

湿法再生技术在铸造粘土废砂资源化中的应用

王宁¹, 戴伟平¹, 潘东鑫², 范毅², 罗桂猛¹, 张继伟³, 梁巍², 尹长城³, 班璐²,
韩义勇^{2*}

¹广西兰科资源再生利用有限公司, 广西 南宁

²南宁学院交通运输学院, 广西 南宁

³湖北汽车工业学院汽车工程学院, 湖北 十堰

收稿日期: 2025年6月26日; 录用日期: 2025年8月2日; 发布日期: 2025年8月15日

摘要

针对铸造粘土废砂传统处置方式导致的土地侵占、资源浪费及环境污染问题, 本研究提出以湿法再生技术为核心, 结合“机械-热法-湿法”三级工艺耦合的创新路径。通过开发选粉脱膜机、复式焙烧炉及强力擦洗机等核心装备, 突破传统再生技术瓶颈; 在湿法环节创新采用梯度压力旋流分离、SDBS-聚醚改性硅氧烷复配药剂及闭式水循环系统, 显著提升再生砂洁净度与稳定性。工业化应用表明, 本技术实现再生砂含泥量小于0.3%、角形系数接近新砂, 可替代新砂用于高端铸件生产, 为铸造业绿色转型提供技术支撑。

关键词

湿法再生, 粘土废砂, 工艺耦合, 绿色铸造

The Application of Wet Recycling Technology in the Resource Utilization of Foundry Clay Waste Sand

Ning Wang¹, Weiping Dai¹, Dongxin Pan², Yi Fan², Guimeng Luo¹, Jiwei Zhang³, Wei Liang²,
Changcheng Yi³, Lu Ban², Yiyong Han^{2*}

¹Guangxi Lanke Resources Recycling Co., Ltd., Nanning Guangxi

²College of Traffic and Transportation, Nanning University, Nanning Guangxi

³School of Automotive Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan Hubei

Received: Jun. 26th, 2025; accepted: Aug. 2nd, 2025; published: Aug. 15th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 王宁, 戴伟平, 潘东鑫, 范毅, 罗桂猛, 张继伟, 梁巍, 尹长城, 班璐, 韩义勇. 湿法再生技术在铸造粘土废砂资源化中的应用[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(8): 1136-1141. DOI: 10.12677/aep.2025.158126

Abstract

In response to the problems of land occupation, resource waste and environmental pollution caused by traditional disposal methods of foundry clay waste sand, this study proposes an innovative path with wet recycling technology as the core, combined with the “mechanical-thermal-wet” three-stage process coupling. By developing core equipment such as powder selection and film removal machines, compound roasting furnaces and powerful scrubbing machines, the bottlenecks of traditional recycling technologies are broken through. In the wet process, innovative adoption of gradient pressure cyclone separation, SDBS-polyether modified siloxane compound reagents and a closed water circulation system significantly improves the cleanliness and stability of recycled sand. Industrial application shows that this technology enables the recycled sand to have a mud content of less than 0.3% and an angular coefficient close to that of new sand, which can replace new sand in the production of high-end castings, providing technical support for the green transformation of the foundry industry.

Keywords

Wet Regeneration, Clay Waste Sand, Process Coupling, Green Casting

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

铸造行业作为装备制造业的基础支撑,在我国工业化进程中发挥着重要作用。然而,其生产过程中往往伴随着严重的环境资源问题:每生产1吨合格铸件就会产生1.5吨废砂,我国年排放量超过2000万吨,其中粘土废砂的占比高达70%。这些废砂的传统处置方式为填埋为主,再生率仅为20%~30%,这种处理方式不仅每年侵占土地5000亩,填埋层厚达3米,更迫使企业每年新开采天然硅砂1900万吨,加剧了硅砂资源的枯竭风险,同时丢弃大量含害废砂,导致资源枯竭与环境污染双重压力[1]。利用铸造废砂替代天然砂石制备土木工程材料(如混凝土路基、回填料等),是消纳此类固体废弃物并实现资源化利用的主要路径[2]。

面对此类问题,行业内部对废砂再生循环利用的研究也在不断加深。目前行业内部主流的再生技术为热法再生、机械再生两大技术,但都存在显著瓶颈:热法再生技术会使砂粒表面膨润土陶瓷化,杂质难以清除;而机械再生导致砂粒粉化严重、酸耗值累积上升,造成再生砂循环寿命短、砂芯强度下降,不能满足高端装备制造的要求。

由此,传统主流的废砂再利用技术不足以满足行业的需求,行业急需一种新型的废砂再利用技术来减轻废砂处理的费用,通过循环经济来提高废砂的再利用率[3]。面对这一困境,本文通过新型的湿法再生技术作为核心载体,通过“机械-热法-湿法”三级工艺耦合,在企业的规模化应用案例验证其经济性,为铸造业绿色转型提供实证路径[4]。

