

铸造混合型旧砂的复合再生工艺研究

韩海涛^{1, 2}, 韩继磊^{1, 2}, 王大威^{1, 2}, 刘宁^{2, 3}, 李宝娥^{2, 3}, 师春生^{2, 4}, 李海鹏^{2, 3}

(1. 承德北雁新材料科技有限公司, 河北承德 068451; 2. 河北省硅砂材料技术创新中心, 河北承德 068451;
3. 河北工业大学材料科学与工程学院, 天津 300130; 4. 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350)

摘要: 对含不同类型树脂芯砂的粘土混合旧砂进行再生试验研究, 对比了湿法再生、化学再生和复合再生等对再生砂表面形貌和性能的影响。结果表明: 单一再生方法无法同时满足对含泥量、灼减量、酸耗值等要求。“水洗+碱/酸处理+高温焙烧”工艺能充分发挥不同工艺优势, 获得理想结果, 适宜的工艺参数为在400 r/min的转速下水洗6次, 每次5 min, 砂水比约为1.7:1, 并在水洗初期和水洗后每100 g旧砂依次加入0.1 mol/L的氢氧化钠溶液4 mL和草酸溶液6 mL, 最后将水洗后的砂子在700 °C焙烧15 min。再生砂含泥量、酸耗值、灼减量分别达到0.18%, 2.61 mL和0.08%, 均超过行业标准和企业生产要求。

关键词: 粘土混合旧砂; 复合再生; 微观形貌; 工艺性能

我国是铸造大国, 砂型铸造是目前应用最广的铸造技术。据统计, 每生产1 t铸件就会产生1 t废旧砂, 若将其直接废弃, 不仅是对资源的极大浪费, 而且还会产生固废污染, 给环境带来巨大的危害。绿色铸造是未来铸造产业的发展方向, 为了实现资源循环利用和绿色清洁生产, 旧砂完全再生技术得到铸造工作者广泛关注^[1-2]。

目前已经应用的旧砂再生工艺根据再生原理的不同主要分为干法再生, 湿法再生和热法再生^[3-4]。其中, 干法再生是利用旧砂粒互相之间或与器械间的碰撞、摩擦等机械作用将表面包裹物去除, 设备简单, 但去除效率低, 主要用作较低要求的粘土砂再生。湿法再生是结合机械擦洗和水的溶解双重作用去除表面残留物, 对具有水溶性特性的粘结剂、盐、酯等有较好的去除效果。热法再生是通过低温或高温焙烧工艺将废旧砂加热, 从而使旧砂表面的残留粘结剂发生脆化, 或被高温分解、烧损, 从而实现去除, 主要用作粘土砂和有机粘结剂砂的再生^[5-7]。

从我司在客户处回收的废旧砂来看, 粘土砂中混入树脂芯砂(包括冷芯盒砂、热芯盒砂和覆膜砂等)的混合旧砂占较大比例。然而目前应用的旧砂再生技术基本上都是针对单一型砂进行的, 对混合废旧砂的再生效果有限。采用传统单一再生方法很难实现混合旧砂的完全再生。因此, 需结合不同方法优势, 通过联合再生获得高性能再生砂^[8-10]。

1 试验材料及再生方案

试验原料为本司客户生产后的旧砂, 按照组成的不同分为三类: 粘土旧砂, 含有热芯砂的混合旧砂(混合旧砂A), 含有冷芯砂的混合旧砂(混合旧砂B)。为了对比研究不同旧砂的再生工艺及再生效果, 本试验设计了三种不同再生方案。

方案 I: 称取不同旧砂各100 g分别放入洗砂杯中, 加入60 mL水, 在洗砂机400 r/min的转速下水洗5 min后静置10 min, 将水洗后的废水倒掉后再加入60 mL水进行下一次水洗, 如此反复水洗6次后, 将砂子在110 °C烘干15 min, 得到方案 I 再生砂。

方案 II: 原材料及水洗流程参数和方案 I 相同, 不同之处在于在初次水洗时加入0.1 mol/L的标准氢氧化钠溶液, 并在最后一次水洗后加入0.1 mol/L的草酸溶液, 烘干后得到方案 II 再生砂。

作者简介:

韩海涛(1988-), 男, 满族, 高级工程师, 主要研究方向为铸造造型材料。E-mail: hanhaitao1012@163.com

通讯作者:

李海鹏, 男, 教授, 博士。电话: 13512062652, E-mail: lhpcx@163.com

中图分类号: TG221

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)06-0799-05

基金项目:

河北省铸造废砂再生循环利用创新团队项目(225A7601D)。

收稿日期:

2023-02-24 收到初稿,
2023-07-28 收到修订稿。

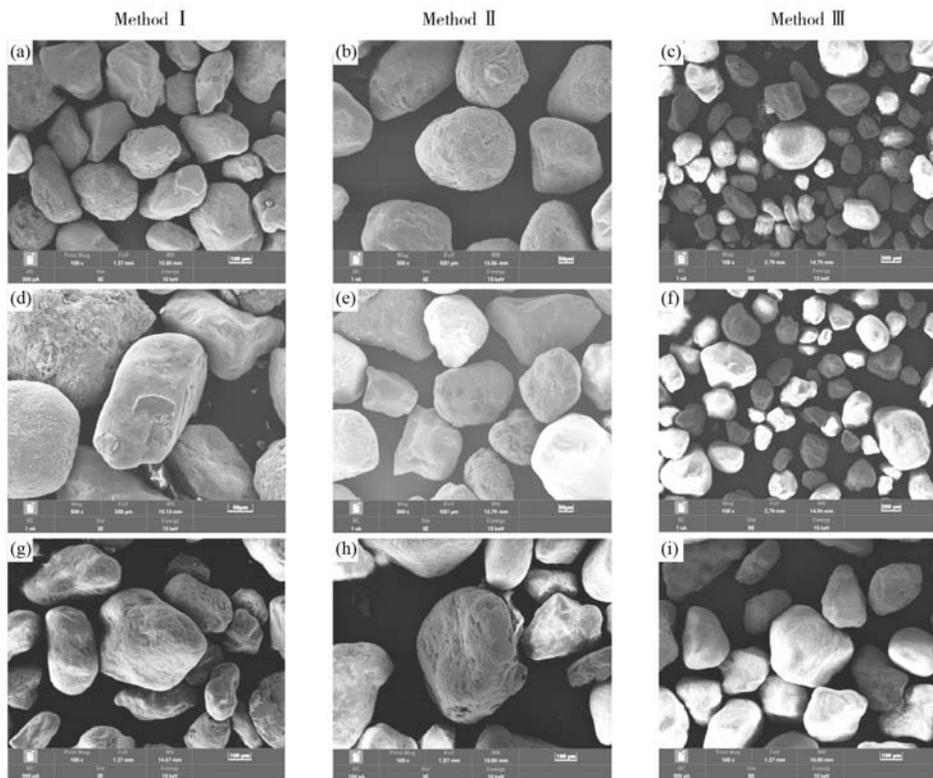
方案Ⅲ：将方案Ⅱ再生砂放入电阻式加热炉中，在700℃焙烧15 min后冷却至室温，得到方案Ⅲ再生砂。

2 旧砂再生效果分析

2.1 再生砂显微形貌

不同旧砂经过三种再生工艺得到的再生砂显微形貌如图1所示。粘土旧砂经6次水洗后表面包裹物有明显分层和脱落痕迹，再生砂表面比较平整，棱角小，

存在部分裂纹及断裂表面，残留杂质极少，说明砂粒表面的残留膨润土、煤粉及其他易溶于水的物质已经被有效去除；化学改性和高温焙烧对水洗砂表面形貌无明显影响。而对于混合旧砂，无论是热芯树脂还是冷芯树脂混合旧砂，水洗后均可见明显的树脂残留，说明水洗过程并不能去除混合旧砂中的残留树脂。但是经过高温焙烧后，再生砂表面较光滑平整，棱角小，杂质极少，说明残留树脂在高温下被有效去除。



