

树脂-粘土混合型铸造废砂微湿法再生关键技术和装备研发及全量利用

王宁，戴伟平，罗桂猛，傅钊铭

(广西兰科资源再生利用有限公司，广西 玉林 537000)

*通讯作者：王宁，男，博士。E-mail: wangning8403@163.com

摘 要：树脂-粘土混合型铸造废砂的湿法和热湿联法再生技术工艺流程长，能耗高，需要水处理，并产生污泥，粉尘和污泥得不到有效利用。本文研发了以微湿法为核心的铸造废砂再生循环利用技术和装备，再生工艺短流程、低能耗、少用水且无需水处理、低碳排放；研发了多源固废协同资源化利用技术，将铸造粉尘转化为硫氧镁防火板、矿物钢塑和土壤调理剂，实现了铸造粉尘的高值化利用。

关键词：树脂-粘土混合型铸造废砂；再生砂；硫氧镁防火板；矿物钢塑；土壤调理剂

Research and development of key technologies and equipment for micro-wet regeneration of mixture of resin waste sand and green waste sand and full utilization

Wang Ning, Dai Wei-ping, Luo Gui-meng, Fu Zhao-ming

(North side of casting center, Yuchai Potang Industrial Park, Yulin, 537000, China)

Abstract: The wet process and combined thermal-wet process regeneration technologies for the mixture of resin waste sand and green waste sand exhibit extended process flows, high energy consumption, require water treatment systems, and generate sludge with ineffective utilization of both dust and sludge. This paper develops foundry waste sand regeneration technologies and equipment centered on a micro-wet method, featuring a shortened process flow, reduced energy consumption, minimal water usage without water treatment, and low carbon emissions. Furthermore, a multi-source solid waste synergistic resource utilization technology has been developed, converting foundry dust into magnesium oxysulfate fireproof boards, mineral steel plastic, and soil conditioners, achieving high-value utilization of foundry dust.

Keywords: mixture of resin waste sand and green waste sand; reclaimed sand; magnesium sulphide fireproof plate; mineral steel plastic; soil conditioner

1 前言

树脂-粘土混合型铸造废砂主要产生于多缸柴油内燃机汽缸体和汽缸盖的生产。近几年我国多缸柴油机的产量在 400 万台左右^[1]，多缸柴油机汽缸体和汽缸盖的平均重量约为 250kg/台，因此，我国多缸柴油机汽缸体和汽缸盖的铸件产量每年约为 100 万吨。据统计，我国每生产 1 吨合格铸件大约排放废砂 1.3-1.5 吨^[2]，因此，树脂-粘土混合型铸造

废砂的产生量每年约为 130-150 万吨。树脂-粘土混合型铸造废砂再生循环利用是行业难题，“树脂-粘土混合型铸造废砂再生循环利用工艺和设备的研制”被中国铸造协会列入“铸造行业技术发展规划纲要”^[3]。现有树脂-粘土混合型铸造废砂再生循环利用技术包括热法+研磨、湿法、热湿联法等，热法+研磨技术的再生砂得率低，<70%；再生砂酸耗值高，>5；再生砂性能低于新砂新能；粉尘得不到有效利用。湿法、热湿联法技术再生砂得率高，>

85%；再生砂酸耗值低， <5 ；再生砂性能优于新砂，可 100%替代新砂使用，降低树脂用量，减少铸件缺陷，降低清理难度[4]；但工艺流程长，能耗高；需要水处理，并产生污泥；粉尘和污泥得不到有效利用[5]。

本文的目的是研发短流程、低能耗、少用水且无需水处理、低碳排放的铸造废砂再生循环利用新技术和装备；研发了多源固废协同资源化利用技术，实现了铸造粉尘的高值化利用。

2 试验过程

2.1 树脂-粘土混合型铸造废砂微湿法再生成套技术及装备

(1) 技术研发

建立再生方法，在生产线上进行工艺及技术参数优化，包括废砂含水量、含泥量、选粉脱膜停留时间、微湿法药剂、微湿法研磨停留时间、微湿法研磨次数等。

(2) 核心装备研发

对核心装备选粉脱膜机和微湿法研磨机进行结构及技术参数优化，包括构造、设备尺寸、耐磨件的选材、鼓风风量及风压、除尘风速等，提高生产能力，提升废砂处理效果。

2.2 铸造粉尘制备硫氧镁防火板^[6]

