

基于制砖法处置水基钻井废屑和市政污泥

卢西雷, 朱小林*, 蒲 贵, 曾明亮

(华南理工大学制浆造纸工程国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要:选取水基钻井废屑和市政污泥作为原料,通过改变市政污泥掺量、烧结温度等参数,制备烧结砖,并对其性能进行测试。研究表明,当市政污泥绝干掺量为 10%~15%、烧结温度为 950℃、保温时间为 2 h,制得的烧结砖性能符合国家标准《烧结普通砖》中 MU10 的要求。市政污泥掺量低于 15%时,烧结温度是影响烧结砖性能的主要因素;污泥掺量过高时,烧结砖内部空隙增加,烧结温度对烧结砖的性能没有影响。通过水基钻井废屑和市政污泥的协同处理,不仅减少了它们对环境的危害,实现了工业固废的高效利用,还为可持续能源开发提供了新的思路。

关键词:水基钻井废屑;制砖工艺;污泥处置;固体废物资源化

中图分类号:X705

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)S2-0404-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S2.070

Disposal of water-based drilling waste and municipal sludge based on brick making method

LU Xi-lei, ZHU Xiao-lin*, PU Gui, ZENG Ming-liang

(State Key Laboratory of Pulp and Paper Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Water-based drilling waste and municipal sludge are selected as raw materials to prepare the fired bricks through changing the dry content of municipal sludge, firing temperature, and so on, and the performance of the fired bricks is tested. Results show that the fired bricks meet the requirements of China's national standard "Fired Common Bricks" with a MU10 performance when the dry content of municipal sludge is 10%-15%, the firing temperature is 950℃, and the holding time is 2 hours. As the dry content of municipal sludge is less than 15%, the firing temperature is the main factor affecting the performance of fired bricks. As the dry content of municipal sludge is too high, the internal pores of fired bricks increase, and the firing temperature has no effect on the performance of fired bricks. Through synergistic treatment of water-based drilling waste and municipal sludge, not only does it reduce their harm to the environment and achieve efficient utilization of industrial solid waste, but it also provides a new idea for sustainable energy development.

Key words: water-based drilling waste; brick making process; sludge disposal; solid waste re-utilization

根据中国国家能源局公布的数据,中国页岩气可采资源量达 $2.18 \times 10^{13} \text{ m}^3$ 。合理勘探和开发页岩气资源,对于保障国家能源安全、促进能源结构优化、实现碳中和目标等具有重要战略意义^[1]。页岩气钻井过程会产生大量的钻井废屑,水基钻井废屑作为二类一般工业固体废物,其结构复杂,对环境危害性大^[2]。另一方面,中国现阶段污水处理厂等市政基础设施建设进程加速,市政污泥产量增加,市政污泥不能合理的处置已经成为制约城市发展的枷锁^[3]。对此,《“十四五”工业绿色发展规划》中明确指出需要推动工业固体废物资源化和循环化转型。

目前国内外对于工业固体废物的资源化处置多

用于建筑材料方面。Yang 等^[4]以水基钻井废屑和铝土矿为原料制备低密度高性能陶粒支撑剂,实现了工艺的优化升级。杜磊^[5]采用水基钻井岩屑代替制砖黏土,制得的烧结砖性能符合国家标准《烧结普通砖》中 MU20 的要求。Yu 等^[6]在页岩-市政污泥烧结砖中加入废玻璃来改善砖体性能,制备的污泥页岩砖的吸水率为 15.29%,抗压强度为 52.01 MPa。但目前关于水基钻井废屑和市政污泥的协同处理研究较少。本研究将污泥脱水工艺和烧结砖制备工艺相结合,将水基钻井废屑和市政污泥混合脱水后的泥饼用作制砖原料,优化生产工艺,资源化处置水基钻井废屑和市政污泥 2 种工业固体废物,实现工业固体废物处置的减量化、无害化、固定

收稿日期:2025-02-20;修回日期:2025-07-31

作者简介:卢西雷(1999-),男,硕士生,研究方向为固体废物资源化处置的研究;朱小林(1969-),男,博士,高级工程师,研究方向为污泥处理与环保设备,通讯联系人,zhuxlin@scut.edu.cn。

化和资源化。

1 材料与方法

1.1 原料

实验所用水基钻井废屑取自重庆市某钻井平台,含水率为 26.31%,塑性指数为 12.73。实验所用市政污泥取自佛山市某污水处理厂,含水率为 86.62%,密度为 1.2 g/cm³,有机质含量为 56.34%,pH 为 8.15。

