

粘土砂铸造中除尘灰的浮选分离煤粉的研究

杨致远, 龚小龙, 胡胜利, 樊自田

(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)

摘要: 采用浮选分离法对粘土砂铸造除尘灰进行浮选分离煤粉实验研究。通过单因素实验和正交实验, 研究了浮选药剂用量、浮选机转速、充气速率和矿浆浓度对煤粉浮选完善指数的影响, 并进行了二次浮选实验; 采用扫描电镜和能谱分析对比了除尘灰、一次浮选煤粉和二次浮选煤粉的微观形貌和表面成分。研究表明: 煤粉浮选完善指数随药剂用量、浮选机转速、充气速率和矿浆浓度的增大先增加后减少; 较优的浮选工艺参数为: 捕收剂用量1 050 g/t、起泡剂用量350 g/t、浮选机转速1 800 r/min、充气速率0.25 m³/h、矿浆浓度130 g/L。此时, 煤粉浮选完善指数达到43.42%, 浮选煤粉的灼烧减量为58.46%。经过二次浮选后, 浮选煤粉灼烧减量高达73.35%, 煤粉表面干净, 只有少量的粘土矿物存在。

关键词: 粘土砂铸造除尘灰; 浮选分离; 煤粉; 正交实验; 浮选完善指数

铸造被认为是一个高污染行业, 其主要污染来源是铸造废砂和除尘灰等^[1-4]。2018年, 我国铸件总产量高达4 935万吨, 其中约80%铸件为砂型铸造, 一般认为生产1 t铸件要排放约1 t固体废物^[5-6]。铸造废砂再生利用已得到广泛应用, 主要采用干法、湿法、热法、复合再生法^[7-10]。铸造除尘灰是铸造废弃物回用的难点, 目前它仅少量用作骨料或添加剂, 制备混凝土和水泥等^[11]; 大部分铸造除尘灰直接被堆放或掩埋, 对环境产生了严重的污染^[12-14]。铸造除尘灰的主要成分是粘土矿物和煤粉, 从铸造除尘灰中浮选分离回收粘土矿物和煤粉对铸造行业的绿色可持续发展具有重要的实际意义。

本研究采用浮选分离法对铸造除尘灰进行了浮选分离煤粉的实验研究, 通过单因素实验和正交实验, 系统地研究了加药量、浮选机转速、充气速率和矿浆浓度对浮选完善指数的影响, 确定了较优的浮选工艺参数, 并完成了二次浮选实验; 通过扫描电镜和能谱对浮选煤粉进行了微观形貌分析, 验证了铸造除尘灰浮选分离煤粉的有效性与可行性。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

实验采用来自中国某铸造厂的粘土砂铸造除尘灰(粒径100 μm左右、含水量6.77%、灼烧减量39.51%); 浮选药剂包括捕收剂和起泡剂, 其中捕收剂为轻质柴油、起泡剂为仲辛醇(纯度98%)。

1.2 实验设备

浮选实验采用XFD II实验室用1.5 L单槽浮选机, 称量采用JA5003N型电子天平, 精度为0.001 g; 浮选煤粉和粘土矿物的干燥采用DHG-9077A型电热恒温干燥箱; 铸造除尘灰浮选煤粉的微观形貌分析采用环境扫描电子显微镜(Quanta 200, FEI, Holland), 表面元素成分分析采用扫描电镜附带的EDAX能谱仪。

作者简介:

杨致远(1996-), 男, 硕士, 主要从事绿色铸造材料与技术研究。
E-mail: yzy9142223@sina.com

中图分类号: TG221

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)

02-0214-05

收稿日期:

2020-09-21 收到初稿,

2020-10-13 收到修订稿。

1.3 实验方法

浮选实验在XFD II实验室浮选机上进行,将铸造除尘灰和自来水以1:2的比例浸泡24 h,然后以2 800 r/min的转速搅拌30 min。加水至刻度线,然后加入一定量的捕收剂(轻质柴油)以1 800 r/min的转速搅拌4 min,再加入一定量的起泡剂(仲辛醇)搅拌2 min后开始充气,最后开始浮选刮泡5 min收集煤粉和粘土矿物,并进行烘干、称重和测试。结果测量:铸造除尘灰浮选效果用浮选完善指数进行评价,浮选完善指数 η_{wf} 根据公式(1)进行计算:

$$\eta_{wf} = \frac{\gamma_j}{100 - A_y} \times \frac{A_y - A_j}{A_y} \quad (1)$$

