

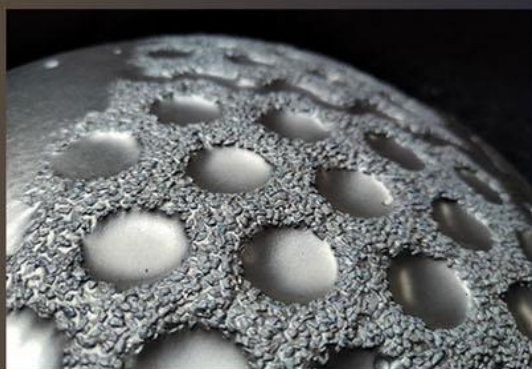
# 材料与装备

2

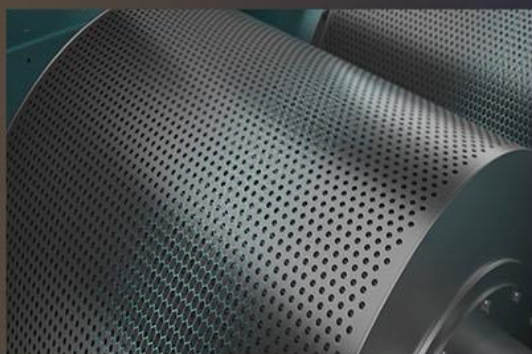
2026

Materials and Equipment

善用资源 服务建设



立磨用陶瓷铁基磨辊



辊压机用铸钉堆焊复合辊套

- 基础研究非做不可、必须做好
- 《循环经济发展“十五五”规划》发改委答记者问
- 白云石煅烧特性及高温下与耐火材料界面黏附行为研究
- 重载板链提升机链板热处理工艺优化研究
- 市政污泥无辅料堆肥系统中溶解性有机质的分子转化规律

主办单位：

中建材装备集团

Email: [clyzb@hcrdi.com](mailto:clyzb@hcrdi.com)

# 材料与装备

2026年第2期

主办单位:

中建材装备集团

## 编委会

技术顾问: 包 玮、隋明洁、蔡玉良

主 任: 王虔虔

副 主 任: 郑 青、彭学平、褚 彪

主 编: 胡 光

编 辑: 解姗姗

委 员: (按姓氏笔划排序)

水 沛、王国庆、王秀龙、许 涛、  
刘 旭、孙利波、宋 昊、豆海建、  
陈翌庆、李永新、李 宁、李伟明、  
何维帅、杨 勇、芦志强、陈昌华、  
杜 鑫、赵 亮、姚丕强、郭 云、  
胡亚东、聂文海、高 霖、高伟强、  
崔洪坤、穆璐莹

编辑出版:《材料与装备》编辑部

地 址: 合肥市辽宁路88号

邮 编: 230051

编辑部电话: (0551) 63439575

广告部电话: (0551) 63439575

传 真: (0551) 63439575

网 址:

<https://www.hcrdi.com/kjyf/kjqk/index.html>

投稿邮箱: clyzb@hcrdi.com

# 目 次

## 一、政策消息

基础研究非做不可、必须做好

..... /1

《循环经济发展“十五五”规划》发改委答记者问

..... /3

## 二、好文荐读

实验室推荐好文

..... /11

## 三、内部交流

白云石煅烧特性及高温下与耐火材料界面黏附行为研究

.....郝睿, 何维帅, 程运等/17

重载板链提升机链板热处理工艺优化研究

.....朱子昂, 周著杰, 冯士豪等/25

市政污泥无辅料堆肥系统中溶解性有机质的分子转化规律

.....王曙蒙, 陈磊, 李宁等/31

水泥窑协同处置污泥与替代燃料造成SCR催化剂下表面挂灰堵塞

机理与防控对策研究

.....李伟/47

提升机料斗自动生产线开发与应用

.....杨军/54

工业煤粉计量系统工艺装备调研与思考

.....唐维贤, 杨勇, 李圣黄/60

基于第三粉碎理论与易碎性试验的辊压机预测模型

.....张林飞, 张杨睿, 范俊/67

分级燃烧与生物质掺烧对分解炉内NO浓度影响的研究

.....水沛/76

水泥窑窑的分布特征及其对SCR催化剂性能的影响与防控

.....冯蓓蓓/85

精益管理在水泥装备制造中的实践探讨

.....娄少英/91

# 基础研究非做不可、必须做好

(作者郭光灿 中国科学院院士、中国科学技术大学教授，记者徐靖采访整理)

习近平总书记在加强基础研究座谈会上强调：“要以更大力度、更实举措加强基础研究，提升我国原始创新能力，进一步打牢科技强国建设根基。”作为一名在量子领域耕耘 40 余年的科研工作者，我亲历了中国量子科学从“无人问津”到“世界瞩目”的全过程。回望这段历程，我深切体会到：基础研究是一个国家科技实力的根基，是科技强国建设的“必修课”。

## 我国量子科学的突围之路，是基础研究厚积薄发的真实写照

这 40 多年，我做了两件事：把量子光学理论体系引入国内；在国内率先开展量子信息科学研究。支撑我一路走下来的，是一个朴素而坚定的信念：基础研究是大国科技的立身之本，关键核心技术是要不来、买不来、讨不来的，必须依靠自主深耕、久久为功。

量子科学在中国的萌芽，始于改革开放初期的破冰探索。上世纪 80 年代初，量子光学在国际上已发展 20 余年，而在中国却是无人问津的学术“荒原”。1981 年，我作为改革开放后首批公派学者赴加拿大访学，初次接触到量子光学前沿，便被其颠覆传统的理论体系与巨大应用潜力深深震撼。那一刻，我暗下决心：一定要把量子光学研究做起来，不能让中国在这一前沿领域缺席。

1983 年回国后，我开始了量子光学研究。当时国内学界对量子光学普遍存疑，认为它是“冷门无用之学”，经费匮乏、人才稀缺、共识不足，研究举步维艰。为搭建理论基础，我通宵整理国外前沿资料，编撰量子光学专业讲义，填补国内教材空白。为聚合国内科研力量、搭建学术交流平台，1984 年，我牵头在安徽滁州举办全国量子光学研讨会。尽管当时仅有数十人参会，但这场小小的学术会议，播下了中国量子科学研究的种子，为学科发展积蓄了最初的科研力量。

从备受质疑的“冷门学科”到广受瞩目的“前沿热点”，我国量子科学的突围之路，是基础研究厚积薄发的真实写照。上世纪 90 年代初，我意识到量子信息将是未来的重大方向，着手进行量子信息科学研究。但因超出当时学界普遍认知，这一前沿探索一度被误解、被质疑。攻坚阶段，我致信钱学森先生请教方向，得到了先生的明确肯定，为我坚守前沿研究增添了底气与力量。1998 年香山科学会议上，“量子通信与量子计算”被列为主题之一，王大珩院士更是明确表示：“量子科学太重要了，必须要有中国人的声音。”

---

摘自人民日报，2026 年 5 月 25 日，有删减

## **每一次突破和跨越，都是持续积累原始创新的必然结果**

在基础研究领域，一代代科研工作者甘坐“冷板凳”、敢坐“冷板凳”，这份勇气和底气，源于国家战略与时代机遇的稳稳守护。伴随着学界共识逐步加深，国家对量子前沿基础研究的支持不断提升，量子科学迎来发展的春天。2001 年，我国首个量子信息领域国家级重点基础研究项目落地，量子信息研究被纳入国家战略布局。

四十余载，我国量子科学实现了从“一无所有”到“世界前列”的历史性跨越。如今，我国量子科技发展水平已稳居世界第一梯队，形成“局部领跑、整体并跑”的战略格局。量子通信领域，我们团队在合肥成功建成“星汉二号”多模式量子中继网络，实现了 14.5 公里的物质纠缠。量子计算领域，第四代自主超导量子计算机“本源悟空—180”上线运行，标志着我国超导量子计算机制造链具备持续迭代的工程化能力。

从理论空白到体系完备，从孤军奋战到人才辈出，从跟跑模仿到原创引领，中国量子科技的每一次突破和跨越，都是持续积累原始创新的必然结果。

## **从点的突破到系统能力提升，基础研究迎来前所未有的发展机遇**

量子科学 40 余年的探索实践，深刻揭示了基础研究对一个国家的重要意义——基础研究非做不可、必须做好，这是关乎国家前途命运的战略抉择。基础研究的根扎得越深，科技创新的树干才能长得越高、枝叶才能伸展越广。

基础研究是破解“卡脖子”难题的前提，不做就会受制于人。关键核心技术的根源在于基础研究，没有基础理论的突破，应用技术就是无源之水、无本之木。量子科学的发展历程充分证明，前沿领域的竞争，本质上是基础研究能力的竞争。倘若当年我们因质疑与困境放弃量子领域基础研究，今日我国就不可能在量子通信、量子计算等领域占据国际话语权，更难以在信息安全、算力竞争等关键领域摆脱对外依赖。当前，全球科技竞争日趋激烈，唯有持续加强基础研究，攻克前沿基础理论，才能从根本上破解“卡脖子”困局，掌握发展主动权。

基础研究是原始创新的“源头活水”。量子力学作为现代物理学的基础，其百年发展催生了半导体、激光、核能等颠覆性技术，深刻改变了世界发展格局。我国量子科学的突破，正是源于对量子力学基础理论的持续深耕，从量子光学理论引入，到量子信息原理创新，再到量子器件技术突破，每一步原始创新都扎根于基础研究的深厚土壤。我国基础研究正处于从量的积累向质的飞跃、从点的突破向系统能力提升的关键阶段，唯有持之以恒加强基础研究，鼓励“坐冷板凳、甘做潜功”，才能源源不断催生原创性、颠覆性成果，提升国家原始创新能力。

加强基础研究，是实现高水平科技自立自强的迫切要求，是建设世界科技强国的必由之路。我们要以量子科学发展为借鉴，坚定“非做不可”的战略定力，涵养“十年磨一剑”的科研品格，以更大力度完善基础研究体制机制，以更实举措培育基础研究人才队伍，鼓励科学家勇闯“无人区”，持续加强基础研究，提升原始创新能力，为加快建设科技强国筑牢坚实根基。

# 《循环经济发展“十五五”规划》 发改委答记者问

2026年6月30日，经国务院同意，国家发展改革委印发了《循环经济发展“十五五”规划》（以下简称《规划》）。日前，国家发展改革委有关负责同志就《规划》有关情况回答了记者提问。

## 问：《规划》出台的背景是什么？

答：发展循环经济是我国经济社会发展的重大战略。习近平总书记高度重视循环经济发展工作，多次作出重要指示批示，强调发展循环经济是提高资源利用效率的必由之路，为我们做好循环经济工作提供了思想指引和根本遵循。2025年，我国主要资源产出率比2012年提高约77%，单位国内生产总值能耗、水耗大幅下降；大宗固体废弃物综合利用率超过60%，主要再生资源回收利用量超过4.1亿吨，废钢铁、废有色金属为生产环节提供原料占比分别达到27%和30%；资源循环利用产业产值达到5万亿元，年均增速保持在10%左右。

当前全球治理体系深刻变化，资源保障重要性日益突显，绿色低碳发展博弈复杂严峻，通过循环利用强化资源安全保障、加快绿色低碳转型已经成为全球共识。“十五五”时期是我国高质量发展的关键期，也是实现碳达峰目标的决胜期，资源安全保障和全面绿色转型任务艰巨，资源循环利用的重要性和紧迫性更加突显，需要进一步加大循环经济工作力度，加强资源安全保障，强化产业链供应链韧性，支撑如期实现碳达峰目标。同时，也要看到，我国循环经济与高质量发展要求相比，仍然存在重点行业资源产出率不高、重点品种废弃物回收渠道不畅、关键技术工艺瓶颈有待突破、产业布局不够优化等问题，迫切需要加强制度设计、优化行业管理、推动技术创新和产业升级，加快提升循环经济高质量发展水平。

按照党中央和国务院决策部署，落实生态环境法典和循环经济促进法要求，国家发展改革委会同有关部门，组织编制了《规划》，报国务院同意后印发实施。

## 问：《规划》的主要内容是什么？

答：《规划》主要包括3方面内容：

第一部分是总体要求和主要目标，明确了“十五五”时期循环经济发展的指导思想、工作原则，提出了未来一段时期发展循环经济的工作目标。到2030年，主要资源产出率比2025年

提高 16%左右，大宗固体废弃物年综合利用率达到 45 亿吨左右，主要再生资源年循环利用率达到 5.1 亿吨，资源循环利用产业产值达到 8 万亿元。到 2035 年，循环经济高质量发展体系基本建立，主要资源利用效率达到国际先进水平。

第二部分是重点任务。一方面，按照循环经济“减量化、资源化、再利用”的理念，全面加强各领域各环节资源循环利用，提出了全面筑牢减量化基础、加快提升资源化水平、持续扩大再利用规模等 3 项重点任务。另一方面，突出问题导向，聚焦当前回收环节不畅、产业发展水平不高等难点堵点问题，提出了有效畅通废弃物回收网络、大力推进循环经济产业升级等 2 项重点任务。

第三部分是保障措施，提出了完善法律法规体系、优化标准标识和认证制度、完善统计和评价制度、加强综合性政策支持等举措，明确了组织实施要求。

同时，《规划》聚焦循环经济发展重点领域和品类，设置了增强大宗固废综合利用能力、加快传统“城市矿产”高值化开发利用、完善“新三样”等固体废弃物回收利用体系等 3 个专栏，进一步细化实化重点领域资源循环利用的政策要求、产业导向、技术路线和具体目标。

### **问：《规划》有哪些亮点和创新点？**

答：《规划》在整合各领域循环经济既有管理政策的基础上，坚持问题导向，完善全链条资源循环利用政策措施，更好发挥循环经济对资源保障和绿色低碳转型的支撑作用，主要的亮点和创新点可以概括为“三个进一步”。

一是进一步强化循环经济对资源安全的支撑保障。适应“十五五”时期资源保障形势和工作需要，《规划》从生产、消费、回收、利用全链条部署资源循环重点任务。在推动资源消耗源头减量方面，通过推行绿色设计、清洁生产和绿色消费，提升资源利用效率，2030 年主要资源产出率比 2025 年提高 16%左右。在增加国内再生资源供给方面，通过抓好工业、农林业、建筑等重点领域资源循环利用，2030 年大宗固体废弃物综合利用率达到 45 亿吨左右，主要再生资源循环利用率达到 5.1 亿吨。在拓宽海外再生资源利用渠道方面，通过完善进口利用工作机制，优化管理流程，拓展进口品类，加强海外再生资源进口和规范化利用，提升资源循环水平。

二是进一步补齐重要品种再生资源循环利用短板。《规划》有针对性地设置了“增强大宗固废综合利用能力”、“加快传统‘城市矿产’高值化开发利用”、“完善‘新三样’固体废弃物回收利用体系”3 个专栏，聚焦循环利用规范化不足、环境风险隐患突出、资源利用水平不高等问题，分品类细化循环利用路径。在大宗固废领域，通过拓宽煤矸石、粉煤灰、尾矿、建筑垃圾等大宗固废的消纳渠道，扩大资源化利用规模，进一步发挥固体废物的资源属性。在传统“城市矿产”领域，通过加快规范化回收和精细化拆解，提高报废机动车、废弃电器电子

产品、废钢铁、废有色金属、废塑料、废旧纺织品等传统“城市矿产”的高值化利用水平。在“新三样”固废领域，针对当前问题较为突出的废旧动力电池、废旧风电设备、废旧光伏设备等“新三样”固废，通过完善报废管理、明确处置责任、健全回收网络，提高规范化回收利用水平。

三是进一步加快资源循环利用产业升级。《规划》在总结循环经济 20 余年发展经验基础上，围绕再生材料使用激励不够、市场化机制不健全、行业低水平竞争、信息化监管能力不足等新情况新问题，有针对性地提出了完善法规标准、健全统计评价、加强综合性政策支持、强化行业监管等具体政策措施，进一步优化产业布局，加快技术工艺提升，培养骨干企业，改善资源循环利用产业“小、散、弱”面貌，推动循环经济实现高质量发展。

### **问：下一步如何推动《规划》实施？**

答：下一步，国家发展改革委将认真履行全国循环经济发展主管部门职责，加强统筹协调，细化任务清单，压实各方责任，强化对规划实施情况的动态监测和评估，加快规划各项任务落实落地，推动“十五五”循环经济发展取得新的更大成效。

# 《美丽中国建设“十五五”规划》（摘选）

（国发〔2026〕20号）

## 二、深入打好蓝天碧水净土保卫战

### （一）推动空气质量持续改善

优化国家大气污染防治分区。加强城市空气质量达标管理。深入推进水泥、焦化等重点行业超低排放改造，鼓励垃圾焚烧企业超低排放改造。研究制修订重点产品 VOCs 含量限值强制性国家标准，推动 VOCs 源头替代和全流程治理。开展传统涉气产业集群整治提升。

#### 专栏6 蓝天碧水净土保卫战

##### 01 大气污染防治提升

完成5亿吨水泥熟料产能、1亿吨焦化产能超低排放改造，建设秸秆等生物质供热超低排放项目30个。推动汽车、工程机械、家具、零部件制造、印刷、汽修等行业具备技术条件的企业完成低（无）VOCs含量原辅材料替代。完成约100个传统产业集群的大气污染综合治理。以京津冀及周边地区为重点，推动产能在6000万标砖/年以下的烧结砖生产线整合退出、燃煤电厂完成并网期间全负荷脱硝改造。加快淘汰国四及以下排放标准货车和国二及以下排放标准工程机械，推动将柴油货车更新为电动货车，推进老旧营运船舶报废更新。建设国家陆域移动源智慧化监管平台和国家大气移动源实验室。

## 三、全面实施固体废物和新污染物治理行动

### （五）实施固体废物综合治理

强化工业固体废物全链条管控和规模化消纳利用，推动重点行业固体废物产生量与综合消纳量逐步实现动态平衡。扎实推进非法倾倒处置固体废物、溶洞垃圾污染等专项整治。实施堆（渣）场、危险废物填埋场、磷石膏库等环境风险隐患排查整治，完成60%以上的历史遗留固体废物堆存场所治理，危险废物填埋处置量占比控制在10%以内。优化尾矿库分类分级环境监管制度，开展污染动态评估和监控预警。优化危险废物利用处置结构，推进设施提标改造。健全小微企业危险废物收集体系。推进全国危险废物产生单位“五即”（即产生、即包装、即称重、即打码、即入库）规范化建设，强化危险废物“一码贯通”全过程监管。

| 专栏7 固体废物和新污染物治理                                                                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>01 工业固体废物环境风险隐患排查整治和综合利用</p> <p>以长江流域为重点，对磷石膏库开展污染整治，严格工程验收。做好新增磷石膏综合利用和无害化处理。推广磷石膏制建材、制硫酸联产水泥等工艺。开展黄河流域煤矸石、粉煤灰、赤泥等大宗工业固体废物环境风险隐患排查整治。以赤泥主要产生地区为重点推广赤泥选铁、制建材等技术。</p> |
| <p>02 危险废物利用处置设施提质增效</p> <p>推动未达标危险废物填埋场预处理、防渗等设施改造提升。在京津冀、长三角、粤港澳大湾区等重点区域实施退役危险废物填埋场封场综合治理。</p>                                                                        |
| <p>03 重金属环境安全隐患整治</p> <p>采取尾矿库及堆（渣）场清空或封控、渗滤液和尾矿水收集及处理、矿洞涌水监测监控等措施，在重点地区开展涉重金属历史遗留矿山、尾矿库等高风险污染源综合整治。</p>                                                                |
| <p>04 新污染物协同治理</p> <p>开展重点管控新污染物环境现状调查评估。在工业废水、城镇污水、畜禽养殖等领域和重点管控新污染物历史遗留污染区域，实施一批新污染物协同治理示范项目。实施新污染物危害评估，建设全国统一的新污染物治理信息平台，提升新污染物发现、跟踪和应对水平。布局建设国家和流域性新污染物治理技术中心。</p>   |
| <p>05 “无废城市”建设</p> <p>推动京津冀、长三角、粤港澳大湾区、成渝地区全域共建“无废城市”，支持200个左右城市开展“无废城市”建设。</p>                                                                                         |

## 五、积极应对气候变化

### （十二）积极稳妥推进和实现碳达峰

实施积极应对气候变化国家战略，落实国家自主贡献目标，扎实推进碳达峰行动，全面实施碳排放总量和强度双控制度。坚持风光水核等多能并举，深入开展节能降碳改造和控煤减煤，合理控制煤电装机规模和发电量，全面提升可再生能源电力消费比重，加快推进新增用电量由新增清洁能源电量覆盖。实施应对气候变化一揽子重大工程，推动碳捕集利用与封存技术发展和示范项目建设。

### （十四）加快发展全国碳市场

充分发挥全国碳排放权交易市场对实现碳排放总量和强度双控目标的重要支撑作用。有序

扩大全国碳排放权交易市场覆盖行业范围、扩展参与主体，对碳排放总量相对稳定的行业优先实施配额总量控制，稳妥推行免费和有偿相结合的配额分配方式。完善以全国碳排放权交易市场为主体的碳定价机制。积极发展全国温室气体自愿减排交易市场，持续扩大支持领域，建立科学完备的方法学体系，推动核证自愿减排量应用，规范各类自愿减排交易活动，提升碳市场国际影响力。

| 专栏9 应对气候变化                                                                                                                                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>01 重点行业领域节能降碳</p> <p>加大火电、钢铁、有色、石化、化工、建材等重点行业领域节能降碳改造力度，推广普及节能低碳技术，实现节能量1.5亿吨标准煤以上。以京津冀及周边地区为重点，逐步淘汰65蒸吨/小时及以下的工业燃煤锅炉。推进食品、纺织、造纸等行业燃煤锅炉和工业窑炉清洁能源替代。</p>     |
| <p>02 非二氧化碳温室气体减排</p> <p>在煤矿开采、种植养殖、废物处理、化工品生产等领域实施非二氧化碳温室气体治理工程，开展超低浓度瓦斯蓄热氧化与低浓度甲烷富集提纯等甲烷减排、工业氧化亚氮末端治理与回收利用、氢氟碳化物回收利用、电力设备六氟化硫回收替代等，推动形成3000万吨二氧化碳当量减排能力。</p> |
| <p>03 温室气体排放管理数智化</p> <p>丰富国家温室气体排放因子数据库因子种类和数量，提高排放因子本土化程度，提升排放因子检测能力水平。实施全国碳市场全链条数智化管理。</p>                                                                  |

# 《城市更新“十五五”规划》（摘选）

（国发〔2026〕12号）

## 一、总体要求

| 专栏 1 “十五五”时期城市更新主要指标 |                   |        |        |
|----------------------|-------------------|--------|--------|
| 序 号                  | 指 标               | 2025 年 | 2030 年 |
| 1                    | 城镇危旧房改造数量（万套/间）   | 〔25〕   | 〔50〕   |
| 2                    | 新开工改造城镇老旧小区数量（万个） | 〔24〕   | 〔11.5〕 |
| 3                    | 老旧街区厂区改造提升数量（个）   | 〔900〕  | 〔1500〕 |
| 4                    | 城中村改造数量（个）        | 〔4100〕 | 〔4000〕 |
| 5                    | 历史建筑修缮数量（万处）      | 〔1〕    | 〔1.5〕  |
| 6                    | 新建及改扩建体育场地面积（万公顷） | 〔12.7〕 | 〔12.8〕 |
| 7                    | 城市公园绿地改造提升面积（万公顷） | —      | 〔2〕    |
| 8                    | 城市地下管网改造长度（万公里）   | 〔25〕   | 〔36.5〕 |
| 9                    | 存量应急避难场所改造数量（万个）  | —      | 〔5〕    |
| 10                   | 城镇房屋基础信息数字化率（%）   | —      | >95    |

注：〔〕 内为 5 年累计数。

## 三、营造高品质城市生活空间

### （一）推进“好房子”建设

实施房屋品质提升工程，兼顾增量建设与存量更新，全链条提升住房标准、设计、材料、建造、运维水平，建设改造安全舒适绿色智慧的“好房子”。鼓励居民开展既有住房装修和局部升级改造，推广装配式装修和适老化、无障碍改造，应用性能优异的新型建材。在新建、改造住宅项目中开展数字家庭建设，丰富数字家庭应用场景。

### 专栏 3 “好房子”建设改造工程

1. 建设改造“好房子”。优化住房产品设计，完善户型功能，调高层高，提高隔声性能，提升装配式装修应用比例。
2. 开展住房品质提升关键技术攻关。突破 200 项以上提升住房品质的成套技术和产品设备，系统解决住房质量常见问题。
3. 建设基础型数字家庭。鼓励配置智能家居产品，对传统家居产品进行数字化改造，推动互联网协议第六版（IPv6）与智能家居协同应用。

## 四、推动城市发展绿色低碳转型

### （三）践行绿色低碳生活方式

推进城市节水，建设海绵城市。深化气候适应型城市建设。加快城市污水收集处理设施补短板，推动建立厂网统筹的建设运维长效机制。持续完善垃圾分类收集和处理设施体系，健全城市生活垃圾资源回收利用体系。推进城市生活垃圾收运网络与再生资源回收网络融合。推动建筑垃圾利用处置设施建设，开展存量建筑垃圾专项整治。倡导绿色低碳出行，优化公交线网和站点布局，建设公交停车场等设施，建设改造人行道、非机动车道，构建城市绿色慢行交通系统。

### 专栏 8 污水垃圾收集处理设施建设工程

1. 城市污水处理能力提升。新建改造总能力达 2500 万立方米/日的污水处理设施。探索城市排水系统雨季溢流污染控制技术路线，完善有关政策和标准。
2. 城市生活垃圾分类处理提质增效。升级改造城市生活垃圾分类投放及收集转运设施，垃圾清运能力达到 75 万吨/日，城市生活垃圾分类实现全覆盖。因地制宜推动生活垃圾焚烧厂超低排放改造，提升焚烧处理设施运行效率。
3. 城市建筑垃圾治理及资源化利用。建设改造建筑垃圾收集、临时贮存、资源化利用、处置等设施，规范建筑垃圾运输管理。

## 实验室推荐好文

### Leveraging large language models for smart manufacturing: Reviews, enablers, challenges, and opportunities 大语言模型在智能制造中的应用： 综述、关键支撑、挑战与机遇

hong Chen, Linju Li, Tao Wang, Zhuowei Wang, Jiewu Leng, Haidong Shao, Lianglun Cheng

#### 摘 要：

智能制造正通过整合先进的信息与通信技术深刻改变制造业格局。大语言模型（LLM）的出现为人工智能领域带来了革命性变化，然而 LLM 在智能制造中的应用仍处于探索阶段，尚未充分应对领域特定挑战。本文对 LLM 赋能的智能制造进行了全面综述与分析。首先回顾了 LLM 在智能制造领域的最新进展及其关键技术。随后，探讨了部署 LLM 赋能智能制造的关键使能技术，包括知识图谱（KG）、智能体系统和模型上下文协议（MCP）。在此基础上，系统分析了 LLM 在四大关键制造领域中的能力表现，涵盖产品设计、工艺优化、预测性维护和再制造。最后，讨论了在制造背景下 LLM 的缩放定律、数据隐私与安全、可解释性以及领域知识集成等方面的挑战与机遇。本研究的成果有助于推动 LLM 的负责任、高效采用，为推进智能制造实践奠定基础。

**关键词：**大模型；智能制造；知识图谱；人工智能

**摘 自：**Journal of Manufacturing Systems 85（2026）593–612（原版英文）

**推荐自：**先进控制实验室

# Role of C-S-H as an alternative raw material in clinkerization: Phase evolution, reaction kinetics, and fundamental properties 水化硅酸钙（C-S-H）作为替代原料用于熟料烧成： 物相演变、反应动力学及基础性能研究

Jinnan Wang, Tongsheng Zhang, Wensheng Zhang, Jiangxiong Wei, Qijun Yu

## 摘要：

富含硬化水泥浆体的废弃混凝土再生微粉可在熟料生产中部分替代石灰石和黏土，然而，由于 C-S-H 凝胶（水泥浆体中主要钙硅相）的热转化行为强烈依赖于其 Ca/Si 比，其作用机制尚未明确。本研究采用水热合成的方法制备了具有可控 Ca/Si 比（0.8~1.9）的 C-S-H，并将其用于替代生料中的 SiO<sub>2</sub> 及部分 CaCO<sub>3</sub>。通过 XRD/Rietveld 定量分析和显微表征研究了烧成过程中的物相演变，并利用非等温 DSC 数据结合等转化率方法评价了固相反应动力学。结果表明，掺入 C-S-H 显著促进了早期 C<sub>2</sub>S 的形成，使生料中 C<sub>2</sub>S 含量达到 40% 以上所需温度由 1200°C 降至 800°C；同时，反应速率（ $da/dt$ ）由 0.43 min<sup>-1</sup> 提高至 2.1~9.6 min<sup>-1</sup>。此外，当生料中掺入 27 wt% 的 C-S-H（Ca/Si = 1.0）时，在 1300 °C 烧成得到的熟料，其 28 d 抗压强度与基准生料在 1450°C 烧成得到的熟料相当，证明了低温烧成熟料的可行性。研究还发现，C-S-H 能促进 C<sub>3</sub>S 的形成和晶体发育，而这与熟料水化活性的提高及早期抗压强度的发展密切相关。本研究阐明了不同 Ca/Si 比条件下 C-S-H 的热转化过程如何调控熟料烧成反应路径，为将废弃混凝土细粉作为替代性钙硅原料应用于水泥熟料生产提供了机理依据和理论指导。

**关键词：**C-S-H 凝胶；熟料烧成；钙硅比；非等温动力学；水化活性

**摘 自：**《Cement and Concrete Research》，207（2026） 108291（原版英文）

**推荐自：**无机非材料实验室

## Simulation of direct separation technology for carbon capture and storage in the cement industry 水泥行业碳捕集与封存中直接分离技术的模拟研究

Justin G. Driver, Thomas Hills, Phil Hodgson, Mark Sceats, Paul S. Fennell

### 摘要:

本研究考察了直接分离反应器 (DSR) 在水泥行业中的应用情况, 旨在捕获工艺过程中产生的大量二氧化碳。文中假设所使用的 DSR 燃料为天然气, 下游则配备有带有典型煤和废弃物衍生燃料混合物的旋转窑。通过评估一系列关键性能指标, 并与基于相同假设条件模拟的基准工厂进行对比, 本研究发现 DSR 有潜力捕获高达 58-68% 的二氧化碳, 从而将生产环节的净直接排放量降至约 0.17-0.21 tCO<sub>2</sub>/tcmnt。这可以在对热负荷影响极小 (仅增加 8%) 的同时, 适度提升电力需求 (增加 330%) 的情况下得以实现。总体而言, 此项工作估算出的二氧化碳捕集成本介于每吨二氧化碳 39 至 53 英镑之间。令人振奋的是, 这些成果是在无需进行严格的工艺优化的情况下取得的, 并且还有许多途径可进一步改善 DSR 的性能。

**关键词:** 水泥; 脱碳; 工艺设计; 技术经济评估; 二氧化碳捕集

**摘 自:** Chemical Engineering Journal 449 (2022) 137721 (原版英文)

**推荐自:** 工业烟气污染控制实验室

## 陶瓷颗粒增强钢铁基空间构型耐磨复合材料研究进展

卢超, 隋育栋, 蒋业华, 周谟金

### 摘要:

对高性能、低成本材料的需求, 促使全球研究人员将研究重点从传统钢铁材料转向新型颗粒增强铁基复合材料。近年来, 围绕该方向开展了大量工作, 已成功制备出多种类型的复合材料。尤其是在耐磨领域, 陶瓷增强铁基复合材料因其优异的综合性能而受到广泛关注。然而, 陶瓷增强铁基复合材料的制备工艺及增强颗粒的选择, 会因不同使用工况下的性能要求而存在显著差异。本文旨在综述陶瓷增强铁基复合材料制备技术的最新进展, 详细分析并总结了不同制备工艺下复合材料的优缺点, 并在文末简要探讨了其未来的发展方向。

**关键词:** 陶瓷增强钢铁基复合材料; 微观界面; 构型复合材料; 磨损机理

**摘 自:** J《材料热处理学报》, 2026 年, 47 卷, 4 期

**推荐自:** 复合耐磨材料实验室

# Energy Requirement for Rock Breakage in Laboratory Experiments and Engineering Operations: A Review

## 室内实验与工程作业中岩石破碎能量消耗研究综述

Zong-Xian Zhang & Finn Ouchterlony

### 摘要:

本文在查阅大量文献的基础上发现: (1) 各种单晶的平均比表面能仅为  $0.8\text{J/m}^2$ 。(2) 静态劈裂试验中预裂岩石的平均比断裂能为  $4.6\text{J/m}^2$ 。(3) 有预切缺口但无预裂的岩石静态拉伸断裂(I型)试验的平均比断裂能为  $4.6\text{J/m}^2$ 。(4) 无预裂和预切缺口的常规岩石试件单轴压缩、拉伸和剪切试验的平均断裂能分别为  $26.6$ 、 $13.9$  和  $25.7\text{J/m}^2$ 。(5) 不规则单个石英颗粒在单轴压缩下的平均比断裂能为  $13.8\text{J/m}^2$ 。(6) 落锤试验颗粒床平均比断裂能为  $74.0\text{J/m}^2$ 。(7) 球磨试验中多颗粒的平均断裂能为  $72.5\text{J/m}^2$ 。(8) 岩石冲击钻进平均比能为  $399\text{J/m}^3$ , 全尺寸切削平均比能为  $131\text{J/m}^3$ , 旋转钻进平均比能为  $157\text{J/m}^3$ 。(9) 粉磨的平均能效仅为  $1.10\%$ 。(10) 爆破比断裂能的准确测量太少, 无法得出可靠的结论。文章最后讨论了粒间位移、加载速率、围压、表面积测量、预制裂纹、磨损和热能对岩石比断裂能的影响。

**关键词:** 岩石; 断裂能; 破碎; 爆破; 钻孔; 切割; 能效

**摘自:** 《Rock Mechanics and Rock Engineering》(2022) 55:629–667 (原版英文)

**推荐自:** 粉磨技术实验室

## 三元乙丙橡胶耐热氧化性能研究进展

张露露, 刘小红, 石红义, 虞锦洪, 李紫媛, 王小飞, 张凡

### 摘要:

三元乙丙橡胶 (EPDM) 热氧化后的耐热性能会大幅下降, 导致以其为原料的制品性能变差, 使用寿命变短。本文综述了国内外有关改善 EPDM 耐热氧化性能的研究进展, 分别从选择高耐热性 EPDM 基体、与耐热橡胶复配和添加防老剂 3 种主要途径来介绍提高 EPDM 耐热氧化性能的方法, 并对未来改善 EPDM 耐热氧化性能的研究方向作出了简要展望。

**关键词:** 三元乙丙橡胶; 热氧化; 耐热橡胶; 防老剂; 复配

**摘自:** 绝缘材料 . 2025 , 58 ( 05 ) : 1-8

**推荐自:** 输送与计量实验室

# Deep learning-based flocculation sensor for automatic control of flocculant dose in sludge dewatering processes during wastewater treatment

## 基于深度学习的絮凝传感器在污水处理污泥脱水絮凝剂自动投加控制中的应用

SHiroshi Yokoyama, Takahiro Yamashita, Yoichiro Kojima, Kazuyuku Nakamura

### 摘 要:

在大多数污水处理厂 (WWTPs) 的污泥脱水过程中, 絮凝剂的投加量通常是通过直接目视检查絮体来手动调整的, 无需借助任何仪器。尽管存在着絮凝剂投加自动控制的需求, 但由于缺乏可靠的絮凝传感器, 这一直是一项挑战。为解决这一问题, 本研究开发了一种基于深度学习的新型图像传感器, 用于测量絮凝程度 (DF)。在实验室规模的絮凝试验中, 使用了两种类型的污泥样品: 剩余污泥以及剩余污泥与原污水的混合物。为寻找适合 DF 推断的深度学习回归模型, 对包括卷积神经网络、视觉变换器和多层感知机 MLP 混合器在内的十种模型进行了比较分析。其中, ConvNeXt 和 MLP 混合器模型的准确率最高, 决定系数 ( $R^2$ ) 大于 0.9。利用模加权梯度加权回归激活图, 对絮凝图像中贡献于 DF 推断的区域进行了可视化。采用廉价的 EdgeAI 设备构建了絮凝传感器原型, 该设备包含单板计算机和集成图形处理单元 (GPU), 并配备了量化后的 ConvNeXt 模型。传感器的最大推断速度为每秒 12.8 帧 (FPS)。絮凝控制试验表明, 该传感器能够通过调整聚合物絮凝剂投加量, 将 DF 控制在目标值。因此, 该絮凝传感器可为絮凝过程的管理提供一种数据驱动的方法, 从而促进污水处理厂的自动化。

**关键词:** 机器学习; 污水处理; 脱水; 图像拟合传感器

**摘 自:** Water Research 260 (2024) 121890 (原版英文)

**推荐自:** 固废资源化实验室

# FacProcessTwin: An LLM-Based System for Process Twin Development

## FacProcessTwin: 基于大语言模型的流程孪生开发系统研究

Yash Pulse, Yong-Bin Kang, Abhik Banerjee, Prem Prakash Jayaraman

### 摘 要:

论文提出 FacProcessTwin: 用大语言模型读取工厂 SOP、PDF/DOCX 文档和操作员描述, 自动提取工序、设备、参数及流程关系, 生成流程孪生, 并绑定 OPC UA 实时测点。系统采用“LLM 理解、工具执行、人工审核高风险决策”的架构。在澳大利亚食品工厂 16 条流程中, 平均 F1 达 95.2%, 构建时间约为人工的六分之一; 对存在歧义的安全测点, 引入人工确认后错误绑定由 75% 降至 0%。其核心价值是打通工业文档、现场数据与数字孪生。

**关键词:** 大模型; 数字孪生

**摘 自:** arXiv (原版英文)

**推荐自:** 机理仿真实验室

# “面向多工况陶瓷增强铁基复合耐磨材料的研发与应用”

## 通过建材联合会成果评价

7月24日，中国建筑材料联合会在湖北枣阳召开“面向多工况陶瓷增强铁基复合耐磨材料的研发与应用”科技成果鉴定评价会，鉴定委员会专家一致认定，该成果达到国际先进水平。“面向多工况陶瓷增强铁基复合耐磨材料的研发与应用”成果由合肥水泥研究设计院有限公司、中建材秦鸿（湖北）新材料有限公司、合肥中亚建材装备有限责任公司、湖南大学共同完成。