(a-c) 粘土旧砂；(d-f) 混合旧砂A；(g-i) 混合旧砂B

图1 不同再生工艺获得再生砂表面SEM图

Fig. 1 SEM images of the reclaimed sand

2.2 再生砂性能

不同旧砂经过三种再生工艺得到的再生砂的含泥量、酸耗值和灼减量如图2所示。由图2a可知，对于不同旧砂而言，水洗（工艺Ⅰ）后所得的再生砂含泥量均低于0.3%，且经过化学处理（工艺Ⅱ）和高温焙烧（工艺Ⅲ）的再生砂含泥量进一步降低。酸耗值可直观地表征砂中碱性物质含量。由图2b可知，仅水洗后的三种旧砂酸耗值偏高（大于10 mL），经过化学处理改性的水洗砂酸耗值显著降低，低于铸造行业对酸耗值小于5 mL的要求，再经焙烧后的砂子酸耗值进一步降低，但幅度较小。灼减量能够表征再生砂中残留有机树脂量的多少。由图2c可知，对于三种旧砂而言，水洗和化学改性后的灼减量均偏高（大于0.8%），而经焙烧后，三种旧砂灼减量均降至0.1%左右，达到小

于0.3%的要求。

由以上结果可见，对于混合树脂的粘土旧砂而言，水洗工艺能有效降低再生砂的含泥量，化学处理能有效降低再生砂的酸耗值，而高温焙烧能有效降低再生砂的灼减量。因此，综合三种再生工艺，开发“水洗+碱/酸处理+高温焙烧”的复合再生工艺，是获得高性能再生砂的有效手段。

3 复合再生关键工艺参数确定

3.1 擦洗次数对再生砂含泥量的影响

由前述结果可知，影响含泥量的关键在于水洗工艺。本研究中对混合旧砂的水洗采用涡流擦洗，模拟生产线装置，不再讨论擦洗机转速、砂水比、单次水洗时间等因素，仅讨论水洗次数（总水洗时间）对旧

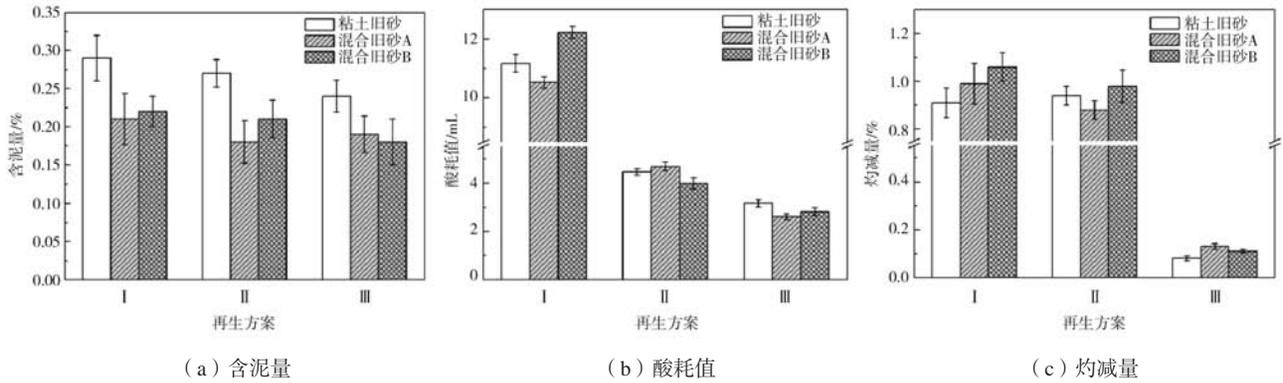


图2 不同再生工艺获得的再生砂主要性能

Fig. 2 The main properties of recycled sand obtained by different reclaimed methods

砂含泥量的影响，结果如表1所示。可见，随着水洗次数的增加，三种旧砂的含泥量均呈现逐渐降低的趋势，当水洗次数达到6次时，旧砂含泥量均低于0.3%的要求。随着水洗次数的进一步增加，粘土旧砂含泥量的降低趋势变缓，混合旧砂含泥量基本保持不变。因此，综合效率和成本考虑，含树脂芯砂的混合旧砂水

表1 水洗次数对再生砂含泥量的影响
Table 1 Effects of the scrubbing times on the mud content of different reclaimed sands w_B /%

旧砂类型	水洗次数				
	4	5	6	7	8
粘土旧砂	0.39	0.32	0.25	0.24	0.23
混合旧砂A	0.32	0.26	0.2	0.2	0.19
混合旧砂B	0.34	0.25	0.18	0.19	0.18