对改性剂进行配方设计和实验室净浆试验，最终在生产线上进行规模化验证，检测指标包括抗折强度、硫氧镁净浆 XRD。

2.3 铸造粉尘制备矿物钢塑^[7]

(1) 筛选不同的粉尘活化改性剂，设计复合改性剂用量，通过物理指标、中试线连续生产和强度测定验证粉尘活化改性效果。

(2) 优化生产配方，提高填充比例，通过中试线连续生产和强度测定确定最高填充比例和配方。

2.4 铸造粉尘制备土壤调理剂^[8]

(1) 筛选不同改性剂，复配后测定产品的胶体特性和重金属吸附特性。

(2) 设计产品配方，通过田间试验验证产品的酸性土壤改良性能。

3 试验结果及分析

3.1 树脂-粘土混合型铸造废砂微湿法再生成套技术及装备

微湿法再生技术是以微湿法为核心的铸造废砂

再生循环利用技术。废砂经破碎、筛分、磁选等前处理后，采用选粉脱膜，快速去除废砂表面 80%以上的微粉杂质，采用微湿法研磨去除较坚硬的粘土膜，并对废砂进行深度除杂和改性制备得到再生砂，工艺流程如图 1 所示。

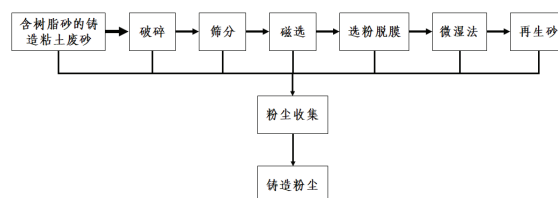


图 1 树脂-粘土混合型铸造废砂微湿法再生技术工艺流程图

Fig.1 Process Flow Diagram of Micro-Wet Method Regeneration Technology for Mixture of Resin Waste Sand and Green Waste Sand

选粉脱膜机生产能力为 5t/h，上部为沉降室，在除尘口前段布置着两道交错的挡板，提高再生得率。选粉脱膜机的沸腾箱体内布置两组旋转轴，分别由各自电机带动，轴上分别安装有 7 组叶片盘，每组叶片盘分为 6 把叶片按照圆周均布，并且两组旋转轴在轴向上互相错开一个叶片的位置。沸腾箱体下部是一个风箱组件，它可以单边倾斜 30°，方便排料，组件由气缸控制开启和关闭；风箱上均匀布满风帽，风箱由软管连接鼓风机。整机工艺布置灵巧，易损件结构简单，操作简便、安全，设备保养、维修方便。

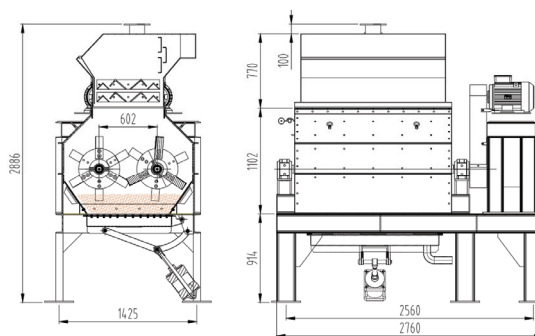


图 2 选粉脱膜机结构示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Classifier-Coating Removal Machine Structure

微湿法研磨机生产能力为 5t/h，整机为修长布局，分成多个大部件组合而成，主要由机座、风箱组件、研磨箱体、研磨轴组件、沉降室、电机和鼓风机等组成。研磨机的上部为沉降室，在除尘口前段布置着多道反射板。研磨机的研磨箱体内横向布

