

文章编号:1674-2974(2016)12-0056-06

固化湖泊淤泥烧结砖的性能与微结构*

张亚梅^{1†}, 贾鲁涛^{1,3}, 崔强², 梅浩¹, 张培根¹, 孙正明¹

(1. 东南大学材料科学与工程学院 江苏省土木工程材料重点实验室, 江苏南京 211189;
2. 无锡国联环保能源集团有限公司, 江苏无锡 214131; 3. 华电电力科学研究院, 浙江杭州 310030)

摘要:以固化湖泊淤泥为主要原材料,采用真空挤压塑性成型技术制备并经烧结得到小样砖.对原材料进行理化性能分析发现,少量固化剂的加入并未明显改变淤泥的塑性指数、氧化物组成、矿物组成等,但对成型性能有一定的影响.测试并比较了湖泊淤泥、固化湖泊淤泥实验室小样砖坯体的干燥线性收缩、烧结后小样砖的体积密度、吸水率、强度、导热系数、抗冻性等.研究发现,当固化淤泥掺量为90%,煤渣掺量为10%时,可制备出坯体干燥线性收缩为5.42%,成品吸水率为18.2%,强度为15.8 MPa的小样砖,其综合性能较未经固化处理的湖泊淤泥烧结小样砖略差.采用SEM和MIP等测试手段对其微结构进行研究,结果表明,固化淤泥烧结小样砖与相同煤渣掺量的湖泊淤泥烧结小样砖相比,其微观结构更为疏松,未被玻璃相包裹的颗粒及未被填充的孔隙更多,孔隙率较大是导致其强度较低、吸水率较高的主要原因,但同时,其导热系数略低.2种烧结小样砖均具有好的抗冻性.

关键词:湖泊淤泥;固化淤泥;烧结砖;微结构;强度

中图分类号:TU522.19

文献标识码:A

Performance and Micro-structure of Fired Bricks Made of Solidified Lake Silt

ZHANG Ya-mei^{1†}, JIA Lu-tao^{1,3}, CUI Qiang², MEI Hao¹, ZHANG Pei-gen¹, SUN Zheng-ming¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Construction Materials, School of Materials Science and Engineering, Southeast Univ, Nanjing, Jiangsu 211189, China; 2. Wuxi Guolian Environment & Energy Group Co, Ltd, Wuxi, Jiangsu 214131, China; 3. Huadian Electric Power Research Institute, Hangzhou, Zhejiang 310030, China)

Abstract: Lake silt and solidified lake silt were used as the main raw materials to prepare fired brick samples employing the vacuum plastic extrusion in a laboratory scale study. Raw material properties tests showed that the addition of a small amount of solidified agent had limited influence on the plasticity index, oxide composition and mineral composition, but had some influence on the formability. Linear drying shrinkage, water absorption, bulk density, compressive strength, thermal conductivity and freeze-thaw resistance of two kinds of brick samples were tested. The test results showed that linear drying shrinkage of solidified silt brick samples with 90% solidified silt and 10% cinder was 5.42%, water absorption was 18.2% and compressive strength was 15.8 MPa. The overall performance of the fired brick samples made of solidified silt was slightly worse than that of the fired brick samples made of lake silt. In addition, SEM and MIP were used to examine the microstructural properties of brick samples, and the results demonstrated that the micro-structure of bricks made of solidified lake silt was more loose, and the porosity was higher than

* 收稿日期:2016-01-08

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

those of the bricks made of lake silt at the same dosage of cinder, which play an important role in the performance of the brick samples such as compressive strength and water absorption. Meanwhile, the thermal conductivity of the former was slightly lower, and freeze-thaw resistances of the both bricks were almost similar.