洗阶段适宜的次数为6次。

3.2 化学改性工艺对再生砂表面残留烧结物和酸耗值的影响

仅水洗的旧砂酸耗值偏高，不能满足高性能再生砂的要求，因此对水洗再生砂进行化学改性是降低其酸耗值的有效手段^[11]。同时有研究成果表明，在碱性溶液中进行浸泡处理对旧砂表面残留的不溶于水的包裹物有一定的去除效果，同时通过碱液的刻蚀作用改善硅砂表面性能，从而提高再生砂造型后的使用性能^[12]。因此，本试验设计在水洗阶段初期加入氢氧化钠溶液，通过化学反应进一步去除旧砂表面残留物，并在水洗后加入草酸溶液调控再生砂酸耗值。

图3所示为水洗环节中加入0.1 mol/L氢氧化钠溶液

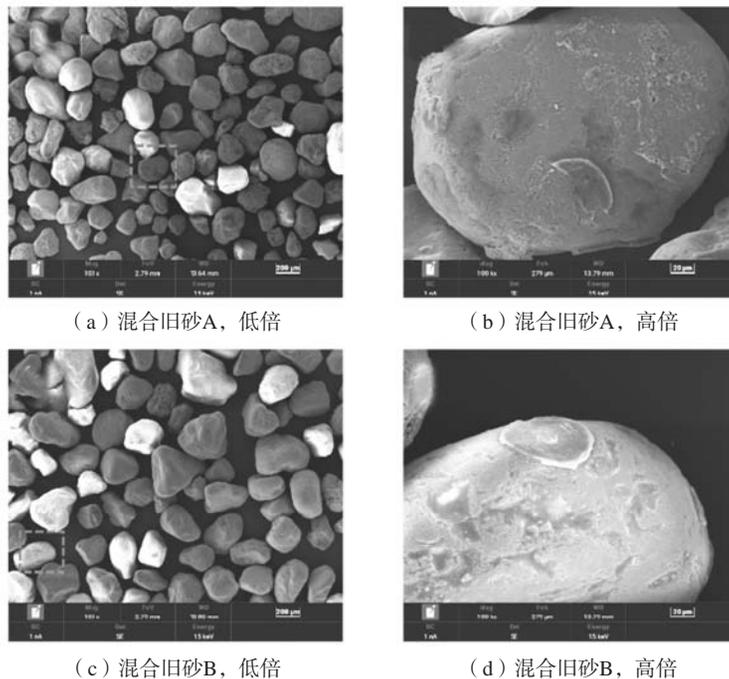


图3 水洗环节中加入碱溶液改性再生砂表面SEM图

Fig. 3 SEM images of the clay-resin mixed waste sands (a, b) A and (c, d) B after water scrubbing and alkali liquor soaking

改性再生砂的表面微观形貌。可见经碱处理后，旧砂表面杂质有一定减少，表面粗糙度增加，说明碱液与硅砂表面发生反应，提高其表面性能，但因反应时间较短且在室温下进行水洗，其去除杂质效果有限。表2所示为碱液处理的旧砂在水洗后加入不同量0.1 mol/L草酸溶液后再生砂的酸耗值。可见当草酸溶液加入量为6 mL时，三种旧砂的酸耗值分别为3.17、2.61和2.82 mL，均达到小于4 mL的要求。因此，对于含树脂芯砂的混合旧砂的化学改性处理适宜参数为水洗初期每100 g砂首先加入0.1 mol/L氢氧化钠溶液4 mL，水洗后加入0.1 mol/L草酸溶液6 mL。

表2 酸溶液加入量对再生砂酸耗值的影响
Table 2 Effects of the amount of acid on acid consumption value of different reclaimed sands

旧砂类型	草酸溶液加入量/mL			
	3	4	5	6
粘土旧砂	8.21	6.84	4.77	3.17
混合旧砂A	8.43	6.69	4.94	2.61
混合旧砂B	8.5	6.33	4.25	2.82

