

# 有机物对铸造粘土废旧砂再生质量的影响研究

胡胜利<sup>1, 2</sup>, 龚小龙<sup>1</sup>, 蔡关翎<sup>2</sup>, 任文强<sup>2</sup>, 樊自田<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学材料科学与工程学院, 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北武汉 430074;

2. 柳晶科技集团股份有限公司, 江苏常州 213300)

**摘要:** 铸造粘土废旧砂通常采用高温焙烧结合机械摩擦方法进行再生回用, 为了得到高质量的再生砂, 废旧砂再生过程中要求焙烧温度相对精确和稳定, 但粘土废旧砂中存在的煤粉及有机树脂砂壳芯混入的有机物使焙烧温度出现巨大波动, 特别是细颗粒废旧砂中的有机物, 影响再生砂质量和再生效率。本文首先将粘土废旧砂进行100目筛分分级, 研究100目筛上和100目筛下两种粒级废旧砂中有机物对燃烧速率的影响, 然后确立废旧砂中有机物燃值贡献的计算公式, 并通过实际生产测试, 获得有机物燃值贡献阈值和废旧砂的再生最优投入量, 为粘土废旧砂的高效率 and 高质量再生提供理论参考。

**关键词:** 铸造; 粘土废旧砂; 有机物; 再生回用; 燃烧阈值

为了实现绿色铸造、清洁生产, 砂型铸造废旧砂的完全再生循环利用是必然趋势<sup>[1-2]</sup>。要做到废旧砂真正实现完全循环利用, 要求废旧砂再生后, 能100%替代原砂用于砂型铸造。粘土砂型铸造经过浇注高温金属液后, 废旧砂中各种成分相互混合烧结在一起, 有机成分被粘土充分包裹, 通常采用高温焙烧结合机械摩擦方法对铸造粘土砂进行再生<sup>[3-4]</sup>。目前该工艺比较成熟, 再生砂质量高, 且再生过程将除尘灰收集利用后, 无其他二次污染。同时, 利用粘土砂中的煤粉等有机物作为主要燃料, 能耗低<sup>[5]</sup>。

高温焙烧设备通常采用立式沸腾焙烧炉, 为了保证再生砂质量, 需要恒定的温度、足够的焙烧时间和充足的氧气, 需要焙烧温度(680~690℃)均匀、稳定。在正常工作时, PLC控制系统会根据温度的波动, 来调整燃烧器气门大小保持温度的恒定<sup>[6]</sup>, 自动化调整燃烧器、进砂速度和鼓风, 达到以上生产条件, 生产出合格再生砂。然而, 由于每家铸造厂生产的工艺和条件不一样, 导致每个铸造厂的废旧砂性状都不一样, 尤其废旧砂中有机物性状差别较大, 包括含量、物理状态等, 其燃值和燃烧速度不一样。在实际生产中, 经常会出现因投入的废旧砂中含煤粉高的细粉增加, 导致焙烧炉迅速升温至超温(700℃); 此时, 燃烧器停止工作, 增加鼓风和引风降温, 部分未充分焙烧的废旧砂通过鼓风沸腾混入焙烧炉底层再生砂中, 从而导致整个炉内的再生砂出现不合格现象, 需要清炉, 重新点火, 造成重大质量事故和财产损失。为了防止此现象发生, 工人将废旧砂投入量大幅减少, 从而减少了产量、降低生产线的工作效率、增加了能源消耗。经过研究者长期跟踪并检测出现超温时的废旧砂粒度分布和灼减量, 发现当废旧砂中细粉含量偏高时, 出现焙烧超温的概率大, 即使废旧砂整体灼减量变化不大的情况下, 只要细粉含量高也会出现超温现象; 初步分析, 是因为旧砂细粉(100目筛下部分)中煤粉含量高, 且在焙烧炉中燃烧速度快, 导致焙烧温度快速升温, 以致于系统来不及自动调温, 只能停止燃烧自我保护。本文通过研究两种粒级(100目筛下和100目筛上)废旧砂中有机物的燃烧速率, 建立废旧砂中有机物燃值贡献公式, 通过实际生产极限试验, 测定出

作者简介:

胡胜利(1976-), 男, 博士研究生, 主要从事铸造造型材料、铸造固体废弃物再生循环利用研究及实践应用。电话: 13366466225, E-mail: 36324198@qq.com

通讯作者:

樊自田, 男, 教授。027-87540094, E-mail: fanzt@hust.edu.cn

中图分类号: TG221

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

04-0527-05

收稿日期:

