

掺合料改性湖泊淤泥烧结生态驳岸砌块的研究*

张亚梅^{1†},梅浩¹,王月华²,马教顺³,夏春跃⁴

(1.东南大学材料科学与工程学院,江苏南京 210000;

2.泰州职业技术学院,江苏泰州 225300; 3.江苏宝能建材有限公司,江苏常州 213000;

4.金坛市水利勘测设计室,江苏金坛 213200)

摘要:为了将湖泊淤泥烧结砌块作为护岸材料应用于河道护岸工程,砌块应有较高的抗压强度和优异的耐久性,满足水利工程的服役寿命要求.湖泊淤泥塑性指数高,干燥收缩大,烧结制品强度低,需选择合适的掺合料对淤泥进行改性.本文以湖泊淤泥为主要原材料,页岩、煤矸石、煤渣、砖粉、煤粉等作为掺合料,通过陈化、成型、干燥、焙烧等工艺得到6组烧结样砖,分别测试样砖的干燥收缩、体积密度、抗压强度、吸水率和抗冻融等物理力学性能,结合微观形貌分析发现,分别掺入10%页岩和10%砖粉的砖坯的成型性能较好,烧结后的样砖具有较高的抗压强度和优异的耐久性能.掺入2%煤粉的样砖的各项性能均下降,应限制煤粉在淤泥烧结驳岸砌块中的使用.最后,在生产线上进行淤泥烧结驳岸砌块的中试生产,其性能满足相关的技术标准和实际工程需要,并将驳岸砌块应用在生态河道护岸工程.

关键词:湖泊淤泥;掺合料;抗压强度;耐久性;微观形貌

中图分类号:TU522.3

文献标志码:A

Properties Modification of Sintered Lake Sediment with Blender for Production of Ecological River Bank Materials

ZHANG Yamei^{1†}, MEI Hao¹, WANG Yuehua², MA Aoshun³, XIA Chunyue⁴

(1. School of Materials Science and Engineering, Southeast University,

Nanjing 210000, China; 2. Taizhou Polytechnic College, Taizhou 225300, China; 3. Jangsu Baoneng Building Materials

Co Ltd, Changzhou 213000, China; 4. Jintan Survey and Design Institute of Water Conservancy, Jintan 213200, China)

Abstract: In order to be used as ecological river bank protection materials, sintered block should have a high compressive strength and excellent durability to meet the designed service life of hydraulic engineering. Lake sediment is of high plasticity, high drying shrinkage and its final sintered product has low compressive strength. It is therefore necessary to choose appropriate blending material to compensate the shortcomings of lake sediment. In this paper, shale, gangue, coal cinder, brick powder and coal were selected as blender of the lake sediment. Six mixtures were formed, dried and then fired at 925 °C to produce bricks. Properties such as drying shrinkage, loss on ignition, bulk density, compressive strength, water absorption, freeze-thaw resistance were determined. Crystal phases and microstructures of the six samples were studied by XRD and SEM. It is found that the samples containing 10% shale or 10% brick powder

* 收稿日期:2017-05-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51378115), National Natural Science Foundation of China(51378115)

作者简介:张亚梅(1968-),女,江苏如皋人,东南大学教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: ymzhang@seu.edu.cn

present the best physical and mechanical properties and excellent durability, which meet the needs of ecological bank protection materials used in hydraulic engineering. Considering the inferior properties of samples with 2% coal, it is not recommended to use coal as internal fuel to produce sintered block for ecological bank protection materials. Finally, sintered blocks from lake sediment were produced in the manufacturing line in factory and were used in ecological river bank protection engineering.

Key words: lake sediment; admixture; compressive strength; durability; microstructure

近年来,随着我国对湖泊治理力度的加大,每年清淤工程疏浚大量的湖泊淤泥,如何有效地利用淤泥对资源的循环利用和生态环境的保护具有重要的意义.传统的淤泥处置方式包括填埋、焚烧、抛海等,不仅处理成本高,占用土地资源,而且处理不当很容易造成二次污染^[1-2].而淤泥与粘土组成接近,是取代粘土生产烧结砖的优良的原材料.一些国家已经实现淤泥烧结砖、砌块的工业化生产^[3-4],并作为墙体材料应用在建筑工程中.为了扩大淤泥烧结砌块的应用领域,将其应用于河道护岸工程中具有重要的意义^[5].目前,河道护岸材料主要分为两类,一类是传统型^[6],比如浆砌石块,现浇混凝土,它们的特点是坚固、耐久,但是阻隔了水陆系统能量和物质交换,并且目前石材紧缺.另一类是生态型^[7-9],比如木桩护岸、网格石笼,特点是透水性好,但是无法兼顾耐久性、生物亲和性和抗侵蚀性.而利用湖泊淤泥制备驳岸砌块不仅可以解决砌筑石材的紧缺、淤泥处置的问题,而且烧结砌块耐久、美观,抗侵蚀能力强;砌块的多孔结构具有良好的生态功能^[10],透气透水,为鱼虾提供栖息场所.