3.3 焙烧温度对再生砂灼减量的影响

为了确定焙烧温度对再生砂灼减量的影响规律，首先对三种旧砂进行了热重分析，结果如图4所示。可见三种旧砂均存在两个较明显的失重温度区间：第一阶段为20~100 °C，主要为旧砂失去吸附水导致；第二阶段为400~650 °C，膨润土失去结构水及树脂热解，质量损失约3%。三种旧砂在680 °C以后均无明显质量变化。这些结果为后续热法再生试验方案的制定提供理论依据。表3所示为经过水洗和化学处理的旧砂不同温度焙烧后再生砂的灼减量。可见，随着温度增加，再生砂的灼减量逐渐减小。当焙烧温度达到700 °C以上时灼减量基本无变化，说明在700 °C焙烧时旧砂表面残留挥发分和树脂已经被完全去除。同时，高温焙烧也能

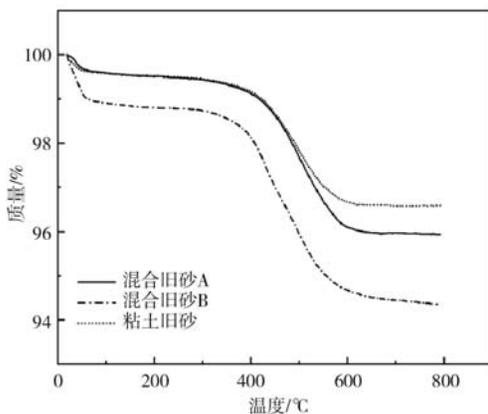


图4 不同旧砂热重分析

Fig. 4 TG analysis results of different waste sands

表3 焙烧温度对再生砂灼减量的影响
Table 3 Effects of heating temperature on the loss on ignition w_B /%

旧砂类型	焙烧温度/°C				
	600	650	700	750	800
粘土旧砂	0.16	0.1	0.09	0.08	0.08
混合旧砂A	0.37	0.19	0.13	0.13	0.12
混合旧砂B	0.44	0.21	0.11	0.12	0.11

促进硅砂从石英向磷石英的转变，减小了硅砂在高温下的膨胀现象^[13]。因此，混合旧砂水洗后适宜的焙烧温度为700 °C。

3.4 再生砂用于覆膜砂的性能

由于覆膜砂是本司的主要产品之一，在混合型旧砂再生工艺开发之初，设立的目标是再生砂要满足制备覆膜砂的性能要求。因此，分别选取新砂和由上述确定的复合再生工艺制备的再生砂各5 kg，在试验线上制备覆膜砂，然后在制样机上分别制备抗弯强度试样（120 s）和抗拉强度试样（120 s）并进行强度测试，结果如表4所示。可以看出，由复合再生砂制备的覆膜砂在常温和热态不同条件下的抗弯强度和抗拉强度均略高于由新砂（围场砂）制备的覆膜砂。以上结果表明，采用本试验优化后的再生工艺参数所制备的再生砂能够实现100%对新砂的替代，可以用于覆膜砂的生产。

表4 原砂和再生砂制备覆膜砂的力学性能
Table 4 Mechanical properties of precoated sand prepared with different sands

骨料类型	常温抗弯强度/MPa	热态抗弯强度/MPa	常温抗拉强度/MPa	热态抗拉强度/MPa
围场砂	8.48	3.26	4.10	1.30
再生砂	8.72	3.34	4.28	1.41

4 再生成本分析

复合再生砂生产线设计生产率为1~1.5 t/h，其中水洗用水为循环水，定期进行处理，处理成本为20~50元/t，焙烧过程所采用燃气成本为70元/t，电耗约为30元/t，设备折旧维护费用约为20元/t，再加上人工成本及其他费用，每吨再生砂的成本约为180元。与新砂相比，废砂经2次再生循环利用即可收回成本，经济效益显著。同时，本生产线设计采用智能化控制，依据废砂原料的不同组成选择不同再生工艺，如纯粘土废砂或对再生砂性能要求不高的情况下可仅进行水洗再生，优化资源和设备利用，进一步提高生产效率

和降低成本。

5 结论

(1) 含树脂芯砂的粘土混合旧砂的最佳再生工艺为水洗+碱/酸处理+高温焙烧, 再生砂含泥量、酸耗值和灼减量均达到行业标准要求。

(2) 水洗能有效降低再生砂的含泥量, 对于混合旧砂适宜参数为在400 r/min的转速下水洗6次, 单次时间为5 min, 砂水比约为1.7 : 1。

(3) 水洗过程中进行碱/酸处理能进一步提高再生砂表面性能并有效降低酸耗值, 适宜工艺参数为在水洗初期每100 g砂首先加入0.1 mol/L氢氧化钠溶液4 mL, 水洗后加入0.1 mol/L草酸溶液6 mL。

