

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.028

## 城市河道淤泥资源化利用的烧制砖试验研究

徐 杨, 阎长虹, 许宝田, 阮晓红, 郭 超

(南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210093)

**摘 要:**城市疏浚河道清出的淤泥,含水量大、有机质含量高、气味臭、有时还含有有毒有害物质,如何进行无害化、资源化处理成为当前城市可持续发展的重要研究课题。以南京秦淮河中段清淤工程为例,以其清出的淤泥为原料,添加一定比例粘性土,淤泥与粘性土比例分别为 1:1、3:2 和 7:3 的 3 组砖坯试样,在 1 000、1 050 和 1 100℃ 3 个不同温度下进行烧制制砖试验。分别测试了烧成品试样的烧失率、线收缩率、吸水率、抗压强度等物理力学参数,并利用 XRD 和 SEM 研究了烧成品的微观结构特征,综合分析了粘性土含量和烧制温度对淤泥进行资源化处理效果的影响。研究表明:烧制温度对试样烧制效果影响显著,当烧制温度为 1 100℃ 时,3 组试样均出现过烧现象,1 050℃ 比较接近试样的适宜烧制温度;粘土含量逐渐增加,烧成品物理力学性质逐渐改善,当粘土含量增加到 50%,烧制温度为 1 050℃ 时,砖块体积密度为 1.4 g/cm<sup>3</sup>、吸水率为 17.28%、线收缩率为 -0.5%、抗压强度为 12.56 Mpa,具有轻质保温特性,各项性能均能够满足工程建设有关规范对普通砖的要求。研究结果对城市景观河道疏浚淤泥的资源化处理具有参考价值。

**关键词:**城市河道淤泥;粘性土;资源化利用;烧制砖

**中图分类号:**TU522.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)S1-0125-05

## Resource Utilization of the Dredged Material of Urban river to Manufacture Sintered Brick

Xu Yang, Yan Changhong, Xu Baotian, Ruan Xiaohong, Guo Chao

(School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, P. R. China)

**Abstract:** The dredged material of urban river (DMUR) is of high water content, rich in organic matter, smelly odor and sometimes also contains toxic and hazardous substances. Harmless and resource utilization of DMUR became an important research topic of urban sustainable development. In this study, the dredging project of Nanjing Qinhuai River were taken for example, the DMUR and clay were used as raw materials to produce sintered brick. Percentages of DMUR in raw materials range from 50% to 70% by mass ratio, and brick specimens sintered at kiln temperatures of 1 000℃, 1 050℃ and 1 100℃. In order to analyze the impact of clay content and kiln temperature on the sintered specimens, mechanical tests were performed to measure bulk density, weight loss on ignition, shrinkage, water absorption and compressive strength; Chemical compositions and microstructures of the samples were investigated using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM), respectively. The results indicate that the kiln temperature has significant effects on sintered specimens, 1 050℃ is the suitable kiln temperature for these specimens; when the clay content is gradually increased, the physical and mechanical properties of sintered specimens gradually increased. Under the optimum preparation condition (DMUR content of 50%, the sintering temperature is 1 050℃), bulk density, water absorption, the linear shrinkage, compressive strength of the sintered bricks were 1.4 g/cm<sup>3</sup>, 17.28%, -0.5%, 12.56 MPa, respectively, meeting the requirements of common bricks. The results of the study have references significant for resource utilization of DMUR.

**Key words:** dredged material of urban river; clay; resource utilization; sintered brick

城市河道不仅是城市之中的一道美丽风景线,而且还担任着排污、行洪的功能。由于大量的城市生活垃圾、各种废水排入河道,加之水流速度较缓,河道淤积往往较为严重,一

般 3~5 a 就需要进行清淤。以南京市内秦淮河中段为例,每年淤积深度在 20~40 cm。由于沉积物来源非常复杂,疏浚河道清出的淤泥处理非常困难。淤泥大量淤积,一方面抬高

收稿日期:2012-12-27

基金项目:水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07317-007-02);江苏省科技厅科技支撑计划——社会发展(BE2011772);教育部高等学校科技创新工程重大项目培育资金项目(708043)

作者简介:徐杨(1987-),男,博士生,主要从事城市环境岩土工程研究,(E-mail)xuyang870808@163.com。

河床,使其行洪能力下降;另一方面,由于河床抬高,水流速度下降,使河道排污能力和自净能力也随之下降,进一步加剧河道淤积。在这河道淤泥还会造成河水严重的二次污染,促使河水水质不断恶化。因此,为了保证城市河道的景观功能以及沿河居民的良好生活及工作环境,必须要对城市河流定期实施清淤工程,这将产生大量城市河道疏浚淤泥。

疏浚淤泥具有高含水率、高压缩性、低渗透性等特点,难以在工程上直接应用<sup>[1-2]</sup>。主要处置方法有填埋、固化处理和烧结处理,填埋是较为简便的处理方法,但淤泥可能对填埋场地造成二次污染,且占用大量的土地资源<sup>[3]</sup>。显然,对疏浚淤泥资源化利用的研究更具有重要的实际意义。

城市河道淤泥与湖、海相淤泥的性质有较大差异<sup>[4]</sup>,在前期的固化处理试验中,采用不同的固化材料对城市河道淤泥进行室内固化试验,试验结果见表 1。从表 1 可以看出,固化效果最好的是掺量为 20% 的水泥固化土,但其 28 d 无侧限抗压强度仅为 670 kPa,明显低于其处理一般软土的固化效果,难以使其在工程上推广应用。