该项目针对立式辊磨机、锤式破碎机和辊压机等不同使用工况，通过陶瓷相增强铁基复合材料的成分设计、结构设计及制备技术的研发，成功研制出系列高性能陶瓷增强铁基复合材料。针对立式辊磨机磨辊，开发 ZTA 陶瓷表面化学镀改性铸渗自生碳化铬界面层技术，研制的复合材料磨辊使用寿命较传统高铬铸铁磨辊提高 2-3 倍；针对锤式破碎机锤头，创新 SiC 陶瓷磁控溅射表面改性工艺，大幅提升 SiC 铸钉锤头界面结合强度，复合材料锤头寿命较高锰钢锤头提高 1.5-2 倍；针对辊压机辊套，完成 TiC 柱钉分布结构设计与堆焊一体化，解决传统镶嵌式 WC 柱钉辊套修复难题，有效降低制造成本。

项目已获授权发明专利 5 件，实用新型专利 6 件，发表论文 5 篇，制定团体标准 1 项，该技术成果已在建材、电力、玻纤、矿山等多个行业实现广泛应用，并出口到俄罗斯、加拿大等欧美国家，经济社会效益显著。



# 白云石煅烧特性及高温下 与耐火材料界面黏附行为研究

郝睿<sup>1</sup>, 何维帅<sup>2</sup>, 程运<sup>2</sup>, 唐亮<sup>3</sup>, 洪旗<sup>3</sup>

(1. 陕西榆林镁业(集团)有限公司, 陕西 榆林 719000;

2. 合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230000;

3. 江苏凯希盟科技有限公司, 江苏 南京 211100)

## 摘要:

针对不同粒径白云石煅烧特性差异及高温下物料与耐火材料黏结的工程问题, 以陕西榆林白云石为原料, 研究了 2~15mm 粒级白云石在 850~1200℃下的煅烧特性, 与微米级样品进行对比, 并考察了其六种典型耐火材料的高温界面黏附行为。结果表明: 白云石烧失量随温度升高逐渐增加, 1000℃时各粒级烧失量均超过 40%, 其中 5~10mm 粒级因受热均匀、碳酸盐分解充分, 最高达 46.65%; 水化活性随温度升高呈先升后降趋势, 5~10mm 粒级在 1000℃时活性达峰值约 23%; 灼减率随温度升高总体下降, 10~15mm 粒级因内部传热滞后灼减率明显偏高。与微米级白云石相比, 2~15mm 粒级存在明显传热滞后, 最佳煅烧温度为 1000℃(低于微米级的 1100℃), 需更长保温时间保证内部分解。界面黏附随温度呈三阶段变化, 中性砖黏连较严重, 碱性砖相对较轻。研究结果可为白云石煅烧工艺优化及耐火材料选型提供实验依据。

**关键词:** 白云石; 煅烧特性; 水化活性; 耐火材料; 界面反应; 粒级效应

## 0 引言

白云石是硅热法炼镁的重要原料, 其煅烧质量直接影响后续还原反应速率、镁回收率及产品质量<sup>[1-2]</sup>。工业生产中白云石煅烧原料涵盖从微米级粉矿到2~15mm粒级块矿的宽粒径范围, 不同粒径物料因传热传质条件差异, 煅烧行为存在显著区别<sup>[3]</sup>。传统回转窑煅烧以块矿为主, 存在原料适应性差、粉矿利用率低、能耗高等问题; 而新兴的悬浮煅烧技术以细粉为原料, 具有传热快、效率高的优势, 但对原料粒径有严格要求<sup>[4]</sup>。明确不同粒径尺度下白云石的煅烧特性差异, 对于工艺参数优化和原料高效利用具有重要指导意义。

已有研究多集中于单一粒径白云石的热分解动力学和煅烧性能<sup>[5-7]</sup>, 关于微米级与2~15mm粒级白云石煅烧特性的系统对比研究相对较少。此外, 在高温煅烧实际工况下, 白云石物料与炉内耐火材料之间易发生界面反应, 出现黏连、结圈、侵蚀等现象, 直接影响设备运行安全与使用寿命, 是工程设计中必须考虑的关键问题, 但目前相关研究报道较少。

本文是前序研究<sup>[8]</sup>的补充与完善, 工作主要分为两部分: 一是将研究粒径范围拓展至2~15mm块矿, 系统考察粒径尺度对白云石煅烧行为的影响规律, 弥补前序研究仅针对微米级

细粉的不足；二是补充开展白云石与耐火材料的高温界面黏附行为研究。界面反应实验采用45~80 $\mu\text{m}$ 细粉进行，主要基于两点考虑：一方面细粉与耐火砖表面接触更充分，可在短时间内灵敏反映高温黏附倾向；另一方面工业煅烧炉内的粘壁、结圈等现象，主要由煅烧过程中物料粉化产生的细颗粒导致，细粉实验结果更具工程参考价值。两部分内容共同为白云石煅烧工艺优化及耐火材料选型提供实验依据。

## 1 实验

### 1.1 实验原料及分析

实验所用白云石由陕西榆林镁业（集团）有限公司提供（如图1）。其主要化学成分为：CaO 29.94%、MgO 21.76%、SiO<sub>2</sub> 0.11%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.35%、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.12%、K<sub>2</sub>O 0.06%、Na<sub>2</sub>O 0.09%，烧失量 46.88%，主要矿物相为高结晶度CaMg（CO<sub>3</sub>）<sub>2</sub>。



图1 白云石矿岩心样

将白云石原矿经颚式破碎机破碎后，筛分为2~5mm、5~10mm、10~15mm三个粒级，用于煅烧实验；另取部分粉磨至45~80 $\mu\text{m}$ 用于高温界面反应实验。耐火材料试样选用工业常用的六种耐火砖：镁铁砖、硅莫砖、镁铬砖、镁铝砖、高铝砖、铬刚玉砖。

### 1.2 实验设备与方法

实验主要设备包括：SY-1400TZX型高温管式炉和KSL-1200X型马弗炉。

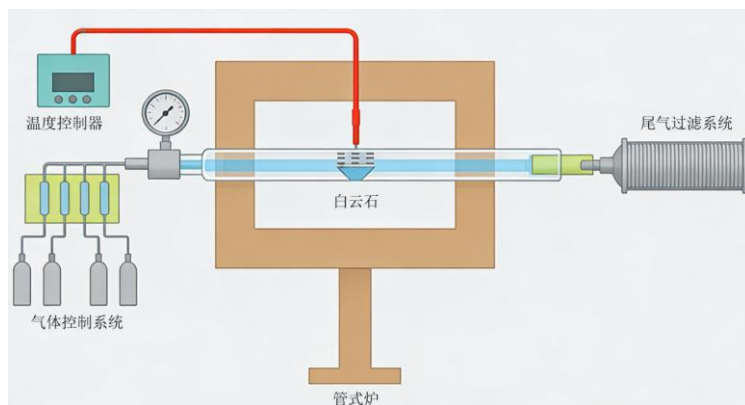


图2 实验装置示意图

### 1.2.1 白云石煅烧实验

采用SY-1400TZX型管式炉进行煅烧实验。称取一定质量不同粒径的白云石置于坩埚中，送入管式炉恒温区，分别在850、900、1000、1100、1200℃下煅烧30min。煅烧结束后将白云石冷却至100℃以下，分样进行性能测试。

### 1.2.2 高温界面反应实验

采用KSL-1200X型马弗炉进行高温界面反应实验，使用粒径45~80μm的白云石粉料，均匀平铺于不同材质耐火砖表面，分别在850、900、1000、1100、1200、1300℃下煅烧10min。冷却后观察白云石与耐火砖的黏附情况，评价不同温度和材质下的界面反应程度。

### 1.2.3 性能表征方法

(1) 烧失量测试：参照GB/T3286.8-2014《石灰石及白云石化学分析方法第8部分：灼烧减量的测定》重量法测定。准确称取约1g干燥白云石（精确至0.0001g），置于已恒重的瓷坩埚中，放入马弗炉，从室温逐渐升温至1050℃±50℃，保温灼烧60min，取出置于干燥器中冷却至室温称重。烧失量为煅烧前后质量差与原白云石质量的比值。

#### (2) 水化活性测试

水化活性表征煅白中游离CaO、MgO与水反应的能力，是评价煅白质量的核心指标。采用水合法测定：

称取 3g 煅烧样品放入烧杯中，质量为  $m_1$ ，加入 5mL 去离子水，等待 5min 后，将烧杯置于 150℃烘箱恒温 1.5h，取出称量质量为  $m_2$ 。

$$\text{活性度} = \frac{m_2 - m_1}{3} \times 100\% \quad (1)$$

#### (3) 灼减率测试

灼减率用于表征白云石煅烧后残余碳酸盐分解程度。取一定量煅烧样品，在规定条件下再次灼烧并测定质量变化，煅烧样品灼减率测试方法如下：

准确称量 1g 煅烧后的样品，放置于坩埚称量质量为  $m_3$ ，将坩埚置于马弗炉中，马弗炉由室温以 10 °C/min 的升温速率加热至 1050℃，保温 1h 后冷却至 300℃下时取出，迅速称取质量  $m_4$ 。

$$\text{灼减率} = \frac{m_3 - m_4}{1} \times 100 \quad (2)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 白云石煅烧特性

#### 2.1.1 烧失量变化规律

图3为不同粒径白云石烧失量随温度的变化曲线。随着煅烧温度升高,各粒径白云石的烧失量均逐渐增加,表明碳酸盐分解程度随温度升高而提高。在1000℃时,各粒径白云石的烧失量均超过40%,其中5~10mm白云石烧失量稳定在45%以上,最高达46.65%,与热重分析结果趋势一致<sup>[8]</sup>。

值得注意的是,10~15mm白云石在1000℃以上烧失量仍持续增加,而2~5mm和5~10mm白云石在1000℃后烧失量趋于稳定。这是由于粒径增大导致颗粒内部传热阻力增加,热量传递至颗粒中心所需时间延长,内部碳酸盐分解滞后,因此需要更高温度或更长时间才能完全分解。

### 2.1.2 水化活性变化规律

图4为不同粒径白云石煅白水化活性随温度的变化曲线。各粒径白云石的水化活性随温度升高均呈先升后降的趋势。低温下碳酸盐未完全分解,活性CaO和MgO生成量少,活性较低;随着温度升高,分解程度提高,活性增加;温度过高时,CaO和MgO晶粒长大、结构致密化,发生过烧现象,导致活性下降。

在三种粒径范围中,5~10mm粒度区间的白云石整体活性最高,2~5mm次之,10~15mm最低。5~10mm白云石在1000℃时活性达到峰值,约为23%;10~15mm白云石因内外分解不均,表层易过烧而内部分解不足,整体活性偏低。

### 2.1.3 灼减率变化规律

图5为不同粒径白云石煅白灼减率随温度的变化曲线。灼减率反映煅烧后残余碳酸盐的含量,灼减率越低表明分解越完全。煅白灼减率随温度升高总体呈下降趋势。在10~15mm粒度条件下,产物的灼减率明显高于其他粒径白云石,尤其在1100℃以上仍保持较高水平。

分析认为,原料粒度越大,热量传递至颗粒内部所需时间越长,碳酸盐完全分解的进程越慢;同时,大颗粒表层在高温下优先分解,过长的高温停留时间易导致表层CaO和MgO结晶长大、结构致密化,形成致密层阻碍内部CO<sub>2</sub>逸出,进一步延缓内部分解,导致灼减率居高不下。

综合来看,本实验条件下的最佳煅烧工艺为:粒度5~10mm、煅烧温度1000℃、保温30min,此时煅白综合性能最优:水化活性度最高(约23%),灼减率较低(约1.01%),烧失量达46.65%。

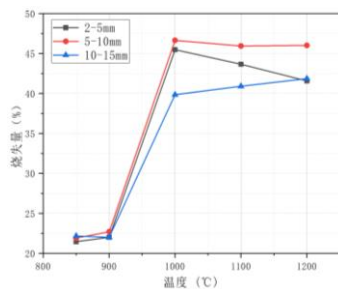


图3 不同粒径的烧失量

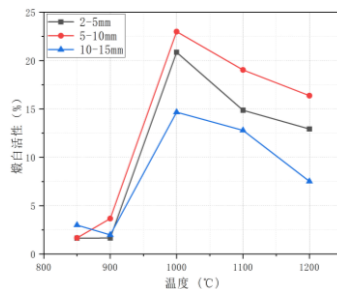


图4 不同粒径的煅白

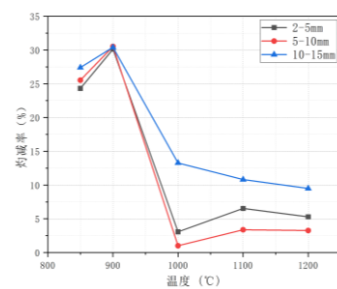


图5 不同粒径的灼减率

表1 1000℃静态堆积条件下煅白产品的基本性能

| 原料粒度/mm | 烧失量 (wt %) | 水化活性度 (wt %) | 灼减量 (wt %) |
|---------|------------|--------------|------------|
| 2-5     | 45.48      | 20.86        | 3.07       |
| 5-10    | 46.65      | 23.00        | 1.01       |
| 10-15   | 39.85      | 14.67        | 13.27      |

## 2.2 微米级与2~15mm粒级白云石煅烧特性对比

将2~15mm白云石实验结果与前文<sup>[8]</sup>微米级（45~315 $\mu\text{m}$ ）白云石煅烧结果进行系统对比，结果如表1所示。

表2 静态堆积条件下微米级与2~15mm 粒级白云石煅烧特性

| 对比项目   | 微米级白云石（45~315 $\mu\text{m}$ ） | 2~15mm 粒级白云石（2~15mm） |
|--------|-------------------------------|----------------------|
| 最佳粒度   | 80~160 $\mu\text{m}$          | 5~10mm               |
| 最佳煅烧温度 | 1100℃                         | 1000℃                |
| 保温时间   | 10min                         | 30min                |
| 最高活性   | 约 23%                         | 约 23%                |
| 最佳灼减率  | 约 2.2%                        | 约 1.01%              |
| 烧失行为   | 传热迅速，低温下即可分解完全                | 内部传热滞后，1000℃以上仍持续分解  |
| 烧结倾向   | 粒径小、受热均匀，高温区灼减率稳定             | 大颗粒表层易过烧，阻碍内部分解      |

由表2可见，粒径尺度对白云石煅烧行为具有显著影响：

烧失行为差异：2~15mm粒级白云石（尤其是10~15mm白云石）因内部传热缓慢，在相同保温时间下烧失量提升滞后，高于1000℃后仍持续上升；而微米级白云石传热迅速，烧失过程在更低的温度区间即可趋于完全。

活性峰值差异：2~15mm粒级白云石在5~10mm、1000℃附近表现出最高活性，活性峰相对集中；微米级白云石的最佳活性出现在80~160 $\mu\text{m}$ 、1100℃条件下，且整体活性随粒径减小普遍高于2~15mm粒级白云石。

烧结倾向差异：2~15mm粒级白云石在高温下更易因表层过度烧结而导致灼减率升高、活性下降，尤其在10~15mm范围内更为明显；微米级白云石因粒径小、受热均匀，灼减率在高温区更容易稳定在较低水平。

最佳工艺区间不同：2~15mm粒级白云石在工程煅烧中宜控制粒度在5~10mm、温度约1000℃，并需适当延长保温时间以保证内部分解充分；微米级白云石的最佳活性对应更细的粒径和略高的温度，且受存放时间影响很小。

上述结果表明，白云石的煅烧特性显著受粒径尺度影响，在实际工业煅烧工艺设计中，需根据原料粒径范围有针对性地优化温度-时间参数，不能简单套用单一工艺制度。

## 2.3 白云石与耐火材料的高温界面反应

### 2.3.1 温度对黏附行为的影响

图6~12为不同温度下白云石与六种耐火砖的黏附情况及原貌。实验结果表明，温度是影响界面黏附的关键因素，其黏附程度随温度升高呈现明显的三阶段变化：

850~900℃：白云石粉料仅物理附着于耐火砖表面，黏附量少且易于清除，无明显化学反应发生；

1000~1100℃：粉料黏附明显增强，难以剥离，界面处开始出现轻微烧结现象；

1200~1300℃：白云石在各类耐火砖表面均发生显著烧结，形成坚硬的黏结层，无法轻易清除。

从工程角度看，1100℃是黏附行为的临界温度：低于此温度时，物料与耐火砖之间以物理附着为主，易于清理；高于此温度时，开始发生明显的烧结黏结，易造成炉内结圈、堵塞，影响正常生产。

### 2.3.2 耐火材质对黏附行为的影响

在相同温度下，不同材质耐火砖与白云石的黏附程度存在明显差异。实验结果表明，中性砖（如硅莫砖）与白云石的黏连现象最为严重，而碱性砖（如镁铬砖、镁铝砖）黏连相对较少。

分析认为，白云石煅烧后生成的CaO和MgO为强碱性氧化物，在高温下与中性、酸性耐火材料中的SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等组分相容性较差，易发生界面反应导致黏结；而碱性耐火材料（镁铬砖、镁铝砖等）的化学组成与煅白相近，化学相容性更好，界面反应较弱，因此黏连程度较轻。

基于上述结果，为减轻物料黏结并延长耐火材料使用寿命，建议在实际煅烧工艺中将热点区温度控制在1100℃以下，并优先选用镁铬砖、镁铝砖等碱性耐火材料。



图6 硅莫砖-镁铁砖-镁铝砖-镁铬砖-高铝砖-铬刚玉砖煅烧前白云石粉料原貌



图7 850℃硅莫砖-镁铁砖-镁铝砖-镁铬砖-高铝砖-铬刚玉砖煅烧10min黏连情况



图8 900℃硅莫砖-镁铁砖-镁铝砖-镁铬砖-高铝砖-铬刚玉砖煅烧10min黏连情况



图9 1000℃硅莫砖-镁铁砖-镁铝砖-镁铬砖-高铝砖-铬刚玉砖煅烧10min黏连情况



图10 1100℃硅莫砖-镁铁砖-镁铝砖-镁铬砖-高铝砖-铬刚玉砖煅烧10min黏连情况



图11 1200℃硅莫砖-镁铁砖-镁铝砖-镁铬砖-高铝砖-铬刚玉砖煅烧10min黏连情况



图12 1300℃硅莫砖-镁铁砖-镁铝砖-镁铬砖-高铝砖-铬刚玉砖煅烧10min黏连情况

### 3 结论

(1) 2~15mm粒级白云石煅烧性能受温度和粒径共同影响：烧失量随温度升高逐渐增加，1000℃时5~10mm白云石烧失量最高达46.65%；水化活性随温度呈先升后降趋势，5~10mm白云

石在1000℃时活性达峰值约23%；灼减率随温度总体下降，10~15mm白云石因传热滞后灼减率明显偏高。2~15mm粒级最佳工艺为5~10mm、1000℃煅烧30min。

（2）粒径尺度对白云石煅烧行为影响显著：与微米级白云石相比，2~15mm粒级白云石存在明显的内部传热阻力，颗粒内外分解不同步，表层易在高温下过烧，因此最佳煅烧温度为1000℃（低于微米级的1100℃），所需保温时间更长，更易发生表层过烧阻碍内部分解。工业生产中需根据原料粒径针对性优化工艺参数。

（3）白云石与耐火材料的黏附随温度呈三阶段变化：850~900℃黏附量少易清除，1000~1100℃黏附增强难剥离，1200~1300℃发生显著烧结。中性砖黏连较严重，碱性砖黏连相对较少。建议煅烧温度控制在1100℃以下，并优先选用镁铬砖、镁铝砖等碱性耐火材料。

#### 参考文献：

- [1] 张超,宋建勋,车玉思,何季麟.工艺参数对硅热法炼镁过程的影响机理[J].中国有色金属学报,2021,31（5）:1347-1357.
- [2] 夏德宏,张刚,郭梁,等.金属镁皮江法还原工艺中的热过程模拟[J].热科学与技术,2005,4（3）:257-261.
- [3] Aliyu W A. Decomposition mechanism of lumpy dolomite particles[J]. Chemical Engineering Science, 2024, 297: 119801.
- [4] 李爱昕.白云石中杂质对硅热法炼镁影响机理及调控方法的研究[D].重庆:重庆大学,2011.
- [5] 刘睿哲.工艺条件对金属镁冶炼还原过程的影响及应用研究[D].西安建筑科技大学,2015.
- [6] Cravero F, et al. Dolomite thermal behaviour: A proposal to establish a definitive decomposition mechanism in a convective air atmosphere[J]. Open Ceramics, 2023, 15: 100412.
- [7] 田驰, 侯欣彤, 等.真空下活性煅白制备的反应动力学研究 [J]. 辽宁化工, 2021,50（7）:929-934.
- [8] 何维帅, 郝睿, 程运, 等.悬浮煅烧条件模拟下白云石热分解与煅白性能调控 [J]. 材料与装备.

# 重载板链提升机链板热处理工艺优化研究

朱子昂<sup>1</sup>, 周著杰<sup>1</sup>, 冯士豪<sup>2</sup>, 杨勇<sup>2</sup>

(1. 合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥, 230051

2. 中建材(合肥)机电工程技术有限公司, 安徽 合肥, 230051)

## 摘要:

针对重载板链提升机链板(抗拉强度 $\geq 1200$  MPa)轻量化设计要求,对40Cr材质链板开展了热处理工艺优化研究。在现有热处理工艺基础之上,分别采用清水、10%PAG淬火液及淬火油三种介质进行淬火,并选取350~450℃范围内的五个温度等级进行回火试验,通过洛氏硬度测试、拉伸试验、夏比冲击试验及扫描电镜显微组织观察,系统探究了淬火介质和回火温度对链板力学性能及显微组织的影响规律。结果表明:采用清水作为淬火介质,回火温度425℃时,淬火后40Cr试样各项性能满足设计要求。

**关键词:** 链板; 热处理; 40Cr; 工艺优化

## 0 引言

板链斗式提升机广泛应用于不同行业粉块状物料的垂直提升,其链条多采用板式套筒滚子链,链板作为链条的关键承载部件,其性能直接决定着整机运行的可靠性与服役寿命。链板工作时受力以循环拉应力载荷为主,并承受一定的冲击和振动,以及一定程度的磨料磨损,其主要失效形式表现为磨损、疲劳断裂及过载断裂等<sup>[1]</sup>。

链板的异常断裂失效往往源于材料选择不当、热处理工艺不合理或组织结构未能达到预期性能要求。热处理是决定链板最终力学性能的核心工艺环节。通过合理设计淬火、回火等工艺参数,可以调控链板的显微组织形态,从而获得强度、韧性、耐磨性与抗疲劳性能的良好匹配。

近年来,随着板链提升机应用场景不断增多,设备大型化、高效化的发展趋势以及节能降耗的“双碳”目标,要求链板具有高强度、高耐磨性的同时有更小的自重,以提高链条的使用寿命和适应节能降耗的需求。针对大型号和特殊工况板链提升机,链板设计抗拉强度需要达到1200MPa,从经济性角度考虑,提升机链板多采用40Cr材质,目前的热处理工艺达不到强度设计要求。本文以该型号提升机链板为研究对象,开展热处理工艺优化研究,通过工艺试验、显微组织分析与力学性能测试等手段,系统探究回火温度和冷却介质对链板组织演变与性能演化的影响规律,旨在提升机链板强度,降低链条整体重量。

## 1 试验对象和方法

### 1.1 试验对象

链板对象为40Cr钢链板,其外形如图1所示,长宽高尺寸:340x165x22mm。试验前采用

全谱直读火花光谱仪对原材料进行化学成分测量，其中 40Cr 钢国标化学成分要求<sup>[2]</sup>及试验用板材化学成分测量结果见表 1。



图 1 链板实物

表 1 试验链板材料的化学成分

| 元素      | C         | Si        | Mn      | Cr      | P      | S      |
|---------|-----------|-----------|---------|---------|--------|--------|
| 40Cr 材料 | 0.4       | 0.27      | 0.63    | 1.03    | 0.023  | 0.004  |
| 40Cr 国标 | 0.37~0.44 | 0.17~0.37 | 0.5~0.8 | 0.8~1.1 | < 0.03 | < 0.03 |

1.2 冷却介质

淬火作为调质工艺的核心环节，直接影响钢的显微组织演变（如马氏体形态、碳化物分布及残留奥氏体含量）和最终力学性能（如强度、韧性、硬度）[3]。40Cr 钢属于中碳低合金结构钢，淬透性中等，淬火冷却过程中对冷却速度的控制要求较高。冷却速度不足时，过冷奥氏体将部分转变为珠光体或贝氏体等非马氏体组织，导致链板心部硬度与强度达不到预期要求；而冷却速度过快时，则因淬火应力过大而增加变形甚至开裂的风险。因此，淬火介质的选择需兼顾淬硬性与淬裂倾向之间的平衡。本文选择了 3 种淬火介质作为研究对象，分别是淬火油、PAG 水基淬火液和水，它们的冷却特性如图 2 所示。淬火油、10%PAG、水三种淬火介质的最大冷却速率分别是 120、162、200℃/s。

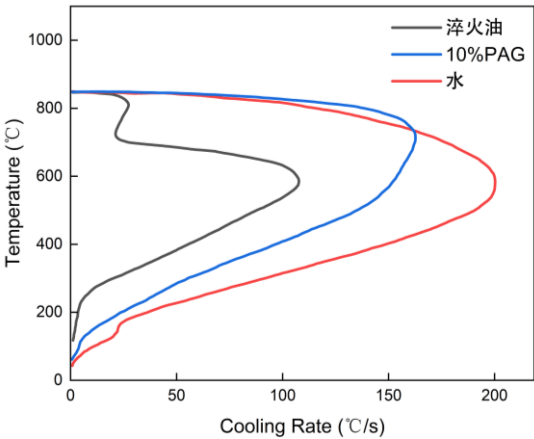


图 2 不同淬火介质的冷却特性曲线对比

### 1.3 试验方法

淬火加热温度设定为 850℃（保温多长时间），采用不同淬火介质对 40Cr 链板进行淬火实验（在淬火介质中浸泡至室温还是过几分钟拿出来空冷）。热处理后链板的硬度作为链板最重要的性能指标，其直接影响到链条的疲劳性能和极限拉伸载荷[4、5]。通过检测淬火后的链板硬度，判断链板是否淬透，选择最优淬火介质。之后进行回火实验，研究不同回火温度对链板材料力学性能的影响，确定最优回火工艺。

试样硬度采用 HRC-150 型洛氏硬度计进行检测。试样微观组织采用德国蔡司 Sigma 360 型场发射扫描电子显微镜观察。试样拉伸强度、屈服强度、伸长率采用 INSTRON 5982 型万能试验机进行测试。试样冲击吸收能量采用夏比冲击试验机（V 型缺口试样）进行检测。为确保数据的可靠性，所有性能测试均采用 3 个平行试样，结果以算术平均值表示。

## 2 试验结果

### 2.1 淬火介质对淬火硬度的影响

淬火后马氏体转变量及硬度水平直接决定了回火后所能达到的综合力学性能。图 3 为 40Cr 钢试样分别在淬火油、10%PAG 水基淬火液、清水介质下淬火后的截面硬度。结果显示，淬火介质类型对 40Cr 钢的淬硬效果具有显著影响。在油淬条件下，40Cr 硬度仅为 HRC 37~41；当采用 10%PAG 淬火时，硬度提升至 HRC 44~47；而当采用水淬时，硬度显著跃升至 HRC 50~56。

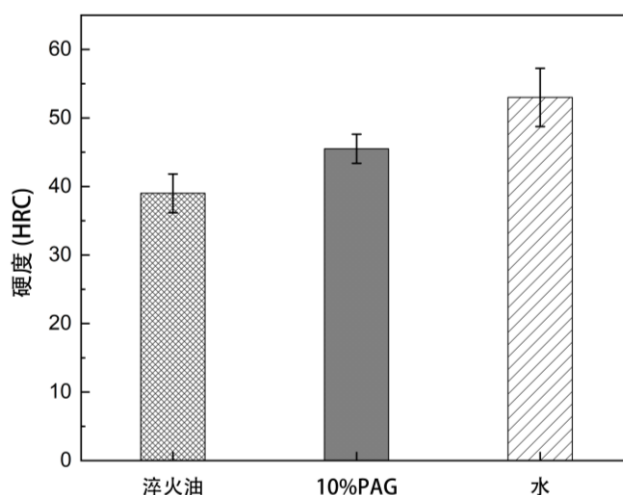


图 3 40Cr 试样在不同淬火介质下淬火后的截面硬度（柱状图）

### 2.2 淬火介质对金相组织的影响

图 4 是 40Cr 试样在不同淬火介质下淬火后的 SEM 显微组织。可以看出油淬后可以观察到较为粗大的、具有明显浮凸感的针状（或片状）马氏体。由于冷却速度相对最慢，图片中可能隐约可见灰色衬度的块状区域，这通常是由于油冷速度未能完全抑制中温转变而形成的少量下贝氏体或屈氏体。10%PAG 和清水淬火后的组织中基本都转变为了马氏体组织，形态上看是由

细小板条马氏体和针状马氏体组成的混合马氏体组织。但水淬后的束状细小板条马氏体占比更多，这种细化了的马氏体群显著提高了材料的强韧性配合。

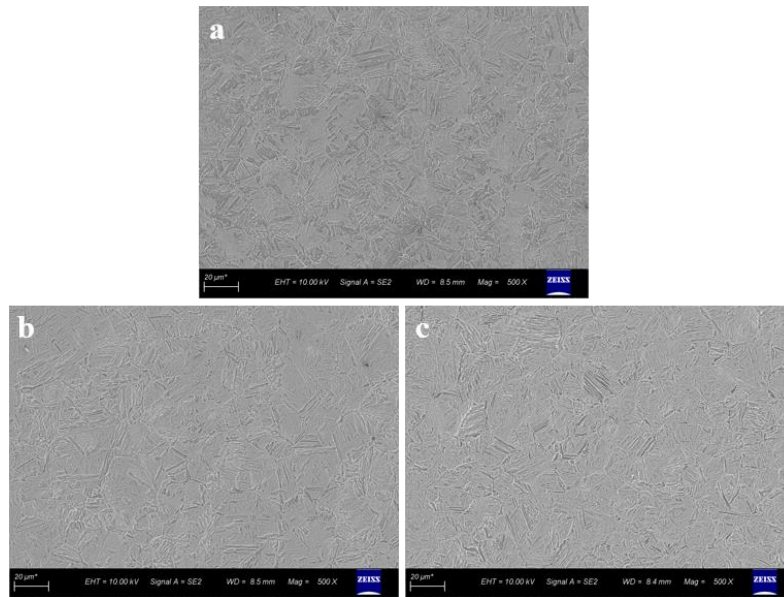


图 4 40Cr 试样在不同淬火介质下淬火后的 SEM 显微组织

(a) 淬火油；(b) 10%PAG；(c) 清水

若要达到 40Cr 链板热处理后拉伸强度达到 1200MPa 的性能需求，必须以充分的淬火马氏体组织为前提。水淬条件下，40Cr 可获得接近完全的马氏体组织和最高硬度，为后续回火调控提供了最宽泛的工艺窗口——从低温回火（保持高硬度高强度）到高温回火（追求强韧性匹配）均可灵活选择。相比之下，油淬后硬度仅 37~41 HRC，部分区域甚至低于 40 HRC 的淬火合格线，马氏体转变量不足，即使降低回火温度也难以弥补淬火阶段的性能损失；10%PAG 淬火虽硬度居中，但其淬硬度仍不及水淬。综上所述，确定水作为 40Cr 钢链板试样的淬火介质。

### 2.3 回火温度对力学性能的影响

回火是决定链板最终使用性能的关键工序。为确定 40Cr 钢链板的最佳回火工艺窗口，本研究对淬火后的试样分别进行了 350℃、375℃、400℃、425℃和 450℃五个温度等级的回火处理，回火保温时间统一为 120 min，随后空冷至室温。回火后试样的硬度、拉伸性能、伸长率及冲击韧性测试结果如表 2 所示，各性能指标随回火温度的变化趋势呈现显著的规律性。

表 2 40Cr 试样经过不同温度回火后的力学性能

| 回火温度/℃ | 平均硬度/HRC | 拉伸强度/MPa | 屈服强度/MPa | 伸长率/% | 冲击吸收能/J |
|--------|----------|----------|----------|-------|---------|
| 450    | 36       | 1140     | 1041     | 10.7  | 44.1    |
| 425    | 36.8     | 1201     | 1095     | 9.3   | 57.9    |
| 400    | 39.8     | 1309     | 1190     | 7.7   | 39.5    |
| 375    | 42.5     | 1389     | 1271     | 6.4   | 29      |
| 350    | 43.3     | 1443     | 1289     | 4.5   | 16      |
| 原有工艺   | 29.6     | 954      | 798      | 12.8  | 40.3    |

随着回火温度的降低，40Cr 钢的硬度和强度呈持续上升的趋势，但在不同温度区间存在差异这与该温度范围内碳化物聚集长大及位错密度降低速率加快有关。

与强度和硬度的变化趋势相反，伸长率和冲击韧性均随回火温度的升高而总体提高。表明随回火温度升高，马氏体分解程度加深，位错密度降低，材料塑性得到有效恢复。冲击韧性的变化尤为值得关注：在 350℃回火时处于较低水平；425℃时达到整个试验范围内的峰值；而 450℃时则回落至 44.1 J，降幅约 24%。这一反常现象可能是 40Cr 钢在 450℃回火时进入了第二类回火脆性敏感区间，由于杂质元素（P、Sn 等）及合金元素在晶界的偏聚导致冲击韧性下降。

## 2.4 回火温度对金相组织的影响

图 5 为 40Cr 试样经不同温度回火后的 SEM 显微组织。由图可见，随回火温度从 400 °C 升高至 450 °C，组织发生显著演变。400 °C 回火时，组织为回火屈氏体，仍清晰保留淬火马氏体的针状/板条状形貌，基体上弥散分布着极其细小的粒状碳化物。425 °C 回火时，组织处于回火屈氏体向回火索氏体的过渡状态，马氏体针叶形态略有模糊但仍可辨认，碳化物开始聚集，位错密度显著降低。450 °C 回火时，组织转变为回火索氏体，马氏体针状形态明显模糊，碳化物颗粒呈粒状均匀分布在基体上。原有工艺组织则呈现典型的回火索氏体特征，碳化物尺寸较 450 °C 回火更为粗大，马氏体形态几近完全消失。

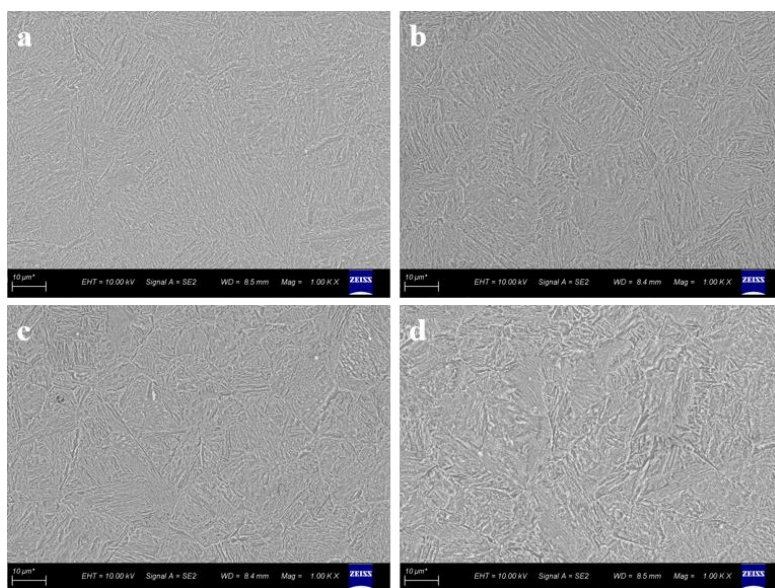


图 5 40Cr 试样经过不同温度回火后的 SEM 显微组织  
(a) 450℃；(b) 425℃；(c) 400℃；(d) 原有

上述强塑性与韧性的倒置关系是回火工艺调控中典型的性能博弈。从工程应用角度出发，提升机链板在服役过程中既需要足够的强度以承受拉伸载荷，又要求具备良好的冲击韧性以抵抗突发性冲击和疲劳裂纹的萌生。过高的硬度（如 350℃回火，HRC>43）虽有利于耐磨性，但冲击韧性仅为 16 J，脆性倾向明显，在承受冲击载荷时存在断裂风险；而过低的硬度（如 450℃

回火, HRC 36) 虽塑韧性改善, 但强度损失显著(抗拉强度下降至 1140 MPa), 不满足链板的高承载要求。综合比较各回火温度下的性能指标, 425℃回火时硬度约 HRC 40, 抗拉强度为 1201 MPa, 冲击韧性为 57.9 J, 强度、硬度与韧性三者匹配较为均衡, 且伸长率 9.3% 相较原有工艺的 12.8% 虽有下降, 但亦处于可接受范围。因此, 确定 425℃为 40Cr 钢链板的优化回火温度。

### 3 结论

本研究针对 40Cr 链板抗拉强度 $\geq 1200$  MPa 的设计要求, 系统探究了淬火介质与回火温度对力学性能及组织的影响。结果表明, 淬火介质冷却能力直接影响马氏体转变量, 水淬效果最佳; 回火温度则主导强韧性博弈, 425℃回火可实现强度、硬度与韧性的良好匹配。基于上述研究, 得出以下主要结论:

(1) 40Cr 钢链板淬火后的截面硬度随淬火介质冷却能力的增强而显著提高。水淬后心部硬度达 HRC 50~56, 明显优于油淬(HRC 37~41) 和 10%PAG 淬火(HRC 44~47)。确定水为 40Cr 钢链板的淬火介质, 可确保链板获得充分的马氏体组织和较高的硬度, 为后续回火提供良好的组织和性能基础。

(2) 回火温度对 40Cr 钢的力学性能具有决定性影响。随着回火温度从 350℃升至 450℃, 硬度与强度持续下降, 伸长率逐步提高; 冲击韧性则先升后降, 在 425℃时达到峰值 57.9 J。

(3) 确定水淬+425℃回火为 40Cr 钢链板的优化工艺方案, 可获得硬度 HRC36.8、抗拉强度 1201 MPa、伸长率 9.3%、冲击韧性 57.9 J 的综合性能匹配, 满足新型轻量化重载提升机链板抗拉强度 $\geq 1200$  MPa 的设计要求, 较原工艺(硬度 HRC 29.6、抗拉强度 954 MPa、冲击吸收能 40.3 J) 分别提升了约 24%、26%和 44%。

#### 参考文献:

- [1] 王学武, 周晋仕. NSBN 系列链斗式提升机链板的选材及热处理[J]. 材料热处理技术, 2009, 38 (8): 124-125.
- [2] GB/T 3077—2015, 合金结构钢[S].
- [3] 王军, 李志勇, 巢昂轩, 等. 淬火介质对 1Cr17Ni2 调质钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2026, 51 (1): 95-102.
- [4] 朱国仁, 徐建民, 周航星. 热处理硬度对链条极限拉伸载荷的影响[J]. 机械设计与制造, 1998 (4): 47-48.
- [5] 朱国仁, 何舒, 吴鹏, 等. 链板热处理硬度对链条疲劳性能的影响[J]. 机械工程师, 1998 (4): 12-13.