Key words: lake silt; solidified lake silt; fired brick; microstructure; strength

我国每年都会对河流、湖泊、港口等进行疏浚清淤,从而产生大量的疏浚淤泥^[1].疏浚淤泥一般表现出含水率高、压缩性大、孔隙比大等特点^[2],是制约其在工程上应用的主要因素^[3].目前疏浚淤泥主要用于农田^[4]及园林绿化^[5],固化后用作填方材料^[6-7],生产建筑材料^[8-10]等.淤泥固化用作填方材料是大量消耗疏浚底泥的方式之一,主要的固化方式有物理脱水固结^[11]、高温烧结固化^[12]和固化剂固化^[13].经固化处理后的淤泥含水率降低,压缩性降低,力学性能得到改善^[14],一般可用于堤防加固工程、市政工程、道路工程等.但由于淤泥量大,部分淤泥经固化处理后未能得到合理利用,造成环境二次污染.地方政府和环境保护部门迫切希望为经固化处理后未能得到及时利用的淤泥寻找其他的利用途径.国内外已经进行了大量的利用疏浚淤泥制备烧结砖的研究^[15-16].淤泥制砖不仅可以解决传统烧结砖用黏土质材料资源紧缺的问题,而且烧结过程中淤泥中的重金属可以得到有效固化^[17],进而解决因对淤泥处置不当可能造成的二次污染等问题.因此,利用淤泥制砖,环境、社会综合效益显著.

淤泥制砖主要有 2 种工艺方式,一种是模具压制成型^[15,18],另一种是塑性挤压成型^[9,19].由于后者更能适应工业化大规模生产,已得到广泛应用,并可根据不同需求制备出墙体承重砖、保温砖、路面砖等.但是,由于淤泥一般都具有颗粒细微、塑性指数较高的特点,塑性挤出成型需要较高的成型水分,因此,坯体干燥收缩较大,极易产生裂纹^[19].目前主要是通过添加粉煤灰、煤渣等瘠性料来降低干燥收缩率^[18].固化后的淤泥一般具有较小的收缩,但是,以固化淤泥为主要原材料生产烧结砖的研究在国内外基本空缺,固化剂的加入对烧结砖性能影响的研究尚未见报道.为此,本文进行了以固化湖泊淤泥(以下简称固化淤泥)为主要原材料制砖的研究,并与未固化湖泊淤泥(以下简称湖泊淤泥)烧结小样砖性能进行比较,同时对烧结砖的微观形貌、孔隙率、孔径分布等进行研究,探讨 2 种烧结砖性能差异的原因.

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

实验室制备烧结小样砖所用主要原材料为固化

淤泥和湖泊淤泥,并采用煤渣作为瘠性料.本研究用固化淤泥为无机固化剂固化后的湖泊淤泥,但具体固化方法不详,因此,主要通过其塑性指数、氧化物组成等与未固化湖泊淤泥进行比较.

1.1.1 塑性指数

塑性指数参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)中液、塑限联合测定法测试,湖泊淤泥和固化淤泥的塑性指数分别为 14.2 和 14.0.固化剂的加入使得淤泥的塑性指数略有降低,但满足生产烧结砖对原材料塑性指数的要求.

1.1.2 氧化物组成

采用 X 射线荧光光谱仪(XRF)测试干燥原材料的化学组成,得到淤泥、固化淤泥的氧化物组成见表 1.可以看出,淤泥主要氧化物组成为 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 等,其种类和含量都与黏土相似,满足生产烧结砖对原材料化学组成的要求.固化淤泥的氧化物组成和湖泊淤泥接近,说明固化时掺加的固化剂含量很小,对淤泥氧化物的组成影响很小.

表 1 原材料的氧化物组成
Tab. 1 Composition of raw materials

氧化物	质量分数/%	
	湖泊淤泥	固化淤泥
SiO_2	69.74	72.28
Al_2O_3	16.20	15.87
Fe_2O_3	5.78	4.91
CaO	1.29	1.09
MgO	2.11	1.21
Na_2O	1.24	1.36
K_2O	2.13	1.87

1.1.3 矿物组成

采用 X 射线衍射仪(XRD)对湖泊淤泥、固化淤泥的矿物组成进行分析,如图 1 所示.可以看出,湖泊淤泥、固化淤泥主要由石英、钠长石、白云母等矿物组成,少量固化剂的加入并没有影响到淤泥的主要矿物组成.