式中: γ_j 指浮选煤粉实际产率, A_y 指入料灰分含量, A_j 指灰分含量^[15-16]。

2 实验结果与讨论

2.1 药剂用量对煤粉浮选完善指数的影响

当固定实验药剂比例捕收剂:起泡剂=3:1,矿浆浓度为100 g/L,浮选时间为5 min,浮选机转速为1 800 r/min,充气速率为0.3 m³/h时,研究了不同药剂用量(捕收剂)对浮选完善指数的影响,其结果如图1所示。由图1可知,随着药剂用量的增加,煤粉浮选完善指数先增大后减小。在药剂用量达到900 g/t的时候,浮选完善指数达到最大值30.07%。

药剂用量过低时,难以在煤粉表面形成连续油膜,导致煤粉表面的疏水性改善效果不明显,难以使煤粉在低药量下浮出。药剂用量过高时,捕收剂对除尘灰中的灰分的捕收效果也会增加,使煤粉中灰分含量相对增加,煤粉含量因此降低,导致浮选完善指数的降低。

2.2 浮选机转速对煤粉浮选完善指数的影响

当浆料浓度为100 g/L,浮选时间为5 min,捕收剂用量为900 g/t,起泡剂用量为300 g/t,充气速率为0.3 m³/h时,研究了不同浮选机转速对煤粉浮选完善指数的影响,其结果如图2所示。由图2可知,随着浮选机转速的增加,浮选完善指数先增大后减小。在浮选机转速达到1 800 r/min的时候,浮选完善指数达到最大值30.07%。

随着浮选机转速的增加,气泡尺寸会不断减小,形成大量微泡,微泡更有利于浮选过程的进行,较高的浮选机转速也会促进捕收剂在煤粉表面的有效吸附。但是随着浮选机转速的过量增加,灰分也更容易发生团聚并包覆在煤粉表面,导致煤粉灰分含量增大,导致煤粉浮选完善指数减小。

2.3 充气速率对浮选完善指数的影响

当浆料浓度取100 g/L,浮选时间5 min,捕收剂用

量900 g/t,起泡剂用量300 g/t,浮选机转速1 800 r/min时,研究了不同充气速率对浮选完善指数的影响,其结果如图3所示。由图3可知,随着充气速率的增加,浮选完善指数先增大后减小。在充气速率达到0.3 m³/h的时候,浮选完善指数达到最大值30.07%。

随着充气速率的增大,产生的气泡数量也会增大,气泡携带的煤粉数量也会增大,使得在较低充气速率时充气速率增加浮选完善指数随之增加。而当充气速率继续增大时,对矿浆的稳定造成了扰动,增加了灰分的夹带。