目前,有关淤泥烧结砌块的研究主要集中在作为墙体保温材料.湖泊淤泥颗粒较细并含有一定量有机质,烧结砖、砌块具有较好的隔热保温效果,能满足建筑材料轻质、高强,节能、环保的要求. Chiang等^[11]研究在不同焙烧温度下以淤泥和粘土为原料制备烧结砖,当焙烧温度在 1 050~1 150 °C,粘土掺量为 0~20%,烧结样砖的性能均满足相关要求.徐杨等^[12-13]研究河道淤泥作为原料制备烧结砖的隔热保温性能,结果表明,相对于粘土砖,掺入 50% 淤泥的烧结砖的导热系数至少下降 40%. Veiseh等^[14]将聚苯乙烯作为成孔剂掺入到样砖中,研究聚苯乙烯的掺量对烧结样砖性能的影响,结果表明,随着聚苯乙烯掺量的增加,样砖的抗压强度和体积密度均下降,当其掺量为 1.5% 时,样砖的导热系数仅为 0.24 W/m·K. 张亚梅等^[15-16]以湖泊淤泥、污泥和煤渣为原料制备烧结砖,结果表明污泥的加入

有效改善了样砖的隔热性能,煤渣作为瘠性料可提高样砖的抗压强度;经过固化处理的淤泥的重金属浸出试验表明,所测重金属浸出浓度低于《危险固废鉴别标准浸出毒性鉴别》限值的 5 个数量级作用^[17]. Li 等^[18-19]对淤泥烧结砖进行环境危害性评估,包括烧结过程的有毒气体排放和烧结砖重金属浸出实验,结果显示,烧结过程排放的烟气中的二噁英等气体的含量远低于德国关于有毒气体排放的标准,重金属浸出实验中也未检测到 As 等重金属的析出,这些重金属被固化在烧结砖的内部,均符合德国环境保护相关的要求.

目前,国内外还没有将淤泥烧结砌块应用于生态护岸的相关研究.作为护岸材料,需要优异的耐久性,较高的抗压强度,而湖泊淤泥塑性指数高,干燥收缩大,烧结制品强度低^[20],不符合驳岸砌块的要求,因此需要合适的掺合料对淤泥进行改性.用来改善烧结制品性能的掺合料包括瘠性料和内燃料等.本文以湖泊淤泥为主要原材料,结合当地可利用资源,选择页岩、煤矸石、煤渣、砖粉、煤粉作为掺合料,通过陈化、成型、干燥、焙烧等工艺得到烧结样砖,分别测试了样砖的干燥收缩、烧失量、体积密度、抗压强度、吸水率、抗冻融性能等物理力学参数,并利用 XRD 和 SEM 研究样砖的矿物组成和微观形貌,综合考虑成型性能、抗压强度和耐久性等性能,优选合适的掺合料.

1 原材料和试验方法

1.1 原材料

实验室制备淤泥烧结样砖的主要原料为湖泊淤泥,选择页岩、煤矸石、煤渣、砖粉、煤粉作为掺合料.其中,湖泊淤泥取自江苏省长荡湖,由于含有贝壳等杂质,湖泊淤泥需要进行除杂处理,工艺流程包括,稀释、除杂、沉淀、脱水、入库;页岩来自于当地的矿山废弃物,煤矸石和煤渣取自当地热电厂,砖粉是破碎烧结砌块废品而得到,来源均较为广泛.对本试验

所用原料均经过烘干、破碎、过筛(2 mm)后备用。

根据 GB/T50123—2007《土工试验方法标准》，烧结砖原料合适的塑性指数为 7~15。采用液、塑限联合测定法测得湖泊淤泥的塑性指数为 15.8，超过标准要求。较大的塑性指数会导致较大的干燥收缩，坯体在干燥过程中容易产生开裂、变形等问题，因此，需要选择合适的掺合料来降低混合料的塑性，减少砖坯的干燥收缩。

1.1.1 矿物组成

根据之前有关湖泊淤泥烧结砖的研究，湖泊淤泥由石英、钠长石、白云母等矿物组成^[15]。石英是主要的矿物相，在焙烧过程中会发生晶型转变，并伴随着轻微的体积变化；钠长石是常见的矿物相，在焙烧过程中能降低玻璃化温度，起到助熔的作用；白云母可以形成纹理结构，降低坯体的干燥敏感性，在焙烧阶段可作为助熔剂使用。