1.2 试验方法

1.2.1 检测方法

参照《砌墙砖试验方法》(GB/T 2542—2012)进行体积密度、吸水率、强度等性能测试;采用 TPS 2500S 型热常数测定仪测试烧结小样砖的导热系数.采用场发射扫描电子显微镜(SEM)观察烧结小样砖的微观形貌;采用压汞仪(MIP)测试烧结小样砖的孔隙率及孔径分布.

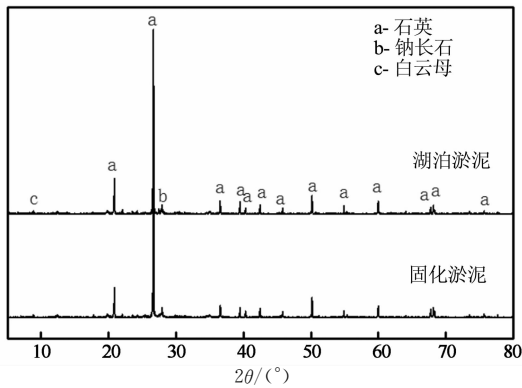


图1 湖泊淤泥、固化淤泥的XRD图谱

Fig. 1 XRD pattern of lake silt and solidified lake silt

1.2.2 实验室烧结小样砖的制备

物料粒径分布对成型和坯体质量有较大影响,大颗粒较多时,物料间黏结性能较差且难以混合均匀;微小颗粒较多时,物料干燥困难且收缩较大易开裂.本试验所用原材料需经烘干、破碎、过筛(2 mm).将原材料按照配合比干混均匀、加水、搅拌、陈化3 d后使用.

1) 成型.采用小型真空挤压机对陈化后的物料进行塑性挤出成型.成型水分较高时会造成成型压力较小,坯体易变形、开裂;成型水分较低时,物料间黏结性能较差.成型压力过高,对器械的磨损也较大.根据物料的特点和小型真空挤压机的实际情况,调整成型水分为20%,压力为1 MPa,真空度为-0.075 MPa.成型后的泥条经钢丝切割成长度约50 mm和100 mm小样砖,长度为50 mm的小样砖用于测试强度,线性干燥收缩等其他性能的测试则用100 mm长的小样砖进行.2种小样砖的截面尺寸均为28 mm×17 mm.

2) 干燥.成型后的小样砖首先在实验室内自然干燥24 h,然后放入鼓风干燥箱中,由室温开始缓慢升温,升温速率控制在10 °C/h,并在最高温度105 °C恒温4 h,保证小样砖充分干燥.干燥过程中砖坯未产生裂纹.

3) 焙烧.干燥后的小样砖放入实验室电炉中焙烧,控制升温速率<100 °C/h,并在最高烧成温度950 °C保温2 h,然后随炉冷却.整个过程约为24 h.

试验所用配比见表2.

表2 试验配比

Tab. 2 Mix proportion in weight

试样	质量分数/%		
	湖泊淤泥	固化淤泥	煤渣
1	100	—	—
2	95	—	5
3	90	—	10
A	—	100	—
B	—	95	5
C	—	90	10

2 小样砖的性能

2.1 成型性能

成型后的小样砖如图2所示.可以看出,未经固化处理的湖泊淤泥砖坯表面及棱边光滑平整,成型效果较好,固化淤泥小样砖表面光滑平整,但棱边较粗糙,有成型裂纹出现,且随着煤渣掺量的增加,棱边粗糙程度有所增加.主要是因为固化淤泥土工力学性能较好、泥质较硬,在相同成型水分下,其塑性较差,成型效果略差.

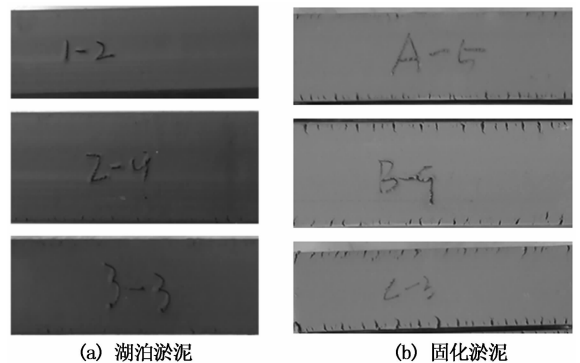


图2 湖泊淤泥与固化淤泥成型效果对比
Fig. 2 Comparison of brick samples after extrusion of lake silt and solidified lake silt

小样砖坯体的干燥线性收缩、烧结后的体积密度、吸水率、导热系数等基本性能见表3.