2023-07-16 收到初稿,

2023-08-24 收到修订稿。

焙烧系统极限燃烧阈值，计算出最优投入量，实现在生产过程中保证再生砂质量的前提下，提高再生砂产出量，降低再生能源消耗。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

本研究的铸造粘土废旧砂来自科华控股有限公司，主要生产汽车涡轮增压器壳等耐高温铸件，铸型用添加膨润土和煤粉的湿型砂砂型，铸造型芯用热芯盒覆膜砂造型，经浇注、冷却、清理、落砂后，产生以粘土废旧砂为主的混合废旧砂，其中内芯覆膜砂废旧砂占18%左右，湿型砂废旧砂占82%左右。表1为粘土废旧砂的化学成分， $Al_2O_3$ 含量为12.2%， $Al_2O_3$ 来自于膨润土；废旧砂灼烧减量（LOI）为5.6%，其主要来自于废旧砂中的有机物。原砂和粘土废旧砂的粒度分布如表2所示，100目筛以下的原砂和粘土废旧砂质量分数分别为3.6%和11.2%，说明原砂中细砂（小于100目）含量较少，粘土废旧砂中100目筛以下的物质主要是破碎的砂和煤粉等物质。

### 1.2 试验设备

粘土废旧砂再生过程中采用的焙烧炉为立式沸腾焙烧炉（5 t/h），燃烧器为利雅路天然气燃烧器

表1 粘土废旧砂的化学成分

$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	其他	LOI
80.2	12.2	0.6	1.0	5.6

表2 原砂和粘土废旧的粒度分布  
Table 2 Grain size distributions of the base sand and waste clay-bonded sand

目数	原砂质量分数/%	废旧砂质量分数/%
20	0	0
30	0	0.4
40	5.0	5.4
50	29.2	28.8
70	41.5	36.4
100	20.7	17.8
140	3.5	9.2
200	0.1	1.0
270	0	0.4
底盘	0	0.6
合计	100	100

（RS190），鼓风机为罗氏风机（鼓风量4 000  $m^3/h$ ）；废旧砂发气量采用GET-III智能发气性测定仪进行检测；采用电磁微振式筛砂机（SDZ）对废旧砂进行筛分；采用马弗炉（KSL-1200X）测定废旧砂的灼烧减量。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 废旧砂再生工艺

本研究的废旧砂再生采用热法和机械法结合的方法再生，用高温焙烧去除废旧砂中的有机成分，用机械摩擦去除砂粒表面的膨润土，从而得到符合铸造要求的再生砂。粘土废旧砂再生工艺流程如图1所示，粘土废旧砂先经过2次破碎使成块的废旧砂破碎成直径小

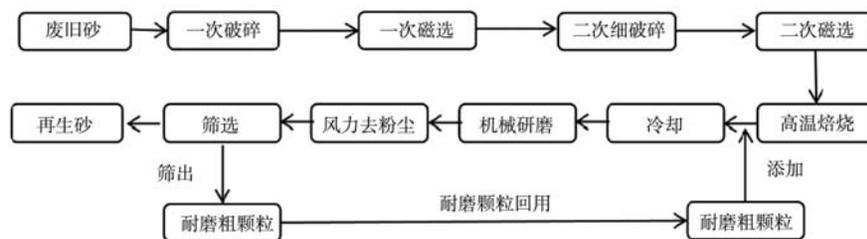


图1 粘土废旧砂再生工艺流程图

Fig. 1 Process flow chart of the reclamation of the waste clay-bonded sand

于5 mm的颗粒状，然后通过两次磁选分别选出大铁块和铁粉，再定量投入焙烧炉内焙烧；经过燃气加热到670~690  $^{\circ}C$ 焙烧7~8 h去除砂粒表面有机杂质且降低粘土旧砂表面的粘土膜韧性，并经过焙烧炉底部热交换器冷却至300  $^{\circ}C$ 左右排出焙烧炉，再经过水雾流动槽降温至100  $^{\circ}C$ 以下；最后进入研磨机内摩擦去除砂粒表面粘土膜并通过风力去细粉，筛分得到优质符合粒度标准的再生砂；在冷却、摩擦和风力去细粉过程中添加

耐磨粗颗粒，帮助去除砂粒表面粘土。

#### 1.3.2 有机物燃烧速度测定方法

废旧砂中的有机物在高温条件下分解成水和二氧化碳，以气体形式排出，本研究使用智能发气性测定仪测定两种废旧砂中的有机物发气，当发气量达到最大值并保持不变时，表明有机物全部分解，记录此时的时间，时间短表示分解燃烧速度快，时间长表示分