# 市政污泥无辅料堆肥系统中溶解性有机质的分子转化规律

王曙蒙<sup>1,2</sup>, 陈磊<sup>1,2</sup>, 李宁<sup>1,2\*</sup>, 黄婷<sup>1,2</sup>

(1. 合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥, 230022;

2. 水泥制造绿色低碳技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥, 230022)

## 摘要:

本研究以深度脱水市政污泥为对象, 在无外源辅料添加的条件下, 采用三维荧光光谱(3D EEM)和傅里叶变换离子回旋共振质谱(FT-ICR MS)等技术, 系统追踪了堆肥过程中 DOM 的光谱特征、分子组成和元素比例的时序演变, 重点阐释了不同阶段 DOM 的转化路径与稳定化机制。结果表明, 堆肥经历升温期、高温期和降温期, 其中 2~4d 为分子转化最活跃的时期。分子组成分析显示, DOM 分子数在 4000~6000 间动态演变, 结构趋向复杂稳定; 易生物利用的 CHO 类化合物占比从 32% 降至 24%, 而含杂原子的 CHONS 类化合物占比从初期的 8% 显著增至 18%。Van Krevelen 图和反应网络分析揭示, 强氧化和脱烷基化等反应主导了 2~4d 的分子重组过程, 并驱动抗性分子数量增至 59%, 从而实现了 DOM 的分子稳定化。本研究阐明了无辅料堆肥过程中 DOM 分子稳定化机制, 为反应的精准调控和无辅料工艺的推广初步提供了分子水平的理论依据。

**关键词:** 固废资源化; 市政污泥; 好氧堆肥; 溶解性有机质; FT-ICR MS

## 0 引言

市政污泥作为污水处理的必然产物, 其产量随着城镇化进程的加快而持续增长。据统计, 我国市政污泥年产量已超过 6000 万 t, 并以每年 10% 的速度递增<sup>[1]</sup>。污泥富含有机质、氮磷等营养元素, 但同时也含有重金属、病原体和持久性有机污染物, 若处置不当将造成严重的环境风险和资源浪费。因此, 实现污泥的减量化、稳定化和资源化处理已成为环境领域的重大挑战<sup>[2]</sup>。

堆肥技术作为一种污泥处理方法, 通过微生物代谢产生的生物热促进水分蒸发, 同时实现有机质的部分稳定化, 具有能耗低、操作简便、产物可资源化利用等优势<sup>[3-4]</sup>。堆肥过程中, 在微生物和胞外酶的共同作用下, 蛋白质、多糖、脂类等大分子有机物首先被水解为可溶性小分子, 这些物质构成了溶解性有机质(DOM)库<sup>[5-6]</sup>。DOM 中的易降解组分被微生物快速利用和矿化, 部分转化为 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O, 而难降解的芳香族化合物则通过氧化、脱烷基化、缩合等反应逐步转化为结构稳定的腐殖质<sup>[7-8]</sup>。因此, DOM 既是有机质降解的核心中间产物, 也是连接易降解组分与稳定腐殖质的关键桥梁, 其分子组成和结构特征的演变直接反映了有机质降解的深度和产物的稳定性<sup>[9-10]</sup>。

然而, 目前关于污泥堆肥的研究, 主要集中在添加秸秆、木屑、锯末等辅料的条件下展开<sup>[11-13]</sup>。这些辅料虽能改善通气性、调节碳氮比并提供孔隙结构, 但通常需要按 30%~50% 的质量比添加, 增加了运输成本和工艺复杂度。因此, 探究无辅料或少量辅料添加的简化工艺具有重要的实际应用价值。

近年来, 三维荧光光谱 (3D EEM) 和傅里叶变换离子回旋共振质谱 (FT-ICR MS) 等先进分析技术的应用, 为深入解析 DOM 的分子组成和转化路径提供了有力工具。其中, FT-ICR MS 凭借其超高分辨率 ( $>400,000$ ) 和卓越的质量精度 ( $<10^{-6}$ ), 能够同时鉴定数千种有机分子, 从而揭示复杂体系中 DOM 的精细结构特征<sup>[14]</sup>。基于此, 本研究针对市政污泥无辅料堆肥过程, 利用多种光谱和质谱技术, 系统追踪并揭示堆肥过程中 DOM 的时序演化特征, 重点解析不同阶段 DOM 的分子组成、元素配比和转化网络, 阐明无辅料条件下 DOM 的稳定化机制。研究成果旨在为精准调控堆肥反应、推动无辅料工艺的应用提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料与实验试剂

本研究选取的市政污泥样品取自于安徽省六安市城南污水处理厂。采用高压薄层压滤技术对污泥进行深度脱水, 脱水后的污泥泥饼含水率为 53.2%, 有机质含量约为 44.3%。

堆肥实验中, 所用发酵菌剂由商业菌剂 EM 和实验室自制菌剂 A 复配得到。EM 菌剂的载体为米糠, A 菌剂的载体为玉米粉和淀粉。EM 菌剂中主要微生物包括 *Chloroplast*、*Pantoea* 和 *Methylobacterium* 等, A 菌剂中主要微生物包括 *Bacillus*、*Lactobacillus* 和 *Pantoea* 等。

DOM 的固相萃取实验中, 所用 PPL 固相萃取柱购于上海靳澜仪器制造有限公司, HPLC 级甲醇购于 Sigma-Aldrich, 其他试剂购于国药集团化学试剂有限公司, 实验用水均为超纯水。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 堆肥实验

在容积为 100L (直径 50cm、高度 70cm) 的反应器 (图 1) 中进行。反应器外壁包裹 6cm 厚保温层, 以减少热量散失; 顶部设有透气盖, 兼具保温与防止热量散失功能。距底部 8cm 处设置多孔板, 用于支撑物料并保障气流分布均匀。反应器配备有曝气泵、流量计和温度计, 其中温度计插入堆体中心位置 (距底部约 35cm), 用于实时监测温度变化。

经高压薄层过滤脱水后, 取 40kg 泥饼用粉碎机进行初步破碎, 得到粒径为 0.5~5cm 的颗粒。随后, 将这些颗粒与 0.4kg 复配发酵菌剂均匀混合, 并转移至反应器中。设定曝气率为  $10\text{L}/(\text{h} \cdot \text{kg})$ , 采用间歇通气模式, 运行周期为通气 10min、停气 20min。堆体每天人工翻堆一次, 实验共持续 10d, 并在第 0, 2, 4, 6, 8, 10d 进行取样。每次取样时, 在堆体的上、中、

下三个位置分别采集样品，混合均匀后作为该时间点代表性样品。所取样品置于 4℃ 条件下保存，其中部分样品进行冷冻干燥、研磨、过筛用于后续分析。

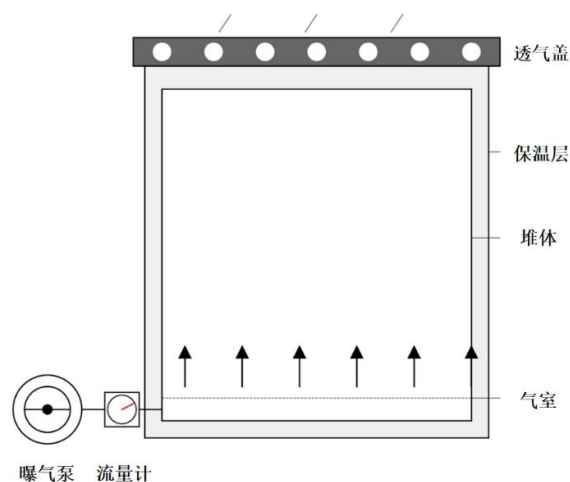


图 1 实验室自制的市政污泥堆肥反应器

## 1.2.2 基础理化参数分析

分别使用水分测定仪（Mettler Toledo HC103）、pH 计（Mettler FE28Standard）和电导率仪（Aarhus ST 3100C）测定污泥的含水率（MC）、pH 值、电导率（EC）。

污泥中有机物含量（OM）通过将样品置于马弗炉中，于 550℃ 下灼烧 300min 后依据失重比例测定。从堆中采集新鲜样品，经冷冻干燥至恒重后，精确称取（40±0.1mg）干燥样品，用锡纸包裹，放入元素分析仪（Vario MACROcube）中燃烧，以测定总碳（TC）、总氮（TN）含量，并计算 C/N 比。

## 1.2.3 溶解性有机质提取、纯化及初步分析

污泥样品中 DOM 的提取参照文献<sup>[15]</sup>所述方法并略作调整。具体步骤如下：将冻干研磨后的污泥样品按 1:10（w/v）与超纯水混合，经超声分散后，于 25℃、300r/min 条件下振荡 24h。随后在 10,000r/min 转速下离心 10min，取上清液过 0.45 μm 滤膜，所得滤液即为污泥 DOM 提取液。提取后的 DOM 分为两部分保存：一部分标记为 DOM-A，于 4℃ 冷藏，用于溶解性有机碳、种子发芽指数测定及光谱分析；另一部分标记为 DOM-B，于 -80℃ 冷冻保存，供后续傅里叶变换离子回旋共振质谱（FT-ICR MS）分析使用。溶解性有机碳（DOC）的含量采用总有机碳分析仪（HYY-CT1000M，泰林，中国）进行测定。具体操作是将 DOM-A 原液稀释十倍，通过高温催化燃烧-非分散红外检测法测定溶液的总有机碳含量，在经计算得出原液的 DOC 含量。

种子发芽实验按照文献报道的方法进行<sup>[16]</sup>。将 5mL DOM-A 置于衬有滤纸的培养皿中，以去离子水作为对照组。将十颗萝卜籽均匀地分布在滤纸上，然后将种子在 25℃ 避光培养 48 小时。种子发芽指数（GI）按照中国国家标准方法 NY/T 525-2021 计算。

使用紫外-可见分光光度计（HORIBA Duetta）测定 DOM-A 的紫外-可见吸收光谱，设置吸收

波长范围为 200~800nm。

将所有 DOM-A 稀释至 DOC 为 20mg/L, 使用荧光分光光度计 (HORIBA Duetta) 测定 DOM-A 的三维荧光光谱 (3D EEM), 设定激发波长 Ex 的波长范围为 200~550nm, 间隔 5nm; 发射波长 Em 的波长范围为 250~650nm, 间隔 2nm。记录的数据使用平行因子分析 (PARAFAC) 进行处理, 在校正水背景并消除瑞利散射和拉曼散射后, 使用 MATLAB R2024b 进行数据分析。

在进行傅里叶变换离子回旋共振质谱 (FT-ICR MS) 分析之前, 使用 PPL 柱对 DOM-B 进行固相萃取以实现脱盐纯化和浓缩。具体步骤如下:

(1) 酸化: 用 1mol/L HCl 调节溶液 pH 值至 2.0。

(2) 柱活化: 将 PPL 柱安装在固相萃取装置上, 依次用 12mL HPLC 级甲醇和 12mL 0.01mol/L HCl 清洗并活化柱。

(3) 上样: 将酸化后的样品以 2mL/min 的受控流速加载到柱上。根据过柱过程中 50% DOC 损失计算所需的样品体积, 以实现最终 DOM 含量约 100mg C/L。

(4) 脱盐: 用 18mL 0.01mol/L HCl 冲洗柱。

(5) 洗脱: 在温和的氮气流下干燥柱, 然后用 12mL 甲醇洗脱 DOM。

(6) 储存: 在氮气吹扫下将洗脱液蒸发至干, 将残留物用 1mL 甲醇复溶, 并在分析前储存于 -20℃。

经固相萃取后, 将 DOM-B 用于 FT-ICR MS 质谱分析 (Bruker Solarix)。离子源为电喷雾离子源 (ESI), 负离子模式。主要检测参数为: 进样方式为连续进样, 进样速度为 120  $\mu$ L/h, 毛细管入口电压为 4.0kV, 离子累积时间为 0.2s, 采集质量范围为 100~1600Da, 设置采样点数为 4M 个, 每个点以 32 位整数形式记录。时域信号叠加 300 次以提高信噪比。样品检测前用 10mmol/L 甲酸钠对仪器进行校正, 样品检测完成后用可溶性有机质 (已知分子式) 进行内标校正。经过校正后, 检测的质量误差均小于  $10^{-6}$ 。之后进行分子式匹配, 采用 DOM 中已知的 CHO 类化合物进行内标校准, 校准后按照如下参数进行分子式匹配;  $S/N > 4$ , 元素个数范围如下,  $C_{1\sim\infty}H_{1\sim\infty}O_{1\sim\infty}N_{0\sim3}S_{0\sim1}$ , 得到可能分子式结果。

对上述所得分子式结果进行进一步筛选, 得到最终数据, 筛选步骤如下:

(1) 保留  $0.2 \leq H/C \leq 2.3$  且  $0 \leq O/C \leq 1.2$  的分子式; 保留 DBE-O 值在 10~-10 内的所有分子式。

(2) 如果一个 m/z 值 (观测到的 m/z) 对应多个可能的分子式时, 保留含杂原子个数最少 (NSP 的个数和最小的) 的分子式是正确的, 如果还有非唯一分子式, 保留误差值最小的分子式是正确的。

(3) 分析 m/z 值范围 100~800Da 的质谱峰。

#### 1.2.4 FT-ICR MS 数据分析及可视化

根据筛选出的分子式, 使用 H/C 比率作为纵轴, O/C 比率作为横轴, 进一步构建 Van Krevelen 图. 分子式根据经验分为以下七类化合物[17]: 单宁 (H/C = 0.6~1.5, O/C = 0.67~1.0), 芳香族系列 (H/C = 0.2~0.7, O/C = 0~0.67), 不饱和烃 (0.7~1.5, O/C = 0~0.1), 碳水化合物 (H/C = 1.5~2.4, O/C = 0.67~1.2), 木质素/CRAM (H/C = 0.7~1.5, O/C = 0.1~0.67), 脂肪族/蛋白质 (H/C = 1.5~2.2, O/C = 0.3~0.67) 和脂质 (H/C = 1.5~2.0, O/C = 0~0.3). 随后的分析利用了分子化合物的相对丰度, 通过标准化绝对峰强度来计算. 此外, 化合物的不饱和度通过 DBE-O 来评估, 芳香性通过 AImod 来评估, 反应性通过 NOSC 来评估. 计算公式如下<sup>[17]</sup>:

$$DBE - O = 1 + \frac{2C - 2O - H + N + P - X}{2} \quad (1)$$

$$AImod = \frac{1 + C - 0.5O - 0.5S - 0.5H}{C - 0.5O - S - N - P} \quad (2)$$

$$NOSC = 4 - \frac{4C + H - 3N - 2O - 2S + 5P}{C} \quad (3)$$

式中: DBE 为双键当量, 表示一个分子中双键和环结构的总数; AImod 为修正芳香性指数, 用于判断分子是否具有芳香性结构; NOSC 为碳的名义氧化态, 反映碳原子的平均氧化还原状态.

为了更好地研究 DOM 的分子转化, 将化合物分为三类: 前体、抗性和产物. 分类过程如下. 首先, 根据国际纯粹与应用化学联合会 (IUPAC) 的原子质量重新计算每种元素 (C、H、O、N 和 S) 的精确分子量 (Mw), 精确到小数点后六位. 其次, 从处理前后的两个样本中识别共存配方. 然后, 比较共存分子式的峰强度. 前体 (precursor) 代表基于分子式分配标准的在处理前的样品中存在的分子式和处理后的样品中不存在的分子式, 以及  $fc < 0.5$  的化合物 ( $fc$  = 处理后的峰强度/处理前的峰强度); 抗性物 (resistant) 是指  $0.5 < fc < 2.0$  的化合物, 具有处理前后样品中均存在的抗性; 产物 (product) 代表在处理前的样品中未发现但在处理后的样品中新形成的产物, 以及  $fc > 2.0$  的化合物<sup>[18]</sup>.

最后, 使用精确的质量差计算可能的前体-产物对. 所有计算均通过 Python 使用已建立的代码 (FTMS1MDM) 执行. 使用 Gephi 软件 (0.9.4) 可视化质量差网络<sup>[18]</sup>.

#### 1.2.5 微生物群落分析

对样品微生物群落结构采用 16S rDNA 高通量测序技术进行解析. 按照 E. Z. N. A.® Soil DNA Kit (Omega Bio-tek, Norcross, GA, USA) 的操作流程提取微生物群落总基因组 DNA, 并利用 ThermoScientific NanoDrop2000 对 DNA 的浓度及纯度进行检测. 以合格的 DNA 为模板, 选用携带 Barcode 序列的通用细菌引物 338F (ACTCCTACGGGAGGCAGCGA) 和 806R (GGAC-TACHVGGGTWTCTAAT),

对 16S rDNA 基因的 V3~V4 可变区进行 PCR 扩增. 扩增产物经纯化后, 采用 Illumina MiSeq PE300 平台完成测序, 测序数据通过上海美吉生物医药科技有限公司提供的在线分析平台进行统计处理与生物信息学分析 (<https://cloud.majorbio.com/page/v2/tools/>).

## 2 结果与讨论

### 2.1 堆肥过程中的基本理化性质

堆肥系统的堆体温度变化反映了微生物代谢活性和有机质降解速率, 是划分堆肥阶段的关键指标<sup>[19]</sup>. 堆肥过程中堆体温度呈现典型的“升温-高温-降温”三阶段变化模式 (图 2 (a)). 初始温度为 27℃, 在 2d 时快速升温至 64℃, 随后 2~6 天期间微生物代谢活性持续保持高水平, 易降解有机质持续被消耗并释放代谢热, 温度继续上升, 在 6d 时达到峰值 72℃, 此后温度逐渐下降, 8d 时降至 55℃, 10d 时进一步降至 29℃. 根据温度变化特征, 可将堆肥过程划分为升温期 (0~2d)、高温期 (2~8d) 和降温期 (8~10d). 升温期微生物快速繁殖, 易降解有机质被大量消耗, 代谢热使堆体温度迅速上升; 高温期维持较长时间, 有利于杀灭病原菌和杂草种子, 同时促进有机质的深度转化; 降温期表明易降解有机质已基本耗尽, 微生物活性下降.

电导率反映了有机质矿化过程中可溶性离子的释放与积累, 是评价有机质降解程度的间接指标<sup>[20]</sup>. 如图 2 (b) 所示, EC 在整个堆肥过程中呈现上升趋势, 从初始的 0.7mS/cm 增加到 4d 的 2.8mS/cm, 此后保持稳定水平. 其增加主要归因于有机质矿化过程中释放的可溶性盐类, 包括铵盐、硫酸盐等离子化合物的积累. pH 值反映了含氮有机物降解、有机酸生成与消耗等多种生化反应的平衡状态<sup>[19]</sup>. 该体系的 pH 值在 0~6d 期间从 6.5 上升至 8.6, 随后保持在 8.6 左右的碱性范围 (图 2 (c)). 初期 pH 值上升与蛋白质分解产生的氨挥发有关, 后期 pH 值稳定则表明缓冲体系的建立. 从弱酸性向碱性的转变指示了蛋白质降解产氨和有机酸消耗的动态平衡.

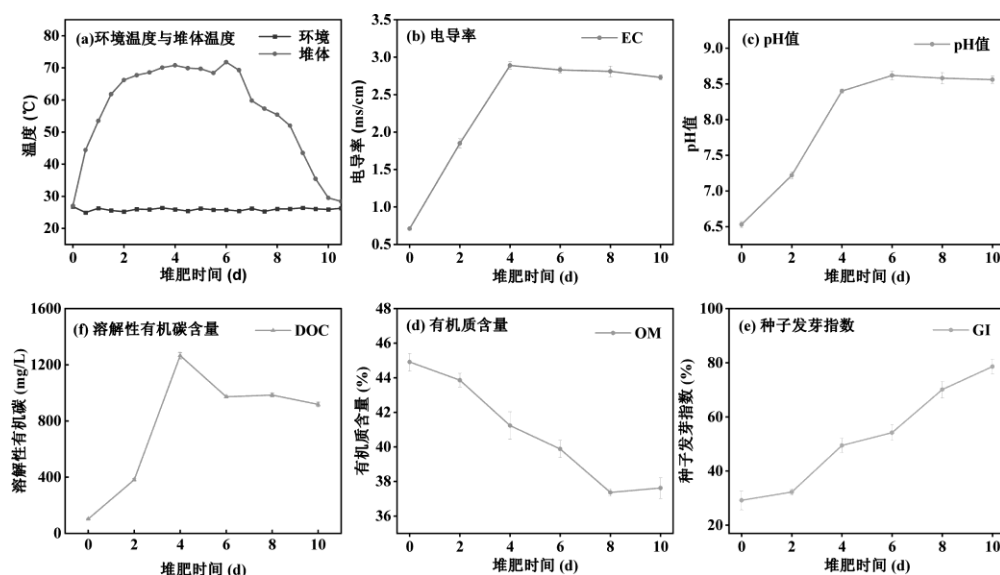


图 2 堆肥过程中各理化参数随时间的变化情况

有机质含量变化表征了易降解组分的消耗与难降解组分的相对富集过程<sup>[21]</sup>。堆肥过程中, 有机质总量从 0d 的 44.9% 逐渐下降至 10d 的 37.6%, 证明了微生物对污泥中易降解组分的不断分解 (图 2 (d))。

种子发芽指数是评价产物腐熟度和植物毒性的重要指标<sup>[16]</sup>。本研究中 GI 从初始的 29.2% 持续上升, 在 10d 时达到 78.6%, 表明堆肥后期产物植物毒性显著降低, 腐熟度提高 (图 2 (e))。

溶解性有机碳含量动态反映了大分子有机质的水解释放与微生物利用消耗之间的平衡关系<sup>[22]</sup>。DOM 在堆肥过程中经历了快速释放后趋于稳定的变化过程。体系的初始 DOC 含量为 102mg/L, 在 0~4d 期间迅速增加至 1265mg/L, 后略有下降并基本保持稳定 (图 2 (f))。其在初期的快速增加主要源于两方面原因: 一是大分子有机质在微生物胞外酶作用下发生水解, 产生大量可溶性中间产物<sup>[23]</sup>; 二是高温条件促进了有机质的溶解和解聚<sup>[24]</sup>。此阶段 DOM 的生成速率大于微生物利用消耗速率。而 4d 后 DOC 含量轻微下降趋于稳定, 表明易降解有机质已被大量消耗, 水解释放速率下降而后与微生物利用消耗达到动态平衡, 此时释放的 DOM 主要为难降解组分, 生物可利用性降低。

## 2.2 溶解性有机质的光谱特征

紫外-可见吸收光谱通过吸收峰特征表征 DOM 的芳香化程度和共轭体系状况, 是评价有机质结构的快速手段<sup>[22]</sup>。UV-Vis 光谱显示, 所有 DOM 样品在 270nm 附近均存在明显的吸收峰 (图 3 (a)), 该特征峰可以归属于腐殖质中的共轭体系, 证明了 DOM 中腐殖质的存在。

三维荧光光谱可识别 DOM 中不同来源的荧光组分 (包括腐殖质类、蛋白质类等), 通过荧光指数定量评价 DOM 的腐殖化程度、微生物活性和生物可利用性<sup>[17]</sup>。从样品的 3D EEM 中识别出 3 个典型荧光峰:  $\lambda_{Ex/Em}=310\text{nm}/370\text{nm}$ ,  $\lambda_{Ex/Em}=340\text{nm}/440\text{nm}$  和  $\lambda_{Ex/Em}=275\text{nm}/320\text{nm}$  (图 3b-d)。经过 Openfluor 数据库查询与文献比对, 可分别归属于微生物源腐殖质 (C1)<sup>[25-26]</sup>、污泥中的陆生源腐殖质 (C2)<sup>[27-28]</sup> 和蛋白质类物质 (C3)<sup>[29-30]</sup> 三种组分。C1、C2 和 C3 在不同时间节点的含量变化如图 4 (a) 所示。

其中, C1 组分的相对强度从 0d 的 12.6% 急剧增加至 2d 的 57.1%, 随后有所下降, 在 4~10d 期间保持相对稳定。C1 组分在 0~2d 的显著增加表明微生物代谢活性较高, 大量合成新生腐殖质。2d 后 C1 组分比例的下降并非其绝对含量减少, 而是其他组分 (如 C2) 的相对增加所致。C2 组分在整个过程中呈现逐渐积累的趋势, 从 0d 的 11.6% 缓慢增加至 10d 的 27.4%。C2 组分的持续增加反映了难降解芳香族结构的相对富集, 这类物质主要来源于木质纤维素的转化产物。C3 组分表现出与 C1 相反的变化趋势, 从 0d 的 75.8% 急剧下降至 2d 的 36.4%, 此后在 4~10d 期间略有下降并保持相对稳定。C3 组分的快速下降表明蛋白质类物质在升温期被大量分解, 部分转化为氨挥发, 部分重组为更稳定的含氮结构。

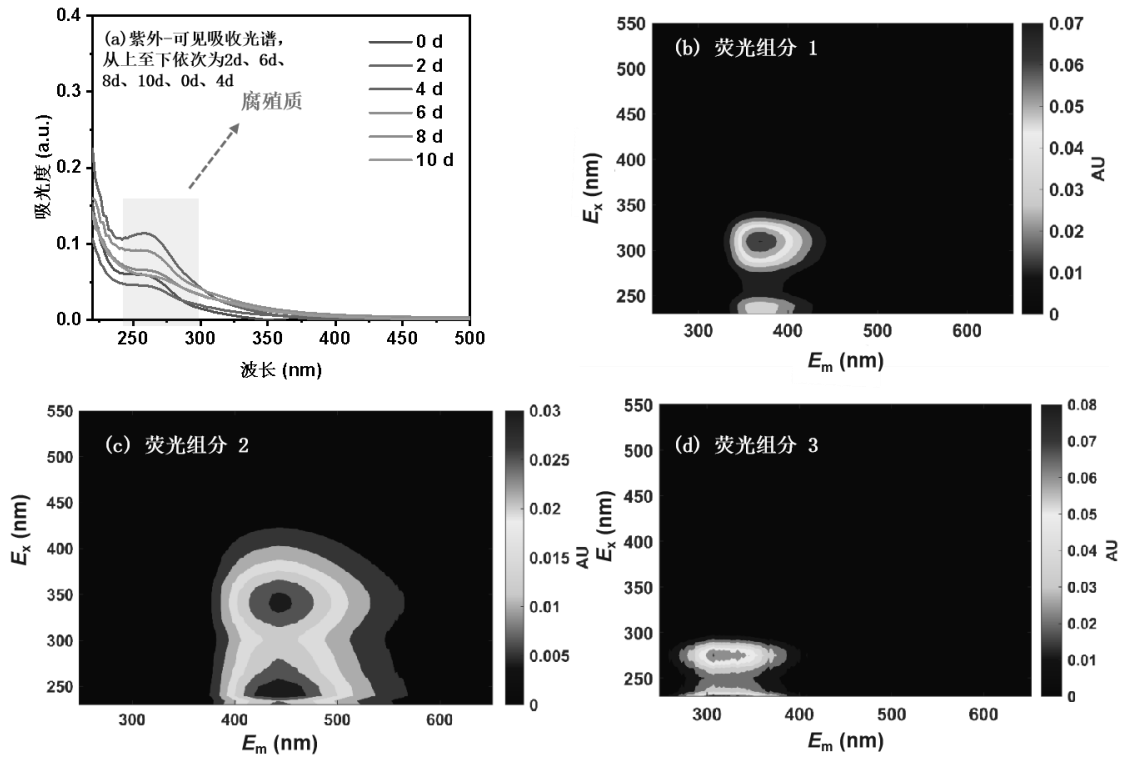


图 3 不同时间 DOM 的紫外-可见吸收光谱与三维荧光光谱

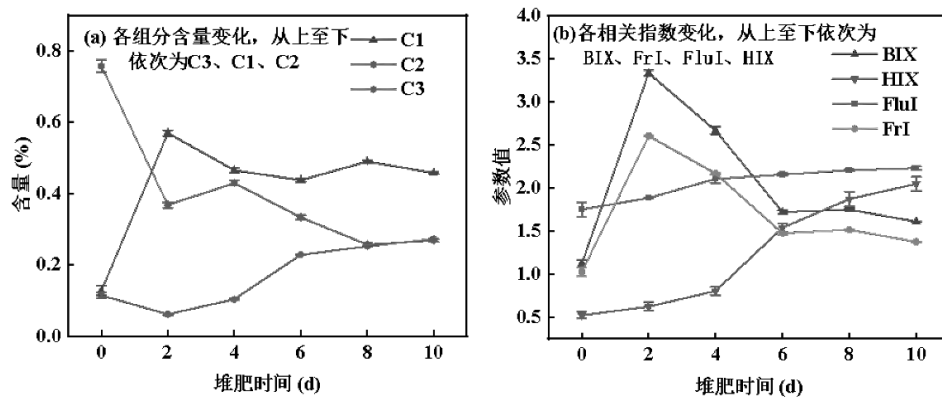


图 4 不同时间 DOM 样品三维荧光的各组分含量和各相关指数变化

三维荧光相关指数的变化进一步证实了 DOM 的转化特征（图 3（b））。其中，腐殖化指数（HIX）和荧光指数（FluI）的变化趋势一致，HIX 从 0d 的 0.54 持续增加至 10d 的 2.10，FluI 从 0d 的 1.76 逐渐增加至 10d 的 2.22，表明 DOM 的腐殖化程度和分子缩合度显著提高，这是有机质稳定化的重要标志<sup>[17]</sup>。生物源指数（BIX）和新鲜度指数（FrI）的变化趋势一致，BIX 在 2d 时达到最高值 3.37，此后持续下降至 10d 的 1.60，证明 2d 为微生物活性的高峰期；FrI 在 2d 时达到峰值 2.62，随后下降至 10d 的 1.38，反映了新鲜有机质在初期的快速产生，后期因反应活性降低而产生缓慢。其中，HIX 的增加趋势与在秸秆、锯末等传统辅料堆肥中的发现一致，表明腐殖化是有机质稳定化的普遍规律<sup>[17-20]</sup>。

### 2.3 溶解性有机质的质谱特征

### 2.3.1 元素组成与化合物组成

不同时间点, FT- ICR MS 鉴定出的 DOM 分子数量分布在 4000~6000 范围内分布, 呈现动态变化趋势: 在堆肥 2~4d 时分子数较少, 6~10d 时分子数相对较多 (表 1)。这种变化反映了升温期 and 高温期前期微生物活性高、易降解分子快速消耗, 而高温期后期和降温期难降解分子相对富集、新生稳定分子不断产生的过程。

从 DOM 的整体元素配比看 (表 1), 氧碳比 ( $O/C_{wa}$ ) 从 0d 的 0.44 增加至 4d 后的 0.48~0.49, 表明氧化反应持续进行, 羧基、羟基等含氧官能团增加。氮碳比 ( $N/C_{wa}$ ) 和硫碳比 ( $S/C_{wa}$ ) 分别从 0.060 和 0.013 增加至 10d 的 0.079 和 0.020, 反映了氮、硫元素向 DOM 中的整合。对于氧元素, 空气中的氧通过强氧化反应整合进入有机分子中, 形成羧基 ( $-COOH$ )、羟基 ( $-OH$ ) 等含氧官能团, 同时部分氧以  $CO_2$  形式经矿化作用释放到气相<sup>[9]</sup>。由于整合速率高于释放速率, 最终使  $O/C_{wa}$  升高。对于氮元素, 蛋白质降解产生的氨被重新整合到新生腐殖质结构中, 同时部分氨以  $NH_3$  形式挥发<sup>[31]</sup>, 但氮向稳定结构的整合作用占主导, 因此  $N/C_{wa}$  升高, 这与 CHONS 类化合物中相应元素比例的增加趋势一致 (图 5 (a))。对于硫元素, 含硫氨基酸 (半胱氨酸、蛋氨酸) 降解释放的硫被整合到 DOM 中, 而少量硫以  $H_2S$  等形式释放<sup>[32]</sup>。总体而言, 硫向有机硫化化合物的转化占主导, 引起  $S/C_{wa}$  的上升。双键当量 ( $DBE_{wa}$ ) 从 0d 的 8.14 降至 4d 的 7.38 后回升至 10d 的 7.94, 标称氧化态 (NOSC) 从 0d 的 -0.18 降至 2d 的 -0.27 后升至 10d 的 -0.06, 表明 DOM 经历了先部分还原后持续氧化的过程<sup>[33]</sup>。

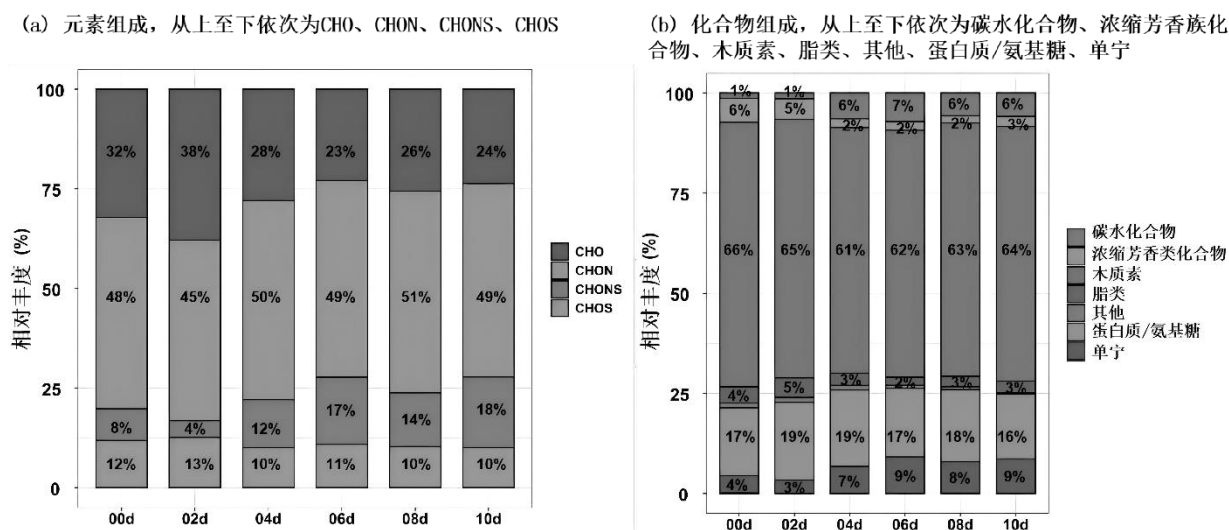


图 5 不同时间 DOM 样品元素组成和化合物组成的平均相对丰度

基于元素组成, DOM 分子被归类为 CHO、CHON、CHOS 和 CHONS 四类, 其动态变化揭示了 DOM 转化的阶段性特征 (图 5a)。CHO 类化合物从 0d 的 32% 先升至 2d 的 38%, 随后逐渐降至 10d 的 24%。CHON 类化合物始终是最主要的组分, 占比在 45%~51% 之间波动。CHOS 类化合物保持相对稳定 (10%~13%)。CHONS 类化合物表现出最显著的变化, 从 0d 的 8% 骤降至 2d 的 4%, 随后快

速增至 6d 的 17%，并在 8~10d 稳定在 14%~18%。0~2d 期间，易降解的含氮硫化合物快速分解，CHO 相对富集，蛋白质脱氨导致 CHON 比例下降。2~4d 期间是反应最活跃的时期，CHO 从 38% 骤降至 28%，CHON 从 45% 增至 50%，CHONS 从 4% 激增至 12%。4~10d 期间，各元素类型组成趋于稳定，反应进入平缓期。

基于生物化学特性，DOM 分子进一步归类为碳水化合物、浓缩芳香族化合物、木质素、脂质、单宁和蛋白质/氨基糖等类型（图 5（b））<sup>[33]</sup>。木质素类物质始终是最主要的组分，占比稳定在 61%~66%，为 DOM 提供了稳定的结构骨架。碳水化合物类物质从 0d 的 1% 急剧增至 4d 的 6% 后保持相对稳定，初期快速释放标志着复杂多糖在糖苷酶作用下的水解高峰，证明 2~4d 为该酶活性峰值期。浓缩芳香族化合物从 0d 的 6% 快速降至 4d 的 2% 后保持稳定，这种变化暗示浓缩芳香族结构在微生物酶系作用下发生部分解聚，产生酚类中间产物，随后通过氧化聚合形成具有单宁特征的新结构。

表 1 通过 FT-ICR MS 分析出不同时间 DOM 样品的分子数量和各项加权平均参数

| DOM type | Molecules number | H/C <sub>wa</sub> | O/C <sub>wa</sub> | N/C <sub>wa</sub> | S/C <sub>wa</sub> | DBE <sub>wa</sub> | AI <sub>mod</sub> | NOSC  |
|----------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|
| 0d       | 4809             | 1.27              | 0.44              | 0.060             | 0.013             | 8.14              | 0.26              | -0.18 |
| 2d       | 4531             | 1.31              | 0.44              | 0.049             | 0.011             | 8.11              | 0.24              | -0.27 |
| 4d       | 4262             | 1.34              | 0.48              | 0.077             | 0.016             | 7.38              | 0.17              | -0.12 |
| 6d       | 5283             | 1.33              | 0.49              | 0.082             | 0.020             | 7.67              | 0.16              | -0.06 |
| 8d       | 4833             | 1.32              | 0.48              | 0.077             | 0.016             | 7.75              | 0.19              | -0.11 |
| 10d      | 5904             | 1.30              | 0.48              | 0.079             | 0.020             | 7.94              | 0.20              | -0.06 |

单宁类物质从 0d 的 4% 显著增至 8d 的 9% 并稳定，其增加与浓缩芳香族化合物的减少呈现良好对应。单宁由多个酚类单元通过氧化偶联形成，其形成是堆肥的一种独特特征，反映了 DOM 结构的重组和稳定化。其他组分对 DOM 组成影响较小。