1.2 原料分析方法

采用荷兰帕纳科公司的 Axios PW4400 X 射线荧光光谱仪对原料的化学成分进行分析;采用荷兰帕纳科公司的 X'pert Powder 多位自动进样 X 射线衍射仪对水基钻井废屑及烧结砖的物相组成进行分析,设备为 Cu 靶,设置管电压 40 kV,电流 40 mA,扫描范围 10°~90°;采用 Mastersizer 3000 马尔文激光粒度仪对水基钻井废屑粒径分布进行分析;采用深圳市新三思材料检测有限公司的 CMT5105 10T 微机控制电子万能试验机测试烧结砖抗压强度;采用日本日立公司 SU5000 场发射扫描电镜拍摄 SEM 电镜照片,加速电压为 3 kV。

吸水率测试方法:清理烧结砖表面后放入干燥箱中干燥至恒重,称其干质量记为 m_1 (g)。将干燥后的烧结砖浸入水中,室温放置 24 h。取出烧结砖,用湿毛巾拭去表面水分,立即称量,所得质量为浸泡 24 h 的湿质量 m_2 (g)。吸水率计算:

$$W = [(m_2 - m_1) / m_1] \times 100\% \quad (1)$$

1.3 烧结砖的制备方法

烧结砖砖胚成型含水率应控制在 18% 左右,高温烧结之前的含水率应控制在 2% 左右^[7-10]。实验以市政污泥绝干掺量分别为 0%、5%、10%、15%、20%、25% 和水基钻井废屑混合,采用广东宝福嘉环保科技有限公司的梯级增压带式深度脱水设备进行深度脱水,通过改变设备的压滤压力以及压滤时间,将泥饼含水率降至 18% 左右。对压滤后得到的泥饼放入粉碎机中粉碎,接着转移至模具中,控制成型压力 7 MPa,保持 5 min。将成型后的砖胚自然干燥 24 h 后,转入电热恒温鼓风干燥箱中干燥 5 h。室温下将砖胚样品放入马弗炉中,升温速率为系统额定参数,约为 9.7℃/min,分别设置最高烧结温度为 900、950℃ 和 1 000℃,保温 2 h。烧结砖制作过程见图 1,马弗炉温度变化曲线见图 2,烧制结束后关闭马弗炉,自然冷却至室温,得到烧结砖样品。

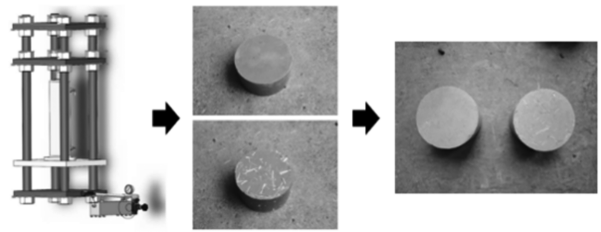
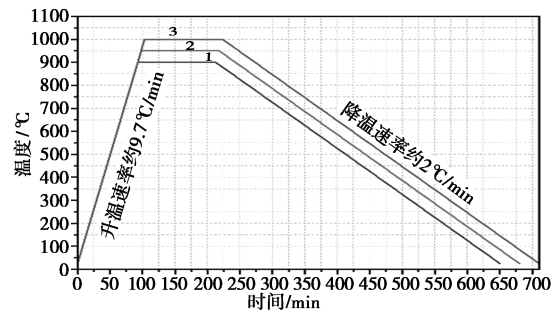


图 1 烧结砖制作过程



1—900℃;2—950℃;3—1 000℃

图 2 砖胚烧结温度曲线

2 结果与讨论

2.1 原料分析

2.1.1 原料化学成分分析

水基钻井废屑和市政污泥的 XRF 测试结果见表 1,两种原料主要化学成分成分都为 SiO₂、Al₂O₃、CaO 和 Fe₂O₃。高温烧结时,Al₂O₃ 作为烧结砖原料的助熔剂与大量的硅和钙结合形成玻璃相晶体,Fe₂O₃ 和 CaO 等作为助熔剂可促进液相形成进而填充砖体内部孔隙,以确保制备出的烧结砖具有足够的强度等性能^[12]。水基钻井废屑的化学成分与传统制砖黏土相似,但含量不同。水基钻井废屑中 SiO₂ 含量偏低,但 CaO 含量高,基本符合制砖要求。而市政污泥中 SiO₂ 含量为 25.62%,比水基钻井废屑低,但 Al₂O₃ 含量较高。市政污泥中大部分为有机质,在高温烧结过程,这些有机质为砖胚提供热值,有助于砖体内部温度升高,提高熔融效率,同时可以节省能源。水基钻井废屑和市政污泥具有与黏土相似的矿物成分,可以代替黏土用于烧结砖的制备。