2. 广西铸造粘土废砂处理行业现状

2.1. 区域废砂现状

广西作为西南地区铸造产业聚集区,现有规模以上铸造企业47家,年产铸件逾180万吨。根据2023

年广西机械工程学会统计数据，每吨铸件产生废砂量达 1.1 至 1.3 吨，全区年排放粘土废砂超 200 万吨。这些废砂中残留膨润土、煤粉及重金属，直接填埋导致两大突出问题：土地资源侵占：按填埋深度 5 m 计算，年占用土地超 600 亩；地下水污染风险：渗滤液 COD 高达 800 至 1500 mg/L 之间，超出《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB16889-2008)标准限值 2.3 倍。可见废砂含有机树脂、重金属等有害成分，处理不当加剧生态环境负担[5]-[7]。

2.2. 传统再生技术效能瓶颈

面对铸造废砂，广西铸造企业主要采用两类处理方式，均存在显著缺陷：

1、热法再生技术：燃气加热温度需稳定在 650℃至 750℃之间，每吨再生砂能耗折合标准煤 42 kg，成本达 110 元/吨，使得废砂再生的能耗与经济性失衡；灼减量波动于 1.5%至 3.0%之间，仅能满足 HT250 以下牌号铸件要求，无法满足高端装备制造的要求；在焙烧过程产生 SO₂ 及粉尘，超出《锅炉大气污染物排放标准》(GB 13271-2014)排放标准，造成二次污染。

2、简易湿法再生技术：相比较于热法再生技术，湿法再生资源利用率提高，污染小[8]。单级水力旋流器对微粉分离效率仅在 40%左右，再生砂含泥量达 2%左右，分级效率低下；在资源利用方面，每吨砂平均耗水量达到 6.5 吨，废水回用率不足 60%，造成水资源的浪费；相关设备在使用过程中，酸性介质加快了碳钢设备腐蚀，使得设备侵蚀严重。

3. 废砂再生技术突破

3.1. 核心装备开发

1、机械再生装备：选粉脱膜机

选粉脱膜机通过双轴对向旋转的锤片结构，在沸腾悬浮状态下使废砂相互摩擦，强力剥离砂粒表面的残留粘结剂及惰性杂质，同时内置抽风系统实现沙尘高效分离，防止粉尘二次附着。其沸腾悬浮设计大幅降低砂粒间碰撞强度，将粉化率从传统工艺的大于 25%降至小于 5%，维持砂粒平均粒径稳定，显著提升再生砂收得率并避免铸件表面粗糙问题。本装备突破传统机械再生中“孔隙惰性膜清除不足”和“高粉化率”两大瓶颈，吨砂电耗降低 30%，且模块化易损件设计使维护成本下降。专利技术支持其连续高效运行，在处理量项目中实现再生砂角形系数优于新砂，直接替代新砂用于冷芯盒树脂制芯，减少铸件脉纹、粘砂缺陷。

2、热法再生装备：复式焙烧炉

复式焙烧炉采用窄通道流化沸腾设计，实现废砂快速升温，集中焙烧热能并减少散热损失。其两段式换热系统将热能利用率提升至 85%以上，较传统热法节能而言，显著降低吨砂能耗 30%。同时，炉内高温使废砂热解产生的 VOCs 在焙烧段充分燃烧，尾气污染物排放浓度低于环保限值，无需额外处理设备，解决了传统热法“能耗高、尾气难处理”的痛点。

3、湿法再生装备：强力擦洗机

强力擦洗机以水为介质，通过六缸串联式旋转摩擦深度剥离砂粒表面嵌入的惰性杂质，清除率大于 95%。其创新设计结合疏水料仓和双层脱水筛，将吨砂耗水量降低，废水回用率达 95%以上，污泥处理成本降低。柔性擦洗工艺避免砂粒破碎，再生砂角形系数优于新砂，彻底突破传统湿法“高水耗、高污泥处置成本”的瓶颈。

3.2. 湿法再生技术协同优化

1、工艺创新：梯度压力旋流分离

公司由于铸造废砂排放压力大，环保问题突出，在各级政府部门高度关注下，在 A 的委托和要求下，B 公司在 2012 年快速启动建设年处理 25 万吨铸造废砂再生循环利用项目，实现了 A 废砂再生循环利用，推动了 A 的绿色可持续发展。项目采用了铸造粘土废砂综合利用成套技术及装备对铸造废砂进行再生处理，可完全去除砂子表面杂质、不损伤砂子，产出的再生砂性能优越，技术参数均在使用指标范围之内，能有效减少新砂投入量，优化铸造工艺。项目建成投产后，年均销售收入 1 亿元、利税 1493 万元，当基准收益率为 12% 时投资回收期 4~5 年。项目达产后，A 每年直接减少 25 万吨铸造固废排放量，减少自然资源开采 40 万吨，项目为发动机产业的可持续发展作出了应有的贡献。从表 1 呈现的 B 公司混合型废砂不同再生工艺实验结果可知，湿法再生工艺具有显著优势。