### 2.3.2 转化过程与反应特征

Van Krevelen 图以 H/C 为纵坐标、O/C 为横坐标，可直观呈现 DOM 分子在化学空间中的分布特征和转化轨迹。根据分子在相邻时间点的出现和消失情况，将它们分为三类：前体分子（仅在前一时间点出现），产物（仅在后一时间点出现）和抗性分子（两个时间点均存在）。堆肥过程中绘制的 Van Krevelen 图如图 6（a-e）所示。

从整体来看，DOM 分子主要分布在四个特征区域：木质素/CRAM 区、脂质区、蛋白质/脂肪族区和碳水化合物区，其中木质素/CRAM 区始终是分子分布最密集的区域。随着堆肥的进行，呈现以下整体转化趋势：

（1）前体分子数量呈现先增后减的趋势，从 0~2d 的 1673 个增加到 2~4d 的 2493 个峰值，随后逐渐降低至 8~10d 的 794 个。表明其在 2~4d 期间消耗最为剧烈。

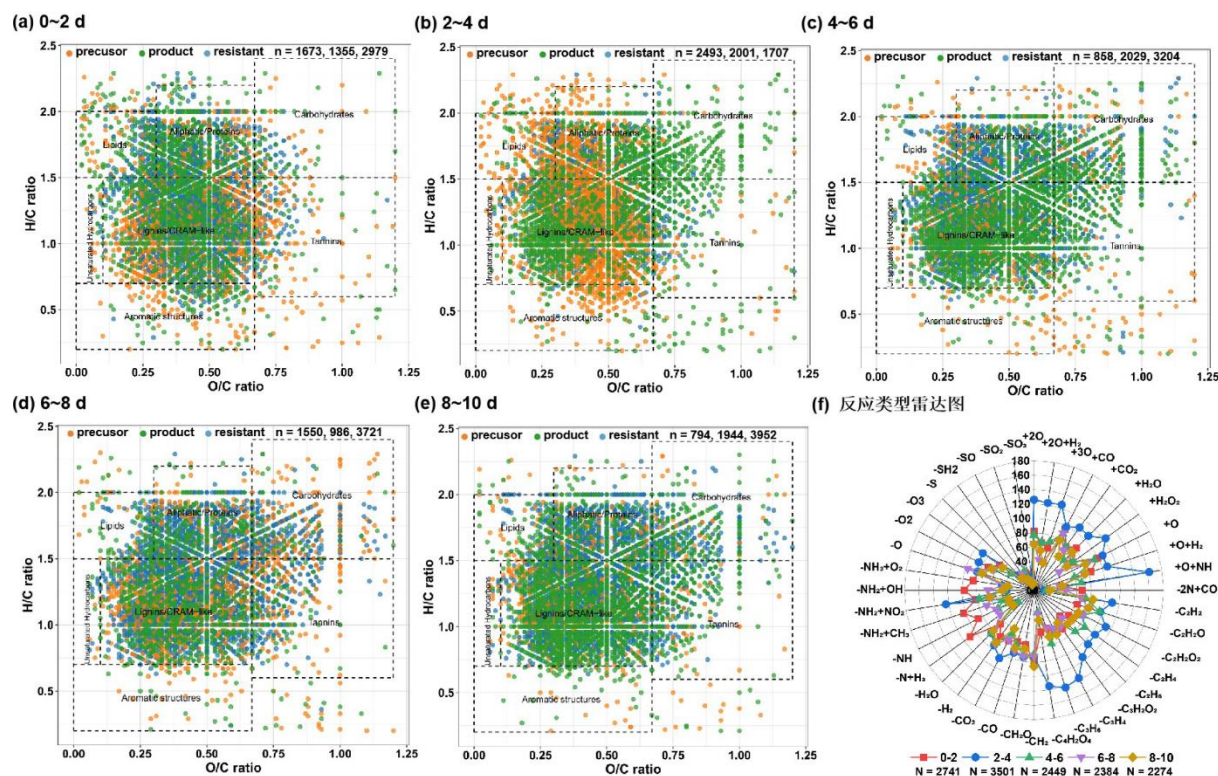


图6 堆肥过程中DOM组成变化的Van Krevelen图 反应类型雷达图及不同反应的数量

(a: 0~2天, b: 2~4天, c: 4~6天, d: 6~8天, e: 8~10天) (注: 橙色: 前体, 绿色: 产物, 蓝色: 抗性物),

(2) 与前体分子的变化一致, 产物分子数量同样呈现先增后减的模式, 在2~4d附近达到峰值, 随后有所波动。

(3) 抗性分子数量持续增加, 从0~2d的2979个(占总分子数的48%)增至8~10d的3952个(占总分子数的59%), 表明DOM的稳定性显著增强, 难降解组分不断积累。

(4) 从分子在化学空间的迁移看, 整体呈现向高O/C方向移动的趋势, 对应于 $O/C_{wa}$ 从0.44增至0.49, 反映了氧化反应的发生。同时, 分子分布从初期的相对分散逐渐向木质素/CRAM区集中, 表明DOM结构趋于稳定化和腐殖化。

综合图6分析, 堆肥过程中DOM转化的核心特征是: 易降解分子逐步消耗, 稳定分子不断积累, DOM实现稳定化。2~4d期间是分子转化最活跃的时期, 前体分子消耗最多, 分子在化学空间中发生明显重组。比起传统污泥好氧堆肥10~30天左右的过程, 具有更短的反应周期和更明显的转化节点<sup>[17]</sup>。

此外, 反应的雷达图展示了不同时期DOM分子转化的主要化学反应类型分布及其定量相对强度(图6(f))<sup>[17]</sup>。如图所示, 0~2d期间, 反应总数为2741个, 雷达图呈现相对集中的分布模式, 主导反应类型为脱氮反应(-NH, -NH<sub>2</sub>), 伴随初步的氧化反应(+O)。2~4d期间, 反应总数为3501个, 雷达图呈现最大的扩展形态, 许多反应类型都显示出高强度, 表明这一阶段

反应最为复杂和活跃，是分子重组的最关键时期。特别突出的反应类型有：(1) 强氧化反应 (+O, +2O, +3O)；(2) 脱烷基化反应 ( $-C_2H_4$ ,  $-C_2H_6$ ,  $-C_3H_4$ )，表明分子重排；(3) 氮整合反应 ( $-NH_2+NO_2$ )；(4) 羧基化反应 (+CO<sub>2</sub>, +CO)。4d 之后雷达图显著收缩，反应总数降低至 2500 个以下，反应强度整体降低，分布趋于均匀，表明 DOM 转化进入稳定期。

基于 2 和 4d 两个时间点 DOM 分子组成的差异，构建了分子转化网络图（图 7）。分析识别出 11 种主要的化学转化类型，呈现高度复杂的蛛网状结构，证明了 2~4d 期间 DOM 经历了极其复杂的多路径转化过程。网络的拓扑结构显示，中心区域存在多个大节点，这些节点连接度极高，代表了分子转化的枢纽分子，其可能是关键的中间产物，连接了多条转化路径<sup>[33]</sup>。值得注意的是，尽管识别出了 11 种主要转化类型，但它们的总占比仅为 42.13%，其他转化类型占比高达 57.87%，这表明 DOM 转化的复杂性远超这些主要类型，涉及大量低丰度但种类繁多的次要转化途径<sup>[17]</sup>。此类高度分散的转化模式反映了 DOM 在微生物多酶系统作用下的协同转化特征，是自然条件下有机质转化的真实写照。虽然单个反应类型丰度较低，但其累积效应对 DOM 整体转化具有重要贡献。这种“少数主导路径+众多次要路径”的转化模式，是堆肥过程中 DOM 快速且深度转化的分子基础。

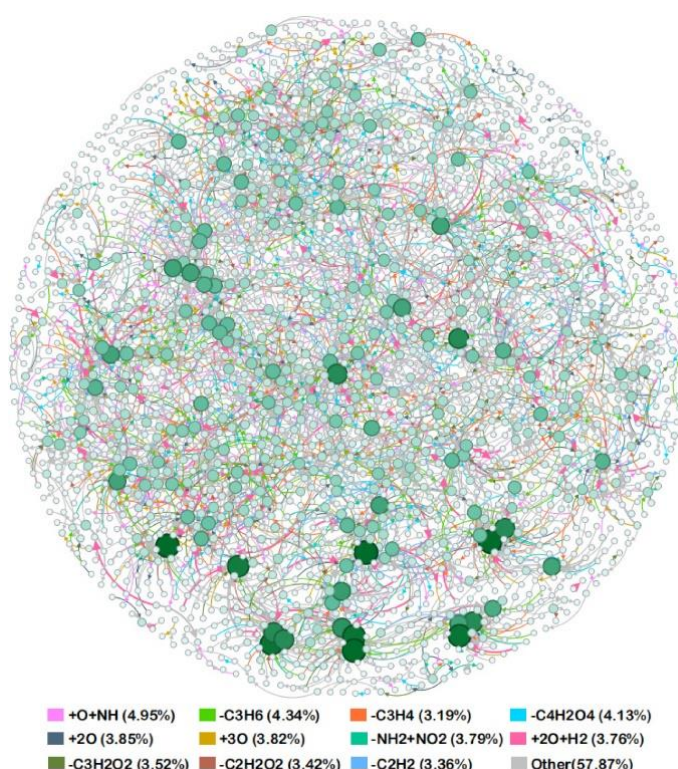


图 7 堆肥第 2~4 天期间的反应网络分析

## 2.4 微生物群落动态变化与 DOM 转化的关联

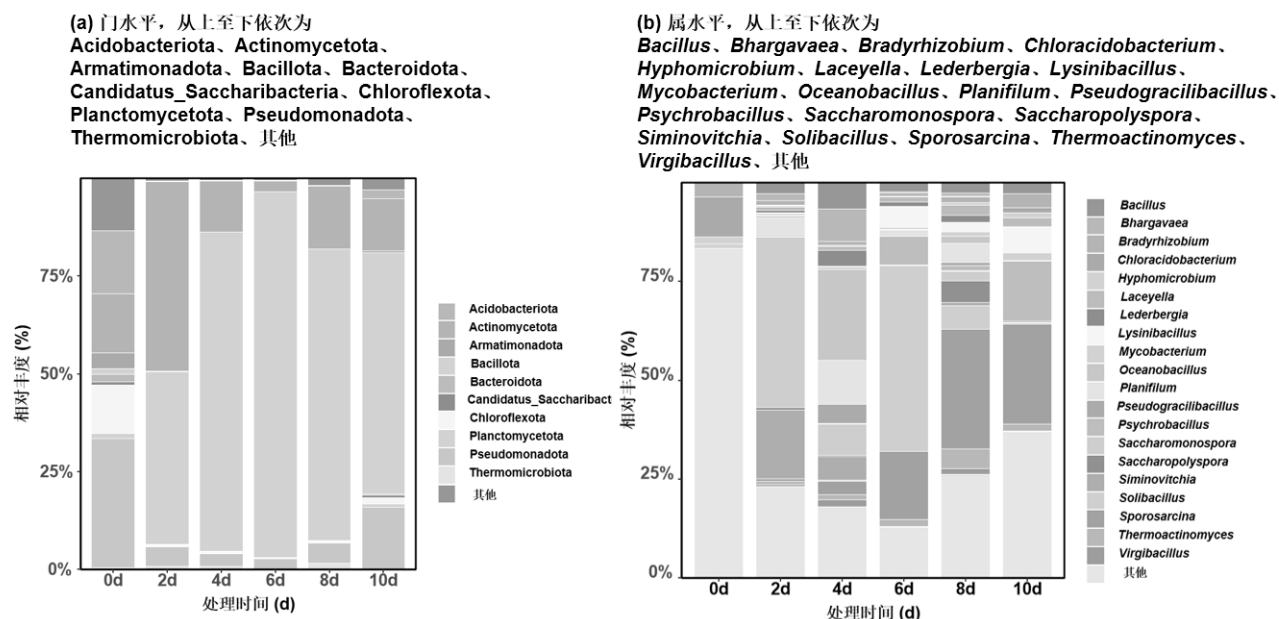
为深入揭示 DOM 转化的微生物驱动机制，利用 16S rRNA 基因高通量测序分析了堆肥过程中微生物群落的动态演替。

### 2.4.1 门水平微生物群落演替

门水平分析显示,微生物群落在堆肥过程中发生显著演替(图 8a)。*Bacillota* (厚壁菌门)从初始的 1.5%快速增至 6d 的峰值 93.5%,成为高温期的绝对优势菌门。该菌门包含大量嗜热芽孢杆菌,能在高温条件下保持活性并分泌多种胞外酶<sup>[34]</sup>。*Actinomycetota* (放线菌门)呈现先升后降再回升的动态变化:2d 时达到 48.5%,随后在 6d 降至 2.7%,降温期(8~10d)回升至 13~16%。*Pseudomonadota* (变形菌门)从初始的 33.0%降至高温期的 2.6%,在 10 天部分恢复至 15.8%。这种演替模式与温度变化及 DOM 转化阶段高度吻合:升温期(0~2d)时 *Bacillota* 和 *Actinomycetota* 合计占比从 16.6%增至 92.7%,带动 DOC 从 102mg/L 快速上升;高温期(2~6d) *Bacillota* 占主导(44%~93.5%),促使前体分子数量达到峰值并引发 DOM 剧烈重组。与传统堆肥相比,该过程的演替速度更快<sup>[35]</sup>,表明高温对菌群产生了更强的选择压力, *Bacillota* 的绝对优势地位可能与其在无辅料体系中更高的堆体密实度和局部厌氧微环境有关,这为耐受氧浓度波动的芽孢杆菌提供了竞争优势<sup>[36]</sup>。

#### 2.4.2 属水平微生物群落演替

在属水平分析中(图 8b), 2d 时 *Saccharomonospora* (糖单孢菌属)丰度爆发式增长至 43.2%,成为优势菌种。该菌属为嗜热放线菌,能分泌纤维素酶和半纤维素酶<sup>[37]</sup>,其丰度峰值出现的时间与碳水化合物类 DOM 在 2~4d 从 1%快速上升至 6%的时间窗口一致 4d 时, *Saccharomonospora* 降至 8.0%,而 *Oceanobacillus* (海洋芽孢杆菌属)增至 23.0%,成为主要优势菌。*Oceanobacillus* 为嗜热嗜盐芽孢杆菌,能分泌耐高温蛋白酶<sup>[38]</sup>。其作用使得 C3 组分(蛋白质类)在 0~4d 从 75.8%降至约 50%。6d 时菌群再次剧变, *Solibacillus* (独居芽孢杆菌属)跃升至 47.0%成为新的绝对优势菌。此后的优势菌种保持相对稳定,反应活性降低。



综合分析表明, 2~4 天成为 DOM 转化关键期的微生物学基础在于: 此阶段嗜热纤维素降解菌 (*Saccharomonospora*) 和嗜热蛋白质降解菌 (*Oceanobacillus*) 达到丰度峰值, 在 65℃ 左右的最适温度下, 其胞外酶系统高效运转, 驱动了易降解组分的快速水解和中间产物的剧烈重组。这一过程证实微生物驱动是 DOM 转化的直接动力。

### 3 结论

(1) 从宏观和微观两个尺度上阐明了市政污泥堆肥过程中 DOM 的稳定化机制。宏观上, GI 从 29.2% 提升至 78.6%, 达到腐熟标准。微观上, 抗性分子从 48% 增至 59%, CHO 类化合物从 32% 降至 24%, CHONS 类化合物从 8% 增至 18%, 实现了杂原子整合和分子稳定化。

(2) 识别出 2~4d 为 DOM 转化的关键窗口期, 为缩短处理周期提供了时间节点依据。该阶段前体分子消耗达到峰值, DOC 含量急剧升高至 1265mg/L, 转化网络最复杂, 完成了 DOM 结构从易降解到更加稳定的快速转变。

### 参考文献:

- [1] 戴晓虎, 张 辰, 章林伟, 等. 碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考 [J]. 给水排水, 2021, 57 (3) : 1-5.  
Dai X H, Zhang C, Zhang L W, et al. Considerations on sludge treatment, disposal, and resource recovery under the background of carbon neutrality [J]. Water Supply and Drainage, 2021, 57 (3) : 1-5.
- [2] Lee D J, Lu J S, Chang J S. Pyrolysis synergy of municipal solid waste (MSW) : A review [J]. Bioresource Technology, 2020, 318: 123912.
- [3] Zhang J, Lü F, Shao L, et al. The use of biochar-amended composting to improve the humification and degradation of sewage sludge [J]. Bioresource Technology, 2014, 168: 252-258.
- [4] 李志坚, 李 宁, 陈 磊, 等. 市政污泥生物干化系统酶强化影响 [J]. 中国环境科学, 2024, 44 (10) : 5658-5669.  
Li Z J, Li N, Chen L, et al. Effects of enzyme enhancement on municipal sludge biodrying system [J]. China Environmental Science, 2024, 44 (10) : 5658-5669.
- [5] He X, Xi B, Wei Z, et al. Spectroscopic characterization of water extractable organic matter during composting of municipal solid waste [J]. Chemosphere, 2011, 82 (4) : 541-548.
- [6] 闫金龙, 江 韬, 赵秀兰, 等. 含生物质炭城市污泥堆肥中溶解性有机质的光谱特征 [J]. 中国环境科学, 2014, 34 (2) : 459-465.  
Yan J L, Jiang T, Zhao X L, et al. Spectral characteristics of dissolved organic matter in composting of municipal sludge with biochar [J]. China Environmental Science, 2014, 34 (2) : 459-465.
- [7] Said Pullicino D, Erriquens F G, Gigliotti G. Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity [J]. Bioresource Technology, 2007, 98 (9) : 1822-1831.
- [8] 占新华, 周立祥, 黄焕忠. 城市污泥堆肥中水溶性有机物的理化特性变化 [J]. 中国环境科学, 2003, (4) : 55-59.  
Zhan X H, Zhou L X, Huang H Z. Changes in physicochemical properties of water-soluble organic matter during municipal sludge composting [J]. China Environmental Science, 2003, (4) : 55-59.
- [9] Lv B, Xing M, Yang J, et al. Chemical and spectroscopic characterization of water extractable organic matter during vermicomposting of cattle dung [J]. Bioresource Technology, 2013, 132: 320-326.
- [10] 王华梓, 胡思文, 左腾腾, 等. 南京市中、富营养化城市湖泊溶解性有机质的组成特征及来源分析 [J]. 中国环境科学, 2025, 45 (5) : 2520- 2529.

- Wang H Z, Hu S W, Zuo T T, et al. Compositional characteristics and sources of dissolved organic matter in moderately and highly eutrophic urban lakes in Nanjing [J]. *China Environmental Science*, 2025,45 (5) : 2520–2529.
- [11] González D, Guerra N, Colón J, et al. Filling in sewage sludge biodrying gaps: Greenhouse gases, volatile organic compounds and odour emissions [J]. *Bioresource Technology*, 2019,291:121857.
- [12] Li H, Luo Y, Jiang C, et al. Study on the effect of thermal assisted combined plant-Based biomass conditioning on dehydrated sludge bio-Drying [J]. *Processes*, 2024,12 (5) :943.
- [13] Wang Y, Li L, Ma J, et al. The response and factors of microbial aerosol emission from the sludge bio-drying process [J]. *Waste Management*, 2024,175:294–304.
- [14] 刘彦君,高良敏,武慧君,等.淮河流域煤粮复合区溶解性有机质组分特征及转化机制 [J]. *中国环境科学*, 2025, 5 (12) : 6869–6880.
- Liu Y J, Gao L M, Wu H J, et al. Component characteristics and transformation mechanisms of dissolved organic matter in coal-grain composite areas of the Huai River Basin [J]. *China Environmental Science*, 2025, 5 (12) : 6869–6880.
- [15] Dong Y, Jia Y, Xu X, et al. From molecular characteristics to microbial functions: DOM transformation driven by sewage sludge compost in mine topsoil revealed by a large-scale field study [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025,517:164559.
- [16] 邵青松,付 娟,高文龙,等.有机肥料中种子发芽指数检测方法研究 [J]. *山东化工*, 2025,54 (15) :127–129,135.
- Shao Q S, Fu J, Gao W L, et al. Study on seed germination index detection methods in organic fertilizers [J]. *Shandong Chemical Industry*, 2025,54 (15) :127–129,135.
- [17] Cai S, Liu M, Zhang Y, et al. Molecular transformation of dissolved organic matter and formation pathway of humic substances in dredged sludge under aerobic composting [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 364:128141.
- [18] Du Z, Hu A, Wang Q, et al. Molecular composition and biotoxicity effects of dissolved organic matters in sludge-based carbon: Effects of pyrolysis temperature [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022,424: 127346.
- [19] 刘英杰,李琬婷,王海候,等.锯末添加量对餐厨废弃物生物干化效率和细菌群落的影响 [J]. *农业工程学报*, 2023,39 (15) :208–216.
- Liu Y J, Li W T, Wang H H, et al. Effects of sawdust addition on biodrying efficiency and bacterial community of kitchen waste [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39 (15) :208–216.
- [20] 常昊宇,谭知涵,孙晓杰,等.污泥好氧堆肥过程中亲水性组分的光谱和电化学特征 [J]. *环境科学研究*, 2024,37 (2) :397–406.
- Chang H Y, Tan Z H, Sun X J, et al. Spectral and electrochemical characteristics of hydrophilic fractions during aerobic sludge composting [J]. *Environmental Science Research*, 2024,37 (2) :397– 406.
- [21] 李再兴,马 骏,武肖莎,等.接种高温嗜热菌剂加快牛粪秸秆堆肥发酵进程 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2022,28 (5) :953–960.
- Li Z X, Ma J, Wu X S, et al. Accelerated fermentation of cow manure–straw compost by inoculating thermophilic bacteria [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022,28 (5) :953–960.
- [22] 卢 泽,席北斗,台德志,等.不同辅料与生物沥浸深度脱水污泥混合堆肥中溶解性有机质的光谱特征研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2022,42 (7) :2120–2129.
- [23] Said-Pullicino D, Erriquens F G, Gigliotti G. Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity [J]. *Bioresource Technology*, 2007,98 (9) :1822–1831.
- [24] Gao M, Li B, Yu A, et al. The effect of aeration rate on forced-aeration composting of chicken manure and sawdust [J]. *Bioresource Technology*, 2010,101 (6) :1899–1903.
- [25] Zhou X, Johnston S E, Bogard M J. Organic matter cycling in a model restored wetland receiving complex effluent [J]. *Biogeochemistry*, 2023,162 (2) :237–255.
- [26] Kim J, Song B C, Kim T H. Origin of dissolved organic carbon under phosphorus-limited coastal-bay conditions revealed by fluorescent dissolved organic matter [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022,9: 971550.
- [27] Zhou Y, Martin P, Müller M. Composition and cycling of dissolved organic matter from tropical peatlands of coastal Sarawak, Borneo, revealed by fluorescence spectroscopy and parallel factor analysis [J]. *Biogeosciences*, 2019,16 (13) :2733–2749.
- [28] Osburn C L, Wigdahl C R, Fritz S C, et al. Dissolved organic matter composition and photoreactivity in prairie lakes of the U.S. Great Plains [J]. *Limnology and Oceanography*, 2011,56 (6) :2371–2390.
- [29] Pitta E, Zeri C. The impact of combining data sets of fluorescence excitation – emission matrices of dissolved organic matter from various aquatic sources on the information retrieved by PARAFAC modeling [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2021,258:119800.
- [30] Dainard P G, Guéguen C, McDonald N, et al. Photobleaching of fluorescent dissolved organic matter in Beaufort Sea and North

- Atlantic Subtropical Gyre [J]. *Marine Chemistry*, 2015,177:630–637.
- [31] Wei Y, Zhao Y, Shi M, et al. Effect of organic acids production and bacterial community on the possible mechanism of phosphorus solubilization during composting with enriched phosphate-solubilizing bacteria inoculation [J]. *Bioresource Technology*, 2018,247:190–199.
- [32] Vairavamurthy A, Mopper K. Geochemical formation of organosulphur compounds (thiols) by addition of H<sub>2</sub>S to sedimentary organic matter [J]. *Nature*, 1987,329 (6140) :623–625.
- [33] Liu J, Wang C, Hao Z, et al. Comprehensive understanding of DOM reactivity in anaerobic fermentation of persulfate-pretreated sewage sludge via FT-ICR mass spectrometry and reatomics analysis [J]. *Water Research*, 2023,229:119488.
- [34] Partanen P, Hultman J, Paulin L, et al. Bacterial diversity at different stages of the composting process [J]. *BMC Microbiology*, 2010,10 (1) : 94.
- [35] Han W, Chen S, Tan X, et al. Microbial community succession in response to sludge composting efficiency and heavy metal detoxification during municipal sludge composting [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022,13:1015949.
- [36] Zhang L, Sun X. Changes in physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage co-composting of green waste with spent mushroom compost and biochar [J]. *Bioresource Technology*, 2014,171:274–284.
- [37] Saini A, Aggarwal N K, Sharma A, et al. Actinomycetes: A Source of Lignocellulolytic Enzymes [J]. *Enzyme Research*, 2015,2015:279381.
- [38] Finore I, Feola A, Russo L, et al. Thermophilic bacteria and their thermozymes in composting processes: a review [J]. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2023,10 (1) :7.

# 水泥窑协同处置市政污泥及替代燃料下SCR催化剂挂灰堵塞机理与防控对策研究

李 伟

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

## 摘 要:

以广州珠江水泥 5000t/d 生产线为工程对象, 该线配套高温高尘 SCR 脱硝装置, 并常态化协同处置 200–250t/d 高含水市政污泥 (含水率 40%) 及 200t/d 纺织碎纺替代燃料。生产运行数据显示, 固废掺烧后熟料产量由 5000t/d 降至 4500t/d, C1 预热器出口 CO 浓度长期稳定在 10000ppm 以上; SCR 催化剂呈现上表面洁净、下层底部严重板结积灰的异常工况, 系统烟气阻力持续攀升, 严重制约脱硝系统的稳定运行。针对催化剂底部积灰问题, 研究通过取样开展理化检测、粒径分析与烟气组分在线监测, 并结合钒钛基 SCR 催化剂对 CO 的催化氧化反应机理, 进行多因素耦合分析。结果表明: 市政污泥高氯、高硫、高碱金属、纺织替代燃料高挥发分难燃尽特性, 分解炉偏小, 处理量大, 造成分解炉燃烧缺氧, CO 大量生成, CO 在催化剂表面强放热氧化引发局部超温, 使飞灰中碱氯盐熔融; 挂灰以 6 $\mu\text{m}$  以下超细粉尘为主 (占比 70%), 取样灰 K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、SO<sub>3</sub>、Cl<sup>-</sup> 富集, 还有未燃有机质, 碱氯盐与硫酸氢铵形成低温共熔粘性基质, 捕获超细粉尘团聚; 烟气流经催化剂孔道时, 粘性粉尘受重力、流场涡流作用持续沉降富集于催化剂下表面, 形成板结层。针对故障根源, 从固废掺烧管控、烧成系统燃烧优化、旁路放风技改、增设替代燃料气化装置、SCR 系统清灰与流场优化多维度提出成套工程解决方案, 可为同类协同处置水泥生产线 SCR 防堵运维提供实践依据。

**关键词:** 水泥窑; 协同处置; 市政污泥; 纺织替代燃料; 高温高尘 SCR; 催化剂挂灰; CO 不完全燃烧; 碱氯循环富集

## 0 引言

“无废城市”背景下, 水泥窑协同处置市政污泥、工业纺织废料已成为固废减量化、资源化、无害化主流路径, 同时可降低煤炭消耗, 助力水泥行业低碳转型。但市政污泥高水分、高氯、高硫、高碱金属, 纺织类替代燃料挥发分高、固定碳低、燃尽难度大, 大规模掺烧会彻底扰动分解炉热工与风场平衡, 引发预热器出口 CO 超标、烟气超细粉尘增多、碱氯元素循环富集等系列问题, 进而诱发后端高温高尘 SCR 脱硝催化剂异常堵塞。

当前关于水泥窑 SCR 催化剂积灰与失活的研究, 多聚焦于纯燃煤工况下的常规失活机制, 主要包括硫酸氢铵堵孔、碱金属/碱土金属中毒, 以及迎风面均匀积灰等典型问题。针对固废协同处置工况下催化剂下表面集中板结、上下表面积灰特性显著差异的特殊积灰故障, 现有研究涉及较少; 且目前尚缺乏基于现场实测灰样理化性质、粒径分布及烟气 CO 长期在线检测数据的全链条机理分析。广州珠江水泥 5000t/d 生产线分设窑列、炉列两套独立 SCR 系统, 两套系统掺烧

工况、挂灰程度、灰样组分存在显著差异，具备天然对比研究条件。本文依托该生产线实测运行数据、挂灰样品化验结果、在线烟气监测曲线，系统揭示高CO、超细粘性飞灰、碱氯循环耦合作用下催化剂下表面积灰堵塞机制，并结合现场工况提出技改与运行优化方案。

## 1 工程概况与故障特征

### 1.1 生产线及固废协同处置工况

广州珠江水泥5000t/d新型干法熟料生产线，烧成系统配置五级双系列预热器、SLC喷腾离解分解炉，2025年6月配套合肥院设计高温高尘SCR脱硝系统，窑列、炉列各独立设置一套SCR反应器。生产线固废处置规模稳定：日投加200t纺织碎纺替代燃料、200t含水率40%市政污泥；无固废掺烧时熟料产能5000t/d，协同处置工况下实际产量仅4500t/d，烧成系统热工失衡明显。

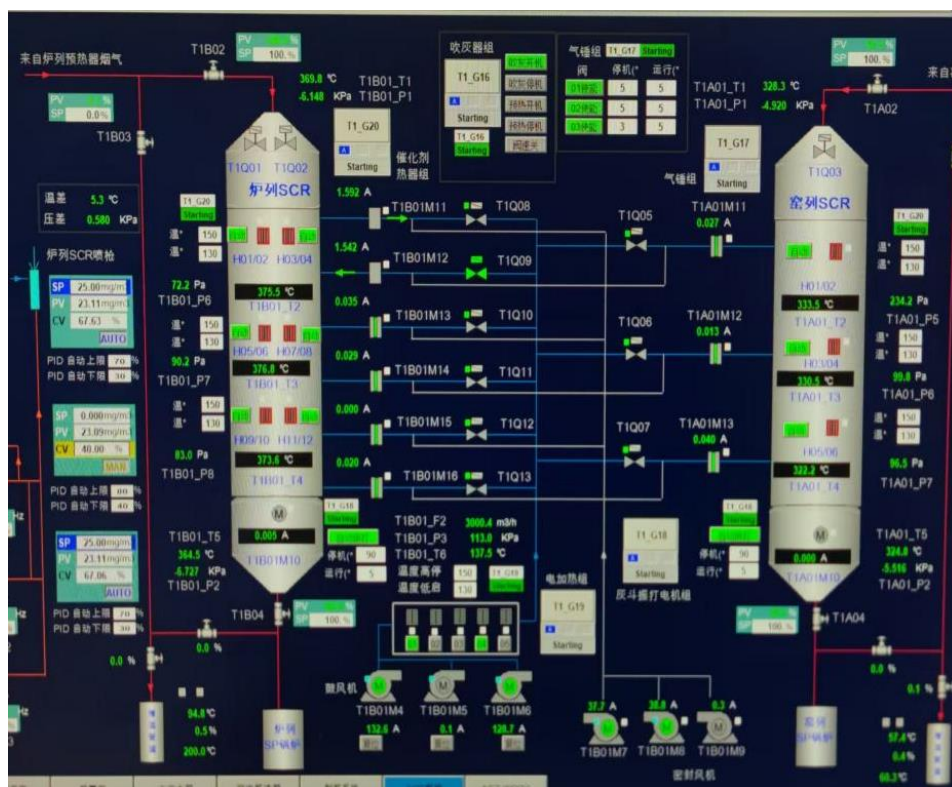


图1 SCR脱硝系统监控界面

### 1.2 SCR 催化剂挂灰故障直观特征

- (1) 停窑检查结果显示催化剂积灰具备极强特异性；
- (2) 催化剂上表面迎风面洁净，蜂窝孔道通畅，无明显粉尘附着；
- (3) 催化剂第一层下表面（烟气出口侧）大面积覆盖灰白色板结灰层，堵塞蜂窝孔道流通截面；
- (4) SCR催化剂底部第一层挂灰厚度、板结程度远重第二层和第三层；
- (5) 常规耙式吹灰无法清除催化剂灰层，停机人工清理工作量大，频繁影响生产线连续运行。



图2 催化剂上下表面对比实拍

### 1.3 C1 出口 CO 长期超标运行特征

自加大处理市政污泥和替代燃料量，生产线2025-2026年在线监测数据显示，预热器C1出口CO浓度均值10000ppm，波动幅度大；行业正常运行工况CO控制均值 $\leq 1500$ ppm，珠水项目实际运行值超出行业均值限值5倍以上，烟气持续处于强还原气氛。



图3 C1出口CO长期趋势曲线

## 2 挂灰样品理化与粒径试验分析

分别采集窑列、炉列第一层催化剂底部挂灰样品开展含水率、烧失量、XRF元素组分、激光粒度测试，对比两组样品差异，明确粘性灰层物质基础。

### 2.1 基础物理指标

(1) 含水率：105℃烘干测试，窑列灰0.27%，炉列灰0.25%，烟气无游离液态水，水分并非板结主要诱因；

(2) 烧失量LOI：窑列灰平均32.03%，炉列灰平均30.07%，高烧失量代表灰中残留大量未燃有机质、碳酸盐、硫酸盐分解产物，是粉尘团聚粘结的有机载体。

### 2.2 XRF 化学成分检测结果

表1 窑列、炉列挂灰关键有害组分对比（质量分数）

| 组分                | 窑列挂灰   | 炉列挂灰   | 差异影响分析                     |
|-------------------|--------|--------|----------------------------|
| Cl <sup>-</sup>   | 1.62%  | 0.5%   | 窑列氯离子富集程度是炉列3倍以上，易生成低熔点氯化盐 |
| K <sub>2</sub> O  | 1.47%  | 1.06%  | 钾盐降低飞灰熔融温度，形成粘性共熔体         |
| Na <sub>2</sub> O | 0.11%  | 0.06%  | 碱金属协同加剧粉尘粘结                |
| SO <sub>3</sub>   | 3.19%  | 9.97%  | 炉列硫组分更高，硫酸氢铵生成潜力更大         |
| CaO               | 43.53% | 44.32% | 高钙基粉尘为骨架载体，吸附盐碱熔融物         |
| 有机物               | 0.1%   | 4.4%   | 炉列有机物多于炉列                  |

窑列系统氯离子、碱金属循环富集显著，是其挂灰更严重的核心物质诱因；炉列烟气硫含量更高，硫酸氢铵粘结作用更强。同时生产线C5热生料氯离子均值1.62%，原料、污泥带入氯元素在预热器内持续循环富集，不断向SCR烟气输送粘性物质。

### 2.3 粉尘粒径分布特征

激光粒度仪检测结果：窑列、炉列挂灰中粒径 $<6\mu\text{m}$ 超细粉尘占比均超80%；窑列灰体积平均粒径VMD=8 $\mu\text{m}$ ，炉列灰VMD=11.30 $\mu\text{m}$ 。超细粉尘比表面积大，极易吸附气态碱金属盐、硫酸氢铵、未燃有机物，形成高粘性团聚颗粒，且不易被烟气高速气流吹扫脱离催化剂表面。

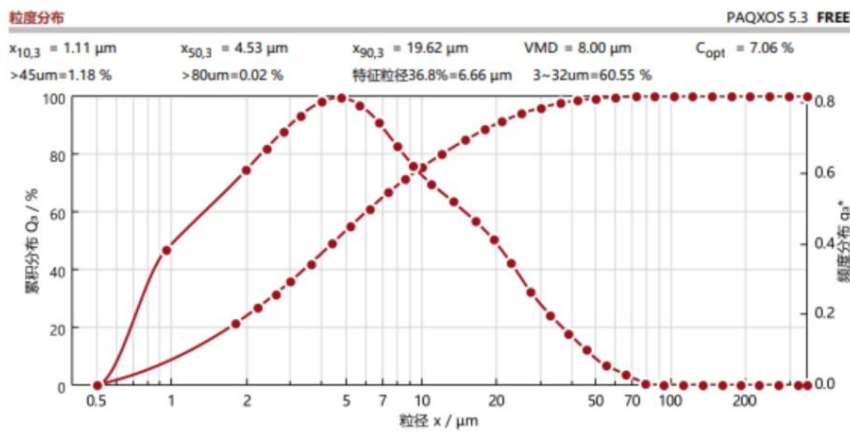


图4 挂灰粒径分布

## 3 高 CO 协同碱氯超细粉尘诱发下表面积灰堵塞耦合机理

### 3.1 污泥与纺织替代燃料造成 C1 出口 CO 超标的根本原因

（1）市政污泥含水40%，入分解炉后水分蒸发大量吸热，局部温度骤降，煤粉、纺织燃料着火延迟，局部缺氧不完全燃烧；

（2）纺织碎纺替代燃料以化纤、棉织物为主，挥发分极高，入炉瞬间大量释放可燃气体，分解炉原有配风体系无法匹配瞬时挥发分负荷，形成局部缺氧区，大量CO、未燃碳氢产物随烟气上行；

（3）项目分解炉炉容偏小，现有燃料供给量下固废燃尽行程不足，未燃组分无法在预热器

各级充分二次氧化，造成C1出口CO超标；

（4）污泥和替代燃料投料不均衡，波动大，造成系统通风量匹配失衡，燃料与助燃空气混合不均匀，进一步加大C1出口CO超标。

### 3.2 CO在钒钛催化剂表面强放热加剧飞灰熔融粘结

SCR钒钛基催化剂（V2O5-WO3/TiO2）兼具NO<sub>x</sub>还原与CO催化氧化双重活性，300-420℃工况下发生强放热反应，烟气中高浓度CO流经催化剂蜂窝孔道时，孔道内部持续释放大量反应热，局部温度较SCR入口烟气升高50-100℃，现场DCS监测出现第一层催化剂层间温度倒挂现象（如下图第一层催化剂上表面为364.0℃，下面表面为369.3℃）。局部超温飞灰中K、Na、Zn氯化物、硫酸盐熔融状态，固态盐碱转化为液态粘性基质，牢固包裹超细粉尘颗粒，形成具备强附着力的团聚灰团。