2.2 干燥线性收缩与体积密度

坯体的干燥收缩与成型水分、压力、物料的塑性指数等都有一定的关系.由表3可看出,未掺煤渣时,固化淤泥小样砖的干燥收缩小于未固化淤泥小样砖,这是因为添加固化剂的淤泥一般土工力学性能较好,泥质较硬,自身干燥收缩较小,较小的干燥收缩可以降低坯体在干燥过程中出现开裂、变形等缺陷的几率.煤渣起到瘠性料的作用,随着煤渣掺量的增加,淤泥/固化淤泥小样砖的干燥线性收缩都降低.未掺煤渣时,固化淤泥烧结小样砖的体积密度为1 668 kg/m³,较湖泊淤泥烧结小样砖降低2.5%.随着煤渣掺量的增加,固化淤泥、湖泊淤泥烧结小样砖的体积密度均略有降低.当煤渣掺量相同时,固化淤泥烧结小样砖的体积密度较未固化淤泥小样砖小,主要原因是固化淤泥具有较小的干燥收缩,对体积密度的降低起着一定的作用.

2.3 吸水率与导热系数

吸水率和导热系数是评价烧结砖耐久性和保温隔热性能的重要指标,与其内部的孔隙结构有密切关系.由表3可看出,未掺煤渣时,固化淤泥和湖泊

淤泥烧结小样砖的吸水率分别为 16.1% 和 15.4%，固化淤泥烧结小样砖的吸水率略大. 随着煤渣掺量的增加, 烧结小样砖的吸水率逐渐增大. 在煤渣掺量相同时, 固化淤泥烧结小样砖吸水率较未固化淤泥小样砖大, 主要是因为固化剂一般为无机类材料, 干燥过程中可以在一定程度上起瘠性料的作用, 对于降低干燥线性收缩有一定作用, 使其干燥后获得相

对多孔的结构, 且其烧失量较小, 混合料整体有机质含量降低, 在焙烧过程中产生的熔融相比较少, 对孔隙的填充不充分, 使其获得更为疏松的结构. 随着煤渣掺量的增大, 导热系数逐渐降低. 当煤渣掺量为 10% 时, 固化淤泥烧结小样砖的导热系数为 0.592 W/(m·K), 较相同煤渣掺量时湖泊淤泥烧结小样砖的导热系数降低约 3%.

表 3 淤泥/固化淤泥小样砖的体积密度、干燥线性收缩、吸水率、导热系数和强度

Tab. 3 Bulk density, linear drying shrinkage, water absorption, thermal conductivity and compressive strength of brick samples

试样	体积密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	干燥线性 收缩率/%	吸水率 /%	导热系数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	抗压强度 /MPa
1	1 710	6.45	15.4	0.623	33.1
2	1 698	6.05	16.5	0.618	28.0
3	1 687	5.49	17.2	0.610	25.4
A	1 668	6.04	16.1	0.620	19.5
B	1 651	5.62	17.1	0.614	17.0
C	1 639	5.42	18.2	0.592	15.8

2.4 强度

强度是评价烧结砖质量的最重要的指标之一. 由表 3 可看出, 未掺煤渣时, 固化淤泥烧结小样砖的强度为 19.5 MPa, 较湖泊淤泥烧结小样砖降低 41%. 随着煤渣掺量的增加, 淤泥/固化淤泥烧结小样砖的强度都下降. 在煤渣掺量相同时, 固化淤泥烧结小样砖抗压强度小于湖泊淤泥烧结小样砖, 主要是因为固化剂也起到瘠性料的作用, 导致抗压强度降低, 同时, 固化淤泥的成型效果较未固化淤泥差(图 2), 导致挤出后的砖坯不仅在外表, 可能在内部均形成缺陷, 进一步降低抗压强度.

