

全固废烧结砖的制备及性能研究

王正华¹, 熊淑琴², 武文皓³, 韩晓雪¹, 郭晨³, 赵翰霖³, 全洪珠^{3,*}

(1. 青岛三星工程有限公司, 青岛 266107; 2. 山东省建设建工(集团)有限责任公司, 济南 250001;

3. 青岛农业大学 建筑工程学院, 青岛 266109)

摘要:以建筑渣土、黄河沉积沙以及污泥为原材料制备全固废烧结砖,借助 XRD、XRF、SEM 等手段对原材料进行了详细的理化性质测试,确定了坯体的最佳制备方法及烧结制度,探究了含水率及黄河沉积沙掺量对烧结砖力学性能的影响规律。结果表明:含水率为 25%时坯体水分挥发稳定,此时砖体烧结强度高;黄河沉积沙取代率为 30%时坯体内形成完整的骨架结构,烧结砖强度增加;在每 2 个梯度间进行 2 h 保温处理,可为物质反应及气体挥发提供所需外部环境,提升烧结质量;烧结砖内部存在高温冷却后形成的由玻璃相以及主晶相构成的砖体骨架,使砖体具有良好的结构稳定性及力学强度;在含水率为 25%、黄河沉积沙取代率为 30%时,砖体强度达到 29.3 MPa,吸水率为 9.9%,符合工程用砖要求。通过原材料处理、配比设计、坯体成型、烧结工艺等方面对烧结砖的制备工艺进行研究,为全固废烧结砖的生产制备提供了理论依据。

关键词:固废;烧结砖;烧结制度;建筑渣土;黄河沉积沙;污泥

中图分类号:TU522.1⁺1

文献标志码:A

文章编号:1673-4602(2024)02-0028-08

Study on preparation and properties of all-solid waste fired bricks

WANG Zhenghua¹, XIONG Shuqin², WU Wenhao³, HAN Xiaoxue¹,
GUO Chen³, ZHAO Hanlin³, QUAN Hongzhu^{3,*}

(1. Qingdao Sanxing Engineering Co. Ltd., Qingdao 266107, China;

2. Shandong Construction Group Co. Ltd., Jinan 250001, China;

3. College of Civil Engineering & Architecture, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: Construction waste and Yellow River sedimentary sand and sludge were used to make the all-solid waste fired brick. The physical and chemical properties of raw materials were evaluated by using XRD, XRF, SEM and other methods. The best preparation method and sintering system have been determined. The influence of water content and addition of Yellow River sedimentary sand on the mechanical properties of fired bricks was investigated. The results show that when the water content is 25%, the moisture volatilization is stable, and the strength of fired brick is enhanced. When the replacement rate of Yellow River sedimentary sand is 30%, a complete skeleton structure is formed and the strength of fired brick is increased. 2 h insulation treatment in every 2 gradient can provide the necessary environment for material reaction and gas volatilization, and can improve the strength of fired

收稿日期:2023-06-21

基金项目:山东省自然科学基金面上项目(ZR2021ME110)

作者简介:王正华(1972-),男,山东青岛人。工程师,主要从事固体废弃物资源化利用方面的研究。E-mail:qdsxgcyxgs@126.com。

*通信作者:全洪珠(1968-),男,朝鲜族,黑龙江鸡西人。教授,主要从事生态混凝土、再生混凝土等方面的研究。

E-mail:quanhongzhu2006@qau.edu.cn.

bricks. Inside the fired brick, glass phase and main crystal phase formed after high temperature cooling constitutes the brick skeleton, therefore the brick has good structural stability and mechanical strength. When the water content is 25% and the replacement rate of Yellow River sedimentary sand is 30%, the brick compressive strength is up to 29.3 MPa and the water absorption rate is 9.9%, which meets the requirements of engineering. In this paper, the preparation technology of fired bricks is studied from the aspects of raw material handling, proportioning design, raw brick forming and sintering process, and provides a theoretical basis for the production and preparation of all-solid waste sintered bricks.