解燃烧速度慢。分解燃烧速度快的有机物是焙烧炉温度快速升温的主要原因。

### 1.3.3 灼烧减量 (LOI) 检测方法

称取2.0000 g废旧砂，平铺于25 mL瓷坩埚中，记录含坩埚总重量，在1 000 °C马弗炉中灼烧30 min，经冷却称重，计算烧失量，与旧砂原重的百分比。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 废旧砂有机物成分和状态

粘土废旧砂中有机物成分主要是煤粉和少量未充分分解的砂芯树脂<sup>[7]</sup>，用铸造标准筛对粘土废旧砂进行粒度筛分测定，试验结果如表3所示。

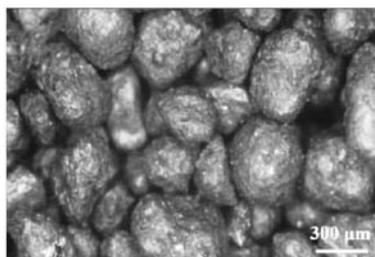
由表3可知，不同粒度的废旧砂中有机物质含量不同，废旧砂中100目（含）筛以上质量占88.8%，100目筛以下占11.1%；分别测100目（含）筛以上和100目筛以下粘土废旧砂灼减量，100目（含）筛以上粘土废旧砂灼减量为4.0%，100目筛以下粘土废旧砂灼减量为17.1%，表明有机物主要分布在100目筛以下的细颗粒中。另外，经计算，砂芯废砂的有机物总量约0.2%，占废旧砂总灼烧减量（5.6%）的3.57%，对研究整体影响较小。

分别对100目（含）筛以上和100目筛以下粘土废

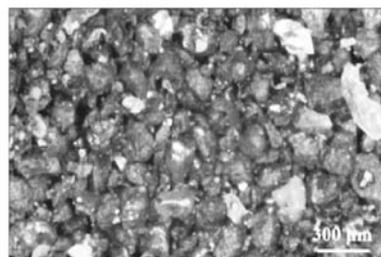
表3 粘土废旧砂粒度分布与灼减量  
Table 3 Particle size distribution and LOI of the waste clay-bonded sand

目数	质量分数/%	分类	质量分数/%	分类灼减量/%
20	0			
30	0.4			
40	5.4	A	88.8	4.0
50	28.8			
70	36.4			
100	17.8			
140	9.2	B	11.2	17.1
200	1.0			
270	0.4			
底盘	0.6			
合计	100		100	

旧砂颗粒进行放大，其体视显微镜图片如图2所示。从图2中可以看出，100目（含）筛以上砂粒中的有机物等成分被粘土紧密包裹在砂粒表面，会影响有机物的分解燃烧速度，而100目筛以下中的有机物等成分相对比较松散，同时有机物颗粒细小，比表面积大，很容易被燃烧分解。因此本文将粘土废旧砂分成两类，100目（含）筛以上废旧设为A类，100目筛以下废旧砂设



(a) 100目（含）筛以上废旧砂



(b) 100目筛以下废旧砂

图2 粘土废旧砂体视显微镜图片

Fig. 2 Stereoscopic microscope images of the waste clay-bonded sand

为B类，初步分析，A类和B类废旧砂中有机物在燃烧分解过程的速度有一定差别。

### 2.2 粘土废旧砂有机物燃烧速度

分别在680 °C测量两种废旧砂的发气量，记录发气曲线。根据发气曲线，记录达到发气量最高时的时间，并设定此时间比即为A类和B类废旧砂的燃烧速度比。

图3为两种粘土废旧砂的发气时间和发气量关系图。由图3可知，两种粘土废旧砂A和B的发气量随着时间的增加均呈现快速增加后趋于水平，其中B类（100目筛以下）废旧砂的发气量增长速率明显高于A类

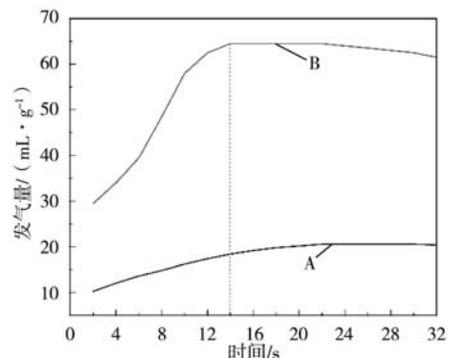


图3 两种粘土废旧砂发气时间与发气量关系图

Fig. 3 Relationship between gas evolution time and gas evolution volume of two kinds of the waste clay-bonded sand