置六组旋转轴，分别由各自电机使用皮带软连接带动，轴上分别安装有四个研磨滚轮，旋转轴两端由轴承座并排固定在底架上。研磨箱体底部是风帽板，板上均匀布满风帽，风帽板下面焊接由风箱，风箱被分为 4 个密闭的箱室，分别与底下的风管连接，并且都安装有调节阀门。鼓风机主管由软管连接鼓风机。研磨机是一种在砂再生行业的核心设备，实用简单，高效节能，整机结构紧凑，占地面积小，易损件结构简单，易于更换维保，实现自动化操作。

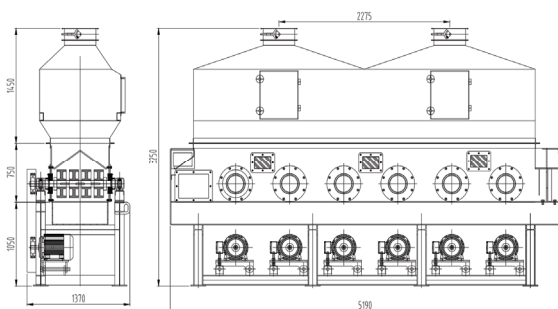


图 3 微湿法研磨机结构示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of Micro-Wet Grinding Machine Structure

树脂-粘土微湿法再生砂性能指标如表 1 所示，产品符合 GB/T 26659-2011《铸造用再生硅砂》。再生砂能耗为 7.38kce/吨，远低于热法+研磨的 26.24kce/吨。再生砂得率超过 85%，远高于行业 70% 的最高水平，再生砂 100% 替代新砂用于树脂砂制芯。

表 1 树脂-粘土微湿法再生砂性能指标

Tab.1 Performance Properties of Regenerated Sand Obtained by Micro-Wet Method from Mixture of Resin Waste Sand and Green Waste Sand

检测项目	指标要求	检测结果
酸耗值 (ml/50g)	≤5	3.76
含泥量 (%)	≤0.3	0.08%
灼烧减量 (%)	≤0.20	0.07%
粒度分布 (AFS 值)	——	原砂 AFS 值±2

3.2 铸造粉尘制备硫氧镁防火板

以硫氧镁胶凝材料为粘结剂，开发改性剂，利用铸造粉尘作为填充料和骨料，经科学配方配置、搅拌混匀，流延辊压成型，再经一次养护、二次养护、裁切、砂光、饰面而成，工艺流程如图 4 所示。

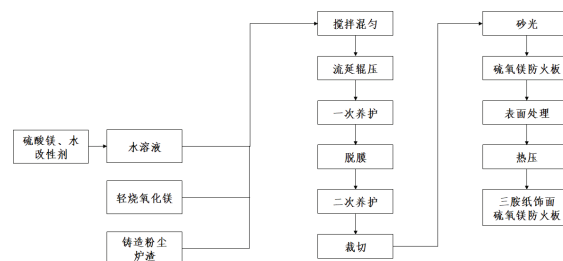


图 4 铸造粉尘制备硫氧镁防火板技术工艺流程图

Fig.4 Process Flow Diagram of Magnesium Oxysulfate Fireproof Board Production Technology from Foundry Dust

通过对改性剂的开发和配方优化，确定了以铸造粉尘为填充料和骨料的技术体系，硫氧镁 $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 晶相比比例超过 70%，如图 5 和表 2 所示，远高于行业的 50%。产品符合 JG/T 414-2013《建筑用菱镁装饰板》。

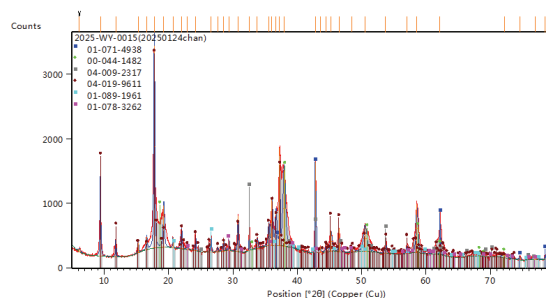


图 5 硫氧镁净浆 XRD 图谱

Fig. 5 XRD Pattern of Magnesium Oxysulfate Paste

表 2 硫氧镁净浆中不同晶体的比例

Tab.2 Proportions of Different Crystalline Phases in Magnesium Oxysulfate Paste

标号	物质	占比比
01-071-4938	MgO	2
00-044-1482	Mg(OH) ₂	8
04-009-2317	MgCO ₃	14
04-019-9611	$5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	72
01-089-1961	SiO ₂	2
01-078-3262	CaCO ₃	2