1.1.2 氧化物组成

采用 X 射线荧光光谱仪(XRF)对原材料的化学组成进行测试，表 1 是 6 种原材料的氧化物组成。可以看出，淤泥的主要氧化物为 SiO_2 ，含量为 69.8%，此外， Al_2O_3 和 Fe_2O_3 的含量也较多，其氧化物组成符合烧结制品关于化学组成的基本要求。页岩、煤矸石、煤渣、砖粉主要氧化物均为 SiO_2 ，其中页岩、煤矸石、煤渣的 SiO_2 含量较淤泥低， Al_2O_3 含量较高。此外，煤矸石和煤渣的 CaO 含量偏高，应控制煤矸石和煤渣的掺量，否则烧结砖很容易产生石灰爆裂^[21]。

表 1 原材料氧化物组成
Tab.1 Chemical components of raw materials %

样品	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O
淤泥	69.80	14.78	4.78	1.96	1.07	0.61	2.18
页岩	64.09	21.33	5.97	1.38	1.78	0	3.85
煤矸石	57.96	20.41	4.86	9.30	0.75	0.7	2.07
煤渣	59.51	22.64	5.56	3.43	0.87	0	2.06
砖粉	69.39	18.11	5.78	1.79	1.34	0.5	3.21

1.2 试验方法

试验配合比见表 2，其中 D 代表淤泥，S 代表页岩，G 代表煤矸石，C 代表煤渣，B 代表砖粉，M 代表煤粉。将原材料按照一定的比例混合均匀、加水、搅拌、陈化三天后使用。为了研究内燃料对淤泥烧结砖性能的影响，在页岩组掺入了 2% 的煤粉作为内燃料。采用小型真空挤压机对陈化后的混合料进行塑性挤出成型，成型压力、真空度、成型含水率分别控制在 1.5 MPa、-0.075 MPa 和 18%。最后，用钢丝将泥条切成长、宽、高为 100 mm×28 mm×17 mm 的砖坯。将成型后的湿坯先在室温下放置 24 h，然后送入鼓风干燥箱中干燥，升温速度控制在 10 °C/h 左右，并在最高温度 105 °C 恒温 4 h，保证湿坯充分干燥。干燥后的干坯放入马弗炉中焙烧，控制升温速度小于 100 °C/h，在烧结温度 925 °C 下保温 2 h，然后随炉冷却。

表 2 试验配合比
Tab.2 Mix designs for laboratory brick production %

配比	淤泥	页岩	煤矸石	煤渣	砖粉	煤粉
D	100					
D+0.1S	90	10				
D+0.1G	90		10			
D+0.1C	90			10		
D+0.1B	90				10	
D+0.1S+0.02M	88	10				2

2 结果和讨论

2.1 样砖的宏观物理性能

焙烧得到的 6 组淤泥烧结样砖如图 1 所示。纯淤泥样砖和掺入 10% 页岩的样砖有最好的外观质量，但是纯淤泥样砖有一定的变形；掺入 10% 煤渣、10% 砖粉、2% 煤粉的样砖外观质量其次；掺入 10% 煤矸石的样砖外观质量较差，表面有一些白色颗粒，这是因为煤矸石在焙烧过程中产生了较多的 CaO，易产生石灰爆裂。表 3 为 6 组样砖的物理力学性能。

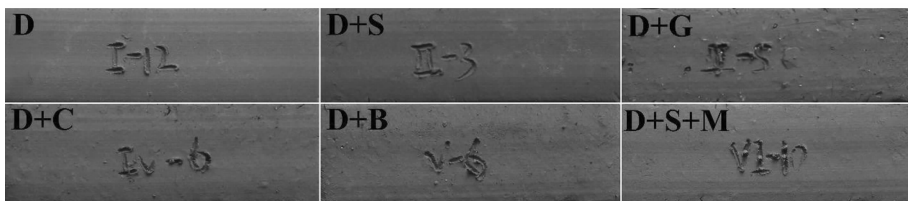


图 1 焙烧后的 6 组烧结样砖
Fig.1 Appearance of the final bricks

表3 6组样砖的物理力学性能
Tab.3 Physical and mechanical properties of adobe and sintered bricks

样砖	干燥线性收缩/%	烧失量/%	体积密度/ (g·cm ⁻³)	抗压强度/ /MPa	吸水率/ /%
D	6.15	4.82	1.718	26.9	15.63
D+0.1S	5.51	4.74	1.732	32.8	15.68
D+0.1G	5.55	8.40	1.632	23.9	17.89
D+0.1C	5.48	4.92	1.712	25.0	16.35
D+0.1B	5.17	4.02	1.752	32.3	15.72
D+0.1S+0.02M	5.49	5.48	1.713	29.6	16.88