(100目筛以上)废旧砂,说明细颗粒的废旧砂有机物含量高,这与表3的数据分析结果一致。另外,当发气量达到最大值并保持不变时,表明有机物全部分解,记录此时的时间可表示有机物分解燃烧速度的快慢。从图3中可以看出,A类废旧砂燃值拐点在22 s,B类废旧砂燃值拐点在14 s,因此B类废旧砂的燃烧速度是A类废旧砂的1.6倍。

### 2.3 废旧砂有机物燃值贡献率公式确立

根据两种粘土废旧砂中有机物燃烧速度的试验结果,焙烧时燃烧分解速度有较大差异,当出现快速超温时,其燃值贡献率有1.6倍差异,因焙烧超温常常发生在1~2 min内,根据废旧砂投入到焙烧炉的2 min质量(焙烧炉PLC,功能设置是每分钟投入量,符号设为 $G$ ,2 min为 $2G$ );设立有机物燃值( $Q$ )计算公式见(1):

$$Q=2G(W_a L_a+1.6W_b L_b) \quad (1)$$

式中: $G$ 为焙烧炉控制系统设置的每分钟投入废旧砂量,kg/min; $L_a$ 、 $L_b$ 分别为A类和B类废旧砂的灼烧减量,%; $W_a$ 、 $W_b$ 分别为A类和B类废旧砂的含量百分比, $W_b=1-W_a$ ,%。

### 2.4 有机物燃值贡献阈值( $Q_{\text{极}}$ )测定以及最优投入量( $G_{\text{优}}$ )公式

本研究是在实际生产中,逐步提高废旧砂的投入量,直到出现超温现象,以此时的相关数据算出 $Q$ 值,即为该焙烧炉的有机物燃值极限贡献率 $Q_{\text{极}}$ 。粘土废旧砂投入量从85 kg/min起,每工作4 h,增加1 kg/min,测再生酸耗值并观察现象,直到出现超温,燃烧器完全停止工作,试验结果如表4所示。

由表4可知,粘土废旧砂投入量在89 kg/min(含)以内,焙烧炉都正常工作,其中投入量在88 kg/min时,再生砂酸耗值最低,产品质量最好。因为低于这个投入量,焙烧炉内总燃值偏低,需要燃烧器充分工作,来弥补燃值不足,此时成本高;当投入量达到

表4 粘土废旧砂投入量试验数据  
Table 4 Input test data of the waste clay-bonded sand

每分钟废旧砂投入量/kg	状况	再生砂酸耗值/mL
85	正常	5.5
86	正常	5.6
87	正常	5.4
88	正常	5.0
89	正常	5.2
90	燃气器数次停止工作	5.6
91	燃气器偶尔停止工作	5.5
92	燃气器偶尔工作,未超温	5.8
93	燃气器完全停止工作,超温	9.5(不合格,内控 $\leq 7$ )

90 kg/min,开始出现燃烧器停止工作,直到投入到93 kg/min时,出现超温,系统开启保护措施,达到试验的极限条件,再生砂酸耗值严重超标,质量不合格。

图4为再生砂体视显微镜图片。从图4中可以观察到,正常合格再生砂表面干净,再生效果好;超温后由于部分设备停机,未充分处理的砂子进入后续系统,砂粒表面的粘土和煤粉存留明显较多,导致酸耗值偏高(9.5 mL),进而影响后续使用<sup>[8]</sup>,必须进行重新再生处理方可应用。因此,粘土废旧砂热法再生过程中的超温现象会严重降低再生砂质量,需考虑有机物分解燃烧对废旧砂再生过程的影响。

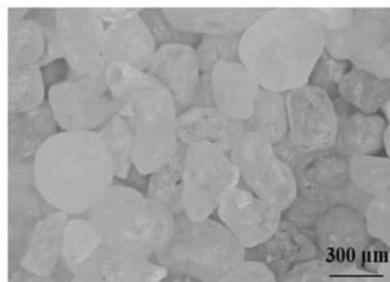
根据表3和表4,可计算出的焙烧炉有机物燃值贡献阈值( $Q_{\text{极}}$ ),并推出本研究所使用焙烧炉不同废旧砂每分钟最优投入量设置公式。

$$Q_{\text{极}}=2 \times 93 \times (88.8 \times 4.0 + 1.6 \times 11.2 \times 17.1) = 123\ 026 \approx 123\ 000$$