3.3 铸造粉尘制备矿物钢塑

铸造粉尘活化改性后，按配方与 PVC 塑料、热稳定剂、CPE、内外润滑进行热混，冷却后经挤出成型、真空定型、共挤包覆、压花、裁切制备矿物钢塑，工艺流程如图 6 所示。

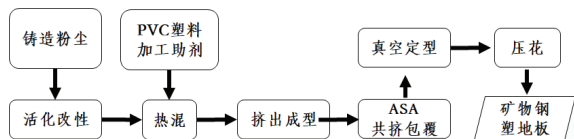


图 6 铸造粉尘活化改性制备矿物钢塑技术工艺流程图

Fig. 6 Process Flow Diagram of Mineral-Filled Steel-Plastic Composite Production Technology via Activated and Modified Foundry Dust

(1) 铸造粉尘活化改性

选用铝酸脂偶联剂 (ACA) 和硬脂酸 1801 (SA) 作为活化改性剂, 以活化度、粘度和吸油值作为评价指标, 活化度越高、粘度越低、吸油值越小, 与 PVC 的兼容性越好。通过表 3 可以看出, 单独使用 ACA 和 SA 改性效果均不如 ACA+SA 复合活化改性。

表 3 铸造粉尘活化前后的物理指标

Tab.3 Physical Properties of Foundry Dust Before and After Activation

样品	活化度%	粘度 mPa·S	吸油值 g/100g
铸造粉尘	0	测不出	79.8
ACA 改性	93	260	35.5
SA 改性	90	300	48.2
ACA+SA 复合改性	95	240	34.6

分别用活化改性前后的铸造粉尘进行中试生产, 其中铸造粉尘的加入量为 200 份, 通过考察连续生产性能和产品技术指标进一步评价活化改性的效果。矿物钢塑为连续性生产, 连续生产时间越长, 效率越高, 成本越低; 静曲强度高, 说明产品抗折性能好, 有一定韧性; 弹性模量大, 说明产品刚性大, 因此静曲强度和弹性模量要同时兼顾产品的韧性和刚性。通过表 4 可以看出, 改性后铸造粉尘的应用性能得到显著改性, 尤其是 ACA+SA 复合改性。

表 4 铸造粉尘活化前后的生产性能及产品技术指标

Tab.4 Production Performance and Product Technical Specifications of Foundry Dust Before and After Activation

样品	连续生产时间 h	静曲强度 MPa	弹性模量 MPa
铸造粉尘	<1	17.6	4608
ACA 改性	<12	29.6	3951
SA 改性	<6	28.4	4013
ACA+SA 复合改性	>48	32.2	3550

与 PVC 兼容性好的原料, 经过热混后能与 PVC 融合在一起成为球形, 通过图 7 电镜图可以进一步

证明活化改性效果, 活化改性的铸造粉尘能很好的与 PVC 熔合在一起, 并初步塑化。

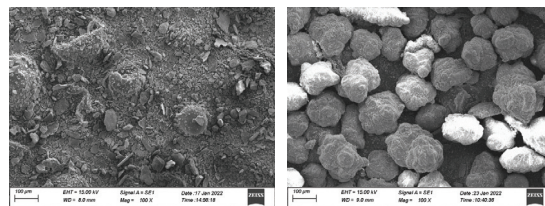


图 7 活化改性前后铸造粉尘与 PVC 热混后电镜图

Fig.7 SEM Micrographs of Foundry Dust-PVC Thermal Composites Before and After Activation and Modification