表 1 原料化学成分

	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	%
水基钻井废屑	16.81	49.55	5.67	11.69	2.57	3.16	0.48	0.10	
市政污泥	31.97	25.62	6.15	10.05	2.67	1.70	2.23	1.67	
黏土 ^[11]	14.12	68.59	5.29	1.21	1.58	2.33	1.24	0.03	

2.1.2 水基钻井废屑组成

水基钻井废屑的 XRD 图谱见图 3。水基钻井废屑中主要含有石英(SiO_2)、方解石(CaCO_3)和云母,石英和方解石在烧结过程中可以形成硅酸钙玻璃相,增加烧结砖的强度和耐火性能。水基钻井废屑中主要矿物的熔点较高、物化性质比较稳定且不具有亲水性,这保证了烧制过程中砖坯的稳定性和质量^[13]。

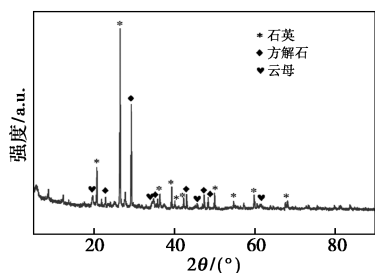


图 3 水基钻井废屑的 XRD 图谱

2.1.3 水基钻井废屑粒度分布

将烘干的水基钻井废屑经过粉碎机粉碎,过 80 目筛测试粒度分布,结果见表 2。原料的粒度分布会对烧结砖的胚体密实度、烧结过程、可塑性等产生影响。作为烧结砖原料,水基钻井废屑中粒径 $\leq 100 \mu\text{m}$ 的颗粒占 85% 左右,这可以减少烧结过程中空隙的数量,从而提高烧结砖的密度和强度。

表 2 水基钻井废屑粒度分布

	<1.0 μm	1.0~10.0 μm	10.0~100.0 μm	>100.0 μm
粒度分布/%	3.36	24.08	57.17	15.34

2.2 烧结砖物质组成

取烧结温度 950°C 下市政污泥掺量为 0% 和 25% 的烧结砖进行 XRD 表征分析,结果见图 4 和图 5。可以看出,烧结砖中石英(SiO_2)含量较高,还存在钙长石($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)和蓝晶石(Al_2SiO_5),这两种矿物都是硅酸盐矿物,在烧结过程中经过高温处理后形成了坚固的骨架结构^[14],为烧结砖提供了强度保障。

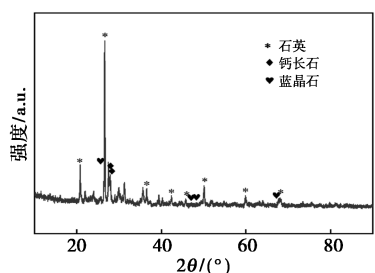


图 4 市政污泥掺量 0% 烧结砖 XRD 图谱

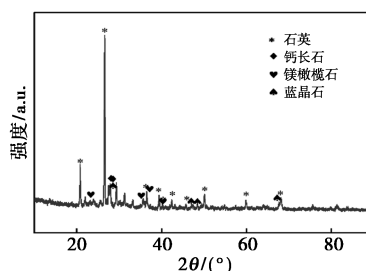
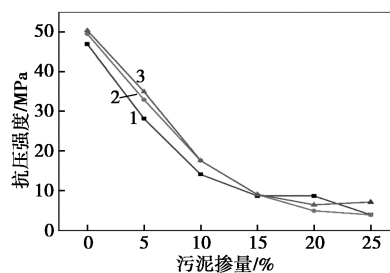