(4) 高温焙烧能有效降低再生砂的灼减量, 适宜工艺为700 °C焙烧15 min。

(5) 采用复合再生砂可以完全替代新砂生产树脂砂, 且成本较低, 减少了环境污染, 具有良好的经济和社会效益。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 孙清洲, 许荣福, 张普庆. 铸造粘土旧砂完全再生技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016
- [3] 樊自田, 刘富初, 龚小龙, 等. 铸造旧砂再生新方法、新进展及新期待 [J]. 中国铸造装备与技术, 2018, 53 (4): 5-10.
- [4] 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.
- [5] 孙清洲, 刘青峰, 王庆军, 等. 树脂旧砂的热法再生 [J]. 铸造, 2006, 55 (6): 646-648.
- [6] 李娜, 冯月雪, 刘庆义, 等. 碱酚醛树脂旧砂再生工艺试验研究 [J]. 现代铸铁, 2021 (4): 19-21.
- [7] 吉鹏辉. 热法再生砂的生产控制与应用 [J]. 铸造设备与工艺, 2018 (2): 14-16.
- [8] FAN Z T, LIU F C, LONG W, et al. A new low-cost method of reclaiming mixed foundry waste sand based on wet-thermal composite reclamation [J]. China Foundry, 2014, 11: 402-407.
- [9] 郝学杰, 孙清洲, 孙益民, 等. 含热芯盒树脂砂的粘土砂完全再生砂改性技术研究 [J]. 铸造, 2016, 65 (12): 1217-1220.
- [10] 邓嫫媛, 严磊, 傅骏, 等. 两种混合型旧砂再生砂用于冷芯盒制芯的实践 [J]. 铸造技术, 2016, 37 (1): 164-166.
- [11] 孙清洲, 任文成, 许荣福, 等. 粘土旧砂湿法再生技术的研究 [J]. 中国铸造装备与技术, 2018, 53 (5): 19-23.
- [12] GONG X L, LIU F C, HU S L, et al. Reclamation of clay resin mixed waste sand by a hot waste alkali liquor soaking assisted with scrubbing method [J]. International Journal of Metalcasting, 2021, 15: 566-575.
- [13] 孙清洲, 孙学忠, 庄云海. 热法再生覆膜砂的特点与应用 [J]. 铸造, 2002 (6): 450-452.

Research on the Composite Reclamation Technology of Clay Resin Mixed Foundry Waste Sands

HAN Hai-tao^{1,2}, HAN Ji-lei^{1,2}, WANG Da-wei^{1,2}, LIU Ning^{2,3}, LI Bao-e^{2,3}, SHI Chun-sheng^{2,4}, LI Hai-peng^{2,3}

(1. Chengde Beiyuan New Material Technology Co., Ltd., Chengde 068451, Hebei, China; 2. Technology Innovation Center of Silica Sand of Hebei Province, Chengde 068451, Hebei, China; 3. School of Material Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 4. School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract:

In this paper, the reclamation of different clay resin mixed waste sands were investigated. A composite reclamation method was proposed to reclaim these sands, as compared to water scrubbing reclamation method. The surface morphology and properties of the reclaimed sands were studied. The results show that the process route of "water scrubbing+alkali liquor soaking/acid liquor soaking+roasting" was appropriate, which could combine the advantages of different methods and lead to an ideal result. In details, the waste sands have been water washing six times with a speed of 400 r/min, and each duration time is 5 min. At the initial scrubbing, 4 ml alkali liquor was added with concentration of 0.1 mol/L, while 6 ml acid with the same concentration was added when after scrubbing. Finally, the modified sands were roasted at 700 °C for 15 min and cooled to room temperature. The mud content, acid consumption value, loss on ignition are 0.18%, 2.61 mL and 0.08%, respectively, which meet the industry standard and customer requirements.

Key words:

clay resin mixed waste sands; composite reclamation; microstructure; properties