(2) 活化改性铸造粉尘的高比例填充

填充活化改性铸造粉尘可以降低生产成本, 提高产品刚性, 但填充比例过大易造成生产困难, 不能连续稳定生产, 产品力学性能下降, 导致产品易脆性大, 容易破碎。通过表 5 可以看出, 当填充比例为 250 份时, 能够连续稳定生产 96 小时以上, 产品指标符合 GB/T24508-2020《木塑地板》, 静曲强度 $\geq 26\text{MPa}$, 弹性模量 $\geq 3400\text{MPa}$ 。

表 5 不同填充比例活化改性铸造粉尘的生产性能及产品技术指标

Tab.5 Production Performance and Product Technical Specifications of Activated and Modified Foundry Dust at Different Loading Percentages

填充比例 (相对于 PVC)	填充量	连续生产时间 h	静曲强度 MPa	弹性模量 MPa
200 份	54%	>96	32.2	3550
250 份	65%	>96	30.0	3940
300 份	68%	<12	24.7	4325

3.4 铸造粉尘制备土壤调理剂

铸造粉尘改性后按配方与腐植酸和石灰混合得到酸性土壤调理剂, 工艺流程如图 8 所示。

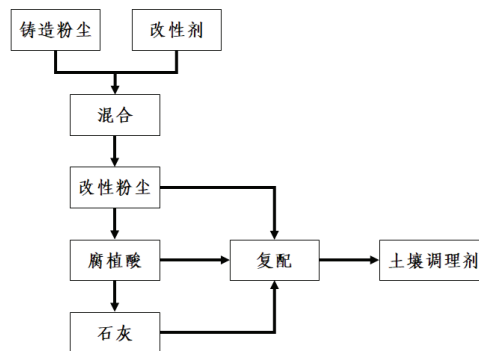


图 8 铸造粉尘改性制备土壤调理剂技术工艺流程图

Fig. 8 Technical Process Flow Diagram of Soil Conditioner Production via Modified Foundry Dust

(1) 铸造粉尘特性

铸造粉尘是铸造粘土废砂在再生过程中分选出来的粉尘，主要由膨润土和煤炭粉组成，还包括硅微粉、碳化物等物质，铸造粉尘的化学组成及重金属含量分别如表 6 和表 7 所示。有机质反应了煤粉含量的高低，无机物主要为膨润土，化学组成主要为二氧化硅和氧化铝。重金属含量低，均远低于 GB 38400-2019《肥料中有毒有害物质的限要求》。

表 6 铸造粉尘的化学组成

Tab.6 Chemical Composition of Foundry Dust

有机质	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Ca O	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
7.0 %	54.2 %	14.25 %	2.63 %	2.40 %	2.16 %	1.58 %	1.44 %

表 7 铸造粉尘的重金属含量 (ppm)

Tab.7 Heavy Metal Content (ppm) in Foundry Dust

重金属	Cr	Pb	As	Cd	Hg
测定值	34.4	6.5	2.3	未检出	0.01
限值	≤150	≤50	≤15	≤3	≤2

铸造粉尘比表面积：1.29m²/g，体积平均粒度 8.500μm，D10=2.173μm，D50=6.595μm，D90=18.010μm，100%的物料粒度在 0.631-30.2μm 微米之间。

铸造粉尘中的膨润土具有离子交换性能，而且粒度细，比表面积大，因此具有潜在的吸附重金属的性能，同时对于化肥可吸附铵离子、贮存钾离子，减少肥料的淋溶流失。铸造粉尘对铜、锌的吸附效果明显，分别为 55.47%和 58.63%；铸造粉尘对镉、铅的吸附性能明显低于铜、锌，吸附效果分别为 25.86%和 37.82%，说明铸造粉尘对重金属具有选择性吸附和竞争性吸附。

表 8 铸造粉尘对重金属的吸附

Tab.8 Adsorption of Heavy Metals by Foundry Dust

样品	Cu	Zn	Cd	Pb	单位
处理前	30.63	40.22	41.22	8.70	ppm
+10%铸造粉尘	13.64	16.64	30.56	5.41	ppm