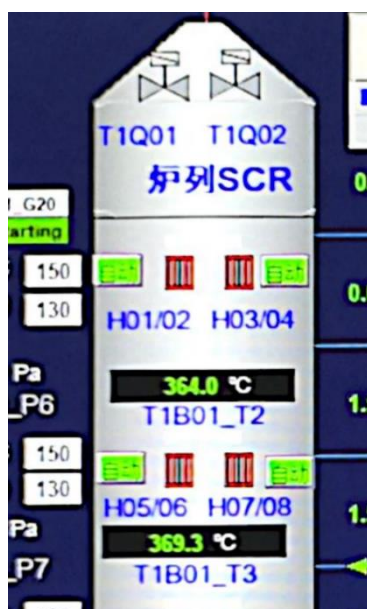


图5 SCR反应器温度监测界面

### 3.3 碱氯循环富集+硫酸氢铵协同强化粉尘粘性

市政污泥中携带的大量氯元素及碱金属元素（K、Na）在预热器内形成氯循环富集。由于该窑列系统未设置旁路放风，Cl<sup>-</sup>在低温区域持续积累，进而生成KCl、NaCl及ZnCl<sub>2</sub>等低熔点共熔物。与此同时，炉列烟气中SO<sub>3</sub>浓度较高，与喷入的NH<sub>3</sub>反应生成硫酸氢铵（ABS）。液态ABS具有强粘附性，可作为粘结剂捕集烟气中的超细粉尘颗粒。此外，未燃尽有机质（高LOI）填充于粉尘层间隙，显著提高灰层结构强度，致使常规吹扫无法有效剥离积灰，随着运行时间的延长，积灰层持续致密化并发生板结硬化。

### 3.4 反应器流场与重力作用造成灰层集中沉积于催化剂下表面

在SCR脱硝系统运行过程中，催化剂蜂窝孔道内的粉尘沉积行为受烟气流动特性与颗粒重力沉降的共同调控。具体而言，烟气自上而下流经催化剂蜂窝孔道时，含尘烟气中的粘性粉尘团

聚体在自身重力作用下持续向下沉降,使孔道出口(即催化剂下表面)成为粉尘自然堆积的主要区域;与此同时,催化剂层底部存在低速涡流区,该区域内烟气流速显著降低,对沉积粉尘的自吹扫能力随之丧失,导致粘性灰团持续滞留并附着于下表面。相比之下,催化剂上表面(迎风面)因烟气流速较高、湍流冲刷作用强烈,粉尘难以稳定沉积,从而形成“上表面洁净、下表面堵塞”的显著差异化积灰特征。随着底部积灰层逐步增厚,烟气流速截面不断缩小,流场畸变程度持续加剧,而低速区的同步扩张进一步加速颗粒沉积,最终形成“堵塞加剧流场恶化、流场恶化加重堵塞”的正反馈恶性循环。

## 4 优化与技改对策

结合现场故障机理、实测数据,从源头燃料管控、烧成系统燃烧优化、有害元素脱除、SCR 系统吹灰改造、运行管控方面提出解决方案。

### 4.1 固废燃料预处理与掺烧负荷管控

在工程对策层面,可从源头减湿、燃料均质化及负荷稳控三个方面实施系统性干预。首先,市政污泥增设深度干化设备,将入炉含水率由40%降至5%以内,以减少水分蒸发吸热所致的局部低温与缺氧区域。其次,通过优化纺织碎纺的破碎筛分工序,严格控制替代燃料的粒径均匀性,避免大块布料瞬时集中释放挥发分,从而抑制燃烧波动。最后,应严格限定协同处置负荷,确保替代燃料的热替代率及污泥处置量保持稳定,严禁短时间内大幅提升固废喂料量<sup>[4]</sup>。

### 4.2 分解炉燃烧系统技改,控制 C1 出口 CO<1500ppm

在工程改造与运行优化层面,可从流场重构、燃料预处置及燃烧气氛精准调控三个方面实施系统性改进。首先,对分解炉进行扩容改造并增设旋流装置,以增强助燃空气与燃料气流的混合强度,消除局部还原性区域,促进可燃组分充分燃烧。其次,新增替代燃料独立气化炉,将纺织废料先经预气化处理后再送入分解炉,以延长可燃组分的燃尽时间,从而有效适配现有处置规模及分解炉偏小的容积条件。此外,应优化窑尾氧含量管控区间,将预热器出口O<sub>2</sub>体积分数稳定控制在2%~3%,确保CO得以充分二次氧化,从源头抑制还原性气氛的生成。

### 4.3 窑列增设旁路放风,减少碱氯循环富集<sup>[2][3]</sup>

窑列C5热生料氯离子最高达1.62%,氯持续循环是窑列挂灰更严重的核心诱因,增设窑尾旁路放风装置,持续排出含高氯、高碱金属飞灰,降低预热器及SCR烟气中氯化盐浓度,从源头减少低熔点粘性前驱物生成。

### 4.4 SCR 脱硝系统抗堵配套优化

在设备升级与运行管控层面,可从强化底部清灰、优化反应器流场及精准抑制ABS生成三个方面实施系统化对策。首先,对清灰系统进行升级改造,在催化剂下表面增设声波脉冲吹灰装

置<sup>[1]</sup>,与上层现有耙式吹灰器形成分层组合式清灰模式,重点消除底部低速区积灰死角,提升催化剂层整体的自清洁能力。其次,开展反应器内流场的CFD数值模拟,依据模拟结果优化内部导流板的结构布置,以改善烟气速度分布的均匀性,增强对催化剂壁面的冲刷效果。此外,应精准管控SNCR系统的喷氨量,将氨逃逸体积分数稳定控制在5ppm以内,从源头上减少硫酸氢铵(ABS)的生成量,降低ABS作为粘结剂引发的粉尘黏附和积灰风险。

### 4.5 建立多参数联动预警运维体系

搭建协同处置工况专属预警模型,实时监控C1出口CO、烟气温度、SCR层间压差、氨逃逸、C5热生料氯碱含量;CO浓度、O<sub>2</sub>浓度、系统压差超标时自动下调固废掺烧量、提高氧化风配比。

## 5 结论

(1)广州珠江水泥协同处置40%含水率市政污泥、纺织碎纺替代燃料后,分解炉炉容不足、配风失衡引发不完全燃烧,C1出口CO长期维持10000ppm强还原气氛;CO在钒钛SCR催化剂表面氧化放热,造成孔道局部超温,是飞灰盐碱熔融粘结的核心热力诱因。

(2)挂灰以6 μm以下超细粉尘为主,窑列烟气Cl<sup>-</sup>、K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O富集,炉列烟气SO<sub>3</sub>、未燃有机质含量偏高,碱氯低熔点共熔物与硫酸氢铵共同形成粘性基质,捕获超细粉尘形成易团聚灰团。

(3)烟气自上而下流动的重力效应与反应器底部低速涡流区耦合,粉尘仅在催化剂下表面持续沉积,形成“上表面洁净、下表层严重堵灰”的故障,窑列因氯循环富集堵塞程度显著高于炉列。

(4)通过污泥深度干化、增设替代燃料气化炉、窑列旁路放风、分解炉风场优化、SCR吹灰技改与在线联动管控等措施,可将C1出口CO稳定控制1500ppm以内,切断碱氯循环富集,从根本上解决催化剂下表面挂灰堵塞问题,保障协同处置工况下SCR系统长周期超低排放稳定运行。

### 参考文献:

- [1] 李祥超,周金波.水泥工业高温高尘 SCR 脱硝催化剂堵塞机理及改造措施[J].中国水泥,2022(12):45-48.
- [2] 张磊,王军.水泥窑协同处置污泥对预热器及 SCR 系统的影响研究[J].环境工程,2024,42(03):189-194.
- [3] 黄俊,陈刚.市政污泥掺烧下水泥窑氯循环富集规律研究[J].硅酸盐通报,2025,44(04):1362-1369.
- [4] 吴斌.纺织类替代燃料在水泥分解炉内燃烧特性及不完全燃烧控制[J].水泥,2024(08):28-32.

# 提升机料斗自动生产线开发与应用

杨军

(中建材(合肥)机电工程技术有限公司, 安徽 合肥 231600)

## 摘要:

针对斗式提升机料斗型号多样、手工生产效率低、质量不稳定的问题,本文设计了一种兼容多型号、换型便捷的料斗自动拼装焊接生产线。该生产线集成机器人、变位机、视觉识别及专用夹具,实现了料斗零部件上料、拼装点对、满焊焊接及卸料全工序自动化;通过基于不同型号料斗生产节拍的工位配置优化,大幅降低了设备等待时间,提升了生产连续性。工作人员仅需进行设备监控与调整,显著降低了劳动强度及安全风险,满足现代制造业规模化、高精度生产需求。

**关键词:** 提升机料斗; 自动拼装焊接; 生产线设计; 多型号兼容; 生产效率优化

## 0 引言

斗式提升机作为粉粒状物料垂直输送的核心装备,广泛应用于水泥、化工等行业,其中料斗是直接承载物料的关键部件,其制造质量直接影响提升机的运行稳定性与使用寿命。料斗主要由薄钢板经折弯、成型、焊接等工序制成,因工业场景需求差异,存在多种规格型号,且焊缝质量要求严格。目前国内料斗制造多依赖手工操作,受人为因素影响大,存在产品一致性差、生产效率低、安全隐患突出等问题,已难以适应规模化生产需求。

自动化生产线通过按预设程序自动完成工艺过程,具有生产连续化、操作标准化、效率高效化的特点,其应用需满足产品产量稳定、工艺成熟的前提——斗式提升机料斗生产已具备上述条件。为此,本文设计了一套多型号兼容的料斗自动拼装焊接生产线,重点解决手工生产痛点,实现焊接工序的自动化、智能化升级<sup>[1-2]</sup>。

## 1 料斗结构与制作工艺

### 1.1 结构特点

提升机料斗采用 4~5mm 厚薄钢板焊接成型,核心结构由斗体、端板、加强筋等部件组成(如图 1 所示),不同型号料斗的外形轮廓一致,仅长宽高尺寸存在差异,为生产线多型号兼容设计提供了结构基础。



图 1 提升机各型号料斗示意图

## 1.2 制作工艺流程

料斗完整制作流程包含下料、压型、折弯、拼焊点对、满焊五个核心工序，其中点焊成型及满焊工序是影响产品质量的关键环节，也是本次自动化生产线的设计重点，工艺流程如图 2 所示。（注：左图中展示料斗核心组成部件及装配关系，适用于主流规格型号。右图箭头方向为工序流转顺序，虚线框内为本次自动化生产线覆盖的核心工序）

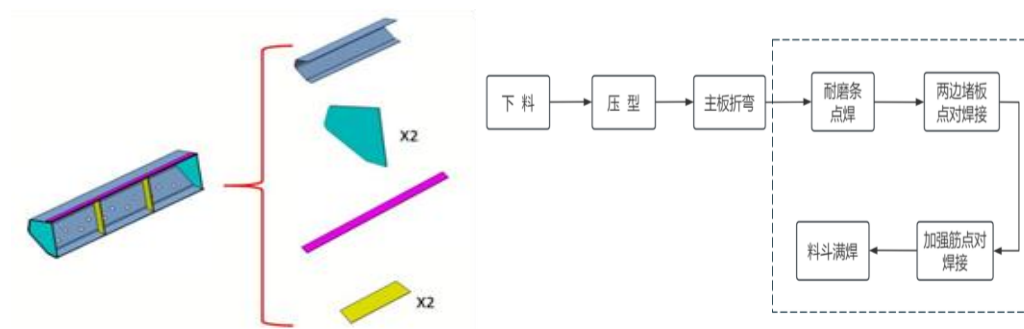


图 2 提升机料斗部件装配关系及加工工序

## 2 生产线设计

### 2.1 生产节拍分析

为优化生产线工位配置，需先明确不同类型料斗的核心工序耗时。经测算各型料斗的焊接时间与拼装点对时间，所有型号料斗的焊接时间均为拼装点对时间的 2.1~3.0 倍，焊接工序为生产瓶颈，需通过多工位设计提升整体效率。

表 1 各型号料斗焊接与拼装时间对比

|             | 315型料斗 | 400型料斗 | 500型料斗 | 630型料斗 | 800型料斗 | 800H型料斗 | 1000型料斗 | 1250型料斗 | 1400型料斗 | 1600型料斗 | 2000型料斗 |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 焊缝长度 (mm)   | 2501.4 | 2911.4 | 3111.4 | 3740.8 | 4080.8 | 4491    | 5193    | 5693    | 6447.8  | 7519.8  | 7895.8  |
| 焊接时间 (分钟)   | 8.3    | 9.7    | 10.4   | 12.5   | 13.6   | 15      | 17.3    | 19      | 21.5    | 23.9    | 26.3    |
| 拼装点对时间 (分钟) | 4      | 4      | 4      | 5      | 5      | 5       | 6       | 6.5     | 7.5     | 8       | 9       |
| 焊接与拼装时间比值   | 2.1    | 2.4    | 2.6    | 2.5    | 2.7    | 3.0     | 2.9     | 2.9     | 2.9     | 3.0     | 2.9     |

注：数据基于实际焊接工艺参数（焊接电流 180-200A，焊缝高度 4mm），人工焊接实测。

## 2.2 总体设计

基于前期生产节拍分析，焊接工序为生产线效率瓶颈，因此本生产线以多型号兼容、全流程自动化、高效率连续生产为总体目标，集成视觉识别、工业机器人、伺服变位机与专用柔性夹具，实现自动上料、拼装点对、自动满焊、自动卸料四大核心功能。为平衡工序节拍、提升设备利用率，系统采用 1 台搬运机器人+2 个拼装焊接工位+2 台焊接机器人的配置模式。生产流程（如图 3 所示）：搬运机器人由送料区抓取料斗零部件，送至第一工位完成定位夹紧与拼装点焊；第一工位进入满焊工序时，搬运机器人同步完成第二工位上料与点对；待第一工位焊接完成后，机器人依次卸载两工位成品，循环实现连续作业。生产线采用侧边式上下料布局（如图 4 所示），AGV 物流通道与设备作业区物理分隔，显著提升物流效率与作业安全性；料盘上方设置视觉识别系统，可实时校验物料型号，有效避免错料、混料问题。

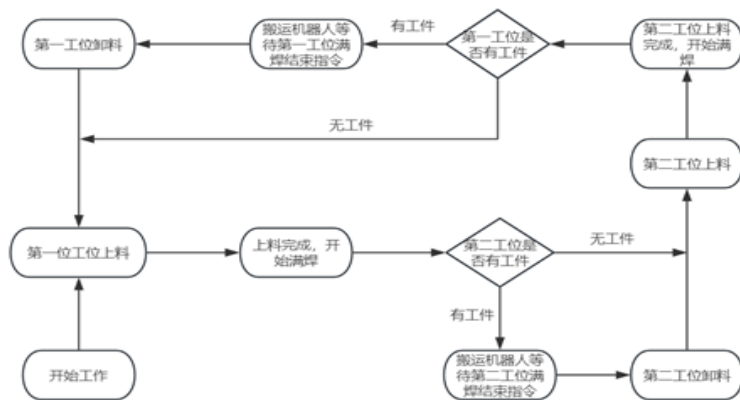


图 3 料斗自动生产线生产流程图

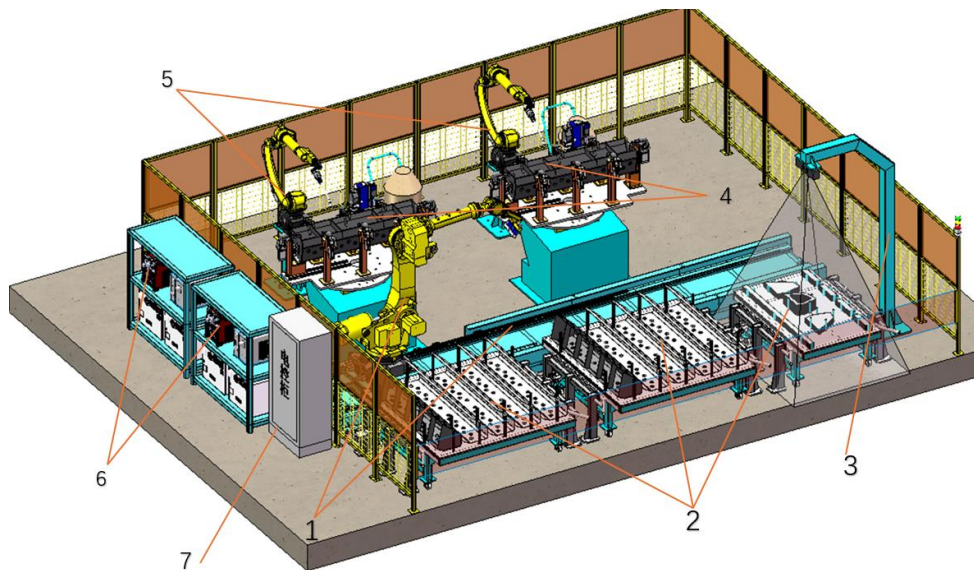


图 4 料斗自动生产线布局图

注： 1-搬运机器人及地轨；2-AGV 送料区；3-视觉系统；4-拼装焊接工位（2 个）；5-焊接机器人（2 台）；6-焊接电源；7-控制系统柜。

## 2.3 核心装备设计与选型

### 2.3.1 满焊机器人及变位机

为满足全型号料斗焊缝可达性与焊接工艺要求（电流 180~200A、焊缝高度 4mm），结合 FANUC ROBOGUIDE 仿真验证，选用 FANUC M-10iD/8L 焊接机器人，其最大工作半径 2032mm、重复定位精度 $\pm 0.02\text{mm}$ ，可完整覆盖各型号料斗焊缝；

采用两轴座式变位机，承载能力 $\geq 100\text{kg}$ ，两轴均采用 FANUC  $\alpha\text{F12/3000F}$  伺服电机驱动，额定扭矩  $3.82\text{N}\cdot\text{m}$ ，最大扭矩  $11.5\text{N}\cdot\text{m}$ ，通过机器人控制器直接控制，实现 $\pm 180^\circ$ 旋转与 $\pm 90^\circ$ 翻转，确保复杂焊缝处于最佳焊接姿态；变位机最大负载力矩  $M=F\times L=100\text{kg}\times 9.8\text{m/s}^2\times 0.5\text{m}=490\text{N}\cdot\text{m}$ ，选用伺服电机+精密减速机组合传动方式，额定力矩  $600\text{N}\cdot\text{m}$ ，安全系数 1.22，满足强度要求。

### 2.3.2 搬运机器人及地轨

料斗成品最大重量 90kg，结合抓手重量 30kg 与 1.5 倍安全系数，机器人所需承载能力 $\geq 180\text{kg}$ ，作业半径需 $\geq 2500\text{mm}$ 。据此选用 FANUC R-2000iC/210F 搬运机器人，手腕承载 210kg、最大工作半径 2655mm，满足负载与覆盖范围要求；

两个焊接工位间距 4.5 米，配置 7.5m 直线地轨，导轨精度等级 H7，采用 FANUC  $\alpha\text{F50/4000}$  伺服电机+精密减速机驱动，定位精度  $\pm 0.05\text{mm}$ ，作为机器人外部轴与本体联动，实现多工位覆盖<sup>[3]</sup>；地轨运行速度  $0.5\text{m/s}$ ，加速度  $0.3\text{m/s}^2$ ，惯性力  $F=ma=210\text{kg}\times 0.3\text{m/s}^2=63\text{N}$ ，导轨摩擦力 $\leq 50\text{N}$ ，驱动电机输出扭矩满足运行需求。

### 2.3.3 焊接电源及焊枪

基于焊接工艺参数（电流 180~200A），选用林肯 E350 型弧焊电源，内置焊接专家库，支持一元化调节，与 FANUC 机器人通讯延迟 $\leq 10\text{ms}$ ，稳定性强；配置松下 YX-09KGC2 冷却循环水箱，控温范围  $5\sim 35^\circ\text{C}$ ，水流量 $\geq 5\text{L/min}$ ，避免大电流焊接时焊枪过热。选用德国宾采尔 W400 型  $45^\circ$  水冷焊枪，适配 200A 大电流连续焊接；通过仿真分析发现，料斗端板与加强筋位置焊缝焊接时存在干涉（如图 5、图 6 所示），故将枪管加长 100mm（优化后如图 7 所示），解决干涉问题，确保焊缝可达性<sup>[4]</sup>。

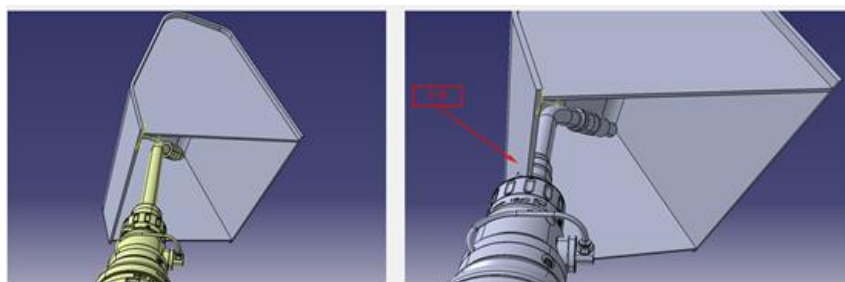


图 5 料斗端板焊接时干涉

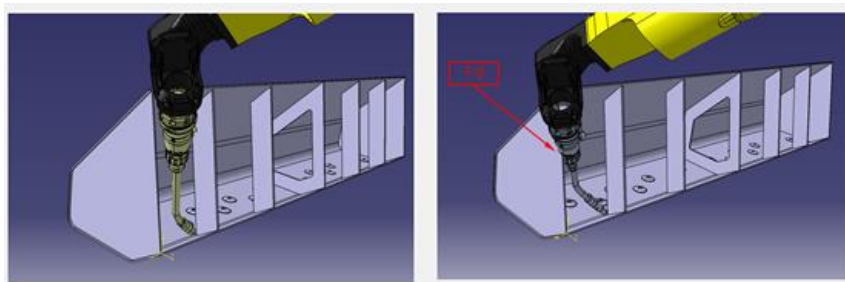


图 6 料斗加强筋焊接时干涉

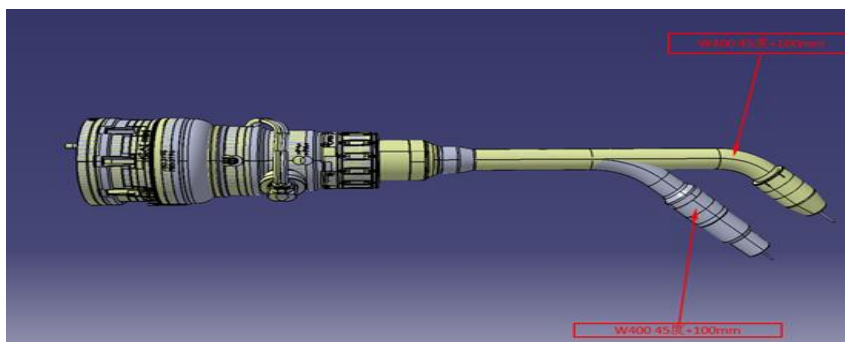


图 7 焊枪加长 100mm

#### 2.3.4 专用夹具设计

夹具以多型号兼容、快速换型、高精度定位为设计核心。基于料斗成型角度一致的结构共性，采用仿形定位结构，长度方向（335~1820mm）与宽度方向（220~412mm）由伺服电机驱动滚珠丝杠调节，覆盖全规格型号，定位精度 $\pm 0.1\text{mm}$ 。夹具与变位机采用定位销+快装机构连接，配合气电快插接头，换型时间 $\leq 5$ 分钟（如图 8 所示）；夹具本体采用 Q235 钢板焊接成型，焊接后进行整体退火处理（温度  $650^{\circ}\text{C}$ ，保温 2h），消除内应力；关键定位面经铣削加工，平面度 $\leq 0.03\text{mm}$ <sup>[2,4]</sup>，确保焊接过程中工件无变形。

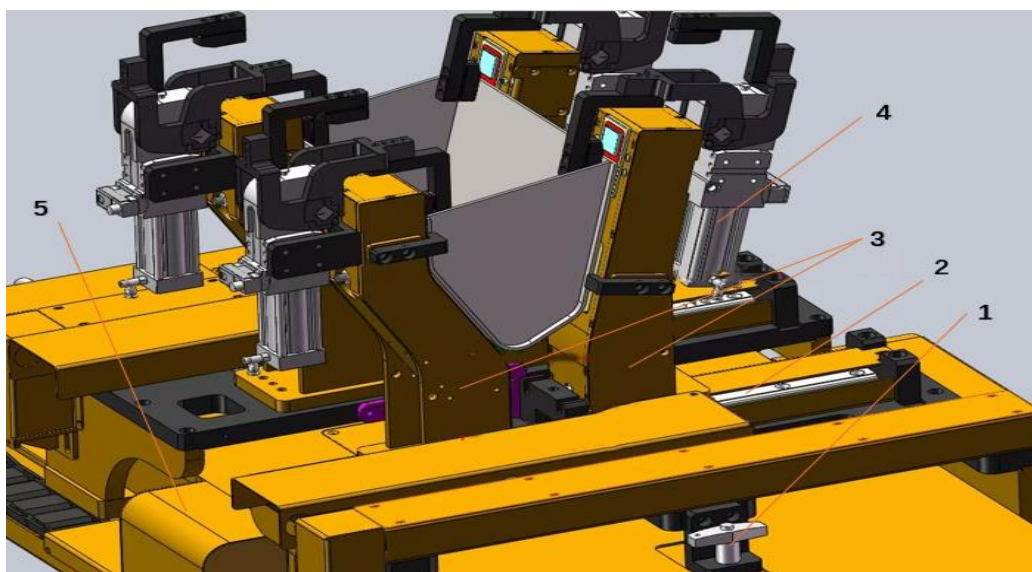


图 8 专用夹具设计图

注：1 - 快装定位销；2 - Y 轴伺服调节机构；3 - 仿形定位块；4 - 夹紧气缸；5 - X 轴伺服调整机构。

### 3 应用效果与数据对比

#### 3.1 核心性能指标

生产线运行后,实现料斗零部件上料、拼装、满焊、卸件全工序自动化,焊接可达率 100%,多型号换型便捷,换型时间 $\leq 5$  分钟,兼容所有主流规格料斗;焊缝质量检测采用外观目视检测,依据产品焊接技术标准判定缺陷,单件任意焊缝存在缺陷即判定整件不合格;设备稳定生产后,通过随机抽取连续 3 天手工焊接、自动化焊接生产检测记录对比,3 天总产量料斗的焊缝质量一次性合格率从手工生产的 85% 提升至 99.2%。

#### 3.2 效率与成本对比

表 2 手工生产与自动化生产线效果对比(以 1250 型料斗为例)

| 对比项目              | 手工生产  | 自动化生产线 | 提升幅度   |
|-------------------|-------|--------|--------|
| 单件生产周期(分钟/只)      | 25.5  | 13.2   | 48.24% |
| 日均产量(只/天, 8h 工作制) | 18.8  | 36.4   | 93.6%  |
| 单台人工成本(元/只)       | 23.94 | 8.24   | 65.58% |
| 安全事故发生率           | 0.08% | 0      | 100%   |

### 4 结束语

本文所设计的提升机料斗自动拼装焊接生产线已经投入使用,有效破解了传统手工生产模式效率低下、质量波动大、安全风险高的行业痛点,通过多型号兼容设计、工位节拍优化与智能装备集成,实现了料斗焊接制造全流程自动化与高效化。该生产线的成功开发与应用,不仅为斗式提升机关键部件的规模化、高精度生产提供了成熟解决方案,也为建材、化工等相关装备制造领域的焊接自动化升级提供了可复制、可推广的技术思路。随着智能制造技术的持续迭代,后续可通过与 RGV 小车、智能仓储系统联动,将下料、压型、折弯等前道工序与本生产线串联,构建完整的料斗智能化生产体系;同时可引入焊缝在线检测系统,实现质量闭环控制<sup>[1]</sup>,构建全流程智能化料斗制造体系,持续推动装备制造行业向高效、智能、绿色方向转型升级。

#### 参考文献:

- [1] 王健.自动化焊接生产线的设计与应用[J].焊接技术,2020,49(5):78-81.
- [2] 李刚.多品种工件焊接机器人工作站的设计[J].机械设计与制造,2019(8):263-265.
- [3] FANUC Robotics. FANUC M-10iD/8L 机器人技术手册[Z].2018.
- [4] 中国机械工程学会焊接学会.焊手册:第3卷 焊接结构[M].北京:机械工业出版社,2017.

# 工业煤粉计量系统工艺装备调研与思考

唐维贤<sup>1</sup> 杨勇<sup>1</sup> 李圣黄<sup>1</sup>

(1. 中建材(合肥)机电工程技术有限公司, 安徽 合肥 230051)

## 摘要:

煤粉是水泥、电力、煤化工、钢铁等行业的重要燃料与原料,其计量精度影响工业现场的高效生产、能源损耗和低碳排放。通过对水泥建材、煤制油、火力发电等行业中煤粉计量系统进行综合调研,系统分析不同计量工艺及装备的技术特点、应用现状及存在问题,为开发大流量煤粉计量系统的工艺设计提供理论支撑与实践参考。同时根据不同工艺场景提出针对性解决方案,助力提升煤粉计量的精度、稳定性及智能化水平,满足现代工业绿色生产与高效运营的需求。

**关键词:** 煤粉计量系统; 科氏力秤; 转子秤; 水泥窑; 煤制油

## 0 引言

煤粉的精准计量可提升燃烧效率、降低能耗、减少污染物排放,保障生产稳定<sup>[1]</sup>,受煤粉物性及高温、高压、高粉尘等工况影响,各行业对煤粉计量系统要求不一<sup>[1-2]</sup>。

水泥行业煤粉计量偏差会影响熟料质量、热工工况并加大氮氧化物排放<sup>[3-4]</sup>;煤制油领域计量精度关乎气化效率与油品转化率,高压、防爆工况提升了技术难度;火电锅炉燃烧效率与计量精度直接相关<sup>[5]</sup>;传统的煤粉计量方式(如容积式给料、皮带秤等)易受环境、设备磨损及物料特性影响,无法达到 $\pm 0.5\%$ 以内的精度与稳定性要求<sup>[1-3]</sup>。研发适配不同工况的专用计量系统,结合智能控制、在线校准与抗干扰技术,是提升工业能效和自动化水平的关键。

## 1 水泥窑煤粉计量系统

水泥窑煤粉计量系统是新型干法水泥生产线的核心设备之一,用于精准计量、输送窑用煤粉,其运行性能直接决定熟料品质、生产能耗及污染物排放水平。水泥窑所用煤粉颗粒偏粗( $80\mu\text{m}$  筛余 $<12\%$ )、流动性良好,但水分含量 $>5\%$ 时易结块,会对计量稳定性造成影响。

### 1.1 技术要求

(1) 水泥窑煤粉计量系统小量程计量精度需达 $\pm 0.5\%$ ,且长期计量偏差需可控,防止熟料质量劣化、 $\text{NO}_x$ 排放超标<sup>[4,6]</sup>;

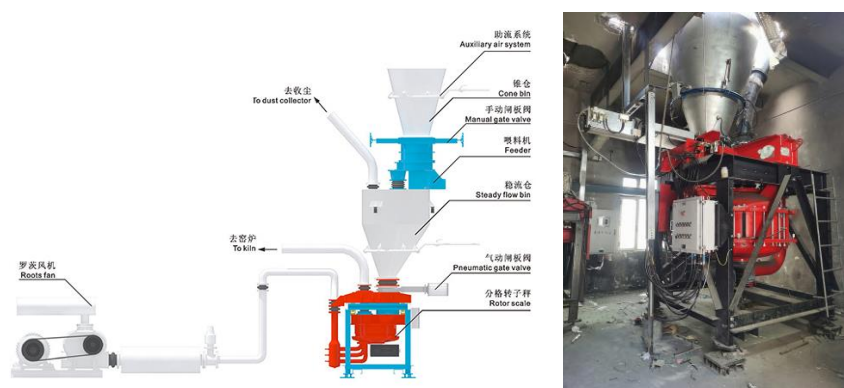
(2) 现场工况温度高,煤粉仓与输送管道局部温度可达 $120\sim 200^\circ\text{C}$ ,粉尘浓度最高达 $1000\text{g}/\text{m}^3$ <sup>[7]</sup>,设备需具备良好的防堵与耐磨性能<sup>[3]</sup>;

(3) 系统需实现连续稳定喂煤,适配回转窑、分解炉热工工况,保证低负荷( $<30\%$  额

定能力)下计量稳定,规避窑况波动造成的熟料质量缺陷。

## 1.2 计量方案

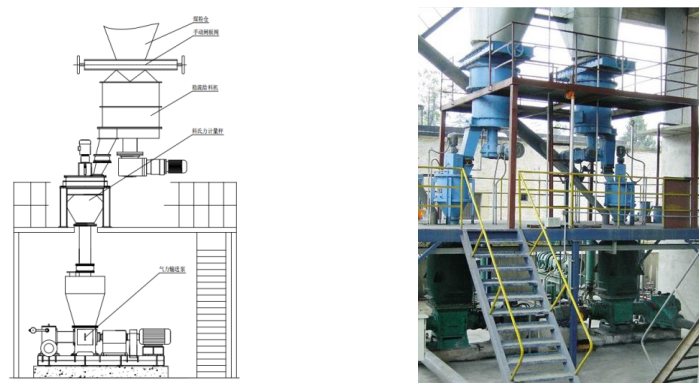
在水泥窑煤粉计量系统中,主要采用的方案有转子秤重力称重或者科里奥利计量系统。转子秤重力称重系统由煤储仓(含仓底助流装置)、稳流给料机、煤粉缓冲仓、转子秤及气力输送装置组成。煤粉经煤储仓、稳流给料机进入缓冲仓,由转子秤计量后,再由气力输送装置输送至回转窑。煤粉计量采用的转子秤多为分格转子式转子秤,其设备主体由穿过进出料口轴线的吊架吊起,轴线一侧设有荷重传感器,当装载煤粉的扇区经过称量区时,荷重传感器可实时检测该扇区内煤粉的重量,从而运算得出瞬时流量,再通过控制变频器改变电机转速,实现喂料量调节。



a 转子秤计量系统工艺图<sup>[8]</sup>

b 转子秤计量系统实景

图 1 转子秤计量系统



a 科里奥利计量秤系统

b 科里奥利计量秤系统实景

图 2 科里奥利计量秤系统

科里奥利计量系统由煤储仓(含仓底助流装置)、稳流给料机、科里奥利计量秤和气力输送装置组成。煤粉经煤储仓、稳流给料机进入科里奥利秤计量,再由气力输送装置输送至回转窑。科里奥利秤内设有高速旋转的测量盘,物料进入秤体后被测量叶片捕获,在离心力的作用下沿叶片向外缘运动离开测量盘,在此过程中,测量盘转轴上会产生一跟物料流量向对应的反作用力矩,测量该力矩大小并进行核算即可得到瞬时流量。图 1、图 2 为两种计量方式的工艺流程对比图。

表 1 转子秤计量系统以及科里奥利计量秤系统对照表

|         | 转子秤重力称重系统                                                                                             | 科里奥利计量秤系统                                                          |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 计量原理    | 重力称重                                                                                                  | 科里奥利力                                                              |
| 能力（t/h） | 0~40                                                                                                  | 0~60                                                               |
| 特点      | 自带锁风，抗干扰性强，易标定，长期计量稳定                                                                                 | 安装空间紧凑，瞬时计量精确度高，能耗低，使用成本低。                                         |
| 常见问题    | ①煤粉水分>5%时易结皮附着，造成料仓下料冲料，影响计量精度；<br>②转子与模板间隙偏大>0.2 mm 会引发窜风问题，阻碍煤粉下落，造成蓬仓、断料故障；<br>③收尘失效导致气体阻力使煤粉仓不下料。 | ①煤粉水分>5%时易结皮附着，造成料仓下料冲料，影响计量精度；<br>②稳流给料机转子密封易磨损，导致串料冲料，无法控制料流稳定性。 |

注：转子秤资料引用自文献<sup>[9-10]</sup>，科里奥利秤资料来源文献<sup>[11]</sup>及波特兰应用情况。

2 煤制油煤粉计量系统

煤制油煤粉计量系统是煤制油装置安全、高效、稳定运行的关键。系统能否精准调控煤粉喂料量，决定了煤粉与催化剂配比是否准确、合成气的组分是否稳定、油品品质与生产效率能否提升，同时对优化煤炭利用、降低能耗与生产成本有重要意义<sup>[12]</sup>。

2.1 技术要求

- （1）煤制油煤粉计量要求系统长期满负荷连续运行，零点漂移、计量偏差可控，具备在线标定功能，支持 70%~110%负荷区间稳定调节，无堵料、断料、冲料异常工况；
- （2）系统动态瞬时计量精度在±0.5%以内，累计计量误差满足工艺生产；
- （3）系统需实现连续稳定喂煤，全程物料输送均匀、流量无大幅波动，稳态喂料控制精度达±1%；

2.2 计量方案

在煤制油煤粉计量系统中，多采用科里奥利力秤计量方案，依靠科里奥利效应直接测量气体、液体及煤粉等颗粒物料的质量流量。与水泥窑煤粉计量的区别在于，煤制油工况煤粉输送量大、粒度细，普通稳流给料机不再适用，多搭配旋转给料阀、螺旋给料机或流量阀组使用。该系统可直接计量质量流量，能规避密度、温度、压力波动带来的测量误差。煤制油计量系统由煤储仓、螺旋给料机、科里奥利计量秤及下级输送设备组成。煤粉从库侧出料，经仓口振动装置助流，进入科里奥利计量秤称重后，由斜槽送至下级设备。系统工艺流程如图 2 所示。

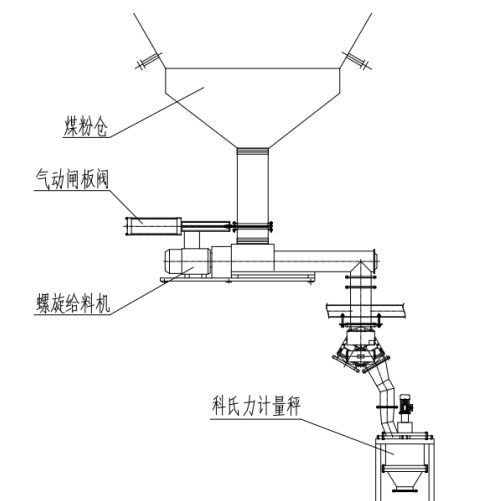


图 3 煤制油煤粉计量系统工艺流程



图 4 煤制油煤粉计量系统现场

### 2.3 设备使用情况

通过对某煤制油公司的进口科里奥利计量系统进行现场调研，图 4 为煤制油煤粉计量系统现场。系统长期处于高限运行状态，频繁突破量程上限引发联锁停机，严重制约了煤直接液化装置的长周期安全稳定运行。现场煤粉计量系统在多次改造后仍然存在以下问题：