2.5 抗冻性

参照《砌墙砖试验方法》(GB/T 2542—2012)对烧结小样砖进行冻融试验, 在 $-15 \sim -20 \text{ }^\circ\text{C}$ 下冰冻, 在 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 融化, 每 3 h 为一个冻融循环. 抗冻性结果如图 3 所示. 可以看出, 在冻融循环次数分别为 25 次、50 次、75 次、100 次时, 纯固化淤泥烧结小样砖的质量损失分别为 0.06%, 0.15%, 0.19% 和 0.35%, 相比于纯淤泥烧结小样砖的 0.05%, 0.13%, 0.19% 和 0.33%, 质量损失略大. 同样, 在相同的冻融循环次数下, 煤渣掺量相同时, 固化淤泥烧结小样砖的质量损失比湖泊淤泥烧结小样砖的质量损失略大, 抗冻性略差. 在煤渣掺量为 10% 时, 固化淤泥烧结小样砖经 100 次冻融循环后的质量损失仅为 0.49%, 满足烧结普通砖 (GB 5101—2003) 的要求. 所有配比的烧结小样砖经 100 次冻融循环后都表现出很好的抗冻性.

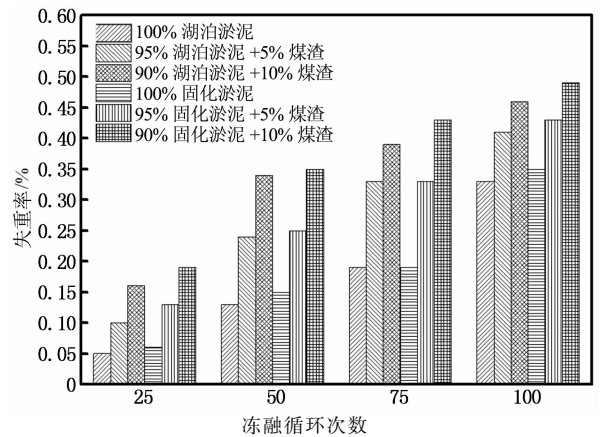


图 3 实验室烧结小样砖的抗冻性

Fig. 3 Freeze-thaw resistance of bricks produced in lab

3 微观结构

3.1 形貌

借助扫描电子显微镜 SEM 对湖泊淤泥、固化淤泥烧结小样砖的微观形貌进行了观察, 结果如图 4 所示. 烧结砖由玻璃相、未熔融颗粒以及孔隙组成. 纯湖泊淤泥烧结小样砖在焙烧过程中产生的液相较多, 对颗粒的包裹和孔隙的填充比较充分, 冷却后形成较为致密的微观结构(图 4(a)), 这也是其强度较高的原因. 纯固化淤泥烧结小样砖也具有较为致密的微观形貌, 但相比纯湖泊淤泥烧结小样砖, 其孔隙较多, 如图 4(b)所示. 随着煤渣掺量的增加, 实验室烧结小样砖的玻璃相逐渐减少, 呈现较为疏松的微观结构. 当煤渣掺量为 10% 时, 从 2 种烧结小样砖 SEM 图像上(图 4(c)和(d))可以清楚地看出, 在玻

璃相的表面分布着较多的未被包裹的颗粒,导致形成较为疏松的微观形貌,这也是导致其力学性能下降的主要原因. 固化剂的加入使得固化淤泥烧结小样砖中淤泥含量相对减少,产生的熔融相更少,未被包裹的颗粒更多,形成更为疏松的微观结构,是导致在煤渣掺量相同时固化淤泥烧结小样砖性能略差的原因.