Key words: solid waste; fired brick; sintering system; construction waste; Yellow River sedimentary sand; sludge

近年来,因大规模城镇化建设产生的大量建筑渣土难以处理,据统计,建筑渣土的年产生量超过15亿 $t^{[1]}$,占城市固体废弃物总量的30%~40%,但综合利用率不超过5% $^{[2]}$ 。污泥年产生量为3500~4000万 t ,无害化处置率不足30% $^{[3-4]}$ 。渣土、污泥因处置成本高、投资回报低等原因大量堆积在城市外围,不仅影响城市美观而且造成生态环境的破坏 $^{[5]}$ 。但建筑渣土具有良好的结构性、亲水性、坚硬度高、压碎指标低等特点 $^{[6-7]}$,用其制备烧结砖,易压实成型,可用于解决建筑渣土的一系列问题 $^{[8]}$ 。同时,国内外已有利用污泥制备烧结砖制品的相关研究,明确了污泥作为烧结砖组分的积极作用 $^{[9-11]}$ 。近年来,黄河沉积沙问题日益严峻,黄河年输沙量达 $2.4 \times 10^8 t^{[12]}$,导致众多泥沙灾害以及生态问题 $^{[13]}$ 。但目前有关黄河沉积沙资源化利用方面的研究较少,尝试将黄河沉积沙用于烧结砖,探索黄河沉积沙资源化利用新途径迫在眉睫 $^{[14]}$ 。

本文旨在完善利用多种固废制备烧结砖的技术理论体系,研究烧结机制对全固废烧结砖力学性能的影响规律,以提高烧结过程的可控性与稳定性;分析砖坯含水率对烧结砖力学性能的影响规律;分析黄河沉积沙对烧结砖骨架结构的形成以及性能的提升情况,以期对全固废烧结砖在实际中的推广应用提供理论依据与数据支持。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料及性能分析

1.1.1 建筑渣土

本试验采用的建筑渣土为某市政道路工程建设产生的施工渣土,经破碎筛分后得到粒径小于0.3 mm的细颗粒土,物理性能及化学组成如表1、表2所示。建筑渣土颗粒与烧结用普通黏土颗粒XRD衍射图谱如图1所示,SEM微观形貌如图2所示。

表1 建筑渣土物理性能

指标	含水率/%	吸水率/%	塑性指数	液性指数	湿密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)
取值	5.4	8.5	16.0	0.5	1.8	1.7

表2 建筑渣土化学成分

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	其他
含量	57.4	17.3	6.1	4.0	0.2	1.8	2.5	3.6	0.6	6.5

建筑渣土及普通黏土经筛分取样后进行XRD测试,由图1可知,两种土料主要成分衍射峰强度相近,主要物相为石英(SiO₂)。

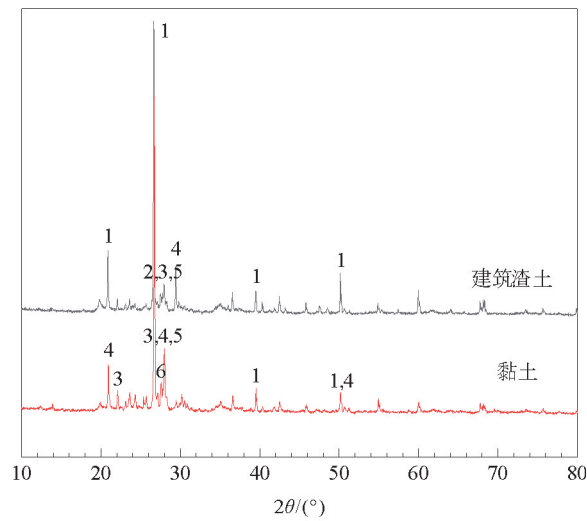
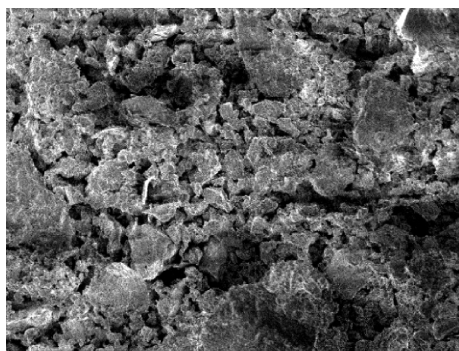
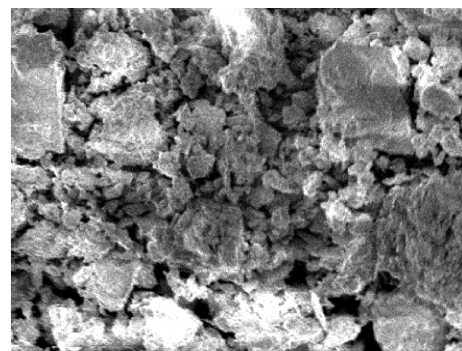