Table 1. Experimental results of different regeneration processes for mixed waste sand in company B
表 1. B 公司混合型废砂不同再生工艺实验结果

再生方法	1、湿法	2、纯热法	3、热法+机械	原新砂	备注
废砂试验量	100 吨	100 吨	100 吨	/	
砂含量	85.2 吨	84.3 吨	84.8 吨	/	方案 1 产生的煤泥含 92% 以上有效煤粉及粘土，可生产再生复合粉回用到铸造厂，从而实现铸造回用率达到 98% 以上，铁渣砂等回收利用，综合利用率达到 100% 方案 2 和 3 细粉为死粘土和细砂重复利用难度大，利用率不高
铁渣砂等回收量	1.17 吨	1.16 吨	1.16 吨	/	
再生砂产量	84.7 吨	71.5 吨	63.2 吨	/	
产生细粉(煤泥)	14.13 吨	23.2 吨	31.4 吨	/	
产生尾气	约 0 吨	4.1 吨	4.2 吨	/	
平均收得率	99.40%	84.80%	74.50%	/	占砂含量的比例
AFS 均值	52.5	53.5	57.5	52.5	方案 3 砂子粒径在不断变小
圆球度, %	81.6	80.5	74	80	
堆积密度 g/cm ³	1.53	1.51	1.4	1.5	
灼烧减量均值	0.37%	0.25%	0.20%	0.40%	
冷芯强度 均值	即拉 终强度	1.5 MPa 0.4 MPa	0.6 MPa 1.1 MPa	1.2 MPa 1.8 MPa	方案 3 再生砂开裂，角形系数变差，细砂偏多，酸耗值不断累积上升，强度衰竭严重
酸耗值	小于 5, 可调	9 月 10 日	不断累积 上升	5 月 6 日	
平均燃料能耗	3~6 万	13~15 万	13~15 万		Kcal, 处理每吨废砂能耗
设备投资	适中	适中	高		每小时处理 1 吨废砂的投资
运行成本	适中	低	高	/	
再生砂综合性能	优, 独立 使用	较差, 不能用	差, 须与 新砂掺用	/	

5. 总结

湿法再生技术在铸造粘土废砂资源化中的应用，标志着铸造行业固废治理从被动处置向资源再生的深刻转型。本研究通过以湿法再生技术作为核心载体，结合“机械-热法-湿法”三级工艺耦合，破解了传统再生技术分离效率低与资源消耗高的双重约束。机械选粉脱膜、复式焙烧与强力擦洗装备的协同创新，实现了砂粒无损再生与杂质深度剥离；湿法环节的梯度旋流分离、复合药剂调控及封闭式水循环系统，更从本质上提升了再生砂的稳定性与洁净度。工业化验证表明，本技术可系统性解决废砂填埋占

地、新砂资源枯竭及再生砂性能波动等行业痛点，为铸造企业构建了“减废 - 降耗 - 提质”的可持续发展路径。未来需进一步深化微粉高值化利用研究，推动跨区域集中再生中心建设，并加速技术标准体系完善，为铸造业绿色低碳转型提供更强支撑。

基金项目

广西港澳台高层次人才工作项目(项目编号: HMTP2023005)。

参考文献

- [1] 牟艳秋, 巴吾东, 刘世森, 等. 铸造废砂的再利用[J]. 铸造技术, 2010, 31(10): 1358-1360.
- [2] 宋安安. 铸造废砂的资源化利用途径及其环境影响[C]//中国铸造协会(China Foundry Association). 第十六届中国铸造协会年会暨第五届全国铸造行业创新发展论坛论文集. 合肥: 合肥安知环境科技咨询有限公司, 2020: 299-303.
- [3] 陈思. 基于循环经济的铸造废砂的资源再利用[C]//香港康健医药有限公司. 2017 年博鳌医药论坛论文集. 邢台: 邢台开放大学, 2017: 522.
- [4] 任启芳. 铸造废砂资源化利用关键技术及自动化装备[Z]. 安徽省, 合肥仁创铸造材料有限公司, 2023-11-09.
- [5] 王兆雪, 勾东东, 韩小问, 等. 铸造废砂再生“三废”治理研究[J]. 中国铸造装备与技术, 2022, 57(6): 104-107.
- [6] 勾东东, 韩小问, 刘国松. 铸造废砂热法再生各环节污染物控制研究[J]. 铸造设备与工艺, 2023(5): 54-55.
- [7] 刘小龙, 李明, 李峰. 废砂再生与废气净化新技术[J]. 铸造设备与工艺, 2016(6): 8-11.
- [8] 吴星. 湿法再生砂在铸造生产中的应用[J]. 江西电力职业技术学院学报, 2020, 33(3): 22-23+29.