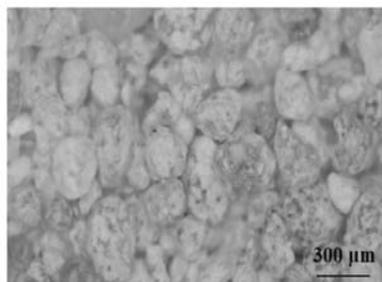
$$G_{\text{优}} = 123\ 000 / 2 (W_a L_a + 1.6 W_b L_b) = 61\ 500 / (W_a L_a + 1.6 W_b L_b) \quad (2)$$

## 3 实际生产指导

根据此研究方法可以测算出每套焙烧炉及系统的



(a) 正常合格再生砂



(b) 超温后再生砂

图4 再生砂体视显微镜图片

Fig. 4 Stereoscopic microscope images of the reclaimed sand

燃值阈值 $Q_{\text{极}}$ ，超过此值，焙烧过程必然会出现超温，导致焙烧停止，再生砂不合格。

通过检测废旧砂的粒度分布、A和B的灼减量，根据本研究公式测算出，该粘土废旧砂最高投入量，超过此投入量，焙烧过程必然会出现超温，导致焙烧停止，再生砂不合格。

## 4 结论

(1) 针对粘土废旧砂的高温焙烧结合机械摩擦再

生方法，100目筛以下废旧砂中的有机物燃烧速度是100目(含)筛以上废旧砂中有机物燃烧速度的1.6倍。

(2) 每套焙烧炉及其系统，粘土废旧砂再生过程中都有燃值阈值 $Q_{\text{极}}$ ，超过此值，焙烧过程必然会出现超温，导致焙烧停止，再生砂不合格。

(3) 每种粘土废旧砂都有最佳投入量，可以根据最优投入量( $G_{\text{优}}$ )公式，通过检测废旧砂粒度分布和不同有机物含量进行计算获得最佳投入量，以提高再生砂质量和再生效率。

### 参考文献:

- [1] 中国铸造协会. 铸造行业“十四五”发展规划[J]. 铸造工程, 2021, 45(4): 1-14.
- [2] 邢婉婷, 刘越, 辛啟斌, 等. 铸造旧砂再生的研究进展与应用[J]. 铸造, 2015, 64(8): 735-739.
- [3] 龚小龙, 樊自田. 绿色铸造材料研究及应用新进展[J]. 金属加工(热加工), 2020(10): 15-18.
- [4] 龚小龙, 胡胜利, 樊自田, 等. 铸造固体废弃物再生利用技术新进展[J]. 中国铸造装备与技术, 2021, 56(1): 36-46.
- [5] 万仁芳, 熊鹰, 吴长松, 等. 湿型砂旧砂热法再生技术及再生砂性能[J]. 铸造设备与工艺, 2016(5): 30-33+43.
- [6] 谢吉坤, 陈云龙, 洪丁, 等. 湿型砂旧砂再生及其在智能化制芯生产线上的实践应用[J]. 铸造工程, 2022, 46(3): 61-66.
- [7] 林鹏飞. 湿型砂造型主要材料特性及配比工艺方案[J]. 铸造, 2021, 70(7): 839-843.
- [8] 吴剑. 砂再生、颗粒净化的工艺流程设计[J]. 中国铸造装备与技术, 2020, 55(2): 49-51.

---

# Study on the Influence of Organic Matter on the Reclamation Quality of Waste Clay-Bonded Sand

HU Sheng-li<sup>1,2</sup>, GONG Xiao-long<sup>1</sup>, CAI Guan-ling<sup>2</sup>, REN Wen-qiang<sup>2</sup>, FAN Zi-tian<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. Liujing Technology Group Co., Ltd., Changzhou 213300, Jiangsu, China)

### Abstract:

High-temperature calcination combined with mechanical grinding method was usually adopted for recycling the foundry waste clay-bonded sand. In order to obtain high-quality reclaimed sand, the calcination temperature is required to be relatively accurate and stable in the reclamation process of waste sand. However, the calcination temperature fluctuates greatly due to the existence of organic matter, such as pulverized coal in the waste clay-bonded sand, especially the organic matter in the fine particle waste sand, which affects the quality and efficiency of the reclaimed sand. In this paper, the waste clay-bonded sand was firstly screened and graded with 100 mesh to investigate the influence of the organic matter in two types of the waste sand on the combustion rate, and then the calculation formula for the contribution of the organic matter in the waste sand was established. According to the actual production test, the contribution threshold of the fuel value of the organic matter and the optimal input of reclamation of the waste sand were obtained, which can provide a theoretical reference for the high-efficiency and high-quality reclamation of the waste clay-bonded sand.

### Key words:

green casting; waste clay-bonded sand; organic matter; recycling; combustion threshold