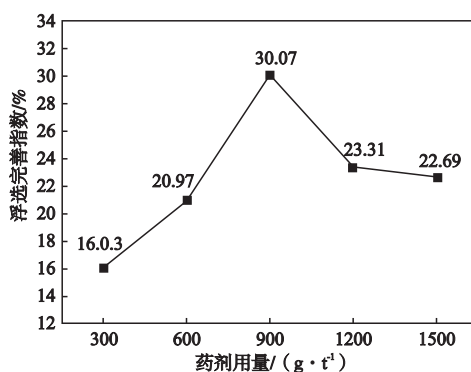


图1 药剂用量对浮选完善指数的影响

Fig. 1 Influence of dosage of reagent on flotation perfection index

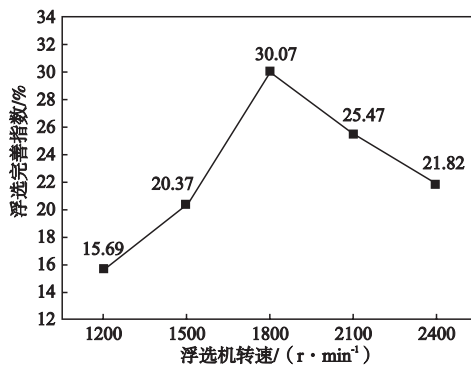


图2 浮选机转速对浮选完善指数的影响

Fig. 2 Influence of flotation machine speed on flotation perfection index

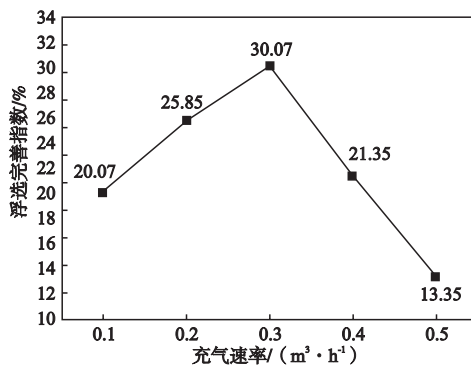


图3 充气速率对浮选完善指数的影响

Fig. 3 Influence of aeration rate on flotation perfection index

2.4 矿浆浓度对浮选完善指数的影响

当浮选时间取5 min,捕收剂用量900 g/t,起泡剂用量300 g/t,浮选机转速1 800 r/min,充气速率0.3 m³/h时,研究了不同矿浆浓度对浮选完善指数的影响,结果如图4所示。由图4可知,随着矿浆浓度的增加,浮选完善指数先增大后减小。在矿浆浓度达到120 g/L的时候,浮选完善指数达到最大值34.89%。

药剂对矿浆中煤粉的选择性是有限度的,在药剂浓度一定的条件下,矿浆浓度的大小存在一定阈值,在阈值以内矿浆浓度上升浮选效果也会随之提升;相反的,超过阈值之后,药剂对于矿浆的选择性也会极大程度降低。

2.5 正交优化实验

为确定浮选药剂用量、浮选机转速、充气速率和矿浆浓度对煤粉浮选完善指数影响的大小,进行了四因素三水平的正交实验。各因素3水平的取值如表1所示,实验结果如表2所示,各因素对浮选完善指数的影响如图5所示。

由表2和图5可知,各影响因素对浮选完善指数的影响由大到小依次是药剂用量、浮选机转速、矿浆浓度、充气速率;最优的实验方案为:浮选浆料浓度130 g/L,浮选机转速1 800 r/min,浮选充气量0.25 m³/h,捕收剂用量1 050 g/t,起泡剂用量350 g/t。次优的实验方案为:浮选浆料浓度120 g/L,浮选机转速1 950 r/min,浮选充气量0.25 m³/h,捕收剂用量900 g/t,起泡剂用量300 g/t。

浮选的关键就在于改变矿物表面的疏水性,制造出合适的紊流条件和气泡,从而使得矿物颗粒能被泡沫选择并捕捉至液面刮出。药剂的使用决定了气泡的产生以及矿物表面特性的改变,故尤为重要;浮选机转速对应了浮选过程的紊流条件;矿浆浓度和充气速率对应了矿物颗粒的密集程度和气泡大小。四种因素综合作用,得到了最优的实验方案。

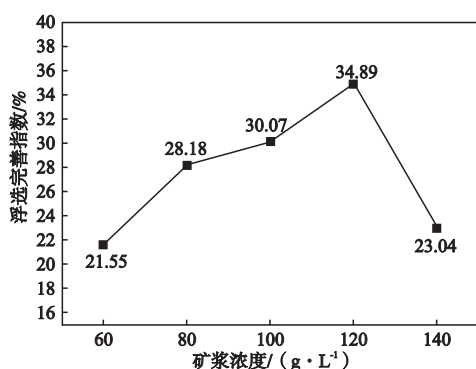


图4 矿浆浓度对浮选完善指数的影响

Fig. 4 Influence of pulp concentration on flotation perfection index

2.6 二次浮选实验

一次浮选后,所得煤粉中粘土矿物含量仍较高,为得到纯度更高的煤粉,使用正交实验所得的最佳参数,对铸造除尘灰进行二次浮选实验即先对除尘灰进行一次浮选,再对一次浮选煤粉进行二次浮选。实验参数为:浮选浆料浓度130 g/L,浮选机转速1 800 r/min,浮选充气量0.25 m³/h,捕收剂用量1 050 g/t,起泡剂用量350 g/t。实验结果表3所示。由表3可知,二次浮选之后,煤粉