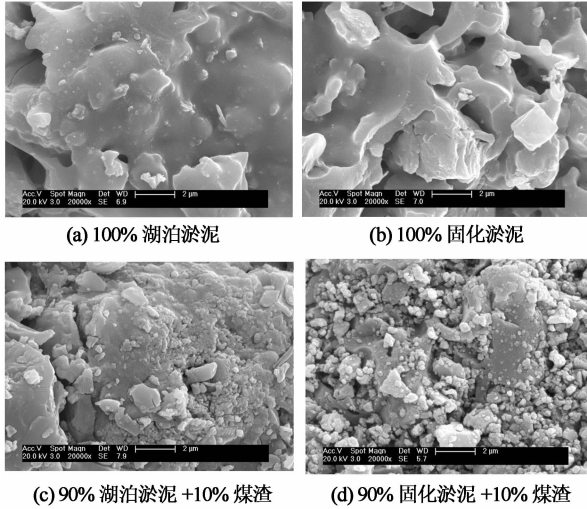


图4 小样砖微观形貌

Fig. 4 SEM micrograph of fired bricks produced in lab

3.2 孔隙率及孔径分布

根据国际纯粹与应用化学协会(IUPAC)对孔径的划分,孔径小于2 nm的孔为微孔;孔径大于50 nm的孔为大孔;孔径在2~50 nm之间的孔称为介孔. 由图5可看出,烧结小样砖的孔径主要分布在20 nm~5 μm之间,为大孔和介孔,且大于1 μm的大孔占有更大比例. 几组烧结小样砖的最可几孔径均出现在2 μm左右. 煤渣的加入对较大孔($d > 1 \mu\text{m}$)的影响较小,主要是增加了较小孔($d < 1 \mu\text{m}$)的比例. 当煤渣掺量为0%,5%和10%时,固化淤泥烧结小样砖的孔隙率分别为31.8%,34.0%和38.7%,湖泊淤泥烧结小样砖的孔隙率分别为31.0%,32.6%和37.4%. 煤渣掺量相同时,固化淤泥烧结小样砖的孔隙率比湖泊淤泥烧结小样砖的孔隙率略大. 此结果表明,固化淤泥烧结砖的强度比未固化淤泥烧结砖强度有明显下降,挤出成型过程中形成的宏观缺陷(图2)是造成强度下降的主要原因. 因此,在采用固化淤泥制备烧结砖时,需要根据成型性能及时对含水率进行调整,以满足真空挤出成型所需要的塑性.

上述研究结果表明,淤泥经固化处理后因其塑性降低,在干燥过程中可在一定程度上起到瘠性料的作用,对于降低干燥线性收缩有一定作用,使其干燥后获得

相对多孔的结构,且因其烧失量较小,混合料整体有机质含量降低,在焙烧过程中产生的熔融相较少,对孔隙的填充不充分,使其获得更为多孔的结构. 这也是在煤渣掺量相同时,固化淤泥烧结小样砖较湖泊淤泥烧结小样砖吸水率高、强度低、导热系数小的主要原因. 此外,有研究表明,小孔比例较高的烧结砖在较为严酷的条件下更容易遭到破坏^[20]. 随着煤渣掺量的增加,小孔比例增大,总孔隙率增大,是导致烧结小样砖抗冻性能略有下降的主要原因.

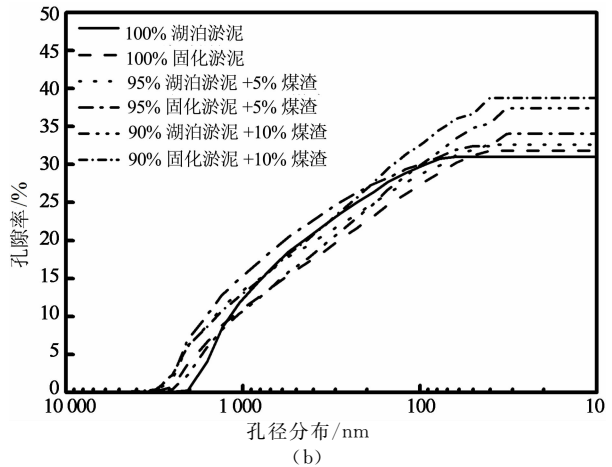
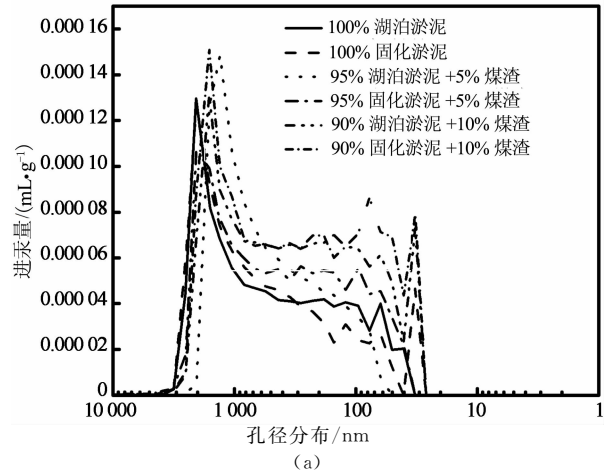