2.1.1 线性干燥收缩

在干燥过程中,伴随着湿坯内部水分的排出,砖坯产生一定量的干燥收缩^[22].不同掺合料的6组砖坯的干燥线性收缩见表3.纯淤泥砖坯的干燥收缩最大,达到6.15%,主要是因为淤泥的颗粒较细、塑性指数较高.掺入10%页岩的砖坯线性干燥收缩降低为5.51%,页岩的掺入降低了混合料的塑性,同时作为骨架减少干燥过程的收缩.煤矸石和煤渣对降低干燥收缩也有一定的作用,样砖的干燥线性收缩分别为5.55%和5.48%.掺入10%砖粉的样砖的干燥线性收缩为5.17%,这主要是因为砖粉没有粘结能力,瘠性效果好,起到骨架的作用.掺入2%煤粉作为内燃料对砖坯的干燥收缩影响作用有限.因此,从减小砖坯的干燥收缩角度,页岩、煤矸石、煤渣、砖粉均为合适的掺合料.

2.1.2 烧失量和体积密度

在焙烧过程中,由于高温作用下砖坯内部发生一系列物理化学反应^[23],不同掺合料的砖坯均有一定量的质量损失,结果见表3.纯淤泥烧结砖的烧失量为4.82%,这是因为淤泥中存在一定量的有机质.由于页岩的烧失量较小,掺入10%页岩烧结砖的烧失量仅为4.74%.分别掺入10%煤矸石和10%煤渣的烧结砖的烧失量较大,分别为8.40%、4.92%,主要原因是这两种掺合料均含有一定量的煤.因为在烧结过程中砖粉没有烧失量,掺入10%砖粉的烧结砖的烧失量为4.02%.2%煤粉的掺入导致烧结砖的烧失量增大.从烧失量角度,掺入煤矸石、煤渣、煤粉的烧结砖具有较大烧失量,烧成后留下较多的空隙,导致样砖的抗压强度较低,抗冻融性较差.

由表3可以看出,纯淤泥烧结砖的体积密度较大,为1.718 g/cm³;掺入10%页岩烧结砖的体积密度为1.732 g/cm³,相比纯淤泥烧结砖有一定增加;掺入10%煤矸石和10%煤渣的烧结砖的体积密度较小,分别为1.632 g/cm³、1.712 g/cm³;掺入10%砖粉的烧结砖的体积密度最大,为1.752 g/cm³.此

外,煤粉的掺入导致烧结砖的体积密度减小.体积密度和烧失量之间有良好的对应关系,即烧失量越大,体积密度越小.

2.1.3 抗压强度

抗压强度对烧结砖质量的好坏影响较大.从表3可以看出,纯淤泥烧结样砖的抗压为26.9 MPa,这与纯淤泥没有较大的颗粒作为骨架有关.分别掺入10%页岩、10%砖粉的样砖抗压强度分别为32.8 MPa、32.3 MPa,相比纯淤泥组有较大提高.考虑到驳岸砌块的强度要求,页岩和砖粉是较为合适的掺合料.添加2%煤粉的烧结砖的抗压强度有所降低.掺入煤矸石和煤渣的抗压强度与纯淤泥组相差不大,分别为23.9 MPa和25 MPa,主要是因为煤矸石和煤渣虽然作为瘠性料,但是烧失量较大,不利于强度的提高.因此,煤矸石和煤渣不是湖泊淤泥烧结驳岸砖合适的掺合料.

2.1.4 吸水率

吸水率是决定烧结砖耐久性的重要指标,高的吸水率导致更多的水分进入砖内部,可能会加速材料的破坏.6组烧结样砖的吸水率见表3所示.相对于纯淤泥组,掺入页岩和砖粉的样砖的吸水率稍有增加,分别为15.68%、15.72%,主要因为页岩和砖粉在烧结后残留部分未反应的颗粒,相比于玻璃相有稍疏松的结构,但满足国家标准GB/T 13545—2014《烧结空心砖和空心砌块》中吸水率小于16%的要求.掺入煤矸石、煤渣或煤粉的样砖的烧失量较大,有较多的孔隙,吸水率也较大.

2.1.5 抗冻性

烧结砌块抵抗冻融破坏的能力是表征其耐久性的重要指标^[24-25].参照GB/T 13545—2014《烧结空心砖和空心砌块》对烧结样砖进行冻融试验.图2是冻融循环实验中6组样砖的质量损失情况.在相同冻融循环次数下,纯淤泥烧结小样的质量损失率最小,在经历50次、75次、100次、125次冻融循环后的质量损失分别为0.13%、0.18%、0.29%、0.33%.掺入10%页岩、10%砖粉的烧结样砖的质量损失率和纯淤泥烧结小样相差不大,均具有较好的抗冻融性能.从图中看出,6组烧结样砖在经历125次冻融循环后质量损失均很小,最大仅为0.63%.