图1 建筑渣土与普通黏土XRD衍射图谱比较

1— SiO_2 ; 2— $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$; 3— $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$;
4— $\text{Fe}_4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$; 5— CaCO_3 ; 6— KAlSi_3O_8



(a) 建筑渣土颗粒



(b) 普通黏土颗粒

图2 建筑渣土、普通黏土 SEM 对比(500 倍)

图2的SEM形貌分析表明,相较于普通黏土颗粒,建筑渣土的土颗粒更趋近于圆形,颗粒组成规整,具有相对完整的颗粒级配。在陈化时,圆形的土体颗粒可较大程度地提高黏土颗粒间相互接触的比表面积,进而提升颗粒间相互作用力及黏性。此外,完整的颗粒级配会有效降低砖体内部的孔隙率,并为水汽蒸发出砖体提供良好的孔体结构。

1.1.2 黄河沉积沙

本试验所用黄河沉积沙采集于高青县黄河下游段,物理性能及化学成分如表3、表4所示。

表3 黄河沉积沙物理性能

指标	平均粒径/mm	含泥量/%	表观密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	堆积密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙率/%	吸水率/%
取值	0.018	2.1	2.63	1.54	41	1.9

表4 黄河沉积沙化学成分

成分	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	SO_3	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	其他
含量	66.5	12.8	7.7	4.4	0.1	2.4	2.0	2.8	1.0	0.3

由图 3 可知,黄河沉积沙的矿物成分比较简单,主要成分为石英(SiO₂),同时含有钙长石(CaAl₂Si₂O₈)、钠长石(Na(AlSi₃O₈))等矿物成分。

1.1.3 污泥

本试验所用污泥取自某自来水厂,物理性能见表 5。

1.2 试验方法

1.2.1 抗压强度测试

依据《砌墙砖试验方法》(GB/T 2542—2012)^[15]中规定的一次成型制样法进行抗压强度测试。

1.2.2 线收缩率测试

坯体成型后测量生坯的直径尺寸,经高温烧结冷却后再测量烧结砖样品的直径,根据式(1)计算线收缩率,试验结果以算数平均值表示。

$$S = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:S 为样品的线收缩率,%;L₀ 为生坯的直径,mm;L₁ 为烧结后样品的直径,mm。

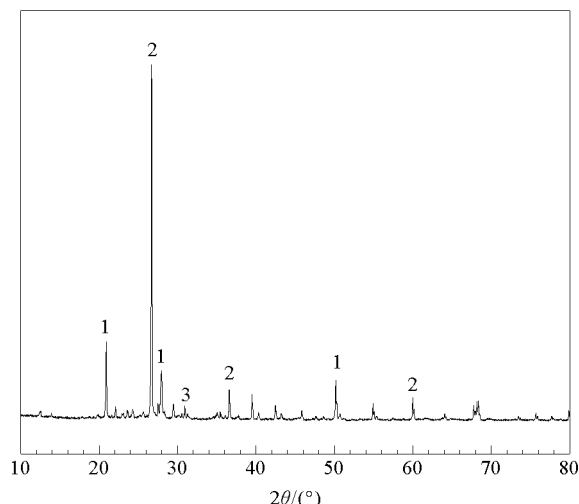


图 3 黄河沉积沙XRD图谱
1—CaAl₂Si₂O₈; 2—SiO₂; 3—Na(AlSi₃O₈)