图5 孔径分布与进汞量(a)和累计孔隙率(b)关系曲线

Fig. 5 Log differential intrusion of mercury (a) and porosity (b) to pore size distribution of fired bricks

4 结论

1) 固化淤泥的塑性指数比未固化淤泥略低,少量固化剂的加入并没有明显改变淤泥的氧化物组成和矿物组成.

2) 在相同的成型水分、压力和真空度条件下,固化淤泥的成型效果较湖泊淤泥略差,棱边较为粗糙.

3) 在相同煤渣掺量条件下,固化湖泊淤泥小样砖较未固化湖泊淤泥小样砖线性收缩小,体积密度小,导热系数小,但同时,吸水率较大,强度较低,抗冻性

能也略差。

4) 随着煤渣掺量的增加, 烧制砖熔融液相减少, 对颗粒的包裹和孔隙的填充不充分, 最后形成较为疏松的微观结构, 导致力学性能下降, 抗冻性变差。在相同煤渣掺量条件下, 固化淤泥小样砖孔隙率较大, 微观结构较疏松, 较湖泊淤泥烧制小样砖吸水率大、强度低、导热系数小。

参考文献

- [1] 陈萍, 张振营, 李小山, 等. 废弃淤泥作为再生资源的固化技术与工程应用研究[J]. 浙江水利科技, 2006(6): 1-3.
CHEN Ping, ZHANG Zhen-ying, LI Xiao-shan, *et al.* Solidification technology of dredged sediment for reuse as civil engineering materials [J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2006(6): 1-3. (In Chinese)
- [2] 丁建文, 张帅, 洪振舜, 等. 水泥-磷石膏双掺固化处理高含水率疏浚淤泥试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2817-2822.
DING Jian-wen, ZHANG Shuai, HONG Zhen-shun, *et al.* Experimental study of solidification of dredged clays with high water content by adding cement and phosphogypsum synchronously[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2817-2822. (In Chinese)
- [3] 程福周, 雷学文, 孟庆山, 等. 水泥及其外加剂固化淤泥的试验研究[J]. 建筑科学, 2014, 30(9): 51-55.
CHENG Fu-zhou, LEI Xue-wen, MENG Qing-shan, *et al.* Experimental study on cement and its additional agent to cure silt[J]. Building Science, 2014, 30(9): 51-55. (In Chinese)
- [4] 朱广伟, 陈英旭, 王凤平, 等. 城市河道疏浚底泥农田应用的初步研究[J]. 农业环境保护, 2001, 20(2): 101-103.
ZHU Guang-wei, CHEN Ying-xu, WANG Feng-ping, *et al.* Application of sediment dredged in grand canal on agriculture (Hangzhou Section)[J]. Agro-environmental Protection, 2001, 20(2): 101-103. (In Chinese)
- [5] 范志明, 张虎元, 王宝, 等. 疏浚底泥的园林绿化应用[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(3): 1089-1091.
FAN Zhi-ming, ZHANG Hu-yuan, Wang Bao, *et al.* Horticultural application of dredged sediment[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(3): 1089-1091. (In Chinese)
- [6] 肖兵, 罗海兵, 周莉. 淤泥固化技术在处理城市道路软土路基中的应用[J]. 基础与结构工程, 2012, 30(5): 128-131.
XIAO Bing, LUO Hai-bing, ZHOU Li. Application of mud curing technology in soft soil subgrade treatment of urban road[J]. Foundation & Structure Engineering, 2012, 30(5): 128-131. (In Chinese)
- [7] 张春雷, 朱伟, 李磊, 等. 湖泊疏浚淤泥固化筑堤现场试验研究[J]. 中国港湾建设, 2007(1): 27-29.
ZHANG Chun-lei, ZHU Wei, LI Lei, *et al.* Field test of dike construction with solidified lake dredged material[J]. China Harbour Engineering, 2007(1): 27-29. (In Chinese)
- [8] 杨晓华, 杨博, 崔清泉, 等. 利用江河淤泥、页岩、生物污泥生产陶粒[J]. 新型建筑材料, 2010, 37(11): 54-56.
YANG Xiao-hua, YANG Bo, CUI Qing-quan, *et al.* Preparation of ceramic with river silt, shale, and bio-sludge[J]. New Building Materials, 2010, 37(11): 54-56. (In Chinese)
- [9] 奚本锋, 李洪年, 张亚梅, 等. 利用湖泊淤泥烧制多孔砖的研究[J].