- (1) 计量系统量程较小，无法满足实际生产要求；
- (2) 精度偏低，误差高于 5%；
- (3) 物料输送不稳定，易出现断料、冲料问题，影响生产；
- (4) 标定困难，计量转子易故障停转，设备无法正常启动，二次标定设置繁琐，维护量大，不利于生产实际操作。

鉴于以上，该煤粉计量系统无法保障装置长周期稳定运行，煤粉投料量控制失准，油煤浆配比、浓度难以达标，能耗与生产成本偏高，液化油收率也无法精准核算。

## 3 火力发电煤粉计量系统

火力发电煤粉计量系统需要精准调控煤粉给料量，优化风煤配比，提升燃烧效率、降低污染物排放，同时减少燃料损耗、压缩运营成本；煤粉的精准给料还能稳定锅炉工况，防止结焦积灰，保障设备安全运行，是火电高效、环保、经济运行的重要支撑。

### 3.1 技术要求

- (1) 计量精度需达到  $\pm 0.5\% \sim 1.0\%$ ，机组调峰时需快速响应负荷变化，计量偏差过大会使锅炉热损失增加  $0.5\% \sim 1\%$ ，还会造成氮氧化物排放超标；
- (2) 因煤粉经磨煤机  $80 \sim 100^\circ\text{C}$  高温干燥，设备需具备耐高温能力；
- (3) 给料范围需满足  $200 \sim 5000\text{t/h}$  的工况需求<sup>[13]</sup>。

3.2 计量方案

火电厂主流煤粉计量设备为耐压称重给煤机，该设备常见型号从 GLD800/5.5/S 至 GLD4000/11/B，给料量 800-4000t/h，市场占比超 70%。设备由封闭壳体、皮带输送机、电子皮带秤、入煤口手动闸门、出口锁气器、称重控制显示仪、电控及报警装置组成，安装在煤仓下方，通过溜槽向磨煤机连续输煤。运行中，称重传感器检测煤重，速度传感器监测皮带转速，控制器依据两类信号计算流量，通过控制带速，实现定量给煤。图 5 为耐压称重给煤机实物图。

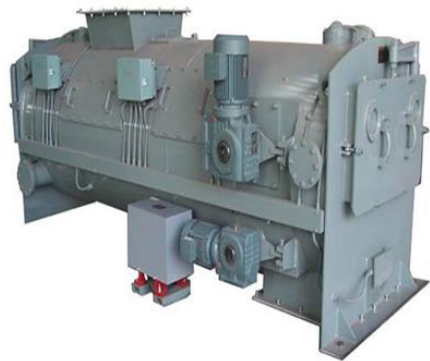


图 5 耐压称重给煤机

该设备实际运行中存在两类常见故障：一是滚筒粘料、张紧器调节不当、落料点偏移、托辊安装偏差等易引发皮带跑偏，造成皮带磨损、输送计量失准，影响设备正常使用；二是称重传感器长期处于高负载、高温、高湿环境，易老化损坏，出现称重偏差、零点漂移等问题。

4 总结

4.1 总结

本次调研针对煤粉计量系统，梳理了该技术在水泥、煤制油、火电行业的应用、工艺、主流设备、运行状况及现存问题，各系统情况对比总结如下表：

表 2 不同煤粉计量系统对照表

|     | 分类        | 能力          | 特点                         | 使用问题                                                          |
|-----|-----------|-------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 水泥窑 | 转子秤计量系统   | 0-40t/h     | 自带锁风、抗干扰性强、易标定、长期计量稳定。     | ①冲料影响计量精度；<br>②转子与模板磨损造成蓬仓、断料故障；<br>③收尘失效导致煤粉仓不下料。            |
|     | 科里奥利计量秤系统 | 0-60t/h     | 安装空间紧凑、瞬时计量精确度高、能耗低、使用成本低。 | ①冲料影响计量精度；<br>②稳流给料机转子密封磨损，导致串料冲料，料流不稳定。<br>③初始标定复杂繁琐。        |
| 煤制油 |           |             |                            | ①量程小，精度偏低，误差高于 5%；<br>②送料不稳定，易断料、冲料；<br>③标定困难，维护量大，不利于生产实际操作。 |
| 火电厂 | 耐压称重给煤机   | 800-4000t/h | 耐压、全封闭、动态测量、定量给煤、产量大       | ①皮带跑偏、磨损，输送计量失准；<br>②称重传感器易老化损坏，出现称重偏差、零点漂移等问题                |

### 4.2 解决方案与建议

#### (1) 水泥窑、煤制油煤粉计量系统

① 优化煤粉仓结构，将仓锥体更换为镜面不锈钢内衬，杜绝煤粉粘附结壁，配套加装环形均匀助流吹气系统；

② 配置专有稳流进料机构，如稳流给料装置和缓冲仓，搭建“储仓-稳流仓-计量秤”三级喂料结构，通过仓重闭环控制恒定料位与仓压，打散结块煤粉，保证入秤煤粉密度、状态均匀稳定；

③ 开发大流量煤粉计量系统（计量能力 $\geq 130\text{t/h}$ ）（主要针对现有煤制油煤粉计量）；

④ 结合煤粉物料特性与后级设备动态波动，优化控制逻辑、适配物料工况，解决传统单一控制模式适配性差、调节滞后、波动超调的问题；

⑤ 配套煤粉计量专有安监防爆系统，定期检测煤粉系统除尘、泄爆、防静电装置及接地电阻，严控系统温度、氧含量，杜绝煤粉堆积、静电积聚引发的安全隐患；

⑥ 提升系统智能化水平，健全联锁预警机制，对断料、堵料、超温超压、流量异常等故障自动报警、调节并触发应急保护；依托运行数据预判设备磨损、结拱堵料隐患，落实预防性运维。

#### (2) 火力发电煤粉计量系统

① 及时清粘料、正落煤点、调张紧校托辊基准，滚筒配人字沟槽包胶+腰鼓形，强化清扫器，加装自动纠偏托辊+跑偏开关联锁，把皮带轨迹锁在中心，消除偏载对称重段受力分布的破坏性干扰；

② 精平安装面配柔性传力，设机械限位防过载；密封防潮，信号缆独立屏蔽单端接地并原理变频动力源，定期进行零点核查、挂码标定、实物校验把漂移锁在可控范围内。

本次调研分析水泥窑、煤制油、火电三大行业煤粉计量工艺装备，各行业需求差异明显：水泥窑注重稳定供料，解决结拱塌料、小流量计量波动；煤制油适配高压密闭工况，对大流量、精度、密封、防爆防静电要求高；火电适配机组宽负荷调峰，重点改善变负荷风粉配比、低流量计量偏差与燃烧不稳问题。行业普遍存在煤粉流动不稳、仓压波动、设备精度衰减、传统控制适配性不足等共性难题。煤粉计量系统将朝着大流量、高精度智能、本质安全、节能低碳方向升级，依托智能算法、数字化监测与模块化装备实现自适应调控、故障预判，提升计量稳定性，削减能耗运维成本，匹配工业绿色智能发展需求。

**参考文献:**

- [1] 王洪磊,郭鑫,张亦凡,等.煤质煤量全面在线检测技术发展现状及应用进展[J].煤炭科学技术,2024,52(2):219-237.
- [2] 姬厚展,高正阳,李永华,等.在线检测中不同形状煤粉颗粒的流动特性[J].中国粉体技术,2023,29(1):1-9.DOI:10.13732/j.issn.1008-5548.2023.01.001.
- [3] 贾桂森.KXT 科氏力秤煤粉计量与控制系统的研究[J].水泥技术,2007,(6):83-85.DOI:10.19698/j.cnki.1001-6171.2007.06.021.
- [4] 朱书骏,朱建国.分解炉空气分级燃烧及 NO<sub>x</sub> 排放特性研究[J].洁净煤技术,2020,26(1):52-58.DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.19112601.
- [5] 张卓林,王孝红,于宏亮.电厂锅炉入炉煤粉计量及优化配风[J].济南大学学报(自然科学版),2013,27(3):279-282.
- [6] 王芯.水泥厂物料的计量[J].新世纪水泥导报,2009,15(4):21-23.
- [7] 何宏涛,彭毅.水泥厂煤粉制备系统袋除尘器的选型及应用[J].中国环保产业,2009,(2):32-37.
- [8] 水泥人网.台泥、南方、西南等 13 条线都用了这个方法,稳产又节煤! [EB/OL]. (2018-04-04) [2026-06-12]. <http://www.cementren.com/2018/0404/56252.html>
- [9] 琚瑞喜.菲斯特煤粉转子秤的使用实践[J].水泥,2020,(9):51-52.DOI:10.13739/j.cnki.cn11-1899/tq.2020.09.019.
- [10] 杨洪伟,琚瑞喜.熟料烧成控制中菲斯特转子秤常见故障分析[J].新世纪水泥导报,2018,24(4):32-34.DOI:10.16008/j.cnki.1008-0473.2018.04.007.
- [11] 陈光华.申克煤粉及生料计量系统工艺设计问题分析[J].水泥,2022,(2):71-74.DOI:10.13739/j.cnki.cn11-1899/tq.2022.02.023.
- [12] 付楚芮.现代煤化工气化能耗评价及节能潜力研究 [J]. 中国煤炭, 2024,50 (8):181-188.
- [13] 国家能源局. DL/T 513-2016 电子称重式给煤机 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.

# 基于第三粉碎理论与易碎性试验的辊压机预测模型

张林飞<sup>1,3</sup>，张杨睿<sup>2,3</sup>，范俊<sup>2,3</sup>，高霖<sup>1,3</sup>

(1. 中建材（合肥）粉体科技装备有限公司，安徽 合肥 230051；

2. 合肥水泥研究设计院有限公司，安徽 合肥 230051；

3. 水泥制造绿色低碳技术安徽省重点实验室，安徽 合肥 230051)

## 摘要：

本文提出一种适用于辊压机粉磨系统的能效预测模型。该模型基于第三粉碎理论，通过易碎性试验获取物料的挤压功指数、比表面积、细度、能耗及产量等关键参数，并与实际生产数据进行关联分析，从而推演出特定工况下的生产指标。该方法可为辊压机等料床粉碎设备的设计选型、效率评估、生产调控及粉磨效率提升提供有效的分析工具。本模型具有试验用料少、操作简便等优点，可作为辊压机智能化控制的核心算法，为解决产能预测困难、试验周期长、生产过程缺乏可靠预测工具等问题，提供了新的研究方法与技术途径。

**关键词：**辊压机；易碎性试验；料床粉碎；闭路循环；预测模型

## 0 引言

以高压料床粉碎理论为基础的辊压机、立式辊磨机等新型节能粉磨技术装备，在推动节能减排与低碳制造方面发挥着重要作用，并广泛应用于水泥、铁矿、钢渣、矿渣、陶瓷等物料的粉磨领域。料床粉碎技术的核心在于依靠颗粒间的应力传递实现粉碎，并在高压下形成料床，进而达到高效节能的目的<sup>[1]</sup>。

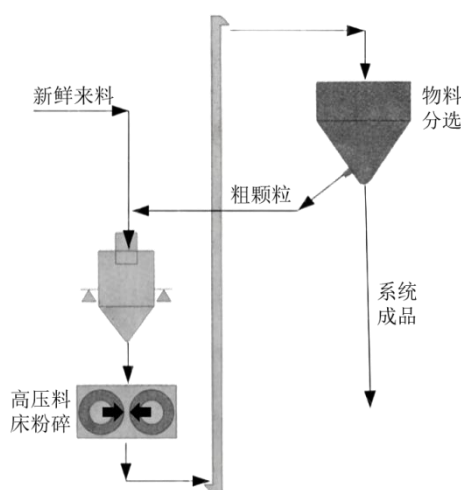


图1 闭路循环工艺流程图

在工业实践中，辊压机等料床粉碎设备普遍采用闭路循环工艺：物料经辊压机挤压后，通

过选粉机等设备进行分选，分选后的粗颗粒返回辊压机再次挤压，合格细粉则进入后续工序，如图 1 所示。当物料级配、设备工况及系统运行参数保持稳定时，该闭路系统将趋于动态平衡。

然而，目前针对辊压机等料床粉碎设备的产能与能效预测仍存在明显不足：

(1) 传统半工业或小型粉磨试验虽能反映一定工况，但流程复杂、物料需求量大（常达数吨）、周期长，难以在项目前期快速推广应用；

(2) 活塞压载试验是研究料床粉碎的基础手段<sup>[2]</sup>，虽具简便性，但单次加载与辊压机连续作业过程尚有一定区别，且并未形成统一试验标准，导致试验结果与生产实际衔接不紧密；

(3) 现有研究多聚焦于粉碎能耗或产品粒度的单向预测，缺乏对设备选型、工艺调控、及系统平衡等多参数协同预测的系统方法，制约了辊压机等料床粉碎装备智能化控制与精细化管理的发展<sup>[3]</sup>。

因此，构建一种试验简便、数据关联性强、适用于实际生产的辊压机预测模型，已成为行业亟需解决的关键问题。

本文在料床粉碎理论与易碎性试验研究基础上，提出一种基于第三粉碎理论的辊压机能耗与产能预测模型。该模型通过易碎性闭路循环试验，获取物料挤压功指数<sup>[4]</sup>、比表面积、细度等关键参数，并与生产数据联动，建立可用于辊压机设计选型、能效评估与生产调控的预测方法，为辊压机系统的智能化运行与工艺优化提供理论工具与工程依据。

## 1 易碎性试验方法

### 1.1 粉碎机理

在水泥厂等粉磨线的建设前期，通常需对物料的可磨性进行初步研究。常见方法包括半工业型或小型粉磨试验、实验室易磨性试验和邦德功指数试验。其中，半工业型试验过程复杂、用料量大、耗时较长，限制了其快速应用；实验室易磨性试验和邦德功指数试验是基于球磨机的物料易磨性试验分析方法，对于易磨难破碎的物料，试验误差较大，不适用于料床粉碎的应用研究。因此，本文采用实验室易碎性循环挤压试验对物料的可碎性进行研究，该试验方法具有物料用量少（500g）、周期短（1-2 天）、可模拟闭路循环工艺等优点，能够快速获取物料的料床粉碎特性参数。

20 世纪 50 年代，Bond 提出了基于第三粉碎理论的邦德功指数法，极大地简化了试验的物料用量和时长，并形成了一套规范化、标准化地实验流程。基于第三粉碎理论，以邦德粉磨功指数  $W_i$  表征的物料易磨性，已在我国水泥生产与设计中广泛应用。

第三粉碎理论（裂缝学说）的基本思想是：粉碎物料颗粒时的输入功与颗粒上产生的裂缝长度成正比，即有用输入功与产品颗粒直径的平方根成反比。根据该理论，将物料由粒径  $F$  粉

碎至产品粒径  $P$  所需的能量  $W$  为:

$$W = 10 \cdot W_i \cdot (1/\sqrt{P} - 1/\sqrt{F})$$

式中  $F$ 、 $P$  分别为原料和成品质量 80% 过筛的筛孔尺寸 ( $\mu\text{m}$ ),  $W_i$  为邦德功指数 ( $\text{kWh/t}$ )。

挤压功指数  $E_i$  与邦德功指数  $W_i$  同属粉碎功指数体系, 物理本质相同, 但两者对应的试验方法和粉碎机理不同:  $W_i$  反映物料在球磨机冲击-研磨作用下的易磨性, 采用球磨机测定;  $E_i$  反映物料在辊压机/立磨料床挤压作用下的易碎性, 采用料床粉碎设备测定。 $E_i$  的定义为: 将 1t 的物料从理论上的无限粒度粉碎到 80% 通过 100 $\mu\text{m}$  方孔筛所需要的功耗, 是表征物料的可碎性 (易碎性) 的重要指标<sup>[4]</sup>。物料在粉碎过程中裂缝的产生、扩展及数量与其物理化学性质有关, 这些差异通过挤压功指数  $E_i$  综合体现。因此, 挤压功指数更适用于料床粉碎工艺的物料评估, 可弥补邦德功指数在测试易磨性与易碎性差异较大物料时预测不准的缺陷。

辊压机粉碎机理与邦德第三粉碎理论具有内在一致性。尽管活塞压载试验 (单次加载) 与辊压机连续作业过程尚有一定区别, 但本文采用该试验作为基础手段的原因在于: ①活塞压载试验能够实现高压料床粉碎的物理模拟; ②通过引入“循环挤压”流程模拟闭路循环工艺, 将单次加载扩展为闭路循环, 可有效逼近连续作业的动态平衡状态; ③该循环挤压试验方法可作为料床粉碎特性的有效表征手段, 其测试结果与生产数据具有较好的相关性。其料床粉碎机理如图 2 所示, 进而, 通过对试验结果进行生产数据校核与修正, 可建立与辊压机型号、成品细度和比表等参数相关的产能预测模型。

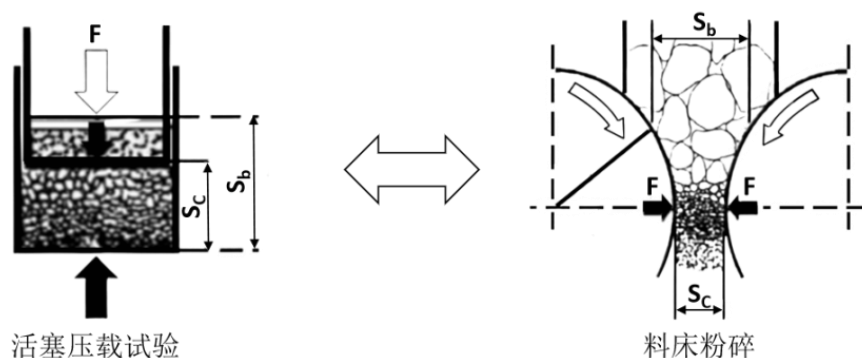


图 2 料床粉碎机理示意图

## 1.2 试验方法

本试验所用主要设备包括:

- (1) 压力试验机: 最大压力 3000kN, 加载速度可调, 用于料床挤压;
- (2) 挤压模具: 内腔直径 100mm 的圆柱体;
- (3) 试验小球磨机: 型号  $\Phi 305 \times 305$ , 配有橡胶球研磨体, 用于料饼打散<sup>[5]</sup>;
- (4) 振筛机与套筛: 用于物料筛分分级。

易碎性试验的料重  $m=500\text{g}$ ，粒度控制在  $5\text{mm}$  以下。料床粉碎装置为压力机，挤压后的料饼使用试验小球磨机进行打散，随后采用振动筛分装置进行筛分，目标成品粒度 $\leq 80\mu\text{m}$ 。

试验流程如图 3 所示：

(1) 物料准备，取生产线新鲜来料，破碎至全部小于  $5\text{mm}$ ，缩分至  $500\text{g}$  作为单次试验料量，并测定初始物料的粒度分布（计算  $F_{80}$ ）、 $\leq 80\mu\text{m}$  细粉含量  $e_a$  及比表面积  $S_a$ ；

(2) 单次挤压，将  $500\text{g}$  物料均匀装入模具，置于压力机上，以  $6\text{mm/min}$  速度加载至  $900\text{kN}$ ，保压  $5\text{s}$  后卸压取出料饼；

(3) 打散与筛分：料饼在配有橡胶球研磨体的试验小球磨机打散后，用  $80\mu\text{m}$  套筛筛分，得到 $\leq 80\mu\text{m}$  细粉（成品）和 $>80\mu\text{m}$  粗粉，分别称重记录；

(4) 循环补料：在粗粉中补加等量初始物料，使总重恢复  $500\text{g}$ ，混合后进入下一次挤压，取出细粉留样，测定比表面积和粒度；

(5) 平衡判定：重复步骤 (2) ~ (4)，直至连续三次循环成品量极差除此三次成品量的平均值 $<1\%$ ，则试验达到平衡稳定条件，取该三次数据的平均值作为平衡试验结果。

(6) 数据测定：测定并记录每次挤压前后全部试验物料的比表面积  $S_c$ 、 $S_d$  及细粉含量  $e_c$ 、 $e_d$ ，以及成品细粉的比表面积  $S_b$ （注：因筛分后 $\leq 80\mu\text{m}$ ，故成品细粉含量  $e_b=100\%$ ），通过粒度筛析数据插值计算初始物料的  $F_{80}$  和平衡成品的  $P_{80}$ 。

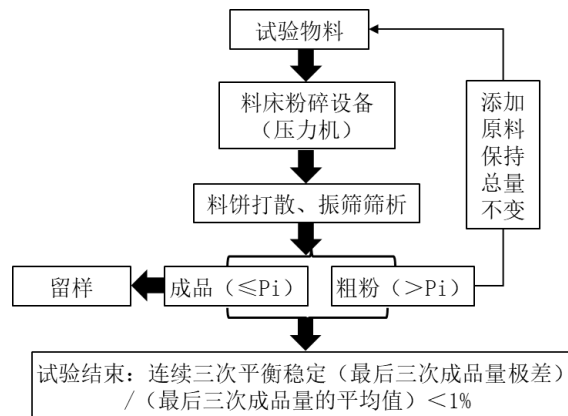


图 3 易碎性闭路循环试验流程

## 2 预测模型构建

### 2.1 单耗预测模型

易碎性挤压功指数  $E_i$  表征在相同试验条件下不同物料的料床粉碎难易程度。在易碎性循环挤压试验达到平衡时，用于挤压破碎的功耗  $E$  与初始物料中的 $\leq 80\mu\text{m}$  细粉含量  $e_0$ 、平衡时细粉产量  $G$ 、初始物料  $80\%$  过筛粒径  $F_{80}$  及平衡后细粉  $80\%$  过筛粒径  $P_{80}$  有关。

基于近百组物料的试验数据，通过量纲分析与多元回归，其中，基于第三粉碎理论的能耗

与粒度平方根倒数差成正比的原理，并考虑循环系统中细粉的累积效应，假设功耗  $E$  与各参数呈幂函数关系。进而，采用最小二乘法进行归一化拟合，得到功耗  $E$  的拟合关系式（易碎性闭路循环试验平衡方程）：

$$E = a \cdot e^b \cdot G_e^c \cdot (1/\sqrt{P_{80}} - 1/\sqrt{F_{80}})^d$$

根据第三粉碎理论，物料破碎功耗也可表示为：

$$E = 10 \cdot E_i \cdot (1/\sqrt{P_{80}} - 1/\sqrt{F_{80}}),$$

联立上式可得到易碎性挤压功指数  $E_i$  的计算公式为：

$$E_i = \frac{a}{10} \cdot e^b \cdot G_e^c \cdot (1/\sqrt{P_{80}} - 1/\sqrt{F_{80}})^{d-1}$$

式中： $E$ ——破碎功耗，kWh/t； $E_i$ ——挤压功指数，kWh/t； $e$ ——试验初始物料中 $>80\mu\text{m}$ 的粗粉料量的含量，即  $e=1-e_0$ ，%； $G_e$ ——平衡时挤压前后的细粉增量，数值上等于细粉产量  $G$  减去平衡时挤压前的补充料中的细粉量，即  $G_e=G-G \cdot e_0=G \cdot e$ ，g； $F_{80}$ 、 $P_{80}$ ——初始物料和成品质量80%过筛对应的筛孔尺寸， $\mu\text{m}$ ； $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ ——试验数据拟合系数。

使用最小二乘法对试验数据进行拟合，得到稳定后的系数值为： $a=360.66$ 、 $b=1.4$ 、 $c=-0.99$ 、 $d=-0.16$ ，如图4所示。

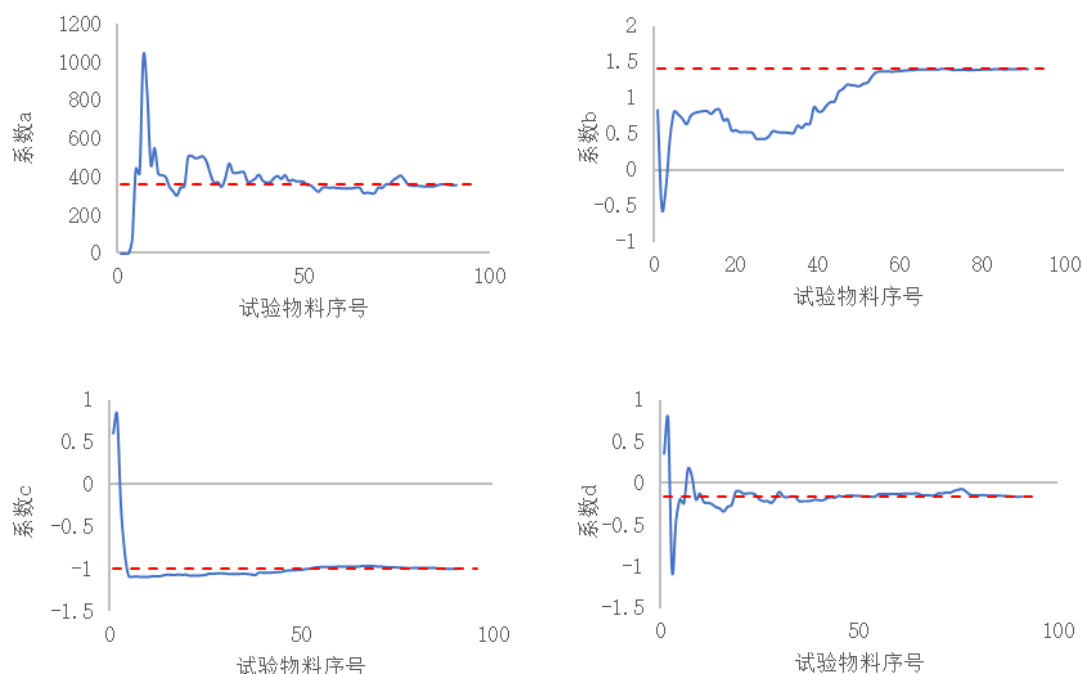


图4 系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  随试验组数的变化趋势

将拟合系数代入上述公式，得到易碎性闭路循环试验平衡方程：

$$E = 360.66 \cdot e^{1.4} \cdot G_e^{-0.99} \cdot (1/\sqrt{P_{80}} - 1/\sqrt{F_{80}})^{-0.16}$$

物料的易碎性挤压功指数  $E_i$  的计算公式:

$$E_i = 36.066 \cdot e^{1.4} \cdot G_e^{-0.99} \cdot (1/\sqrt{P_{80}} - 1/\sqrt{F_{80}})^{-1.16}$$

将上述模型推广至实际生产, 定义生产中辊压机的理论单耗  $E^*$ :

$$E^* = 10 \cdot E_i \cdot (1/\sqrt{X_{80}} - 1/\sqrt{Y_{80}})$$

理论单耗  $E^*$  是假设设备为理想状态, 而实际辊压机的能耗还受设备尺寸和运行参数影响, 因此, 为进一步贴近实际, 引入辊压机参数 (辊径  $D$ 、辊宽  $B$ 、线速度  $V$ ) 及通过量比例系数  $K$  等进行修正。通过将试验数据与生产数据的比值进行多元回归, 得到各参数的指数, 从而建立预测单耗  $E_g$  模型:

$$E_g = \frac{D^{1.96} B^{0.49}}{V^{0.95} \cdot K^{0.29}} E^* = \frac{10 D^{1.96} B^{0.49} (1/\sqrt{X_{80}} - 1/\sqrt{Y_{80}})}{V^{0.95} \cdot K^{0.29}} E_i$$

式中:  $E_g$ ——基于试验和生产参数修正的辊压机预测单耗, kWh/t;  $E^*$ ——基于第三粉碎理论的理论单耗, kWh/t;  $E_i$ ——试验物料的挤压功指数, kWh/t;  $K$ ——通过量比例系数, 无量纲, 即  $K=Q/m=Q/500$  ( $Q$  为辊压机对应的通过量, t/h;  $m=500g$  为试验料量);  $D$ ——辊径, m;  $B$ ——辊宽, m;  $V$ ——辊子线速度, m/s;  $X_{80}$ 、 $Y_{80}$ ——分别为辊压机系统成品和新鲜来料 80% 过筛对应的筛孔尺寸,  $\mu m$ 。

该模型表明, 在物料不变的情况下, 产品粒度越细、通过量越小, 辊压机单耗越高。

## 2.2 产能预测模型

实际生产中, 生料常以细度为主要调控指标, 水泥则以比表面积为主。为此, 本文基于粉碎工艺与易碎性试验, 提出一种适用于闭路循环粉碎的产能预测方法, 该预测方法可建立物料经挤压前后的比表细度增量关系, 并在易碎性循环实验中得到了数据验证, 原理如图 5 所示。

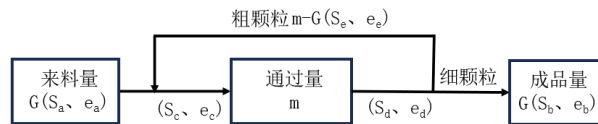


图 5 产能预测模型方法原理图

在易碎性试验达到平衡后, 可建立如下质量与指标平衡关系模型。

比表面积平衡模型:

$$\begin{cases} m \cdot S_c = G \cdot S_a + (m - G) \cdot S_e \\ m \cdot S_d = G \cdot S_b + (m - G) \cdot S_e \end{cases}$$

$$G = m \cdot (S_d - S_c) / (S_b - S_a)$$

细粉含量平衡模型：

$$\begin{cases} m \cdot e_c = G \cdot e_a + (m - G) \cdot e_e \\ m \cdot e_d = G \cdot e_b + (m - G) \cdot e_e \end{cases}$$

$$G = m \cdot (e_d - e_c) / (e_b - e_a)$$

式中：m——易碎性试验料量，g；G——细粉产量，g；S<sub>a</sub>、S<sub>b</sub>、S<sub>c</sub>、S<sub>d</sub>——分别为初始物料比表、平衡时循环挤压后筛出的细粉（易碎性试验成品）的比表、平衡时循环挤压前全部物料的比表、平衡时循环挤压后全部物料的比表，m<sup>2</sup>/kg；e<sub>a</sub>、e<sub>b</sub>、e<sub>c</sub>、e<sub>d</sub>——初始物料中的细粉含量、平衡时循环挤压后筛出的细粉中（易碎性试验成品）的细粉含量、平衡时循环挤压前全部物料中的细粉含量、平衡时循环挤压后全部物料中的细粉含量，%。

将生产中辊压机的通过量 Q 及辊压机系统成品指标（比表 S<sub>b</sub>\*或细粉含量 e<sub>b</sub>\*）代入，可得产能预测模型：

基于比表面积的产能预测模型：

$$T = Q \cdot (S_d - S_c) / (S_b^* - S_a)$$

基于细粉含量的产能预测模型：

$$T = Q \cdot (e_d - e_c) / (e_b^* - e_a)$$

式中：T——辊压机预测台产，t/h；Q——辊压机设备通过量，t/h；S<sub>b</sub>\*——辊压机系统成品比表，m<sup>2</sup>/kg；e<sub>b</sub>\*——辊压机系统成品中细粉含量，%。

### 3 应用示例

以某水泥厂（辊压机型号为 HFCG180-160，辊径 D=1.8m，辊宽 B=1.6m，线速度 V=1.6m/s）为例，其稳定生产数据为：台产 284.4t/h，辊压机单耗 9.18kWh/t，辊压机系统成品比表即入磨比表 S<sub>b</sub>\*=279.25m<sup>2</sup>/kg，辊压机系统成品细度 R<sub>0.08mm</sub>=11.79%，则，成品中细粉含量 e<sub>b</sub>\*=88.21%，通过量 Q≈1150t/h。

#### 3.1 试验

取该工况下物料进行易碎性循环挤压试验，试验料量 m=500g。平衡后关键试验数据为：细粉增量 G<sub>c</sub>=94.17g，细粉产量 G=105.16g，初始粗粉占比 e=89.55%；通过对生产中新鲜来料、生产中辊压机系统成品以及对易碎性试验初始物料、易碎性试验成品振动筛析，分别得到其粒度分布，对累计通过量用插值法计算得到 80%过筛对应的筛孔尺寸，可得到试验初始 F<sub>80</sub>=3917.61μm，试验成品 P<sub>80</sub>=54.16μm，生产中来料 Y<sub>80</sub>=20962.1μm，辊压机系统的成品 X<sub>80</sub>=65.09μm。物料筛析数据及试验过程数据详见表 1 至表 5。

表 1 生产中新鲜来料筛析数据

| 筛孔孔径 (mm) | 粒径段 (mm) | 重量 (kg) | 百分比 (%) | 累计筛余 (%) | 累计通过量 (%) |
|-----------|----------|---------|---------|----------|-----------|
| 40        | >40      | 1.06    | 1.57%   | 1.57%    | 98.43%    |
| 25        | 25-40    | 5.08    | 7.54%   | 9.11%    | 90.89%    |
| 16        | 16-25    | 16.36   | 24.27%  | 33.38%   | 66.62%    |
| 5         | 5-16     | 14.24   | 21.13%  | 54.51%   | 45.49%    |
| 0         | 0-5      | 30.66   | 45.49%  | 100.00%  | 0.00%     |

表 2 生产中辊压机系统成品筛析数据

| 筛孔孔径 ( $\mu\text{m}$ ) | 粒径段 ( $\mu\text{m}$ ) | 重量 (g) | 百分比 (%) | 累计筛余 (%) | 累计通过量 (%) |
|------------------------|-----------------------|--------|---------|----------|-----------|
| 80                     | >80                   | 2.36   | 11.80%  | 11.80%   | 88.20%    |
| 63                     | 63-80                 | 1.87   | 9.35%   | 21.15%   | 78.85%    |
| 54                     | 54-63                 | 1.04   | 5.20%   | 26.35%   | 73.65%    |
| 45                     | 45-54                 | 0.61   | 3.05%   | 29.40%   | 70.60%    |
| 0                      | 0-45                  | 14.12  | 70.60%  | 100.00%  | 0.00%     |

表 3 易碎性试验初始物料筛析数据

| 筛孔孔径 ( $\mu\text{m}$ ) | 粒径段 ( $\mu\text{m}$ ) | 重量 (g) | 百分比 (%) | 累计筛余 (%) | 累计通过量 (%) |
|------------------------|-----------------------|--------|---------|----------|-----------|
| 5000                   | >5000                 | 0.00   | 0.00%   | 0.00%    | 100.00%   |
| 2500                   | 2500-5000             | 105.60 | 46.19%  | 46.19%   | 53.81%    |
| 1250                   | 1250-2500             | 41.30  | 18.07%  | 64.26%   | 35.74%    |
| 630                    | 630-1250              | 19.80  | 8.66%   | 72.92%   | 27.08%    |
| 315                    | 315-630               | 16.10  | 7.04%   | 79.97%   | 20.03%    |
| 160                    | 160-315               | 11.20  | 4.90%   | 84.86%   | 15.14%    |
| 80                     | 80-160                | 10.70  | 4.68%   | 89.55%   | 10.45%    |
| 0                      | 0-80                  | 23.90  | 10.45%  | 100.00%  | 0.00%     |

表 4 易碎性试验成品筛析数据

| 筛孔孔径 ( $\mu\text{m}$ ) | 粒径段 ( $\mu\text{m}$ ) | 重量 (g) | 百分比 (%) | 累计筛余 (%) | 累计通过量 (%) |
|------------------------|-----------------------|--------|---------|----------|-----------|
| 80                     | >80                   | 0.00   | 0.00%   | 0.00%    | 100.00%   |
| 63                     | 63-80                 | 2.25   | 11.26%  | 11.26%   | 88.74%    |
| 54                     | 54-63                 | 1.78   | 8.90%   | 20.16%   | 79.84%    |
| 45                     | 45-54                 | 1.73   | 8.64%   | 28.80%   | 71.20%    |
| 0                      | 0-45                  | 14.24  | 71.20%  | 100.00%  | 0.00%     |

表 5 易碎性试验过程数据

| 料床挤压试验循环次数                                                    | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 5、6、7 平均 |
|---------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| 易碎性试验料量 $m$ (g)                                               | 500    | 500    | 500    | 500    | 500    | 500    | 500    | 500.00   |
| 压前 $\leq 80\mu\text{m}$ 细粉量 $m$ (g)                           | 52.25  | 13.15  | 12.10  | 11.65  | 10.90  | 11.05  | 11.02  | 10.99    |
| 压后 $\leq 80\mu\text{m}$ 细粉量 $G$ (g)                           | 125.75 | 115.5  | 111.6  | 104.25 | 105.6  | 104.75 | 105.14 | 105.16   |
| 新增 $\leq 80\mu\text{m}$ 细粉量 $G_e$ (g)                         | 73.5   | 102.35 | 99.5   | 92.6   | 94.7   | 93.7   | 94.12  | 94.17    |
| 压前 $\leq 80\mu\text{m}$ 细粉含量 $e_c$ (%)                        | 10.45% | 2.63%  | 2.42%  | 2.33%  | 2.18%  | 2.21%  | 2.20%  | 2.20%    |
| 压后 $\leq 80\mu\text{m}$ 细粉含量 $e_d$ (%)                        | 25.15% | 23.10% | 22.32% | 20.85% | 21.12% | 20.95% | 21.03% | 21.03%   |
| 压前全部物料比表 $S_c$ ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )                     | 19.49  | 10.60  | 11.62  | 11.78  | 11.75  | 11.92  | 11.8   | 11.82    |
| 压后全部物料比表 $S_d$ ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )                     | 82.39  | 78.21  | 74.41  | 72.63  | 73.98  | 74.06  | 74.25  | 74.10    |
| 压后 $\leq 80\mu\text{m}$ 细粉比表 $S_b$ ( $\text{m}^2/\text{kg}$ ) | 232    | 256.5  | 275.4  | 272.4  | 273.7  | 272.7  | 273.01 | 273.14   |

### 3.2 模型计算

挤压功指数  $E_i$ :  $E_i = 36.066 \cdot e^{1.4} \cdot G_s^{-0.99} \cdot (1/\sqrt{P_{80}} - 1/\sqrt{F_{80}})^{-1.16} = 4.02 \text{ kWh/t}$

理论单耗  $E^*$ :  $E^* = 10 \cdot E_i \cdot (1/\sqrt{X_{80}} - 1/\sqrt{Y_{80}}) = 4.71 \text{ kWh/t}$

预测单耗  $E_g$ :  $K=Q/m=1150/500=2.3$ ;  $E_g = \frac{D^{1.96} B^{0.49}}{V^{0.95} K^{0.29}} E^* = 9.42 \text{ kWh/t}$

基于比表面积平衡模型的预测台产  $T$ :  $T = Q \cdot (S_d - S_c) / (S_b^* - S_a) = 275.72 \text{ t/h}$

其中,  $S_a=19.49 \text{ m}^2/\text{kg}$ ,  $S_c=11.82 \text{ m}^2/\text{kg}$ ,  $S_d=74.10 \text{ m}^2/\text{kg}$ ,  $S_b^*=279.25 \text{ m}^2/\text{kg}$ 。

基于细粉含量平衡模型的预测台产  $T$ :  $T = Q \cdot (e_d - e_c) / (e_b^* - e_a) = 278.48 \text{ t/h}$

其中,  $e_a=10.45\%$ ,  $e_c=2.2\%$ ,  $e_d=21.03\%$ ,  $e_b^*=88.21\%$ 。

以上预测结果表明, 基于易碎性试验与第三粉碎理论建立的辊压机能耗与产能预测模型, 在实际生产中表现出较高的吻合度。预测单耗为  $9.42 \text{ kWh/t}$ , 与实际生产单耗  $9.18 \text{ kWh/t}$  的相对误差仅为  $2.6\%$ ; 基于比表与细粉含量的产能预测值分别为  $275.72 \text{ t/h}$  和  $278.48 \text{ t/h}$ , 与实测台产  $284.4 \text{ t/h}$  的相对误差均在  $3.2\%$  以内。该结果验证了模型在实际工程应用中的可靠性与适用性, 表明其能够为辊压机系统的工艺优化、能耗评估与智能调控提供定量化工具, 具备良好的工程推广价值。

### 4 结语

本文基于第三粉碎理论与易碎性闭路循环试验, 建立了适用于辊压机粉磨系统的能耗与产能预测模型。该方法具有试验简便、物料用量少、预测精度高等特点, 能够为辊压机的设计选型、工艺调控与能效评估提供可靠依据, 尤其适用于水泥、矿渣等物料的粉磨系统优化。

未来研究将进一步拓展模型在多物料、多工况下的适用性, 并探索其与智能控制系统的深度融合, 以实现辊压机运行的实时优化与能效持续提升, 为推动粉磨系统绿色化、智能化发展提供理论支持与实践路径。

### 参考文献:

- [1]包玮, 马克, 王志凌, 王虔虔. 料层粉碎的基本规律及在水泥粉磨工艺中应用的探讨[J]. 中国水泥, 2010 (07): 61-65.
- [2]刘建远. 关于矿石粉碎特性参数及其测定方法[J]. 金属矿山, 2011 (10): 9-19.
- [3]刘建远, 罗科华. 铁矿石物料粒间粉碎的数学建模[J]. 矿冶, 2013, 22 (02): 4-10.
- [4]张林飞, 张杨睿, 高霖. 基于料床粉碎的挤压功指数测定方法及应用研究[J]. 水泥, 2025, (09): 45-49.
- [5]张林飞, 高霖, 安晓鹏. 料饼中颗粒分布的无损精准测定方法[J]. 中国水泥, 2023 (09): 68-72.