表 5 污泥物理性能

指标	pH 值	含水率/%	烧矢量	MLSS/MLVSS	污泥指数 SVI/(mL·g ⁻¹)
取值	6.98	38.3	7.51	0.4098	146

注:MLSS/MLVSS 比值为污泥中有机物的比例,可作为污泥活性指标参考。

1.2.3 微观形貌分析

采用日本 Hitachi 公司生产的 HT7700 型扫描电子显微镜,将样品制成合适大小且具代表性颗粒,冲洗表面后干燥至恒重,冷却后通过导电胶带将样品粘贴在样品台上喷金处理,处理完成后放入仪器进行检测。

1.3 配合比设计

试验采用 240 mm×115 mm×53 mm 模具进行制坯,混合料在模具中的最佳适配用量为 1.5~2 kg。试验 1 以确定最佳含水量为目的设计配合比,见表 6;试验 2 以确定最佳黄河沉积沙取代率为目的设计配合比,见表 7。试验 1 以建筑渣土为烧结砖的主要原材料,污泥为烧结砖掺料,并固定为混合料质量的 10%,以含水率为变量,取值方法为区间内以固定单位间隔取值。试验 2 将含水率固定为混合料质量的 25%,以黄河沉积沙部分取代建筑渣土,取值方法为区间内以固定单位间隔取值,污泥为烧结砖掺料,并固定为混合料质量的 10%。

表 6 试验 1 配合比 %

试验编号	含水率	建筑渣土	污泥
1	21	69	10
2	23	67	10
3	25	65	10
4	27	63	10
5	29	61	10
6	31	59	10
7	33	57	10
8	35	55	10

表 7 试验 2 配合比 %

试验编号	黄河沉积沙	建筑渣土	污泥	含水率
1	10	55	10	25
2	15	50	10	25
3	20	45	10	25
4	25	40	10	25
5	30	35	10	25
6	35	30	10	25
7	40	25	10	25
8	45	20	10	25

2 烧结砖坯体制备及烧结制度

2.1 烧结砖坯体制备

由于建筑渣土成分复杂、含水率高且块状土体占比大,应先将渣土干燥破碎,后利用 0.3 mm 方孔筛进行筛分,最终得到合格土料。以过筛前后土料质量计算可得该过程土料质量损失率为 8.2%。

将合格土料利用搅拌机按设计配合比搅拌 60 s 后停止,用刮刀刮去搅拌叶及搅拌锅壁上土料,继续搅拌 30 s 后放入陈化桶中覆膜陈化,保鲜膜近桶侧喷淋少量水以保证陈化桶内相对湿度,放置阴暗处陈化并记录塑性指数的波动情况。通过探究样品在陈化环境中 48 h 内的水分迁移进程,确定陈化条件和陈化时间。物料通过陈化库进行时效处理,使原料中的水分扩散,颗粒均化、疏解,进一步湿化和塑化,从而使成型后性能得到大幅提高。

成型压力对烧结砖的成型质量和烧结质量都有明显影响,本文在 0.5~2.5 MPa 之间进行烧结砖砖坯最佳成型压力的测试,测试效果如图 4 所示。随着成型压力的提高,烧结砖砖坯致密化程度提升,砖坯前期的湿强度增加;随着成型压力的进一步提升,逐渐观察到砖坯水分溢出,坯体含水率下降,土粒间的相互作用效果减弱,压力撤销后观察到坯体变形程度较大,并出现裂缝,导致坯体稳定性较差;故本研究采取 1.5 MPa 成型压力制备坯体。

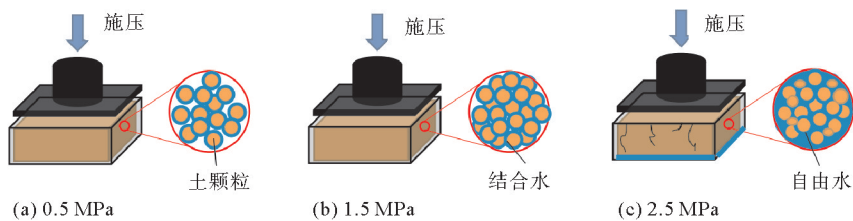


图 4 成型压力对坯体的影响

混合料经过 1.5 MPa 的压力成型为 240 mm×115 mm×53 mm 砖坯。在通风遮荫处静置 3 d 以挥发土壤颗粒之间的部分可蒸发水。砖坯成型后,采用干缩试验测定了含水率为 15%、25% 和 35% 的陈化材料的收缩系数,分别为 2.3%、2.8% 和 3.4%;干燥敏感系数分别为 0.69、0.72 和 1.04。陈化后砖坯已具有一定湿强度,此时可以将砖坯放入烧结设备中进行焙烧。本文采用贝意克 BEQ-ZMF-1700C-18L 型真空气氛箱式炉进行烧结工作。