图 5 市政污泥掺量 25% 烧结砖 XRD 图谱

2.3 不同温度下制备的烧结砖抗压强度

以水基钻井废屑和市政污泥为原料,按照 1.3 中方法制备烧结砖样品。不同温度下制备的烧结砖抗压强度随市政污泥掺量的变化结果见图 6。可以看出,市政污泥掺量对烧结砖抗压强度的影响很大。随着市政污泥掺量的增加,烧结砖的抗压强度逐渐降低,市政污泥掺量为 0% 时, 1000°C 下制备的烧结砖抗压强度最高,为 50.46 MPa;当市政污泥掺量低于 10% 时,随着烧结温度的升高,烧结砖的抗压强度逐渐升高,这可能是因为当烧结温度达到 950°C 以上时,方解石在高温下继续与 SiO_2 反应生成钙长石,同时 SiO_2 与 Al_2O_3 反应形成蓝晶石,在烧结砖内部生成玻璃相晶体,结构更加紧密,砖体强度提高^[15];当市政污泥掺量高于 15% 时,随着污泥掺量的增加,烧结砖抗压强度的变化不明显,污泥掺量达到临界值;同时,升高烧结温度,对烧结砖抗压强度的影响可以忽略不计,污泥掺量对烧结砖抗压强度的影响大于烧结温度的影响。继续增加市政污泥掺量,烧结砖的抗压强度均低于国家《烧结普通砖标准》(GB 5101—2003)规定的最低要求 MU10 等级。



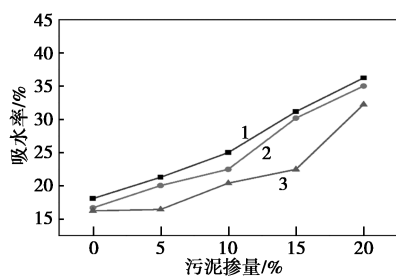
1— 900°C ; 2— 950°C ; 3— 1000°C

图 6 烧结砖抗压强度变化曲线

2.4 不同温度下制备的烧结砖吸水率

在不同温度下制备的烧结砖吸水率随市政污泥掺量的变化结果见图 7。通过数据分析看出,市政污泥掺量为 0% 时,不同烧结温度下制备的烧结砖吸水率比较接近, 1000°C 下制备的烧结砖吸水率最低,为 16.82%。烧结温度越高,烧结砖吸水率越

低,这可能是因为升高温度,促进了原料中的 CaO、MgO 与 Al_2O_3 及 SiO_2 反应,生成 $CaO/MgO-Al_2O_3-SiO_2$ 三元系统液相^[16]。在冷却过程中,液相转变成玻璃相,填充了砖体内部的孔隙,导致吸水率降低。随着市政污泥掺量增加,烧结砖的吸水率逐渐增大,这是因为市政污泥掺量增加,砖体中有机物含量升高,在高温烧结过程中有机质发生分解,在砖体内部形成大量孔隙,导致砖体外形发生收缩,砖体内部结构破坏,使得烧结砖吸水率升高。市政污泥掺量为 5%~15% 时,1 000℃ 下制备的烧结砖吸水率明显低于 900℃ 和 950℃ 下制备的烧结砖,此时烧结温度是影响烧结砖吸水率的主要条件;当市政污泥掺量大于 20% 时,升高烧结温度,烧结砖吸水率变化不明显,此时烧结温度对吸水率的影响要小于市政污泥掺量。

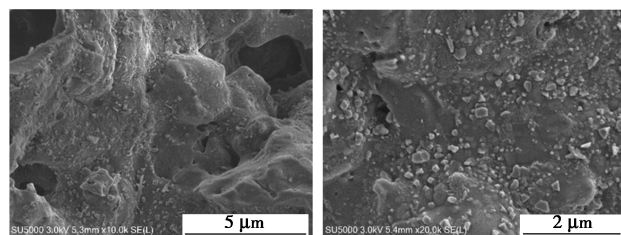


1—900℃; 2—950℃; 3—1 000℃

图 7 烧结砖吸水率变化曲线

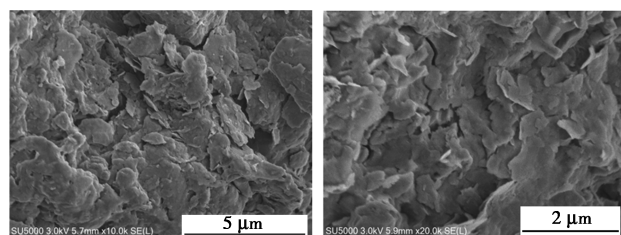
2.5 烧结砖微观结构分析

为了探究烧结砖物理性能和微观表面结构之间的关系,取 950℃ 烧结温度下市政污泥掺量为 0% 和 25% 的烧结砖截面进行 SEM 分析,结果见图 8。图 8(a)、(b) 为不同放大倍数下市政污泥掺量 0%