# 分级燃烧与生物质协同掺烧对分解炉内 NO<sub>x</sub> 排放特性的影响研究

水沛

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 231699)

## 摘 要:

本文基于 CFD 方法建立了适用于工业规模分解炉的数值模型, 准确预测 NO 的生成与还原过程。模型采用欧拉-拉格朗日方法, 并通过 PIC 计算固相流动, 利用全局化学动力学反应模型模拟煤粉燃烧与 NO 反应, 结合现场实测数据验证模型准确性。研究揭示了 NO 在分解炉内的生成与还原机理, 发现原分解炉还原区长度不足, 限制了 NO 还原效率。针对这一问题, 提出了分解炉结构优化与分级低氮燃烧策略, 并探讨了生物质掺烧对 NO 浓度的影响, 结果表明生物质掺烧可有效降低 NO 浓度, 为低氮燃烧技术提供理论与技术支撑。

**关键词:** 分解炉; NO 生成/还原机理; 分级燃烧; 生物质

## 0 引言

水泥生产是高能耗、高排放产业, 其中氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 是水泥生产过程中主要污染物之一, 主要包括氧化亚氮 (N<sub>2</sub>O)、一氧化氮 (NO)、二氧化氮 (NO<sub>2</sub>) 等。NO<sub>x</sub> 会伤害人体器官, 形成酸雨, 破坏臭氧层等, 需要严格控制其排放量。目前全球水泥生产总量持续增长, 但在不断提高的环保政策要求下, 降低 NO<sub>x</sub> 的排放是水泥行业亟待解决的问题<sup>[1]</sup>。

水泥生产过程中 NO<sub>x</sub> 主要的形成场地是回转窑和分解炉, NO<sub>x</sub> 的形成机理极其复杂, 目前的研究将 NO<sub>x</sub> 形成机理分为 3 种<sup>[2-4]</sup>: 热力型、快速型、燃料型。分解炉中平均温度在 900℃ 左右, 远低于热力型 NO<sub>x</sub> 的温度, 可以忽略热力型 NO<sub>x</sub> 产生。快速型 NO<sub>x</sub> 只有在大量 O、OH 基团存在, 占比非常低可忽略不计。对于水泥分解炉, 只需着重研究燃料型 NO<sub>x</sub> 的产生与还原。燃料型 NO<sub>x</sub> 的生成机理一般认为是: 燃料 N 向 NO 转变由两个互相竞争过程控制的。分解炉中燃烧产生的污染物 NO<sub>x</sub> 主要为 NO, 占 95% 以上, 控制 NO 的生成量是控制 NO<sub>x</sub> 排放的关键<sup>[5]</sup>。

在水泥生产等大型设备行业中, 计算流体动力学 (CFD) 较实验更具经济性和应用前景。近年来, 计算硬件和算法进步推动了工业级水泥设备的仿真研究。已有学者将欧拉多相流和 DPM 模型应用于分解炉模拟, 实现了传热传质过程的精确预测, 但未涉及 NO<sub>x</sub> 生成与还原<sup>[6]</sup>。后续研究利用 Fluent 软件, 探讨了空气和生料分级、替代燃料对 NO<sub>x</sub> 排放的影响, 但 NO<sub>x</sub> 多采用后处理模型, 缺乏详细反应路径<sup>[7-8]</sup>。Nakhaei 等则基于 PIC 算法, 结合全局反应动力学, 准确模拟了分解炉运行及 NO 排放, 但未提出具体 NO<sub>x</sub> 控制方法<sup>[9]</sup>。

生物质能源因对  $\text{CO}_2$  排放“零贡献”、 $\text{NO}$  和  $\text{SO}_2$  排放显著低于煤粉，被视为理想的可持续能源，在全球应用日益广泛。富氧下掺烧生物质可明显降低  $\text{NO}$  排放<sup>[10]</sup>。已有研究表明，生物质与煤混烧比单独燃烧  $\text{NO}$  排放更低<sup>[11]</sup>，基于生物质改性的钙基吸收剂也能协同还原  $\text{NO}$ <sup>[12]</sup>。典型生物质（如玉米秸秆、稻秆、松木）与焦炭共燃的  $\text{NO}$  排放与灰分特性也得到实验验证<sup>[13]</sup>。目前欧洲水泥行业生物质替代燃料占比已超 80%<sup>[14]</sup>，而目前中国仍低于 15%。作为农业大国，中国生物质资源丰富，提升生物质高效利用将有助于实现碳达峰和碳中和目标。

本文建立了分解炉全尺寸数值模拟，并通过现场实测数据验证了模型的正确性。通过统计分解炉各个部位  $\text{NO}$  生成/还原的化学速率，直观地揭示了  $\text{NO}$  在分解炉内生成/还原的行为，结合分级燃烧工艺对分解炉结构进行优化。相比分级燃烧技术，煤粉掺烧生物质工艺更经济、环保，因此本文最后探究了煤粉掺烧生物质技术对残余  $\text{NO}$  的影响。

## 1 模型的建立与求解

### 1.1 分解炉气-固-化学反应控制方程

本研究数值模拟采用欧拉-拉格朗日方法，气相基于 Navier-Stokes 方程并引入大涡模拟（LES）描述湍流行为，颗粒相轨迹采用拉格朗日法追踪。相间作用力通过 PIC 模型处理，拖曳力模型选用 Wen-Yu/Ergun 形式<sup>[15]</sup>。模型中考虑了典型的气相燃烧、煤粉热解与反应、 $\text{NO}$  还原等过程<sup>[16]</sup>，生料的加热与分解反应为主要研究对象，高温下的固相反应因动力学缓慢，在本研究中未作考虑。

### 1.2 分解炉介绍与参数设置

如图 1 为新型干法水泥热解系统示意图，分解炉是承上启下的关键的设备，其设计水平会直接决定煅烧系统熟料烧成质量、污染物排放浓度、换热效率等。解炉边界条件如表 1 所示。模型模拟的时间为 100 秒，时间步长为  $2.5\text{e-}4$ 。本文分解炉由 4 个生料下料管、4 个喷煤管、1 个三次风管和炉体等部分组成。

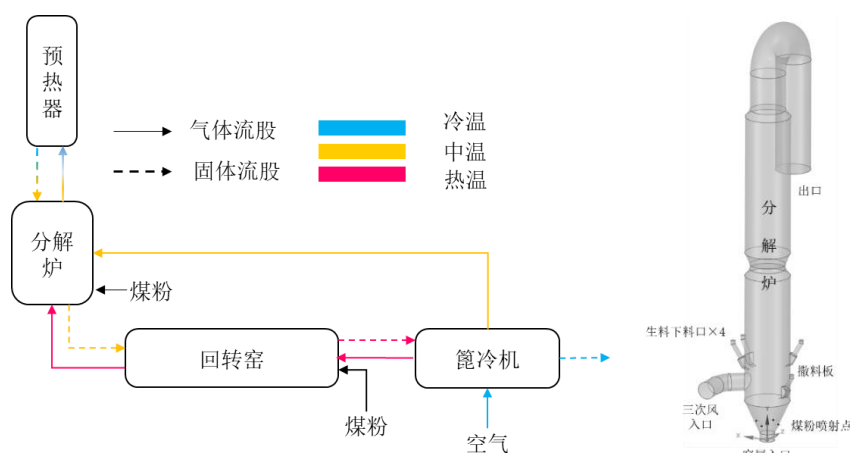


图 1 新型干法水泥烧结系统与分解炉结构图

表 1 模型计算边界条件

| 分解炉部位     | 气体质量流量<br>(kg/s) | 气体组分体积占比 (%)                                                                                                             | 温度 (K)  | 固体质量流量<br>(kg/s) |
|-----------|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------------------|
| 窑尾烟气      | 44.2             | N <sub>2</sub> :O <sub>2</sub> :CO <sub>2</sub> :SO <sub>2</sub> :NO:H <sub>2</sub> O=<br>72.63: 2.32:18.65:0.7:0.9:6.24 | 1433.5  | —                |
| 煤粉（燃料）喷射口 | --               | N <sub>2</sub> :O <sub>2</sub> =79:21                                                                                    | 303.15  | 6.55             |
| 三次风       | 55.3             | N <sub>2</sub> :O <sub>2</sub> =79:21                                                                                    | 1233.15 | —                |
| 生料下料口     | —                | —                                                                                                                        | 1053.15 | 32.6×4           |

模型使用的燃料为煤粉与玉米秸秆，玉米秸秆是中国最常见的农作物之一，是生物质燃料稳定的来源。煤粉与玉米秸秆生物质的性质如表 4 所示。

表 2 燃料特性

| 工业分析 (wt%) 煤   |             | 工业分析 (wt%) 生物质（玉米秸秆） |            |
|----------------|-------------|----------------------|------------|
| Fixed carbon   | 48.2        | Fixed carbon         | 0.1775     |
| Volatiles      | 26          | Volatiles            | 71.45      |
| Ash            | 23.3        | Ash                  | 5.93       |
| Moisture       | 2.5         | Moisture             | 4.87       |
| 元素分析           |             |                      |            |
| C              | 73.8        | C                    | 44.2       |
| H              | 5.0         | H                    | 4.95       |
| O              | 8.1         | O                    | 41.25      |
| N              | 1.3         | N                    | 0.57       |
| 热值             |             |                      |            |
| Q <sub>低</sub> | 22.18 MJ/kg | Q <sub>低</sub>       | 15.45MJ/kg |

2 计算结果

2.1 模型验证

如图 2 所示，本文通过建立 5 组不同网格数量的模型进行网格无关性验证。结果显示，当网格数量超过 110 万时，NO 浓度变化小于 5%，数值趋于稳定，故最终采用约 110 万网格。为验证模型准确性，在分解炉不同高度布置监测点，将模拟结果与现场实测的温度和 NO 浓度对比（见表 5），最大误差小于 10%，验证了模型的可靠性。

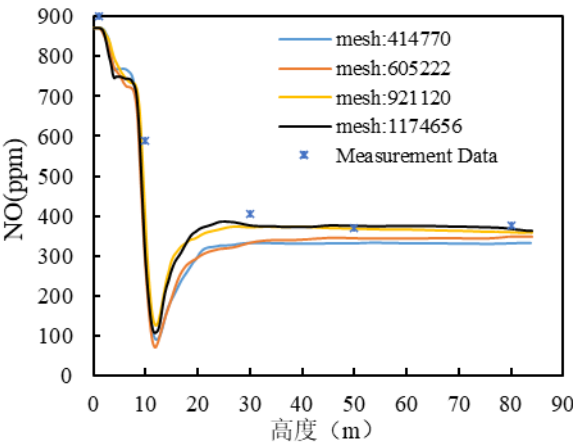


图 2 5 种网格数量下 NO 浓度沿分解炉高度示意图



图 3 分解炉现场图片

表 3 数值模拟结果与实测数据对比

| 项目   | 监测点 1  |      | 监测点 2  |        | 监测点 3   |       | 监测点 4  |       |
|------|--------|------|--------|--------|---------|-------|--------|-------|
|      | 温度     | NO   | 温度     | NO     | 温度      | NO    | 温度     | NO    |
| 实测数据 | 1423.0 | 1170 | 1225.0 | 423.5  | 1201.2  | 437.5 | 1149.0 | 392   |
| 数值模拟 | 1397.9 | 1210 | 1193.7 | 472.75 | 1189.72 | 453.6 | 1167.4 | 412.2 |

## 2.2 分解炉 NO 生成与还原规律

图 4 展示了  $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{NO}$  三种气体组分浓度及温度沿分解炉高度的截面平均值变化趋势。分解炉 0–6 m 高度范围内， $\text{O}_2$  浓度因煤粉中挥发分氧化作用而下降；随三次风加入， $\text{O}_2$  浓度迅速上升，其他气体浓度因稀释作用下降。煤粉挥发后形成焦炭与灰分，焦炭燃烧导致  $\text{O}_2$  浓度平稳下降，而  $\text{CO}_2$  浓度因焦炭氧化和  $\text{CaCO}_3$  分解反应而增加，其中  $\text{CaCO}_3$  分解释放的  $\text{CO}_2$  为主要来源。在炉内 12 m 以下， $\text{NO}$  浓度因  $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$  等还原性气体及焦炭还原作用逐步降低；随  $\text{O}_2$  浓度增加，煤粉燃烧生成的  $\text{HCN/CNO}$  被氧化， $\text{NO}$  浓度升高。分解炉设有四路生料下料口，三路位于三次风管上方，煤粉燃烧充分后生料注入分解吸热；一路位于三次风下方，用于调控炉温及通过金属氧化物催化促进  $\text{CO}$  与  $\text{NO}$  反应，加速  $\text{NO}$  还原。图 5 (d) 所示，0–10 m 区域  $\text{CaCO}_3$  分解致温度较低，三次风后温度迅速上升，进一步生料加入后温度趋于稳定并快速达到平衡。

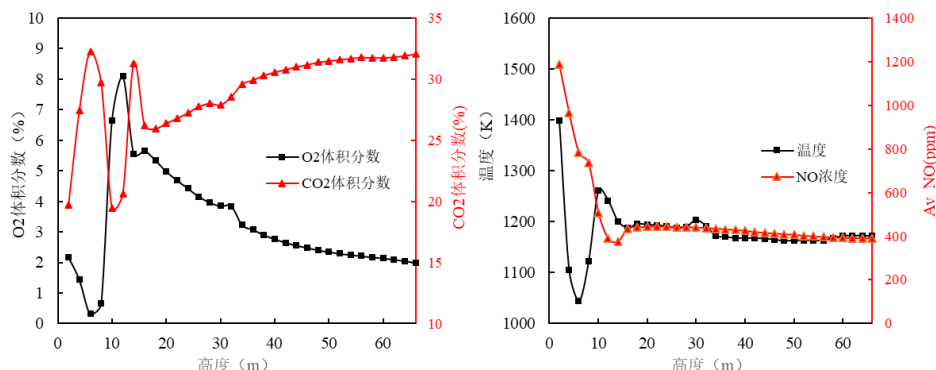


图 4 气体组分浓度与温度沿分解炉高度分布图

分解炉中  $\text{NO}$  来源主要有两处：(1) 回转窑产生的  $\text{NO}$  通过窑尾烟气进入分解炉的；(2) 分解炉内煤粉燃烧新产生的  $\text{NO}$ 。在水泥分解炉内，不仅仅有煤粉中有机氮的中间产物 ( $\text{HCN/CNO}$ ) 向  $\text{NO}/\text{N}_2$  的竞争转换反应，还有还原气体 ( $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$ ) 下  $\text{NO}$  的还原反应。因此在水泥分解炉内  $\text{NO}$  的生成/还原机理更为复杂。

为了能够深入了解分解炉内  $\text{NO}$  生成/还原机理，沿分解炉高度取 26 个监测点，提取每个监测点与  $\text{NO}$  生成/还原相关的化学反应速率 (包括均相反应与异相反应)，为了避免瞬态分析带来的误差进一步统计在 50–100s 内每个监测点化学反应速率的时均值。固体焦炭  $\text{C}(\text{s})$  与  $\text{NO}$  的反应速率单位为  $\text{kg/s}$ ，为了能够与气相反应的反应速率一致，使用公式 (7) 进行单位转换：

$$R_{NO\_mol} = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} R_{NO\_kg} \cdot N_i}{V_i M w_c} \quad (7)$$

式 (11) 中,  $i$  表示监测点标号,  $V_i$  是该处监测点上下 0.5 m 高度范围内的体积,  $R_{NO\_kg}$  与  $R_{NO\_mol}$  是该处某个颗粒的化学反应速率, 单位分别是 kg/s 与 kmol/s,  $N_i$  是体积  $V_i$  范围内所有煤粉颗粒的数量,  $M w_c$  是焦炭的摩尔质量。

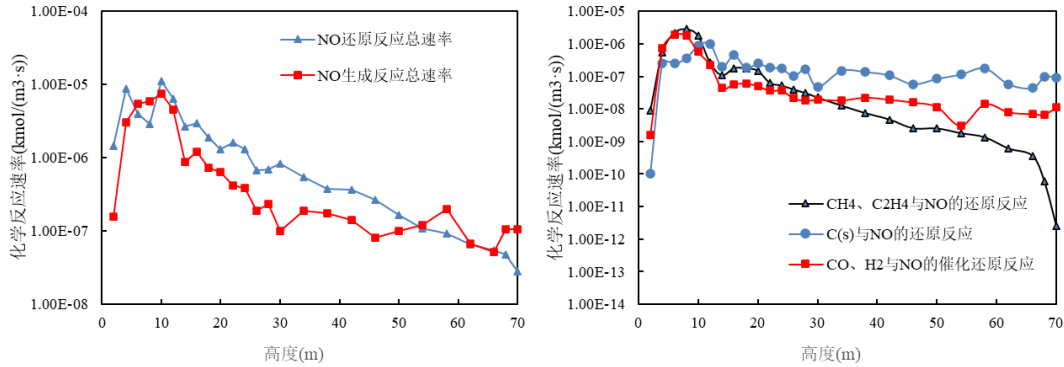


图 5 NO 生成/还原化学反应速率曲线图

由图 5 可知, 分解炉 6–10 m 为 NO 还原区 (还原速率大于生成速率), 其他区域为 NO 生成区 (生成速率大于还原速率)。低于 6 m, 由于煤粉不足, NO 生成和还原速率均较低; 高于 10 m, 三次风引入提高 O<sub>2</sub> 浓度, HCN 氧化生成 NO, 同时还原气体减少, 导致生成速率占优。6–10 m 范围内, 煤粉贫氧燃烧产生大量还原气体, 使还原速率显著提高。

NO 还原集中于高度为 6–10 m 的区间范围内, 在此范围, CH<sub>4</sub>、CO 和 H<sub>2</sub> 等气态还原剂对 NO 的作用相当, 焦炭 C (s) 还原速率较低。三次风引入后, 气态还原剂被氧化, 其还原能力迅速减弱, 焦炭 C (s) 成为主要还原剂, 但随炉温升高及焦炭消耗, 其还原速率逐渐下降。

### 2.3 分级燃烧对 NO 的影响

分级燃烧通过局部贫氧燃烧和 CO 还原 NO 实现低氮排放。现有分解炉出口 NO 浓度为 391 ppm, NO 有效还原区仅 4 m, 难以充分减排。为优化 NO 控制, 本文在窑尾烟气入口与三次风管间增设 9.5 m 还原区 (见图 6), 并将煤粉分上下两路投加, 上、下路分别设在 12 m 和 1.8 m 高度, 烟气 O<sub>2</sub> 浓度可调。设计三种分级燃烧工况: (1) Case 1: 下路喷煤 50%, O<sub>2</sub> 2.3%; (2) Case 2: 下路喷煤 70%, O<sub>2</sub> 2.3%; (3) Case 3: 下路喷煤 100%, O<sub>2</sub> 3.5%。

图 7 显示, 分级燃烧后, Case 2 和 Case 3 的 NO 浓度较原设计分别降低约 20 ppm 和 70 ppm。还原区延长提升了还原作用, Case 1 因部分煤粉在高位充分燃烧, NO 未明显降低; Case 2 通过下路喷煤增加强化了还原气氛, 有效减少 NO 生成; Case 3 在提高煤粉与 O<sub>2</sub> 浓度下, 贫氧还原更加充分, NO 减排效果最佳。图 8 所示, 各工况 NO 分布进一步说明, 煤粉投加与 O<sub>2</sub> 浓度需

协调优化，具体参数应根据实际工况调整，本文方案为工程改造提供参考。

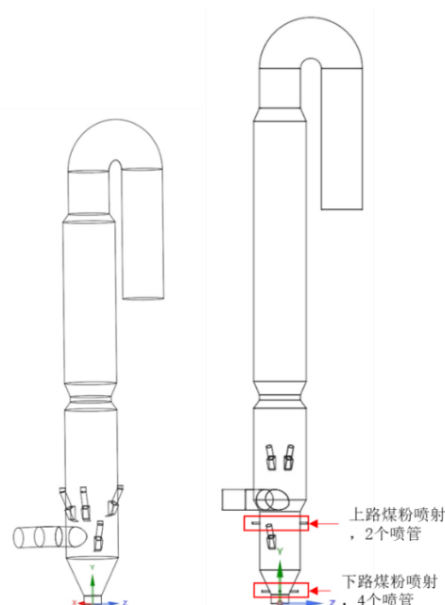


图6 原分解炉与改造后的分解炉结构对比图

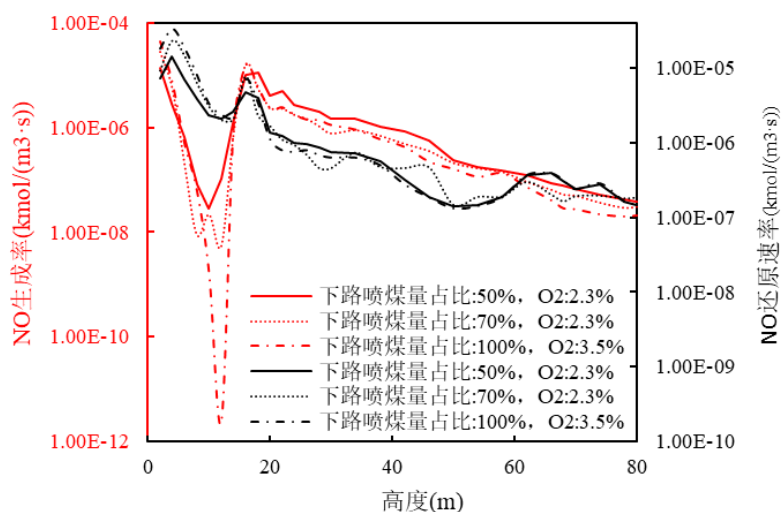


图7 分级燃烧

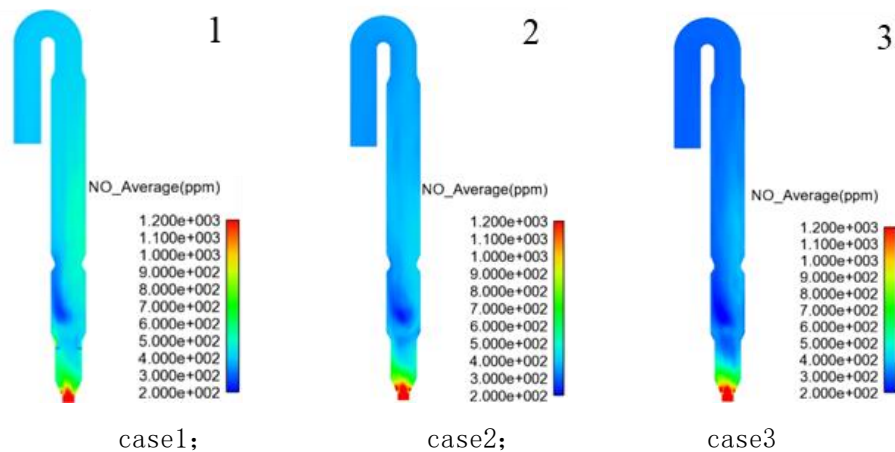


图8 分解燃烧3种工艺下的NO浓度分布图

## 2.4 生物质掺量对 NO 的影响

分级燃烧虽被广泛应用，但其还原区会延迟焦炭燃烧、降低焦炭活性，导致燃尽率下降和灰分含碳量增加，加上设备改造等综合问题，使其并非 NO 治理的最优方案。本文以玉米秸秆为代表生物质，研究其与煤粉掺烧对 NO 排放的影响（见表 1）。由于生物质热值较低，为维持分解炉温度，需用等热值生物质替代煤粉，使用量相对较高。生物质与煤粉燃烧的 NO 生成反应相同，模拟结果见表 4。生物质颗粒较大，为了准确模拟颗粒的传热于传质行为，本文采用了“让云代表分数颗粒”的方式进行建模。利用软件的颗粒分数处理功能进行建模，使每个计算云代表部分真实颗粒的质量和体积，进而精确反映粒料流化和燃烧的特性。

表 4 生物质掺烧模拟结果

| 项目 \ 替代比例    | 煤粉被替代质量比例 (%) |       |       |       |
|--------------|---------------|-------|-------|-------|
|              | 0             | 10    | 20    | 30    |
| 煤粉用量 (kg/s)  | 6.55          | 5.895 | 5.24  | 4.585 |
| 生物质用量 (kg/s) | 0.0           | 0.94  | 1.88  | 2.82  |
| NO           | 391           | 355   | 336   | 298   |
| 分解效率         | 94.12         | 93.38 | 92.73 | 93.56 |

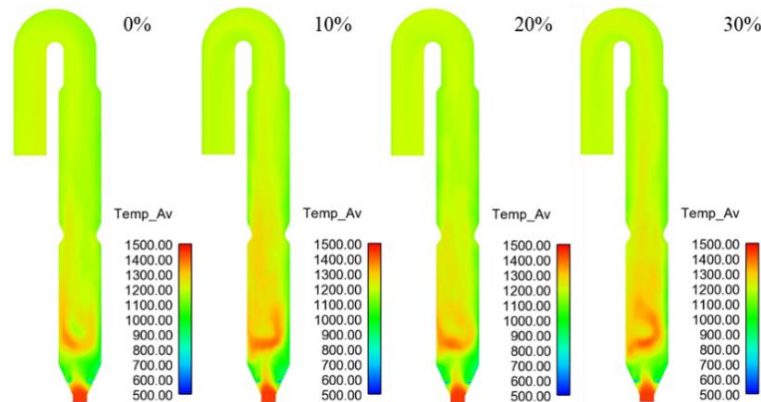


图 9 不同生物质掺烧量温度云图

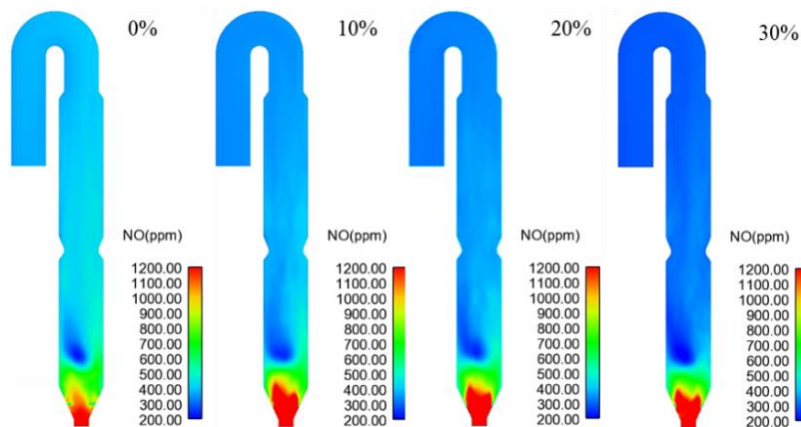


图 10 不同生物质掺烧量 NO 浓度分布云图

从图 9 和表 4 可见, 掺烧等热值生物质后, 由于生物质颗粒较大, 燃烧速率比煤粉慢, 随着生物质掺烧比例的增加, 分解炉内的高温区相对延迟, 但仍能够确保生料的分解率保持在 92% 以上。图 10 可清晰看到随着生物质掺烧量的增加, 分解炉内三次风管以上区域的 NO 浓度显著降低, 表明生物质燃料的使用可有效减排 NO。采用生物质/煤粉掺烧技术, 能够将分解炉中的 NO 浓度控制在约 300 ppm, 无需依赖分级燃烧工艺或增加炉体高度。综合考虑经济性与低碳燃烧等因素, 生物质掺烧技术相较于分级燃烧技术更具优势。

### 3 结论与展望

本文建立了分解炉数值模型, 模型模拟了分解炉内煤粉燃烧、生料分解, 揭示了 NO 的生成/还原机理, 着重研究了分级燃烧与生物质燃烧对污染物浓度的影响。

(1) 基于 PIC 算法建立了工业尺寸分解炉数值模型, 将数值模拟预测的气体温度和 NO 浓度与实测数据进行对比, 验证了数值模型的准确性。使用 Python 沿分解炉高度对 NO 生产/还原反应速率进行统计, 直观地揭示了 NO 在分解炉内生成/还原机理, 发现分解炉主要存在两个还原区: 三次风管下段与分解炉末端。

(2) 通过优化分解炉结构, 在窑尾烟气入口与三次风管之间增加还原区, 并采用分级燃烧技术, 通过调整煤粉上下路喷射比例和窑尾 O<sub>2</sub> 浓度, 增强还原气氛, 实现 NO 的显著减排效果, 同时为分解炉低氮改造提供参考思路。

(3) 使用低氮的生物质燃料, 可以明显减少 NO 的排放。在不使用分级燃烧工艺、不增加炉体高度, 使用生物质/煤粉掺烧技术也可以将分解炉中 NO 的浓度控制在 300 ppm 左右。

#### 参考文献:

- [1] 赵丹辉. 浅析水泥行业氮氧化物控制技术[J]. 水泥技术, 2020, 1 (05): 24-27.
- [2] B.R STANMORE, S.P VISONA. Prediction of NO emissions from a number of coal-fired power station boilers[J]. Fuel Processing Technology, 2000, 64 (1-3): 25-46.
- [3] STEPHEN R.TURNS. An introduction to Combustion Concepts and Applications.[M]. Beijing: Tsinghua university press, 2015.
- [4] RUTAR.T, LEE.J, C.Y, DAGAUT.P. NO<sub>x</sub> Formation Pathways in Lean-Premix-Prevaporized Combustion of Fuels with Carbon-to-Hydrogen Ratio between 0.25 and 0.88[J]. Proceedings of the I Mech E Part A Journal of Power & Energy, 2007, 221: 387-398.
- [5] 许超. 基于 CPFD 方法的 140t 循环流化床锅炉低氮燃烧研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [6] YA MAO, DI ZHANG, ZUOBING CHEN. Numerical modelling of multiphase FLOW and calcination process in an industrial calciner with fuel of heavy oil[J]. Powder Technology, 2020, 363 (106): 387-397.
- [7] KINEKAR S, MONE S, TAQI A. NO<sub>x</sub> reduction in calciner using air staging and raw meal split technology[J/OL]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45: 3091-3096.
- [8] 孙雍春. 水泥分解炉内替代燃料特性的数值模拟[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2019.
- [9] NAKHAEI M, GRÉVAIN D, JENSEN L S. NO emission from cement calciners firing coal and petcoke: A CPFD study[J].

Applications in Energy and Combustion Science, 2021, 5: 100023.

[10]WINTER F, WARTHA C, HOFBAUER H. NO and N<sub>2</sub>O formation during the combustion of wood, straw, malt waste and peat[J]. Bioresour Technol, 1999, 70 (1) : 39-49.

[11]MARYORI DÍAZ-RAMÍREZ, FERNANDO SEBASTIÁN, JAVIER ROYO. Influencing factors on NO<sub>x</sub> emission level during grate conversion of three pelletized energy crops[J]. Appl Energy, 2014, 115 (4) : 360-373.

[12]MURARI MOHON ROY, KENNY W. CORSCADDEN. An experimental study of combustion and emissions of biomass briquettes in a domestic wood stove[J]. Applied Energy, 2012, 99: 206212.

[13]LUNBO DUAN, YUANQIANG DUAN, CHANGSUI ZHAO. NO emission during co-firing coal and biomass in an oxy-fuel circulating fluidized bed combustor[J]. Fuel, 2015, 150 (15) : 813.

[14]MENGHAN ZHANG, XIAO LIANG, HUICHAO CHEN. A novel effective approach for synergistic NO reduction during the carbonation process by biomass-modified calcium-based sorbents[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 439: 135795.

[15]SNIDER D M. An Incompressible Three-Dimensional Multiphase Particle-in-Cell Model for Dense Particle Flows - ScienceDirect[J]. Journal of Computational Physics, 2001, 170 (2) : 523-549.

[16]GUANG WANG, PEI SHUI, TENGFEI YIN, HONGKUN CUI, AND YUJIE TIAN. Optimizing Nitrogen Oxide Emissions in Industrial Calcination through Staged Combustion: A CFD-, PIC-, and RSM-Based Approach for Enhanced Process Efficiency[J]. 63 (33) : 14541-14553.