2.2 烧结制度的确定

为明确烧结砖烧结过程,对混匀后的粉状混合料以 10 °C/min 的升温速率利用 TG-DSC 进行分析,确定烧结制度。

由图 5 可以看出,在 0~100 °C 时,混合料有明显的失重,此时自由水开始蒸发;100~200 °C 时,结合水挥发,坯体质量平稳下降;200~600 °C 时,有机物开始氧化,碳酸盐、硫酸盐和铁的硫化物同步分解氧化,其中 C—O、S—O 稳定的结合状态被部分分解成 $\text{CO}_2 + \text{O}^{2-}$ 、 $\text{SO}_2 + \text{O}^{2-}$,生成的 O^{2-} 与其他阳离子结合产生 CO_2 、 SO_2 和 SO_3 等气体;600~800 °C 时,由于气体挥发,导致混合料质量急剧下降,该阶段进行保温处理,可稳定气体挥发速率以降低气孔率,同时,坯体内矿物、晶格开始解体,液相形成;800 °C 以后,晶格完全解体,活性氧化物形成新矿物。高温烧结机理如图 6 所示。

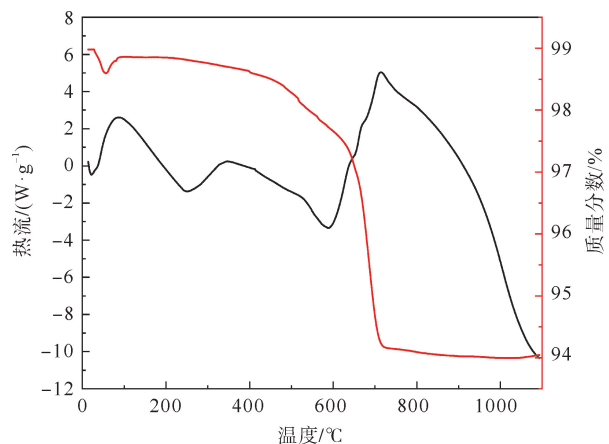


图 5 混合料升温烧结阶段 TG-DSC

— 热流; — 质量分数

依据图 5 的 TG-DSC 分析结果,设置 0~200、200~500、500~600、600~800、800~1050 °C 为烧结砖的 5 个升温梯度,以升温速率 10 °C/min 烧结,在每 2 个梯度间保温 2 h,以保证坯体内足够的反应时间及气体挥发条件。

3 试验结果分析

3.1 含水率对力学性能的影响

在不同含水率下,烧结砖的抗压强度及吸水率的对比情况如图 7 所示。结果表明:含水率为 25% 时坯体水分挥发稳定,经 20 h 陈化后土粒黏性被充分激发,成型后具备一定湿强度,烧结后砖强度达到 24.8 MPa,吸水率为 9.3%,此时力学性能最优。这是由于含水率为 25% 时土料中土粒本体吸水饱和,土粒周围自由水受电场引力作用包覆强结合水水膜,陈化料体现出较强的弹性和黏滞性,高温烧结后气体挥发平稳,使砖体具有较高的强度及较低的吸水率。

当含水率较低时,土粒塑性未完全激发,成型压力需 3~4 MPa 或更高,此时砖体吸水率受早期成型状态影响较大,致密的外硬层导致坯体烧结时气体挥发缓慢,并产生细小裂缝,导致吸水率增大、强度降低。当含水率较高时,围绕土粒表面所建立的水的结构层中层间水累积,湿强度降低,水汽挥发时产生的通道增加砖体气孔率,进而影响砖体强度。