图3是经历125次冻融循环后的6组样砖.部分纯淤泥烧结样砖出现了少量裂纹,这主要是由于没有掺入瘠性料,样砖的强度较低.掺入10%煤矸石的样砖由于有较大的孔隙,导致样砖表面缺陷较多且质量损失较大.掺入10%煤渣样砖的棱角存在破损.分别掺入10%页岩、10%砖粉的样砖的表面

质量良好,具有优良的抗冻融性能.

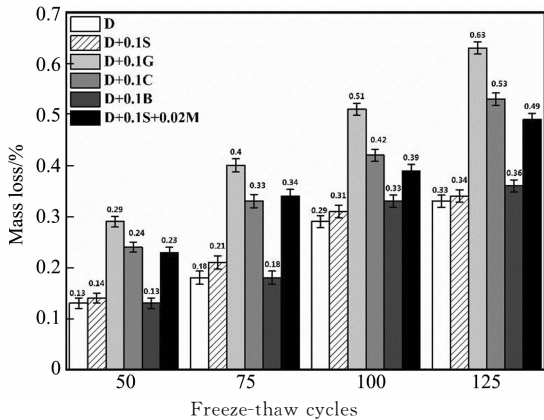


图2 冻融循环实验中6组样砖的质量损失
Fig.2 Freeze-thaw resistance of fired brick samples

2.2 矿物组成和微观形貌分析

图4是分别掺入10%页岩和10%砖粉的烧结样砖的矿物组成.可以看出,两组烧结砖的矿物组成基本一致,主要由石英,赤铁矿,钠长石等组成.其中,石英为样砖的主要矿物相;烧结样砖中出现氧化铁,这主要是氢氧化铁分解产生.氧化铁决定样砖的颜色,随着氧化铁含量的增加,烧结样砖的颜色变红.钠长石在烧结过程中起到助熔作用,在高温下不分解^[26].与淤泥的矿物相相比,烧结样砖中白云母相消失,这主要是高温下白云母发生分解.