# 水泥窑铊的分布特征及其对SCR催化剂性能的影响与防控

冯蓓蓓

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

## 摘要:

水泥生产过程中, 由于使用的原燃料以及混合材中天然含有重金属铊元素, 在高温煅烧条件下, 这些金属会挥发并随烟气排出, 在预热器位置发生气固转变反应, 最终导致水泥窑中低温 SCR 催化剂出现铊 (Tl) 中毒问题。本文通过对多条水泥生产线进行调研、测试, 探讨了水泥窑生产过程中 Tl 在窑灰中的富集现象, 烟气温度越低, 粉尘铊含量越高。研究表明, Tl 会以氧化铊和硫酸铊形式共存于催化剂上进而显著富集。Tl 物种会通过抑制  $\text{NH}_3$  在酸性位点上的吸附活化反应和逐渐积累不活泼的硝酸盐反应中间体, 从而占据活性位点; 同时 Tl 能与活性钒物种产生强相互作用, 进一步抑制  $\text{NH}_3$ -SCR 反应。进一步的, 提出了通过源头削减毒物输入、过程优化运行工况、失活催化剂高效再生的组合手段, 可为未来解决催化剂 Tl 中毒问题提供指导。

**关键词:** 水泥窑; 重金属 Tl; Tl 富集; 催化剂 Tl 中毒

## 0 引言

除了高挥发的汞, 易挥发重金属 Tl 逐渐引起人们的重视, 业界重点关注窑尾烟气中的 Tl 含量。Tl 已被证实是一种比汞或铅更致命的重金属污染物, 且被美国环境保护署 (US-EPA) 列为优先关注的金属污染物之一, 生物吸收 Tl 的主要原因是其与钾 (K) 具有相似的半径, 富 Tl 或受 Tl 污染土壤可以通过食物链对人类健康构成威胁<sup>[1]</sup>。

Tl 具有明显的亲硫性和亲石性, 多富集于硅酸盐矿物、硫化物矿中。同时, 水泥窑的重金属 Tl 分布具有地区特征, 尤其是以广东、江西、湖南等地较为集中。在中国广东省云浮市, 过度的含 Tl 黄铁矿开采活动已被发现是导致 Tl 污染的主要原因。此外, 为了发展城市循环经济和实现降本增效, 过去几年间, 硫酸厂排放的含 Tl 黄铁矿渣材料被进一步用作当地水泥生产的添加剂<sup>[1]</sup>。农田附近建造的数座水泥厂, 会进一步加剧该地区的 Tl 污染。已知烟气中的 Tl 会与催化剂活性组分  $\text{V}_2\text{O}_5$  反应, 导致其不可逆地失活<sup>[2]</sup>。通过了解典型易挥发重金属 Tl 在水泥窑内的迁移、排放规律和对脱硝催化剂进行分析, 可为水泥生产区及其他类似地区开展重金属污染控制提供重要参考。

摘自《中国水泥》2026 年第 6 期

## 1 水泥窑重金属铊的迁移

### 1.1 铊物种特性

表 1 给出了不同铊物种的熔点和沸点数据,考虑到烟气中含有  $\text{SO}_2$ 、氯化物、氧气等成分,因而表中涵盖了铊相关的单质、硫酸盐、氧化物和卤化物。经分析发现,它们的熔点均低于  $800^\circ\text{C}$ ,仅 Tl 单质和  $\text{Tl}_2\text{O}$  的沸点极高,且均高于  $1450^\circ\text{C}$ 。此外,相较于一价铊化合物,三价铊氧化物具有不溶于水、不易迁移且低毒性的特性,因此铊主要以一价铊的形式进行大气迁移。

表 1 不同铊物种的物理性质

| 成分                       | 熔点                  | 沸点                   | 备注                                                                   |
|--------------------------|---------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Tl                       | $304^\circ\text{C}$ | $1457^\circ\text{C}$ |                                                                      |
| $\text{Tl}_2\text{SO}_4$ | $632^\circ\text{C}$ | 分解(无沸点)              | 高温分解为 $\text{Tl}_2\text{O}$ 和 $\text{SO}_3$                          |
| $\text{Tl}_2\text{O}$    | $300^\circ\text{C}$ | $1865^\circ\text{C}$ |                                                                      |
| $\text{Tl}_2\text{O}_3$  | $717^\circ\text{C}$ | 分解(无沸点)              | 高温 ( $>875^\circ\text{C}$ ) 分解为 $\text{Tl}_2\text{O}$ 和 $\text{O}_2$ |
| $\text{TlCl}$            | $430^\circ\text{C}$ | $720^\circ\text{C}$  |                                                                      |
| $\text{TlBr}$            | $480^\circ\text{C}$ | $815^\circ\text{C}$  |                                                                      |

### 1.2 铊物种分布

根据表 1 的熔沸点数据可推断,生料中的 Tl 在先后进入多级预热器和回转窑的过程中,在回转窑  $1450\sim 2000^\circ\text{C}$  的高温区基本全部挥发,因此熟料中含 Tl 较少。烟气中的含 Tl 蒸气在经五级/六级预热器到一级预热器的降温过程会发生气固转化反应并凝结、吸附在飞灰颗粒物上,同时烟气中的  $\text{SO}_2$  可通过多步反应促进硫酸铊的生成。此外,催化剂的存在也会促进硫酸铊的表面生成(表 2)。当窑尾烟温进一步降低,回转窑烟气中的一部分颗粒物会在  $110\sim 130^\circ\text{C}$  的原料磨中与原料反应并进入原料混合物,导致 Tl 内部循环。经过原料磨后,烟气中剩余的颗粒物进入除尘器,其中大部分窑尾颗粒物被捕获并送回原料仓,导致 Tl 外部循环。最后只有少量颗粒物到达烟囱,从而作为空气污染物排放<sup>[3]</sup>。

表 2 含 Tl 物种在水泥窑中的分布

| 位点   | Tl 物种存在形式                                                     | 关键过程与影响因素                                                                     |
|------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 回转窑内 | 气态为主,主要包括铊的含氧化合物和卤化物                                          | 高温挥发,几乎全部铊气化                                                                  |
| 预热器  | 气态 $\rightarrow$ 固态转变,并冷凝/吸附到飞灰颗粒上                            | 冷凝、吸附、反应( $\text{SO}_2$ 的存在可促进 $\text{Tl}_2\text{SO}_4$ 的生成)                  |
| SCR  | 高温 SCR 烟气包含气态 $\text{Tl}_2\text{O}$ 和其他固态物种,中温 SCR 中完全以固态形式存在 | 催化剂表面吸附的含 Tl 物种会与烟气中 $\text{SO}_2$ 反应形成 $\text{Tl}_2\text{SO}_4$ ,进一步覆盖在催化剂表面 |

### 1.3 铊富集现象

生料是最常用、最合理的参考基准,其代表了重金属输入系统的总量。对于易挥发的 Tl 元素,在窑尾预热器出口的低温环境下,大部分含 Tl 物种均冷凝、吸附于粉尘之上,因而下面

重点针对生料和窑尾粉尘进行 Tl 的排放浓度分析。

图 1 给出了不同水泥生产线生料和窑尾粉尘的铊含量统计结果,所测样品来自 15 条线的生料(图 1a)和 30 条线的窑尾粉尘(图 1b),其中窑尾粉尘 30 份 = SP 灰 8+SCR 灰 12+收尘器灰 10。可以发现,86.7%的生料 Tl 含量处于 0~200mg/kg,13.3%处于 200~700mg/kg。而窑尾粉尘中分别有 66.7%、26.7%和 6.7%对应处于 0~500mg/kg、500~1000mg/kg 和 1000mg/kg 以上的 Tl 浓度区间。

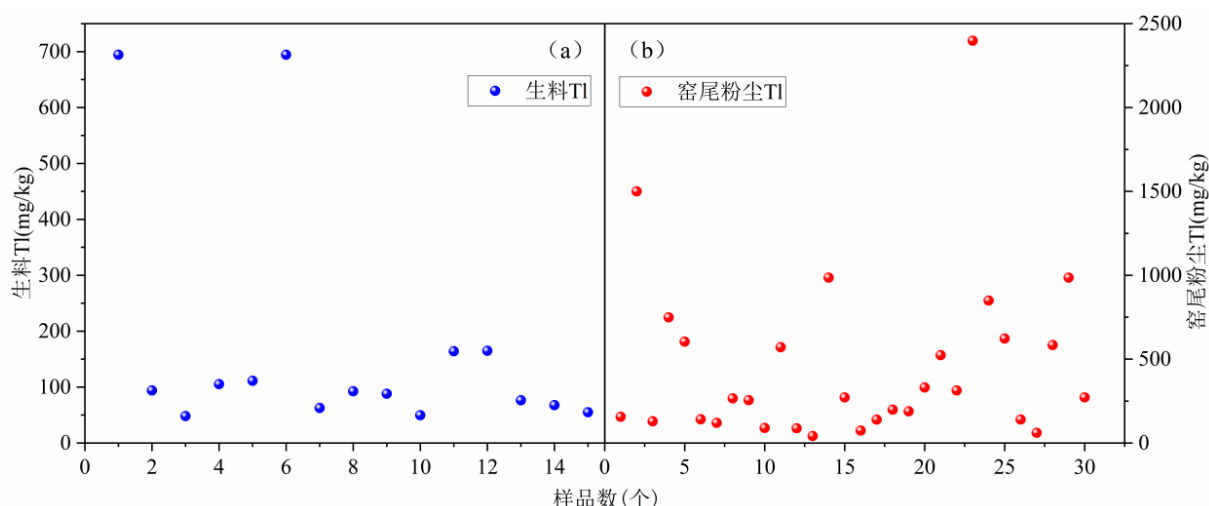


图 1 不同水泥生产线生料和窑尾粉尘的 Tl 含量统计

此外,水泥烟气中重金属的“富集因子”是一个关键指标,可量化重金属在特定部位(通常是窑灰、粉尘)相对于原始生料的富集程度,通常定义为某种物质在目标相(如窑灰)中的浓度与在参考相(如生料)中的浓度之比。基于 ICP-OES 技术(一种定量测试技术且其测试精度相比于 XRF 更高),表 3 给出了 4 个厂不同物料的 Tl 检测结果:发现生料 Tl 含量均处于 0~200mg/kg 区间,且熟料中的 Tl 浓度远低于生料,由此证实生料中的 Tl 进入回转窑并在回转窑的高温区大量挥发。表中的富集因子指代 SCR 后的粉尘与生料的 Tl 含量之比,且以 SCR 粉尘为代表的窑尾粉尘可使生料中 Tl 富集 5~50 倍。对比四个厂发现,C 厂、D 厂的粉尘 Tl 浓度明显高于前两个厂,这是因为中温 SCR (200-300℃) 温度下的 Tl 物种完全以固态形式存在,经过 Tl 的内循环过程可导致其含量显著升高。

表 3 不同水泥厂生产过程中的物料 Tl 含量 mg/kg

|     | SCR 温度/℃ | 生料     | 熟料    | SCR 前粉尘 | SCR 后粉尘 | 富集因子  |
|-----|----------|--------|-------|---------|---------|-------|
| A 厂 | 320      | 5.84   | 1.19  | 199.90  | 209.86  | 35.94 |
| B 厂 | 300      | 45.57  | 2.95  | 301.22  | 322.02  | 7.07  |
| C 厂 | 220      | 62.57  | 12.28 | 622.85  | 1130.56 | 18.07 |
| D 厂 | 200      | 103.30 | 4.72  | 577.47  | 551.11  | 5.34  |

## 2 重金属铈对催化剂的影响

当窑尾含铈烟气进入 SCR 脱硝系统时,这些重金属元素会持续作用于催化剂表面,成为影响其脱硝性能的重要因素。为此,需进一步对 SCR 脱硝系统的催化剂样品进行测试分析,以揭示铈在催化剂上的积累规律及其对催化活性的具体影响。

### 2.1 样品分析

通过对 5 条水泥熟料生产线的脱硝催化剂进行取样和 XRF 成分分析,可获得催化剂上的重金属含量。Tl 含量检测分别基于两种原理的仪器进行测试,一种是日本理学 ZSX Primus IV 的 X 射线荧光光谱仪 (XRF),另一种是美国 Agilent 7700 型号的电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES)。XRF 测试所用样品为现场所取碎片状催化剂研磨后的粉末经压片法制得的直径 30mm 的圆片,并采用归一化处理给出各种成分氧化物形式的百分含量。ICP-OES 测试方法为:对约 0.1g 的样品进行微波消解酸溶并定容至 10mL,测试时稀释十倍获得对应元素的浓度 ( $\mu\text{g/L}$ ),计算可得样品的元素含量 ( $\text{mg/kg}$ )。

表 4 给出了 5 个不同省份水泥厂中温 SCR 催化剂的重金属 As 和 Tl 的半定量测试结果,其表现为痕量的 As 和显著的 Tl 含量,二者最多可相差几千倍。尤其广东某厂的催化剂 Tl 含量高达 2.52%,其在催化剂上的富集会随时间累积,由此引发的催化剂 Tl 中毒问题不可忽视。先前研究表明,当铈负载量到达 6%以上,即使在 400℃条件下高温 SCR 催化剂也会完全丧失 NO<sub>x</sub> 转化能力,同时催化剂表面富集的铈以 Tl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 Tl<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>两种形态存在,并导致酸位点的数量和强度显著降低<sup>[4]</sup>。

表 4 不同水泥厂的重金属 As 和 Tl 含量

|        | As 浓度 (%) |        |        | Tl 浓度 (%) |        |        |
|--------|-----------|--------|--------|-----------|--------|--------|
|        | 一层        | 二层     | 三层     | 一层        | 二层     | 三层     |
| 1 福建某厂 | 0.0040    | 0.0088 | 0.0070 | 0.3080    | 0.5929 | 0.5250 |
| 2 广东某厂 | /         | /      | /      | 2.5200    | 1.5500 | 1.5700 |
| 3 浙江某厂 | /         | /      | /      | 0.3206    | 0.4243 | 0.4777 |
| 4 安徽某厂 | /         | /      | /      | 0.8720    | 0.1900 | 0.3550 |
| 5 四川某厂 | 0.0015    | 0.0004 | 0.0013 | 0.4280    | 0.3750 | 0.7930 |

### 2.2 催化剂铈中毒机制

铈存在于水泥生料的主要原料黄铁矿和云母中,因此在水泥窑烟气中检测到了铈,且铈会引发商业 SCR 催化剂发生不可逆的化学失活。Tl 对脱硝催化剂的影响主要体现在以下几方面<sup>[5]</sup>。

(1) 活性钒物种的形态转变和数量减少。钒物种从单体向聚合态和晶态转变,且形成了 V-O-Tl

物种，导致活性  $V^{5+}$  位点数量大大减少。

(2) 活性钒物种的还原温度随着 Tl 负载量的增加而升高。这一现象表明，Tl 与 Ti-V/Ti 催化剂上的 V 物种发生相互作用，显著降低了其氧化还原性能，从而不利于  $NH_3$ -SCR 反应。

(3) 占据酸性位点从而抑制氨的吸附。Tl 的沉积会抑制  $NH_3$  在 Brønsted 和 Lewis 酸位点上的吸附，因此对  $NH_3$ -SCR 反应表现出毒化作用。

(4) 引发不活泼的硝酸盐反应中间体逐渐积累。未能及时分解的中间体会占据活性位点，进一步抑制产物的生成。随着铊沉积量的增加，中毒效应加剧，最终导致催化活性完全丧失。

### 3 水泥生产过程中的铊控制策略

目前采用的主流思路是“防治结合”，主要聚焦于源头原料控制、生产工艺优化和催化剂性能提升三方面。

首先要严格管控原料，现行标准对 Tl 的入窑含量缺乏限值要求，与已有限值的砷 (As)、铅 (Pb) 等相比，存在监管盲区，因而急需对入窑的生料、燃料和协同处置的废弃物进行重金属含量分析，限制高 Tl 物料入窑。该策略是协同控制体系的首要环节，同时可采用前端脱除技术--在原料预处理阶段，通过浸出、分离等湿法工艺，有选择性地将铊组分提前提取并回收，从源头上减少随物料进入高温烟气的 Tl 总量，但该法流程复杂且成本高。

生产工艺优化主要通过定期、高效地吹灰和清灰实现，减缓粉尘中因 Tl 富集造成的催化剂快速失活。具体的，可将耙式吹扫与声波清灰有机结合，通过智能控制，根据催化剂的实际积灰情况选择清灰方式和强度，取长补短，以达到精细化清灰的效果。同时，需对窑灰 Tl 浓度开展定期检测，一旦达到浓度阈值，应及时进行卸灰或资源化处理。

催化剂性能提升主要通过添加抗铊元素、调整孔结构等改进 SCR 催化剂配方。研究表明引入分子筛 ZSM-5 可提高钒钛催化剂的抗铊中毒能力，ZSM-5 充当牺牲剂的角色，可保护 V-O-H 和 Ti-O (H) -Ti 键<sup>[6]</sup>。当催化剂性能低至一定阈值且难以满足排放要求时，将失活催化剂运回专业工厂，通过物理清除、化学清洗、活性组分再负载、煅烧等全套工艺全面恢复催化剂活性。

总而言之，解决催化剂 Tl 中毒问题的核心，是从源头减少毒物输入，在过程中优化工况，并对失活催化剂进行高效再生，这一理念在不同催化剂体系中具有普适性。

### 4 结语

Tl 作为一种毒性极强的重金属污染物，目前已普遍在水泥窑脱硝催化剂中被检出。基于 Tl 易挥发、高富集的特性，分析发现其在水泥窑生产过程中主要分布于窑灰和 SCR 单元，并通过内外循环机制进行迁移。对多条水泥生产线的生料和窑尾粉尘进行统计，结果显示 90% 以上样品的 Tl 含量分别处于 0~200 mg/kg 和 0~1000 mg/kg 范围。而 SCR 催化剂中铊含量普遍高达上

千 ppm，远高于 As 元素。对比高温与中温 SCR 工艺，中温 SCR 因温度更低，窑尾粉尘中 Tl 的富集倍数更高（可高出生料数倍至数十倍）。建议国家和地方政府尽快制定废气中铊及其化合物的排放限值，并加强对原燃料中重金属的源头监测，通过源头控制、过程治理与末端净化相结合的方式，有效降低 Tl 等易挥发重金属对环境和公众健康的危害。

#### 参考文献：

- [1] LIU J, REN J, ZHOU Y, et al. Effects and mechanisms of mineral amendment on thallium mobility in highly contaminated soils [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 262: 110251.
- [2] 李雨田. 水泥窑烟气中铊与氨逃逸对 SCR 催化剂的协同毒化机理及控制策略 [J]. *水泥*, 2026, (05): 25-7.
- [3] HUANG Y, LIU J, FENG X, et al. Fate of thallium during precalciner cement production and the atmospheric emissions [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 151: 158-65.
- [4] HUANG X, WANG D, ZHAO H, et al. Severe deactivation and artificial enrichment of thallium on commercial SCR catalysts installed in cement kiln [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2020, 277: 119194.
- [5] XUE Q, XING J, CHEN J, et al. Unveiling the poisoning mechanism of thallium on the catalytic performance of commercial V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub> SCR catalyst [J]. *Fuel*, 2025, 386: 134208.
- [6] LI J, JIN Y, LI J, et al. Enhancing thallium tolerance and SCR performance of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/WO<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> catalysts through ZSM-5 modification: Mechanism and regeneration [J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 374: 133721.

# 精益管理在水泥装备制造中的实践探讨

姜少英

(中建材装备集团共享智造分公司, 安徽 合肥 231699)

## 摘要:

辊压机、立式磨、除尘器、提升机等水泥行业专用成套装备属于典型的离散型制造产品, 具有小批量、多品种、高度定制化的生产特征, 企业在推进提质、增效、降本的生产运营优化工作中面临诸多瓶颈。本文立足精益管理核心思想, 以水泥装备全流程制造场景为研究载体, 以精益人才体系建设为基础, 以 6S 现场治理为核心抓手, 以信息化系统为数据支撑链条, 整合生产节拍管控、产线自动化升级、全员创新改善等多元实施路径, 系统构建适配水泥装备离散生产模式的精益管理体系。通过企业现场实践验证, 该体系在中建材装备集团智造园应用实践后, 取得了良好效果, 期望能为离散型装备制造企业的精益化转型提供实践参考与体系借鉴。

**关键词:** 精益管理; 精益人才; 6S 管理; 信息化; 节拍; 改善活动

## 0 引言

当前, 装备制造业正朝着高端化、智能化、数字化方向深度转型, 精益管理作为优化生产组织模式、革新企业管理逻辑、破解生产低效难题的核心工具, 已成为制造企业实现降本增效、高质量发展的重要路径。科学落地精益管理体系, 能够有效优化车间工艺布局、规范全流程作业标准、提升生产运营效能、压缩综合制造成本, 为装备制造企业转型升级筑牢管理根基。

国内外离散制造业已围绕精益管理开展大量理论与工程实践, 形成了标准化、数字化、持续化的精益发展体系。不同行业的生产业态差异, 决定了精益管理无法照搬套用, 必须结合行业特性定制化落地。本文依托中建材装备集团智能制造产业园(以下简称“智造园”)精益改造实践, 聚焦水泥行业成套装备生产场景, 探讨离散型重工装备的精益管理落地模式与实施路径。

智造园主营辊压机、立式磨、提升机、除尘器等水泥行业核心装备, 属于典型的订单式离散制造业态。以核心产品之一辊压机为例, 单台重量为 150~500 吨, 结构复杂、非标零部件占比高, 年产规模仅数十至数百台套, 无标准化量产条件, 无法形成规模化流水线作业。相较于汽车、家电等大批量标准化离散制造行业, 水泥装备定制化生产特征显著, 传统精益管理模式适配性不足, 精益改造落地难度更大。因此, 构建适配水泥行业装备生产特性的特色精益体系, 实现管理提质、生产增效、成本压降, 成为企业高质量发展的核心着力点。

## 1 国内外离散型制造业精益管理研究与实践概述

全球精益管理发展已从传统的现场改善、流程优化，逐步迈入数字化、智能化赋能的全新阶段，数字化与精益理念的深度融合，成为当前离散制造业的研究热点与落地核心。

2010 年以来，工业物联网、大数据、人工智能等数字技术快速普及，推动传统精益管理从“经验驱动”向“数据驱动”迭代。国外离散制造企业率先实现精益理论与数字技术的深度融合，依托 MES 制造执行系统、WMS 仓储管理系统、IoT 数据采集、数字孪生等技术，大幅提升精益落地精度。核心应用体现在三个维度：一是基于价值流图仿真技术，实现生产方案的前置模拟与优化，规避现场改造风险；二是通过 MES 系统实时采集生产工时、设备状态、工序进度等数据，将传统事后复盘式改善，转变为实时监测、动态调整的主动优化模式；三是依托数字孪生技术完成设备与产线仿真迭代，让精益持续改善摆脱经验依赖，实现精准化、数据化落地。

国内离散制造业结合自身产业特征，形成了适配本土企业的精益落地体系。国内离散制造普遍存在多品种、小批量、订单波动大、定制化占比高、管理基础薄弱、人员流动性大、供应链协同不足等痛点，行业在长期实践中摸索出本土化精益管理路径，核心包含四大维度：其一，以价值流诊断为前置基础，精准识别生产全流程浪费点，结合企业管理现状与行业痛点定制改造方案；其二，以现场管理为突破口，从 5S 和标准化作业切入，逐步延伸至产线布局、物流协同、生产计划、供应链管理的全方位优化，实现由点及面的分层落地；其三，推进精益流程与数字化技术双向融合，将标准化精益流程嵌入工业软件底层，以系统管控替代人工经验，弥补企业管理短板；其四，构建全员持续改善机制，依托常态化创新活动，形成长效精益迭代体系。

## 2 水泥装备离散制造精益管理的痛点与行业特征

水泥装备制造属于重型离散制造业，区别于普通轻工离散制造与水泥熟料流程化生产，其独特的生产业态导致通用精益体系难以直接复用，核心特征与管理痛点如下。

### 2.1 订单驱动生产，定制化程度高，生产批量小

不同水泥生产线的产能规模、生产工况、厂区布局存在显著差异，设备的结构参数、配置方案、适配工艺均需按需定制，单品类产品生产批次少、批量小，无法形成连续稳定的规模化流水线作业，传统适配大批量标准化生产的精益管理模式，难以直接适配水泥装备制造场景。

### 2.2 非标产品为主，零部件繁杂，生产重复性低

水泥行业装备属于大型非标机电一体化设备，产品零部件品类繁多、尺寸跨度极大，非标定制件占比高。不同订单的生产工序流程、加工精度、装配工艺差异显著，生产重复性极低，难以实现全工序标准化管控与全流程自动化作业，大幅增加了精益标准化改造的落地难度。

### 2.3 生产工序离散碎片化，无固定生产节拍，生产柔性强

生产全过程中，钢板下料、铆焊、机加工、装配、涂装等各核心工序相互独立、工位分散布局，无连续、固定的标准生产节拍。单工序设备可独立停机检修，生产调整自由度高。但高度柔性的生产模式导致生产排产随机性强、工序衔接不畅、产能均衡性差，难以实现流水线式的节拍化均衡生产。

### 2.4 物料体系复杂，现场管控与齐套性保障难度大

水泥装备产品采用多层级复杂 BOM 结构，原材料、标准件、非标零部件、外协配套件品类繁杂。生产过程中易出现物料滞后、缺料待工、物料错配、零部件乱堆乱放等问题，物料齐套管控、现场定置管理、物流动线优化难度远高于普通制造业，是现场精益管控的核心难点。

### 2.5 人工依赖度高，作业规范性与质量稳定性可控性弱

受非标产品特性、复杂工序工艺限制，产品焊接、加工、装配等关键核心工序无法实现全面自动化替代，生产质量和工序效率高度依赖技工的专业技能。员工技能水平、操作习惯存在个体差异，直接影响产品质量、工序效率与工艺一致性，导致标准化作业落地难度较大，亟需依托人才培养与现场管控弥补自动化技术的应用短板。

### 2.6 信息化协同不足，生产数据碎片化、联动性差

传统生产模式下，产品研发设计、工艺编制、现场生产、质量检验、仓储物流、采购供应等各业务环节信息相互割裂，形成数据孤岛。非标产品工艺变更频繁，人工信息传递易出现滞后、偏差、错位等问题，生产数据可视化、协同化程度低，亟需搭建全流程贯通的数字化体系，支撑精益精细化管控。

综上所述，水泥行业装备的离散制造生产特性决定了其无法照搬通用制造业精益管理体系，必须立足行业特点与生产实际，构建适配自身发展特性的精益管理体系。

## 3 精益组织建设与人才培养的落地支撑作用

精益管理的长效落地，离不开完善的组织架构与专业化人才梯队支撑。智造园坚持“组织先行、人才赋能”的建设思路，搭建三级精益组织体系与多层级人才培养机制，为精益改造落地筑牢根基。

### 3.1 层级化精益组织搭建

中建材装备集团在智造园构建了自上而下的三级精益管理组织体系，实现统筹规划、分级落实、全域覆盖。总部设立精益管理总倡导者、总执行人，负责顶层战略规划与制度设计；下设专职精益管理办公室，统筹方案落地、督导检查与资源协调；各分子公司设立二级精益组织，由单位主要负责人担任组长，压实主体管理责任；各生产班组搭建三级落地组织，推动精益工作下沉一线、直达岗位。同时，二级组织专设精益专员岗位，承担承上启下的核心职能，向上

对接总部精益工作部署，向下普及精益知识、组织现场改善、协调跨部门落地事宜，保障精益体系高效闭环运转。

### 3.2 系统化精益人才培养

中建材装备集团以学习型组织建设为抓手，构建完善的精益人才培养体系，搭建精益工程师综合能力模型（图1），形成“精益管理层—精益工程师—现场精益专员”的三级人才梯队，全方位夯实企业精益运营能力。精益人才培养主要涵盖四大维度：一是打造创新精益文化，通过优化组织机制、完善制度流程、健全激励体系、常态化开展改善活动，营造全员改善、持续创新的氛围；二是推行全场景规范化管理，统一员工行为规范、现场定置标准、制度执行细则，夯实基础管理能力；三是系统化落地精益核心模块，分步推进6S现场管理、TPM设备保全、标准化作业、全员改善、精益指标管控等重点工作；四是建立常态化监督考评机制，通过交叉检查、专项督导、评比考核，倒逼精益管理队伍能力提升，实现体系建设与人才培养双向赋能。



图1 精益工程师综合能力模型

## 4 6S 现场管理的实践应用

智造园在传统5S管理基础上融入安全管控模块，构建适配重工制造场景的6S管理体系，通过整理、整顿、清扫、清洁、素养、安全六大维度的系统化管控，全面规范生产现场秩序，夯实精益管理基础。

整理、整顿、清扫、清洁是现场管理的基础核心环节。智造园通过全域物资梳理、分区分类管控、标准化标识布设、现场动线优化等举措，实现生产现场整洁规范。现场推行“100米、10米、1米”三级整洁提升活动，依托地面标线、区域分割、标识标牌、专用托盘等标准化载体，搭建规范化现场管控框架，实现人员、设备、物资的有序管控，从源头杜绝现场杂乱、物料错配、作业低效等问题，为标准化作业与节拍化生产落地奠定基础。某生产区现场标准化管理效果如图2所示。

素养与安全是保障精益长效落地的关键，贯穿生产作业全流程。园区从三方面推进落地：一是前置厂区工艺规划与安全设计，依托科学的硬件布局潜移默化规范员工作业行为；二是深化制度落地，编制推广《目视化手册》、《精益管理手册》，统一现场管理标准，实现全员参照执行；三是强化教育培训、考核评比与多级检查，通过园区交叉检查、车间互查、班组自查的三级管控模式，结合专项评比与交流汇报，精准补齐管理短板，培育员工规范作业、安全履职的良好职业素养。

信息化数字化体系是破解离散制造信息割裂、数据碎片化问题的核心支撑，是精益管理标准化、精细化落地的重要底座。智造园搭建多系统协同的数字化管理体系，实现研发、生产、仓储、质控、采购全流程数据贯通。

多系统的协同应用，构建了覆盖研、产、供、销、服的全维度数字化管理体系，形成标准化的数据流转机制与作业执行规范，有效盘活企业数据资产，为精益管理的精准落地、动态优化、持续迭代提供坚实的系统与数据支撑。

## 6 节拍化与自动化精益生产模式实践

借鉴流程性行业推进的节拍化管理理论，把节拍化生产作为工序内精确控制生产节奏（即“节拍”）的措施来组织生产。这里的“节拍”指完成一个产品所需的平均时间，在装备制造环节，计算公式可简化为：节拍 = 单位有效工作时间 / 单位时间客户需求数量。例如，若日需 100 台产品，有效工作 16 小时，则节拍为 9.6 分钟/台。以涂装工序节拍化生产为例，如图 3，通过推进小件涂装节拍化管理，效率提升 26%，台车及空间利用率提升 50%，有效提升了产线产能。



针对工件类型设计合理优化工装，主要从工装标准化，实现快速换模、提高台车利用率及空间利用率、减少修补量等方面开展，最终实现产线节拍的提升和产量的增加，如袋笼涂装线产量较之前提升约 50%，小件涂装线较之前节拍提升 26%、台车利用率及空间利用率提升 50%，产量提升 30%，成品修补量降低 20%。

图 3 节拍化生产实施效果

在节拍化管理理论的指导下，对产品的生产制造工序进行了节拍化分解，以辊压机机架焊接为例，将生产流程拆解为钢板下料、坡口加工、铆焊装配、打磨修整四大核心工序，分别测算各工序标准节拍与物料周转周期，通过工序串联模拟流水线作业逻辑，结合 MES、智能制造平台等系统自动统计生产节拍、核算产能、定位生产瓶颈，为生产优化提供量化决策依据。

节拍化、流程化分析为产线自动化升级奠定了基础。智造园结合产品标准化程度差异，针对性推进智能化改造。在提升机生产环节，以链板、销轴等批量化产品为例，通过工艺流程分析和节拍化管理，把生产过程分解为剪切、打磨、钻孔、精加工、码垛等标准工序，根据标准工序配置自动化产线。通过对焊接、机加工等重复性强的工序部署焊接机器人、自动化加工中心、抓取机械手及标准化工装，实现中间节、料斗、链板、销轴等零部件的自动化生产。

针对辊压机等大型非标装备，全面梳理生产工序与物流周转节拍（图 4），通过工序标准固化、关键工序智能化升级，在无法实现全流程自动化的前提下，有效提升生产标准化水平与作业效率，破解离散制造低效难题。

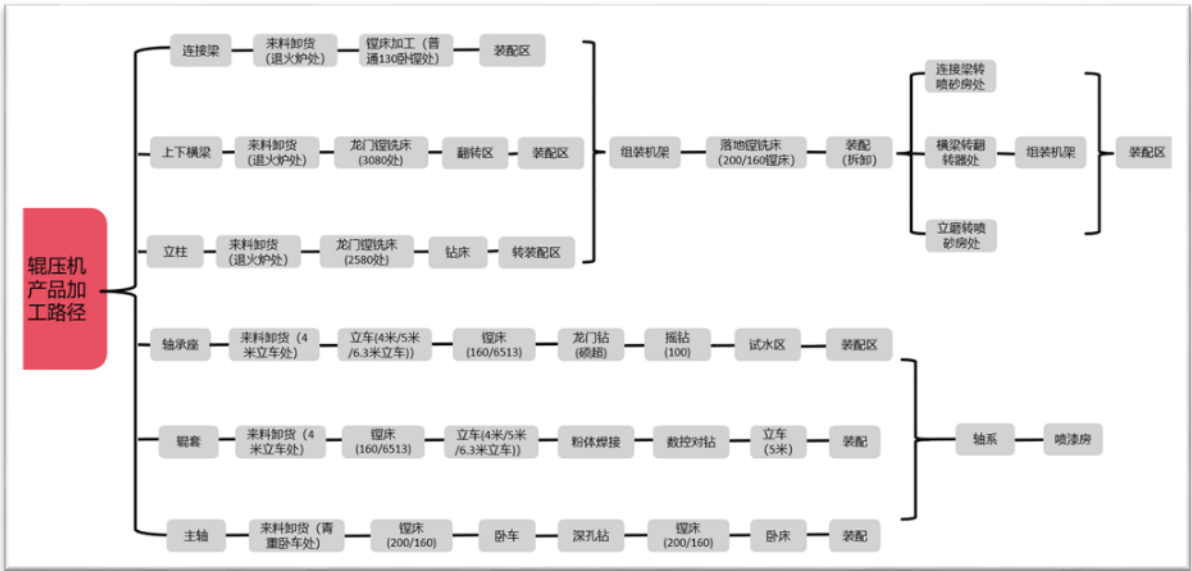


图 4 生产工序分解图

7 全员改善活动的长效提质作用

在推进节拍化管理的基础上，通过工序间的数据统计分析，为进一步推进改善活动奠定了基础。

全员持续改善是精益管理迭代升级的核心动力，智造园构建 QCD 全员提案与 TDR 专项改善双向并行的改善体系，实现全域、全员、全流程的持续优化。

QCD 提案聚焦质量、成本、交货期三大核心指标，鼓励员工立足岗位开展小微创新与工艺优化；TDR 专项改善聚焦时间、成本、资源三大维度，开展系统性、整体性的流程优化与资源提质。

以除尘器生产车间为例，通过推进改善活动后的实施效果分析如图 5 所示。

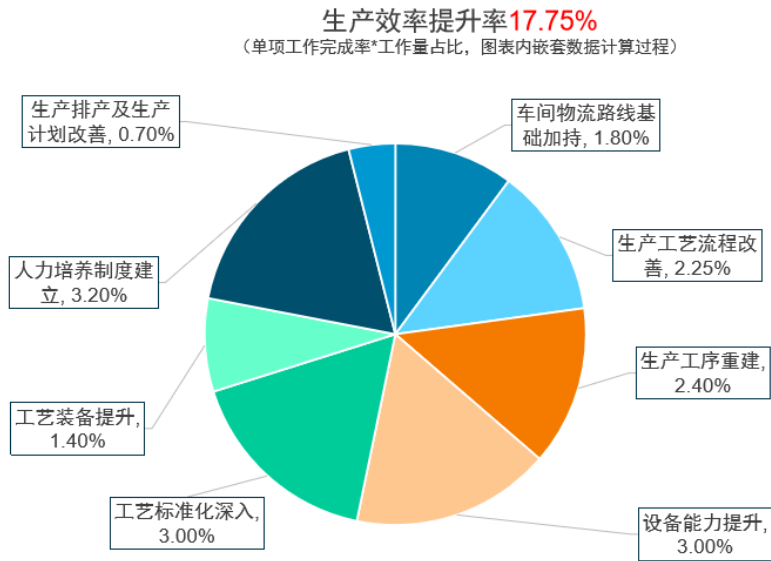


图 5 除尘器生产车间推行改善活动的效果分析

除尘器生产车间在 TDR 专项改善活动中，以“三齐、三统一、三不落地”为活动方案，推进零部件摆放整齐、工器具摆放整齐、材料备件堆放整齐的“三齐”管理；推进设备颜色统一、周转箱架统一、工器具放置柜统一的“三统一”管理；推进零部件不落地、装配制作不落地、材料备件不落地的“三不落地”管理。精益团队根据现场生产特点，梳理零部件、物流路线、工装架、工具架、设备编码、物料编码、生产工序、生产工艺等要素，系统优化了生产工艺与现场管理体系。“三不落地”专项改善活动效果如图 6 所示。

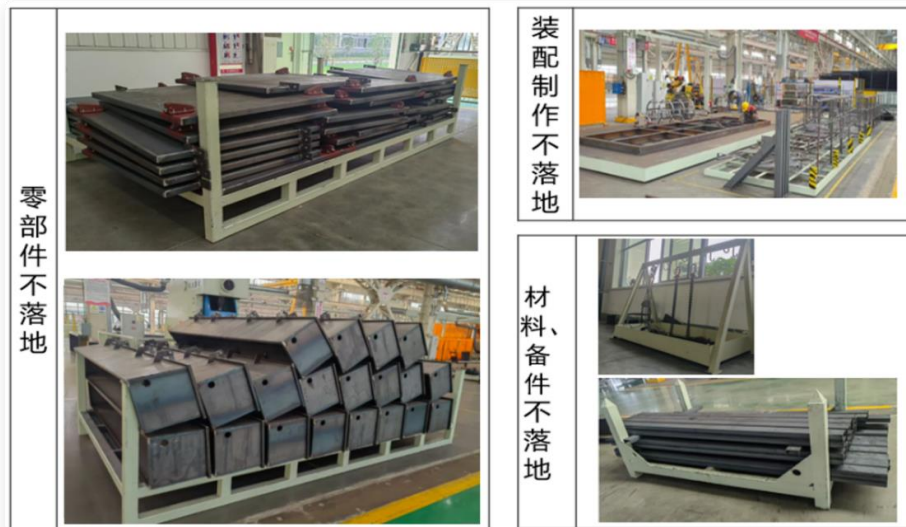


图 6 “三不落地”专项改善活动实施效果

提升机生产车间常态化推进 QCD 提案改善，建立“每人每月 1 条改善提案”的长效机制，阶段性员工月均提案量达 3.5 条/人。车间通过提案公开公示、快速落地、交流分享、专项激励四大举措，充分调动全员创新积极性，有效解决现场生产、设备运维、流程衔接中的各类痛点问题，现场改善成效显著（图 7、图 8）。



图 7 现场提案改善案例

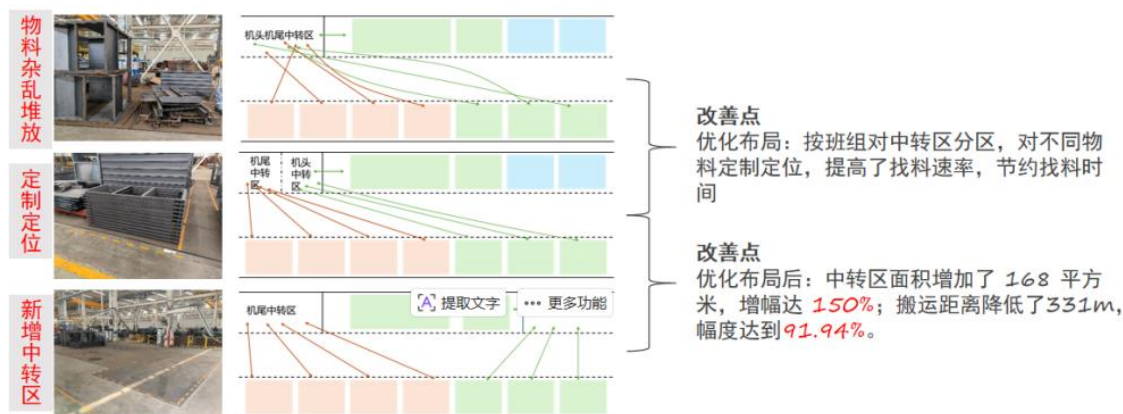


图8 专项改善活动案例

目前，全员改善活动已覆盖生产、设备、综合管理等全业务场景。通过常态化的小微创新与专项优化，实现了持续精简作业流程、优化资源配置、降低生产损耗的目标，这也是企业培育精益文化、夯实管理能力、实现长效提质增效的核心保障。

## 8 结语

水泥装备制造作为典型的重型离散型制造业，具有定制化、小批量、非标化的显著生产特征，无法直接套用大批量制造业的标准化精益体系。智造园立足行业生产痛点与企业运营实际，以数字化、智能化、系统化为精益建设导向，构建了“组织人才为根基、6S 现场管理为抓手、信息化系统为支撑、节拍化自动化优化为核心、全员改善为动力”的定制化精益管理体系。

离散型装备制造业的精益转型是一项全员参与、全域覆盖、长期迭代的系统性工程。后续企业需持续深化精益与数字化的深度融合，常态化开展流程优化与现场改善，持续补齐管理短板、挖掘增效潜力，推动水泥装备离散制造模式实现规范化、精细化、智能化高质量转型升级，为同类重工离散制造企业的精益化发展提供可复制、可推广的实践经验。

## 参考文献：

- [1] 新益为. 6S 精益管理实战. 人民邮电出版社. 2020.
- [2] 吴明. 工厂现场精细化管理手册. 人民邮电出版社（第 2 版）. 2023.
- [3] Pongboonchai-Empl, et al. Critical success factors of digital lean transformation in discrete manufacturing [J]. sustainability, 2024.
- [4] Wagner T, et al. Lean 4.0: How can digital technologies support lean practices? [J]. Procedia Manufacturing, 2017.