3.2 黄河沉积沙对力学性能的影响

从上述研究可知当砖体含水率为 25% 时砖体力学性能最优。在此条件下,黄河沉积沙取代率对砖体的力学性能及吸水率的影响如图 8 所示,由图 8 可知,黄河沉积沙取代率在 30% 时砖体力学性能最优。30% 的黄河沉积沙取代建筑渣土后坯体内形成完整的骨架结构,烧结砖强度进一步增强,达到 29.3 MPa,吸水率为 9.9%,这可能是由于混合料中盐类及矿物质在高温状态下晶格被破坏重组并伴随液相产生和新物质生成,冷却后液相形成玻璃相,包裹并黏结晶粒使砖体致密化程度提升,从而提高烧结砖强度。当取代率过高时,建筑渣土含量低,高温状态下大量液相产生,但混合料中黏性微粒含量不足,砖体结构稳定性遭到破坏,表现为砖体力学性能下降。

3.3 微观形貌分析

在含水率 25%、黄河沉积沙取代率 30% 的条件下,依据上述烧结工艺制备的烧结砖 SEM 微观形貌如图 9 所示,高温烧结时砖体内盐类等化合物成分晶格破坏重组,氧化物重新结晶,内部出现高温液相冷却后形成的玻璃相,部分玻璃相包裹并黏结晶粒形成固溶相,降低砖体气孔率,进而保证砖体强度并降低吸