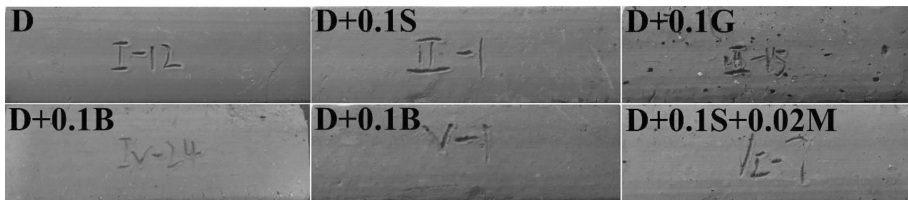


图3 冻融循环实验后6组样砖的外观质量
Fig.3 Appearance of fired brick samples after 125 cycles

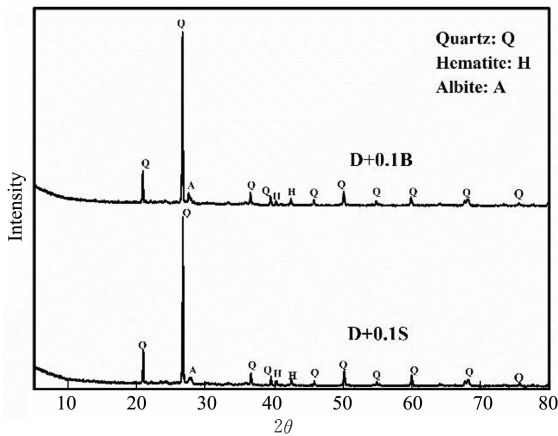


图4 分别掺入10%页岩、10%砖粉的淤泥烧结样砖的XRD衍射图
Fig.4 XRD patterns of the final brick samples

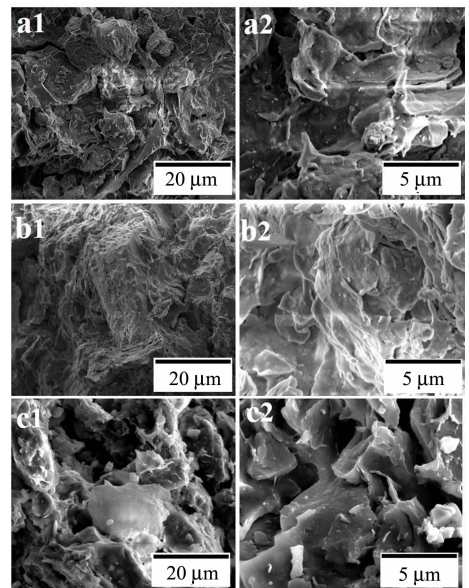


图5 烧结样砖的SEM图:纯淤泥烧结样砖—5000(a1), —20000(a2);掺入10%页岩的烧结样砖—5000(b1), —20000(b2);掺入10%煤矸石的烧结样砖—5000(c1), —20000(c2)
Fig.5 SEM micrographs of fired bricks: (a): 100% lake sediment (D); (b): 90% lake sediment + 10% shale (D+0.1S); (c): 90% lake sediment + 10% gangue (D+0.1G)

图5分别是纯淤泥、掺入10%页岩和10%煤矸石的烧结样砖的SEM图像.在图6(a)中,由于湖泊淤泥颗粒较细,在焙烧过程中形成较多的玻璃相,样砖有较为密实的结构,其吸水率较低.在掺入10%页岩的样砖中,页岩颗粒作为骨架,熔融的玻璃相包裹页岩颗粒,样砖有较高的抗压强度和优异的抗冻融性能.由于煤矸石有较高的发热量,添加10%的煤矸石的样砖有较多的玻璃相,煤矸石燃烧后形成较为疏松的结构,如图6(c)所示,导致样砖的抗压强度较低,吸水率较高,抗冻融性能较差.

2.3 湖泊淤泥烧结驳岸砌块

根据以上原材料优选的结果,在生产线上以湖泊淤泥和页岩进行驳岸砌块的中试生产,研究生产

的产品是否满足驳岸砌块的技术标准. 将料场堆放的湖泊淤泥和页岩破碎、过 3 mm 筛备用, 这是因为实际生产中的挤压机有更高的成型压力和真空度, 原料颗粒可适当粗化, 节约成本; 根据实验室和生产线关于页岩掺量的优化实验, 在淤泥中掺入 20% 的页岩最为合适; 混合料经加水拌和、陈化、成型、干燥、预热、焙烧等工艺步骤制备淤泥烧结驳岸砌块, 如图 6 所示, 中试生产的成型含水量和成型压力分别控制在 17% 和 2 MPa, 真空度大于 92%.

由于烧结砌块应用于涉水环境, 对其耐久性和强度有较高的要求. 根据“太湖流域水环境治理—金坛市河道疏浚工程”关于驳岸砌块的性能指标说明

和 GB/T 13545—2014《烧结空心砖和空心砌块》, 要求驳岸砌块的横向强度 ≥ 5.0 MPa、纵向抗压强度 ≥ 7.0 MPa; 吸水率 $\leq 16\%$; 50 次冻融循环后的质量损失 $\leq 2.0\%$. 生产线上制备的淤泥烧结驳岸砌块如图 7(a)所示. 驳岸砌块的尺寸为 290 mm \times 190 mm \times 190 mm, 孔洞率为 60%, 其外观质量较好, 表面平整无裂纹; 横向、纵向的平均抗压强度分别为 5.7 MPa 和 8.3 MPa; 吸水率为 12.7%; 砌块经历 125 次冻融循环后的质量损失为 1.72%, 并保持较好的外观. 因此, 烧结砌块性能满足水利工程和国家标准的相关要求.

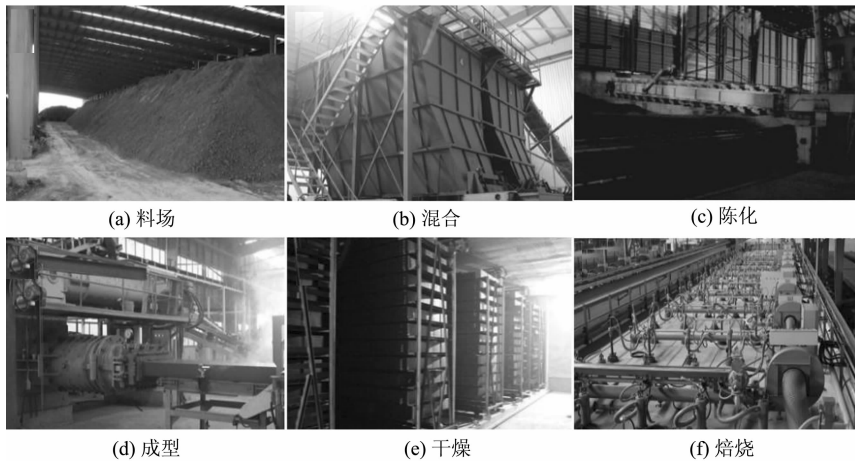


图 6 生产线上制备淤泥烧结驳岸砌块

Fig. 6 Sintered ecological revetment block produced from lake sediment

目前, 淤泥烧结驳岸砌块已在金坛地区的生态河道护岸工程中得到应用, 如图 7(b)所示. 与传统河道护岸相比, 淤泥驳岸砌块护岸取得了良好的经济和社会效益, 实现了对河流的综合治理, 满足城市

兼顾防洪、生态等功能, 并且淤泥烧结砌块为柔和的砖红色, 改变传统护岸单一的灰色调, 形成了优美的风景线.