(3) 铸造粉尘改性

选用不同的改性剂对铸造粉尘进行改性，提高其凝胶性能。如表 9 和表 10 所示，改性剂 A 的效果最好，当加入量为 2.5%时，凝胶吸水量达到最大，为铸造粉尘自身重量的 5 倍，继续增加改性剂的加入量，凝胶吸水量无变化。

表 9 不同改性剂对铸造粉尘凝胶性能的影响

Tab.9 Effect of Different Modifiers on the Gelling Properties of Foundry Dust

改性剂种类	凝胶性能
改性剂 A	成凝胶
改性剂 B	不成凝胶
改性剂 C	少量成凝胶，但不能结团成一体

表 10 改性剂 A 加入量对铸造粉尘凝胶性能的影响

Tab.10 Effect of Modifier A Dosage on the Gelling Properties of Foundry Dust

加入量	1%	1.5%	2%	2.5%	3%
吸水量/倍	1	2	4	5	5

(3) 酸性土壤调理剂

利用改性后的铸造粉尘与腐植酸和石灰按照配方进行复配，并在水稻上进行了田间试验。试验设置 4 个处理，每亩施用土壤调理剂分别为 0、125kg、150kg、175kg，每个处理 3 个重复。经过一季晚稻后，酸性土壤改良效果显著，如表 11 所示，酸性土壤改良后 pH 升高，交换性铝和有效锰降低，盐基饱和度提高。

表 11 土壤调理剂对酸性土壤的改良效果

Tab.11 Amelioration Effect of Soil Conditioner on Acid Soil

技术指标	种植前土壤	对照	125	150	175
pH	4.71	5.38	5.95	5.96	6.12
交换性铝 cmol(Al ₃ ⁺ /kg)	1.51	0.50	0.03	0.13	0.13
有效锰 mg/kg	12.4	7.41	4.83	5.79	6.13
盐基饱和度%	33.0	49.4	86.6	83.5	77.6

4 结果或结论

(1) 研发了微湿法创新技术和装备，将树脂-粘土混合型铸造废砂再生，实现再生砂 100%代替新砂应用于树脂砂制芯工艺。

(2) 研发了专用改性剂，实现了铸造粉尘、其它固废和硫氧镁凝胶体系的配伍，填充量超过 30%，硫氧镁晶相 5Mg(OH)₂ · MgSO₄ · 7H₂O 超过 70%，制备出 A1 级硫氧镁防火板，应用于绿色建筑材料。

(3) 研发了界面改性增塑技术，突破了无机粉体和高分子材料界面兼容难题，制备出铸造粉尘填充量高达 60%以上的矿物钢塑，应用于户外景观工程。

(4) 研发了改性工艺技术，提升了含有膨润土



和碳基的铸造粉尘胶体性能，通过与腐植酸的有机无机复配，制备出酸性土壤调理剂，同时具有保水、保肥、固化耕地土壤中重金属的功能。

参考文献:

- [1] https://mp.weixin.qq.com/s/huTS2D0301hMDj_a1lJbFA.
- [2] 黄顶强, 候宗伟. 论铸造废砂再生循环利用 实现废物资源化 and 环境污染治理[J], 广西节能, 2013 (4): 34-36.
- [3] 中国机械工程协会铸造分会, 铸造行业“十三五”技术发展规划纲要[J], 铸造, 2015 (64): 1165-1202.
- [4] 戴伟平. 应用全量再生技术提高铸造砂品质, 中国铸造行业第七届高层论坛论文(摘要集)会议论文集[J], 2015, 258-264.
- [5] 杨洪金, 戴伟平, 罗桂猛, 刘临琦, 等. 铸造废砂微湿法再生成套技术及装备, 科技成果, 2024.
- [6] 中国菱镁行业协会, 镁质胶凝材料及制品技术[M], 北京: 中国建材工业出版社, 2016.
- [7] 林咏兰, 李文杰, 周正安. 硬聚氯乙烯塑料成型加工[M], 上海: 上海科学技术出版社, 1983.
- [8] 张树清, 非金属矿物在农业中的应用[M], 北京: 中国农业出版社, 2015.