表1 正交实验因素与水平

Table 1 Orthogonal experimental factors and levels

| 水平 | 矿浆浓度 /(g·L ⁻¹) | 浮选机转速 /(r·min ⁻¹) | 充气速率 /(m ³ ·h ⁻¹) | 药剂用量 /(g·t ⁻¹) |
|----|-------------------------------|----------------------------------|---|-------------------------------|
| 1 | 110 | 1 650 | 0.25 | 750 |
| 2 | 120 | 1 800 | 0.3 | 900 |
| 3 | 130 | 1 950 | 0.35 | 1 050 |

表2 正交实验结果及分析

Table 2 Orthogonal experimental results and analysis

| 实验序号 | 矿浆浓度 | 浮选机转速 | 充气速率 | 药剂用量 | 浮选完善指数 |
|------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 23.42 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 37.36 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 41.38 |
| 4 | 2 | 1 | 2 | 3 | 39.52 |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 1 | 35.37 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 2 | 43.15 |
| 7 | 3 | 1 | 3 | 2 | 34.91 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 3 | 43.43 |
| 9 | 3 | 3 | 2 | 1 | 35.76 |
| 均值1 | 34.05 | 32.62 | 36.67 | 31.52 | |
| 均值2 | 39.35 | 38.72 | 37.55 | 38.47 | |
| 均值3 | 38.03 | 40.1 | 37.22 | 41.44 | |
| 极差 | 5.29 | 7.48 | 0.88 | 9.93 | |

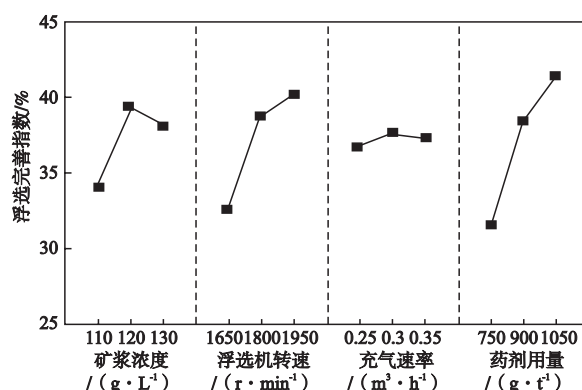


图5 矿浆浓度、浮选机转速、充气速率、药剂用量对浮选完善指数的影响

Fig. 5 Influence of pulp concentration, speed of flotation machine, aeration rate, dosage of reagent on flotation perfection index

的灼烧减量较一次浮选时提升了14.89%，证明多级浮选确实能提高煤粉纯度。

3 微观形貌和能谱分析

对铸造除尘灰、实验8所得浮选煤粉、按实验8所得参数二次浮选煤粉进行了微观形貌和能谱分析，结果如表4和图6所示，表4中的数值1~7是对应图6中的测试点。

由表4和图6可知，粘土砂铸造除尘灰的主要组成物质是煤粉和粘土矿物，其中煤粉表面有部分粘土矿物粘附着。通过一次浮选之后浮选煤粉含碳量得到了较大提升，但仍有较多粘土矿物存在；经过二次浮选之后粘土矿物大大减少，所得煤粒较为干净。