新型建筑材料, 2007, 34(11): 20-22.

- XI Ben-feng, LI Hong-nian, ZHANG Ya-mei, *et al.* Study on sintered perforated brick using lake silt[J]. New Building Materials, 2007, 34(11): 20-22. (In Chinese)
- [10] DALTON J L, GARDNER K H, SEAGER T P, *et al.* Properties of Portland cement made from contaminated sediments[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2004, 41(3): 227-241.
- [11] 武冬青, 董志良, 徐文雨. 化学-物理复合法在海底淤泥填海造地工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 32(9): 1779-1784.
WU Dong-qing, DONG Zhi-liang, XU Wen-yu. Application of chemical-physical combined method to land reclamation using seabed marine clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 32(9): 1779-1784. (In Chinese)
- [12] 季冰, 肖许沐, 黎忠. 疏浚淤泥的固化处理技术与资源化利用[J]. 安全与环境工程, 2010, 17(2): 54-56.
JI Bing, XIAO Xu-mu, LI Zhong. Dredged mud solidification disposal techniques and resource[J]. Safety and Environmental Engineering, 2010, 17(2): 54-56. (In Chinese)
- [13] 杨爱武, 杜东菊, 赵瑞斌, 等. 水泥及其外加剂固化天津海积软土的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1823-1827.
YANG Ai-wu, DU Dong-ju, ZHAO Rui-bin, *et al.* Experimental study on cement and its additional agent to cure Tianjin marine soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1823-1827. (In Chinese)
- [14] 丁建文, 吴学春, 李辉, 等. 疏浚淤泥固化土的压缩特性与结构屈服应力[J]. 工程地质学报, 2012, 20(4): 627-632.
DING Jian-wen, WU Xue-chun, LI Hui, *et al.* Compression properties and structure yield stress for solidified soil composing of dredged clay[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(4): 627-632. (In Chinese)
- [15] 耿飞, 潘龙, 沈勇林, 等. 太湖淤泥烧制砖的制备及其性能[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(10): 182-185.
GENG Fei, PAN Long, SHEN Yong-lin, *et al.* Production and performance of sintered bricks made by Taihu Lake silt[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(10): 182-185. (In Chinese)
- [16] CHIANG K Y, CHIEN K L, HWANG S J. Study on the characteristics of building bricks produced from reservoir sediment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 159(2): 499-504.
- [17] WENG C H, LIN D F, CHIANG P C. Utilization of sludge as brick materials[J]. Advances in Environmental Research, 2003, 7(3): 679-685.
- [18] 袁永兵, 陈洪龄, 吕志刚, 等. 以干化太湖淤泥为原料烧制砖的研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(5): 179-182.
YUAN Yong-bing, CHEN Hong-ling, LY Zhi-gang, *et al.* Preparation of brick using dewatered mud from lake Taihu[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(5): 179-182. (In Chinese)
- [19] MEZENCEVOVA A, YEBOAH 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.
- [20] LU G, LU G Q M, XIAO Z M. Mechanical properties of porous materials[J]. Journal of Porous Materials, 1999, 6(4): 359-368.