(a) 无污泥

(b) 无污泥



(c) 污泥掺量 25%

(d) 污泥掺量 25%

图 8 烧结砖横截面 SEM 图

的烧结砖横截面 SEM 图,图 8(c)、(d) 为市政污泥掺量 25% 的烧结砖横截面 SEM 图。当市政污泥掺量为 0% 时,烧结砖截面比较紧实,孔隙较少,可以看到大片的玻璃化结构,从图 8(b) 可以看到上面附着许多不规则的结晶颗粒,此时烧结砖抗压强度较高,吸水率较低;当市政污泥掺量为 25% 时,烧结砖截面存在大量开放孔隙,看不到明显的玻璃化区域,内部结构疏松呈现片状结构,此时烧结砖抗压强度较低,吸水率较高,这与其抗压强度和吸水率的曲线变化相一致。

3 结论

本研究基于烧结砖制作工艺与污泥脱水工艺相结合,优化工艺条件,实现资源化处置工业固体废物,结论如下。

(1) 水基钻井废屑-市政污泥烧结砖的最佳制备工艺条件为:市政污泥绝干掺量为 10%~15%、烧结温度为 950℃、保温时间为 2 h。在此条件下,制得的烧结砖性能符合国家标准《烧结普通砖》中 MU10 的要求,含水率 26.31% 的水基钻井岩屑和含水率 86.62% 的市政污泥处理量比例接近 1:1,固体废物利用率 100%。

(2) 市政污泥掺量对烧结砖性能的影响大于烧结温度。市政污泥掺量较低时,烧结温度与抗压强度表现为正相关的关系,与吸水率表现为负相关的关系;市政污泥掺量过高导致烧结砖内部空隙增加,此时烧结温度对烧结砖性能影响忽略不计。

(3) 通过 XRD 和 SEM 分析烧结机理和试验现象,发现构成烧结砖骨架的主要晶相是长石类矿物和石英,其中长石主要为钙长石,石英则以 SiO_2 形式存在。这两种矿物都是硅酸盐矿物,在烧结过程中经过高温处理后形成了坚固的骨架结构,为水基钻井废屑-市政污泥烧结砖提供强度保障。

参考文献

- [1] 何希鹏,蔡潇,高玉巧,等.页岩气勘探开发实验技术研究进展与发展方向[J].天然气工业,2024,44(7):12-26.
- [2] Wang Z, Li B, Liang X. Utilization of river sediment, sewage sludge and wheat straw as the primary raw material in sintered-shale bricks [J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2022, 24(6):2401-2415.
- [3] Liang Y, Xu D, Feng P, et al. Municipal sewage sludge incineration and its air pollution control [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 295:126456.

(下转第 415 页)

5 结论

(1)通过 α -蒎烯与MAH的Diels-Alder加成反应及其与PEG-1000的酯化反应,成功合成了新型萜烯基乳化剂TP-1000。核磁共振和红外光谱表征结果表明,产物结构正确。

(2)采用相反转乳化法成功制备萜烯树脂乳液。结果表明,TP-1000作为乳化剂时,乳液稳定性优于使用市售乳化剂时。乳化剂浓度对乳液稳定性有重要影响,浓度为12%时,乳液在常温下可稳定超过3个月,且在高温、离心、冻融和钙离子稳定性测试中均表现出优异性能。

(3)乳化剂用量对压敏胶的力学性能有显著影响。实验发现,乳化剂用量的减少能够提升压敏胶的初粘强度和剥离强度,但会导致乳液稳定性下降。因此,在实际应用中需要在乳液稳定性和压敏胶力学性能之间进行平衡,以满足不同的使用需求。

(4)萜烯树脂乳液与橡胶乳液共混后,形成的压敏胶力学性能得到明显改善。结果表明,萜烯树脂乳液的添加能够提高压敏胶的初粘强度和剥离强度,并在添加量为70%时达到最大值。与市售松香乳液相比,萜烯树脂乳液对压敏胶力学性能的改善效果更显著。

参考文献

[1] Khan I, Poh B T. Natural rubber-based pressure-sensitive adhesives: A review [J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2011, 19(3): 793-811.

(上接第407页)

[4] Yang H, Liu Y, Bai G, *et al.* Solidification and utilization of water-based drill cuttings to prepare ceramsite proppant with low-density and high performance [J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(5): 2314-2325.

[5] 杜磊.页岩气水基钻井岩屑制备烧结类墙体材料性能研究[D].绵阳:西南科技大学,2023.

[6] Yu G, Yao Y, Shi J, *et al.* The reuse of waste glass to enhance strength during the introduction of municipal sewage sludge in shale brick manufacturing [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2024, 26(6): 3681-3698.