表3 二次浮选实验结果

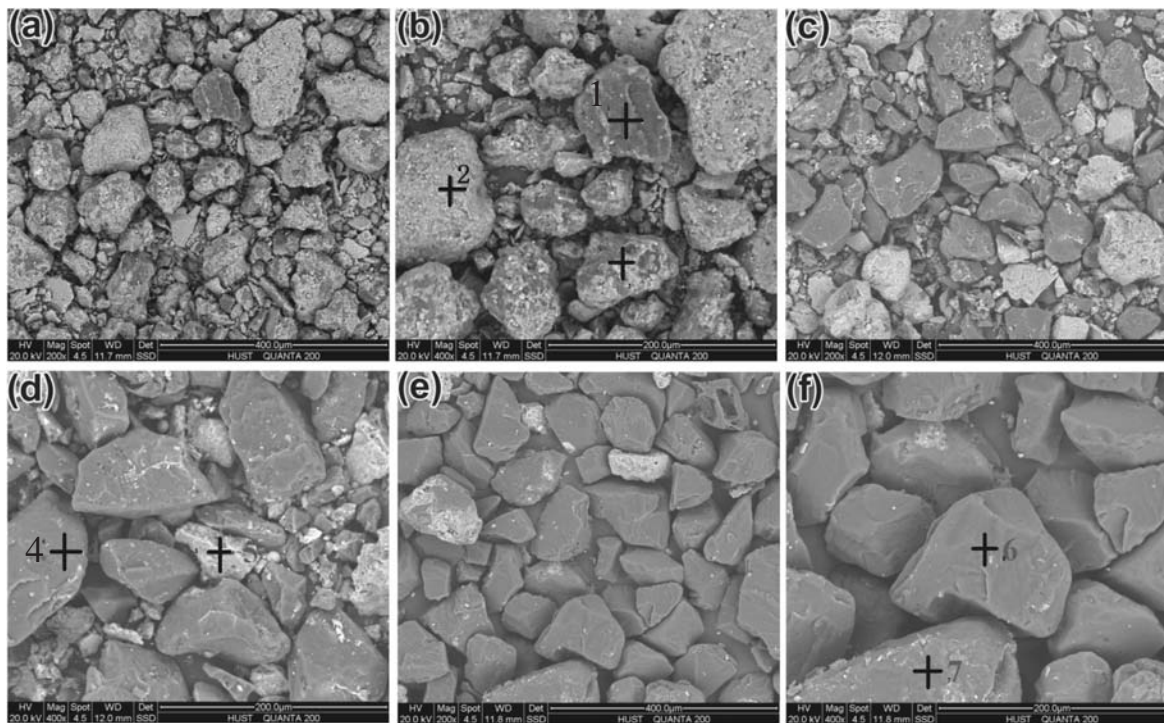
Table 3 Results of secondary flotation experiment

| 项目 | 产率/% | 灼烧减量/% |
|--------|-------|--------|
| 铸造除尘灰 | | 39.51 |
| 一次浮选煤粉 | 54.77 | 58.46 |
| 二次浮选煤粉 | 35.31 | 73.35 |

表4 铸造除尘灰、浮选煤粉能谱分析结果

Table 4 Energy spectrum analysis results of casting dust removal ash and flotation pulverized coal $w_B/\%$

| 元素 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C | 67.10 | 17.71 | 20.14 | 80.67 | 29.33 | 90.92 | 83.94 |
| O | 10.97 | 30.66 | 26.07 | 04.58 | 25.95 | 08.42 | 07.38 |
| Al | 03.74 | 10.59 | 10.68 | 05.96 | 09.53 | 00.00 | 03.64 |
| Si | 18.19 | 41.04 | 43.11 | 08.79 | 35.20 | 00.66 | 05.04 |



(a) 铸造除尘灰；(b) 铸造除尘灰；(c) 一次浮选煤粉；(d) 一次浮选煤粉；(e) 二次浮选煤粉；(f) 二次浮选煤粉

图6 除尘灰和浮选煤粉环境扫描电镜图

Fig. 6 SEM photographs of casting dust removal ash and flotation pulverized coal

4 结论

(1) 增加浮选药剂用量、浮选机转速、充气速率和矿浆浓度均可在一定范围内提高煤粉浮选完善指数，但随着数值进一步增加会导致煤粉灰分含量增加、矿浆受到扰动，降低浮选完善指数。

(2) 较优的再生工艺参数为：浮选浆料浓度130 g/L，浮选机转速1 800 r/min，浮选充气量0.25 m³/h，捕收剂用量1 050 g/t，起泡剂用量350 g/t。

(3) 通过参数优化，可以提高粘土砂铸造除尘灰的浮选效果；用优化后的参数对原矿进行二次浮选可以大幅提升浮选煤粉的纯度，其灼烧减量高达73.35%。

参考文献:

- [1] 樊自田, 董选普, 朱以松, 等. 水玻璃砂工艺原理及应用技术 [M]. 第二版, 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [2] SURESH P, DINESH K, SURRENDER K S. An empirical study on applicability of lean and green practices in the foundry industry [J]. J. Manuf. Technol. Mana., 2016, 27 (3) : 408–426.
- [3] PARK Chong-lyuck, KIM Byoung-gon, YU Young-chul. The regeneration of waste foundry sand and residue stabilization using coal refuse [J]. J. Hazard. Mater., 2012, 203–204: 176–82.
- [4] BAVITA B, PARDEEP K. Waste foundry sand in concrete: A review [J]. Constr. Build. Mater, 2017, 156: 661–674.
- [5] Anonymous. Total casting tons hits 112 million [J]. Modern Casting, 2019, 109 (12) : 22–25.
- [6] FAN Zitian, LIU Fuchu, LONG Wei, et al. A new low-cost method of reclaiming mixed foundry waste sand based on wet-thermal composite reclamation [J]. China Foundry, 2014, 11 (5) : 402–407.
- [7] NESTOR C, CEDRIC B, FRANCO B. Green sand reclamation using a fluidized bed with an attrition nozzle [J]. Resour. Conserv. Recycl., 2009, 54 (1) : 45–52.
- [8] MOHD M, MANVENDRA S, SANJAY M M, et al. Reclamation of used green sand in small scale foundries [J]. J. Mater. Process. Technol., 2018, 255: 559–569.
- [9] 王继娜, 樊自田, 张辉明. 水玻璃旧砂“冰冻-机械”再生实验 [J]. 铸造, 2008 (10) : 1013–1016.
- [10] ALONSO-SANTURDE R, COZA A, VIGURI J R, et al. Recycling of foundry by-products in the ceramic industry: Green and core sand in clay bricks [J]. Constr. Build. Mater, 2011, 27 (1) : 97–106.
- [11] WANG Fajun, XIE Ting, LEI Sheng, et al. Preparation and properties of foundry dust/ p ortland cement based composites and super hydrophobic coatings [J]. Constr. Build. Mater, 2020, 246.
- [12] KRAUS R N, NAIK T R, RAMME B W, et al. Use of foundry silica-dust in manufacturing economical self-consolidating concrete [J]. Constr. Build. Mater, 2009, 23 (11) : 3439–3442.
- [13] CÉSAR C, AIRES C, RUTE E, et al. Using foundry slag of ferrous metals as fine aggregate for concrete [J]. Resour. Conserv. Recycl, 2018, 138: 130–141.
- [14] RAFAT S. Properties of concrete made with volcanic ash [J]. Resour. Conserv. Recycl, 2012, 66: 40–44.
- [15] 甄坤坤. 超声场作用下的低阶煤和粉煤灰的浮选调浆强化实验研究 [D]. 中国矿业大学, 2019.
- [16] 刘亮, 吕鑫磊, 安小强, 等. 粉煤灰脱碳的浮选实验研究 [J]. 选煤技术, 2009 (1) : 10–13+2.

Investigation on Flotation Separation of Pulverized Coal from Foundry Dust of Clay Sand

YANG Zhi-yuan, GONG Xiao-long, HU Sheng-li, FAN Zi-tian

(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)

Abstract:

A flotation separation method was used to separate the pulverized coal from clay sand casting dust. The single factor and orthogonal experiments were carried out to analyze the effects of flotation reagent dosage, flotation speed, aeration rate and pulp concentration on the flotation perfection index of pulverized coal, and the secondary flotation test was completed under the optimal conditions. The micro morphology and surface component of dust removal ash, primary flotation pulverized coal and secondary flotation pulverized coal were analyzed by SEM and EDS. The results show that with increasing reagent dosage, flotation machine speed, aeration rate and pulp concentration, the coal flotation perfectness index firstly increases and then decreases; the optimal flotation process parameters are: collector dosage 1 050 g/t, foaming agent dosage 350 g/t, flotation machine speed 1 800 r/min, aeration rate 0.25 m³/h, pulp concentration 130 g/L. At this time, the flotation perfection index of pulverized coal reaches 43.42%, and the ignition loss of flotation pulverized coal is 58.46%. After secondary flotation, the ignition loss of flotation pulverized coal is as high as 73.35%, the surface of pulverized coal is clean and only a small amount of clay minerals exist.

Key words:

clay sand casting dust; flotation separation; pulverized coal; orthogonal experiment; flotation perfection index