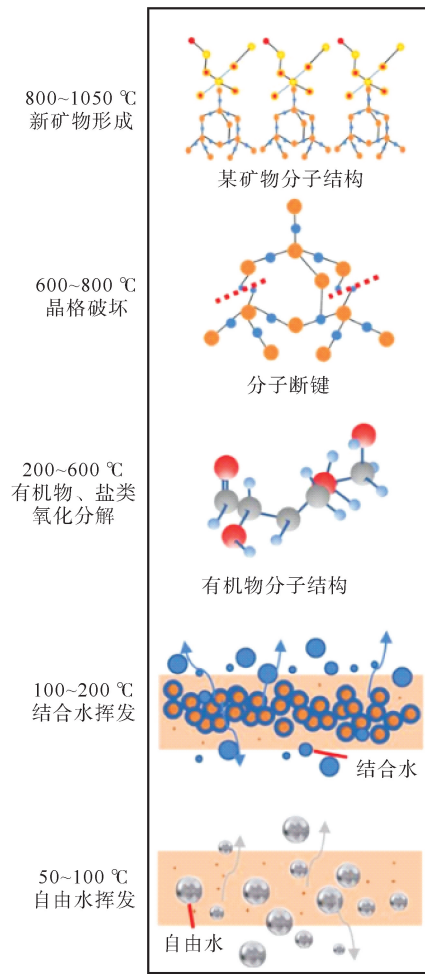


图 6 烧结过程

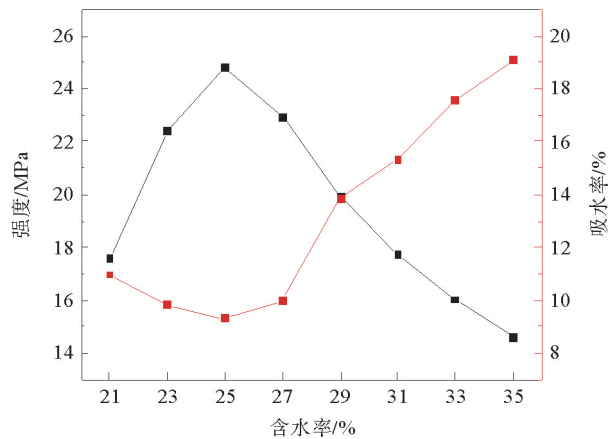


图 7 不同含水率下强度与吸水率关系
—■— 强度; —■— 吸水率

水率。此外,新晶相莫来石作为一种高温蠕变值小、硬度大且膨胀均匀稳定的二元化合物,与其他主晶相构成砖体骨架,有效提升固废烧结砖的结构稳定性及力学性能。

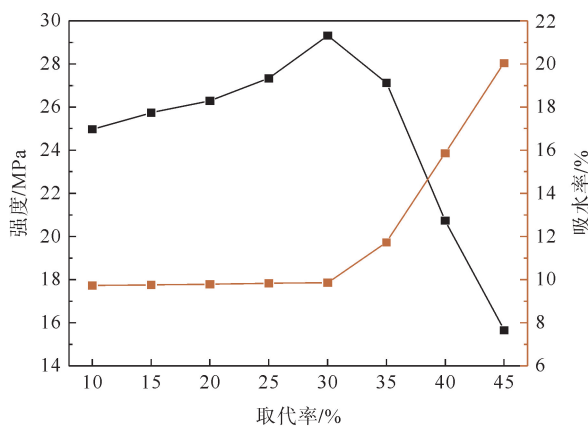
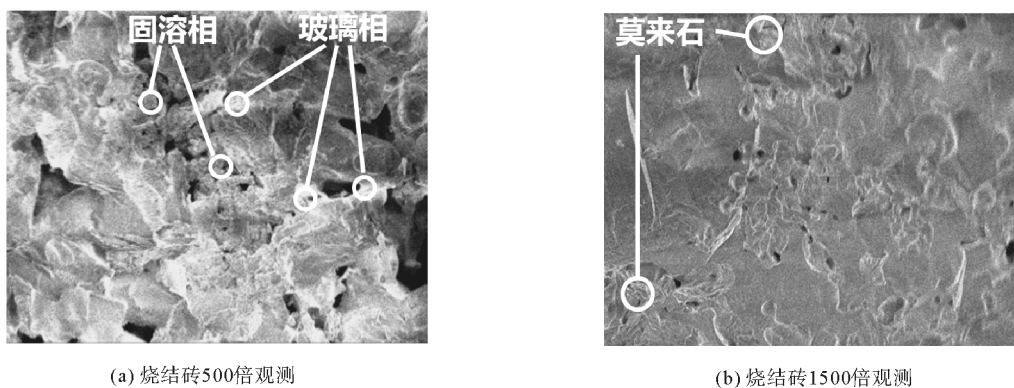


图8 不同取代率下强度与吸水率关系

—■— 强度; —□— 吸水率



(a) 烧结砖500倍观测

(b) 烧结砖1500倍观测

图9 烧结砖 SEM 微观形貌

4 结论

本文以建筑渣土、黄河沉积沙以及污泥为原料制备全固废烧结砖,对全固废烧结砖的制备过程进行了详细研究,确定了坯体的最佳制备方法及烧结制度,并探究了含水率及黄河沉积沙掺量对烧结砖力学性能的影响规律。结果表明:

1) 含水率为25%时坯体水分挥发稳定,经20 h陈化后土颗粒塑性及黏性被激发,当污泥掺量为10%时,30%的黄河沉积沙取代率使坯体内形成完整的骨架结构,坯体强度增加;

2) 黄河沉积沙提供的矿物成分为烧结砖的高温烧结形成稳定的内部环境,通过在每2个梯度间进行2 h保温处理,可为物质的反应及气体挥发提供所需的外部环境,进一步提升烧结质量;

3) 通过SEM微观及力学性能试验得出烧结砖内部存在高温冷却后形成的玻璃相以及由主晶相构成的砖体骨架,砖体具有结构稳定性及力学强度,在含水率为25%、污泥掺量10%、黄河沉积沙取代率为30%的条件下,砖体强度达到29.3 MPa,吸水率为9.9%,符合工程用砖要求。

参考文献(References):

- [1] ALEXIS Laurent, IOANNIS Bakas, JULIE Clavreul, et al. Review of LCA studies of solid waste management systems Part I: Lessons learned and perspectives[J]. Waste Management, 2014, 34: 573-588.