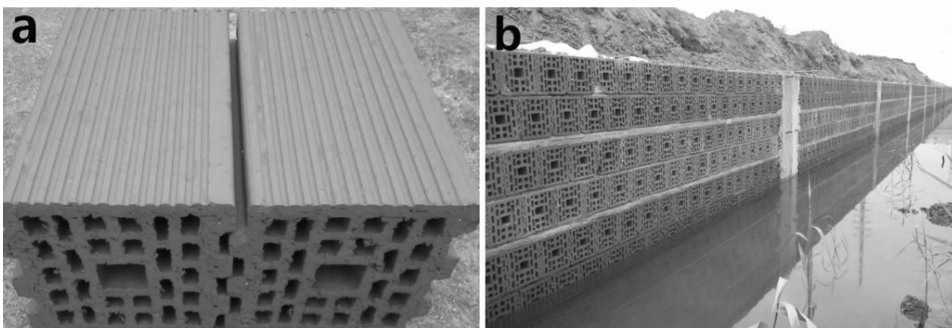


图 7 工业生产的淤泥烧结驳岸砌块(a), 淤泥驳岸砌块应用于生态河道护岸工程(b)

Fig. 7 Sintered blocks from the manufacturing line (a), application of sintered blocks in river bank

3 结 论

在实验室条件下,研究了以湖泊淤泥为主要原材料,以页岩、煤矸石、煤渣、砖粉、煤粉作为掺合料烧结生态驳岸砖的可行性。对比不同组样砖的抗压强度、吸水率等性能,发现分别掺入10%页岩和10%砖粉的样砖的抗压强度分别为32.8 MPa、32.3 MPa,吸水率分别为15.68%和15.72%,经历125次冻融循环的样砖的质量损失均小于2%,满足相应的国家标准和制备要求。考虑到页岩来源方便,价格便宜,优先选择页岩作为掺合料,砖粉可部分替代页岩。掺入2%煤粉的样砖的各项性能均下降,应限制内燃料在淤泥烧结驳岸砌块的掺入。

在生产线上进行了以淤泥为主材、页岩为掺合料的烧结驳岸砌块的中试生产,其性能满足相关的技术标准和实际工程需要;将驳岸砌块应用在生态河道护岸工程中具有良好的生态、社会和经济效益。

参考文献

[1] 姬凤玲,朱伟,张春雷. 疏浚淤泥的土工材料化处理技术的试验与探讨[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1999—2002.
JI F L, ZHU W, ZHANG C L. Study of treatment technology of dredging sludge with geosynthesizing method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(12): 1999—2002. (In Chinese)

[2] 姬凤玲,吕擎峰,马殿光. 沿海地区废弃疏浚淤泥的资源化利用技术[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(15): 4593—4595.
JI F L, LV Q F, MA D G. Study on the utilization techniques of dredged mud as resource in coastal areas[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007, 35(15): 4593—4595. (In Chinese)

[3] HAMER K, KARIUS V. Brick production with dredged harbour sediments: An industrial-scale experiment[J]. Waste Management, 2002, 22(5): 521—530.

[4] SAMARA M, LAFHAJ Z, CHAPISEAU C. Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks: factory scale experiment[J]. Journal of Hazard Materials, 2009, 163(2/3): 701—710.

[5] 王雪,田涛,杨建英. 城市河道生态治理综述[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(5): 106—111.
WANG X, TIAN T, YANG J Y. Summary on ecological treatment of urban river[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(5): 106—111. (In Chinese)

[6] 杨海兵,李新龙. 现浇城镇河道护岸生态混凝土现状及发展趋势[J]. 山西建筑, 2013, 39(11): 48—50.
YANG H B, LI X L. The numerical analysis on soil additional stress of high-rise residential under earthquake displacement[J]. Shanxi Architecture, 2013, 39(11): 48—50. (In Chinese)

[7] 兰立伟. 生态河道护岸材料探讨[J]. 浙江水利科技, 2015(4): 43—45.
LAN L W. Study on the ecological bank materials[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2015(4): 43—45. (In Chinese)