[7] Lv C, Wang J, Zhao P, *et al.* Effect of red mud content on the property of sintered brick [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 726/731: 2677-2680.

[8] Sun D, Sun P, Wang A, *et al.* Establishing performance of prediction models and optimizing preparation parameters of sintered product based on response surface methodology [J]. *Asian Journal of Chemistry*, 2014, 26(5): 1501-1505.

[9] Cheng J, Shao Z, Xu T, *et al.* The advantages of microwave in using engineering spoil to sinter bricks [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 57: 104940.

[2] 卢晨晨,钱军,石一峰.不同光引发剂的丙烯酸酯UV热压敏胶的性能研究[J].*现代化工*,2025,45(3):189-193.

[3] 熊联明,沈震,李璐,等.丙烯酸酯乳液压敏胶改性研究新进展[J].*现代化工*,2006,26(S1):122-125.

[4] Yang H W H. Water-based polymers as pressure-sensitive adhesives—viscoelastic guidelines [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1995, 55(4): 645-652.

[5] 杨玉昆.乳液压敏胶的技术进展[J].*粘接*,2007,28(5):41-44.

[6] 瞿冬梅,许自忠.水性增粘树脂在压敏胶中的作用原理[J].*粘接*,2012,33(8):48-50.

[7] 王雪荣,焦剑,黄旭东,等.增粘树脂在丙烯酸酯乳液胶粘剂中的共聚改性研究[J].*中国胶粘剂*,2006,15(7):13-16.

[8] 吴喜来,张少云,黄秀萍,等.含萜烯树脂丙烯酸酯乳液型压敏胶的制备与性能研究[J].*中国胶粘剂*,2012,21(8):19-22,36.

[9] Rajesh P R, Hagood A G, Peters M A, *et al.* Evaluation of natural rubber latex-based PSAs containing aliphatic hydrocarbon tackifier dispersions with different softening points-Adhesive properties at different conditions [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2013, 41: 160-170.

[10] Tobing S D, Klein A. Mechanistic studies in tackified acrylic emulsion pressure sensitive adhesives [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2000, 76(13): 1965-1976.

[11] 于文浩,张素芳,郭书成,等.水性石油树脂乳液的制备及应用研究进展[J].*精细石油化工*,2024,41(2):73-76.

[12] Fink J K. 12-Terpene Resins [M]. 2018:403-415.

[13] 黎月清.萜烯树脂分散胶及其制备方法:CN 201711068512.1 [P]. 2018-02-23.

[14] Allenspach M, Steuer C. α -Pinene: A never-ending story [J]. *Phytochemistry*, 2021, 190: 112857.

[15] Liu P, Liu X M, Saburi T, *et al.* Thermal stability and oxidation characteristics of α -pinene, β -pinene and α -pinene/ β -pinene mixture [J]. *RSC Advances*, 2021, 11(33): 20529-20540.

[16] 罗常泉,段文贵,岑波,等. α -蒎烯-马来酸酐加成物的合成[J].*生物质化学工程*,2006,40(3):25-28.

[17] Ünveren E, Gündüz G, Cakicioglu F. Isomerization of alpha-pinene over acid treated natural zeolite [J]. *Chemical Engineering Communications*, 2005, 192(3): 386-404. ■

[10] Huang B, Jing J, Zhu J, *et al.* The comparative analysis of lime burst between sintered shale brick and light-weight sintered brick [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 450/451: 683-687.

[11] 卢娟娟,鹿晓泉,段兆辉,等.GB/T 16399《黏土化学分析方法》的修订介绍[J].*中国水泥*,2021(S1):4-7.

[12] Luo L, Li K, Fu W, *et al.* Preparation, characteristics and mechanisms of the composite sintered bricks produced from shale, sewage sludge, coal gangue powder and iron ore tailings [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 232: 117250.

[13] Guo C, Kong J, Wang Z, *et al.* Study on preparation and properties of sintered brick from multi-source solid waste [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(19): 10181.

[14] Chiang K, Chien K, Hwang S. Study on the characteristics of building bricks produced from reservoir sediment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 159(2/3): 499-504.

[15] Liu Y, Wang Z, Chen M, *et al.* Preparation of sintered brick from thermal desorption residue of oily sludge and analysis of environmental performance [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 376: 130923.

[16] 李欣聪,卢晶荣,郭鑫桥.石煤提钒尾渣基钙长石烧结砖的烧结及重金属固化机理[J].*矿产综合利用*,2024,45(5):153-160. ■