- [2] 张腾飞,荣辉,刘志华,等. 900 密度等级渣土陶粒的制备及性能研究[J]. 新型建筑材料,2017,44(1):109-113.
ZHANG Tengfei,RONG Hui,LIU Zhihua,et al. Research on preparation and properties of muck ceramsite for 900 density level[J]. New Building Materials,2017,44(1):109-113.
- [3] 王晓利,曾正中,王厚成,等. 污泥处理处置及资源化方法探讨[J]. 环境工程,2014,32(3):150-154.
WANG Xiaoli,ZENG Zhengzhong,WANG Houcheng,et al. The disposal technique and comprehensive utilization of sludge[J]. Environmental Engineering,2014,32(3):150-154.
- [4] 戴晓虎,侯立安,章林伟,等. 我国城镇污泥安全处置与资源化研究[J]. 中国工程科学,2022,24(5):145-153.
DAI Xiaohu,HOU Li'an,ZHANG Linwei,et al. Safe disposal and resource recovery of urban sewage sludge in China[J]. Strategic Study of CAE,2022,24(5):145-153.
- [5] 王瑞敏,王林秀. 中国建筑垃圾现状分析及发展前景[J]. 中国城市经济,2011(5):178-179.
WANG Ruimin,WANG Linxiu. Current situation analysis and development prospect of construction waste in China[J]. China Urban Economy,2011(5):178-179.
- [6] 邓晓娟,鄢海丰,梁嘉琪. 利用建筑渣土生产新型烧结墙体材料的可行性研究[J]. 砖瓦世界,2016(4):50-52.
DENG Xiaojuan,YAN Haifeng,LIANG Jiaqi. Feasibility study on the production of new sintered wall materials from construction residue[J]. Brick & Tile World,2016(4):50-52.
- [7] 金益晟. 建筑渣土在市政道路路基工程中的应用[J]. 建材与装饰,2020(3):248-249.
JIN Yisheng. Application of construction residue in municipal road subgrade engineering[J]. Construction Materials & Decoration,2020(3):248-249.
- [8] XIAO Jianzhuang,SHEN Jianyu,BAI Meiyun,et al. Reuse of construction spoil in China;Current status and future opportunities[J]. Journal of Cleaner Production,2021,290:18.
- [9] 罗立群,王召,魏金明,等. 铁尾矿-煤矸石-污泥复合烧结砖的制备与特性[J]. 中国矿业,2018,27(3):127-131.
LUO Liqun,WANG Zhao,WEI Jinming,et al. Preparation and characteristics of composite sintered brick by iron ore tailing, coal gangue and sewage sludge[J]. China Mining Magazine,2018,27(3):127-131.
- [10] 贾鲁涛,崔强,梅浩,等. 湖泊淤泥与生活污泥复合烧结砖的制备、性能及环境安全性[J]. 东南大学学报(自然科学版),2016,46(6):1301-1307.
JIA Lutao,CUI Qiang,MEI Hao,et al. Preparation,properties and environmental safety of fired bricks made from lake silt and sewage sludge[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition),2016,46(6):1301-1307.
- [11] 徐鹏,张竹慧,赵瑞斌,等. 天津某污水处理厂城市污泥资源化制砖技术研究[J]. 新型建筑材料,2023,50(2):123-127.
XU Peng,ZHANG Zhuhui,ZHAO Ruibin,et al. Study on sludge resource brick making technology of a sewage treatment plant in Tianjin[J]. New Building Materials,2023,50(2):123-127.
- [12] 穆兴民,赵广举,高鹏,等. 黄河未来输沙量态势及其适用性对策[J]. 水土保持通报,2020,40(5):328-332.
MU Xingmin,ZHAO Guangju,GAO Peng,et al. Future trend of sediment discharge in Yellow River and its adaptation strategies[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2020,40(5):328-332.
- [13] 王延贵,胡春宏. 流域泥沙灾害与泥沙资源性的研究[J]. 泥沙研究,2006(2):65-71.
WANG Yangui,HU Chunhong. Study on sediment disaster and sediment utilization as resource[J]. Journal of Sediment Research,2006(2):65-71.
- [14] 徐亚,王京京,李淑,等. 黄河流域固废治理现状、问题与对策建议[J]. 环境科学研究,2023,36(2):373-380.
XU Ya,WANG Jingjing,LI Shu,et al. Present situation,problems and countermeasures of solid waste management in the Yellow River Basin[J]. Research of Environmental Sciences,2023,36(2):373-380.
- [15] GB/T 2542—2012,砌墙砖试验方法[S].
GB/T 2542—2012,Test methods for wall bricks[S].

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)