[8] 黄岳文,汪荣勋. 荣勋砌块及其在生态护岸上的应用[J]. 人民长江, 2008, 39(13): 67—69.
HUANG Y W, WANG R X. The application of Rongxun block in ecological bank engineering[J]. Yangtze River, 2008, 39(13): 67—69. (In Chinese)

[9] 厉志闯,陈文亮,梁荣祥. 生态砌块挡墙抗侧向力性能试验研究[J]. 浙江水利科技, 2012(5): 66—67.
LI Z C, CHEN W L, LIANG R X. Experimental study on lateral force resistance of retaining wall composed of ecological building blocks[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2012(5): 66—67. (In Chinese)

[10] 陈玉芳,薛志良,刘亦锋. 基于孔隙理论运用多孔隙单元块体护岸在金堤河河道堤岸中的应用[J]. 中国水运月刊, 2012, 12(5): 116—117.
CHEN Y F, XUE Z L, LIU Y F. The application of multi pore unit block bank in jindihe river based on the pore theory[J]. China Water Transport, 2012, 12(5): 116—117. (In Chinese)

[11] CHIANG K, CHOU P. Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks[J]. Journal of Hazard Materials, 2009, 171(S1—3): 76—82.

[12] XU Y, YAN C, XU B. The use of urban river sediments as a primary raw material in the production of highly insulating brick[J]. Ceramics International, 2014, 40(6): 8833—8840.

[13] 徐杨,阎长虹,许宝田,等. 城市河道淤泥资源化利用的烧结制砖试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(S1): 125—130.
XU Y, YAN C H, XU B T, et al. Resource utilization of the dredged material of urban river to manufacture sintered brick[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(S1): 125—130. (In Chinese)

[14] VEISEH S, YOUSEFI A A. The use of polystyrene in lightweight brick production[J]. Iranian Polymer Journal, 2003, 12(4): 323—329.

[15] ZHANG Y M, JIA L T, MEI H, et al. Fabrication, microstructure and properties of bricks fired from lake sediment, cinder and sewage sludge[J]. Construction and Building Materials, 2016, 121: 154—160.

[16] 贾鲁涛,崔强,梅浩,等. 湖泊淤泥与生活污泥复合烧制砖的制备、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 L T, CUI Q, MEI H, et al. Preparation, properties and environmental safety of fired bricks made from lake silt and sewage sludge[J]. Journal of Southeast University(Natural Science), 2016, 46(6): 1301—1307. (In Chinese)

[17] 张亚梅,贾鲁涛,崔强. 固化湖泊淤泥烧制砖的性能与微结构[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(12): 56—61.
ZHANG Y M, JIA L T, CUI Q. Performance and micro-structure of fired bricks made of solidified lake silt[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2016, 43(12): 56—61. (In Chinese)

[18] LI R Y, YANG H, ZHOU Z G, et al. Fractionation of heavy metals in sediments from Dianchi Lake, China[J]. Pedosphere, 2007, 17(2): 265—272.

[19] NIU H, DENG W, WU Q, et al. Potential toxic risk of heavy metals from sediment of the Pearl River in South China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(8): 1053—1058.

[20] MEZENECVOVA A, YEOH A N N, BURNS S E, et al. Utilization of Savannah Harbor river sediment as the primary raw material in production of fired brick[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 113: 128—136.

[21] JAIN L C. Docking and prevention of lime blowing in bricks[J]. Transactions of the Indian Ceramic Society, 2014, 32(3): 9N—10N.

[22] ROMUALDAS M, JURGITA M, ASTA K. The regulation of physical and mechanical parameters of ceramic bricks depending on the drying regime[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 14(4): 263—268.

[23] CULTRONE G, SEBASTIÁN E, TORRE M J. Mineralogical and physical behaviour of solid bricks with additives[J]. Construction and Building Materials, 2005, 19(1): 39—48.

[24] MALLIDI S R. Application of mercury intrusion porosimetry on clay bricks to assess freeze-thaw durability—a bibliography with abstracts[J]. Construction and Building Materials, 1996, 10: 461—465.

[25] 肖东辉,马巍,赵淑萍. 冻融与静荷载双重作用下土体内部孔隙水压力、水分场变化规律研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 46(6): 1301—1307.
XIAO D H, MA W, ZHAO S P. Research on changing laws of pore water pressure and moisture field in soil subjected to the combination of freeze-thaw and static load actions[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2017, 46(6): 1301—1307. (In Chinese)

[26] CULTRONE G, SIDRABA I, SEBASTIÁN E. Mineralogical and physical characterization of the bricks used in the construction of the “Triangul Bastion”, Riga (Latvia)[J]. Applied Clay Science, 2005, 28: 297—308.