表 1 不同固化材料对试验淤泥的固化效果

固化剂种类	28 d UCS/kPa
20% 掺量水泥	670
9% 掺量石灰	350
6% 掺量 CMSC 固化剂	570

利用烧结处理的方法对固体废弃物加以利用的研究很多<sup>[5-12]</sup>,如任伯帆<sup>[4]</sup>等研究了以城市污水污泥、粉煤灰和粘土为原料烧砖的试验研究,在原料中可掺入 30% 左右该类城市污泥,烧制成品性能可满足国家标准要求,李旺等<sup>[5]</sup>研究了高含量城市污泥制备轻质微孔砖,当城市污泥含量 55%~75% 时掺入一定黏土及改性可获得各项指标满足要求的轻质微孔砖;Chen 等<sup>[6]</sup>以污泥焚烧灰、粘土和少量纳米 SiO<sub>2</sub> 为原料烧制砖瓦,并通过宏微观结合的方法研究了烧成品的物理力学性能,结果表明纳米 SiO<sub>2</sub> 的加入可有效改善砖瓦的物理力学性质;Chiang 等<sup>[7]</sup>研究了利用污水污泥和稻壳烧制轻质砖,当烧结温度为 1 100 °C、稻壳含量为 15% 时,其轻质、高强度的砖块能满足相关规范的要求,He 等<sup>[8]</sup>研究了以黄河淤泥和赤泥为原料烧制结砖的可行性,结果表明:赤泥含量为 40%、烧结温度 1 050 °C 和烧结时间 2 h 是较为适宜的烧结条件。这些研究多针对污水污泥的烧结试验研究,对城市河道疏浚淤泥的研究甚少。

本文以城市河道疏浚淤泥和南京地区典型下蜀土为原料,以不同比例混合后在不同烧结温度下进行烧制结砖试验,分别测试了烧成品的体积密度、烧失率、吸水率、线收缩率和抗压强度等物理力学参数,并运用 X 射线衍射(XRD)和扫描电子显微镜(SEM)等方法对烧成品的矿物成分以及微观结构进行了分析,研究了烧结温度和粘土含量对试样烧结效果的影响,为实现城市河道淤泥的资源化利用提供了科学依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

砖块样品的制作原料主要由以下 2 种原料:淤泥、粘土。

淤泥取自南京市内秦淮河中段中山南路桥附近;粘土取自南京大学浦口校区,为典型南京地区下蜀土,原料来源丰富。将淤泥、粘土风干后碾碎,过 2 mm 筛以保证原料的均匀性。

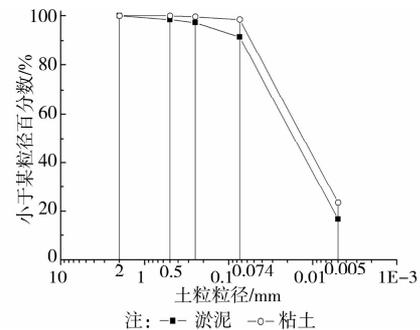


图 1 试验材料粒径分布曲线

利用筛分法和密度计法联合测定了淤泥和粘土的粒径分布,其结果如图 1 所示。该淤泥的黏粒含量(<0.005 mm)为 16.7%,粉粒含量(0.074~0.05 mm)为 74.7%,砂粒含量(>0.074 mm)为 8.6%。该粘土的黏粒含量(<0.005 mm)为 23.4%,粉粒含量(0.074~0.05 mm)为 75.1%,砂粒含量(>0.074 mm)为 1.5%。

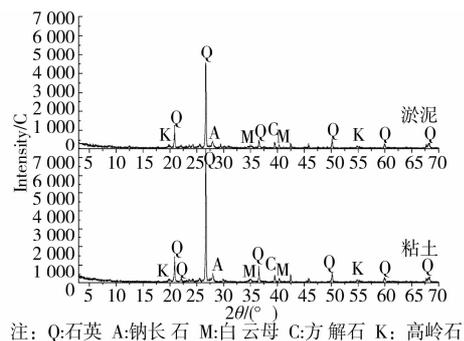


图 2 试验材料 XRD 衍射图

采用 X 射线衍射的方法对试验材料的矿物成分进行测试,衍射图谱如图 2 所示。石英矿物是最主要的衍射峰,且粘土的石英矿物衍射强度比淤泥高,说明粘土中石英矿物的含量比淤泥更高。另外钠长石、白云母、方解石、高岭石等矿物的衍射峰也有出现,但衍射强度相对较低。

化学成分采用美国热电 ARL9800XP+型 X 射线荧光光谱仪进行测试,结果如表 2 所示。淤泥和粘土的成分都是以 SiO<sub>2</sub> 主,分别占总量的 61.365%、66.418%,与 XRD 试验结果一致;粘土的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO 含量略高于淤泥,分别为 13.842%、5.22%;而 CaO、MgO 的含量则低于淤泥,分别为 1.27%、1.43%;其余成分含量较为接近,但淤泥的烧失量明显高于粘土,主要是由于淤泥中含有大量有机质所致。

表 2 试验材料的化学成分

成分	淤泥	粘土
SiO <sub>2</sub>	61.365	66.418
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.64	13.842
CaO	4.76	1.27
FeO	4.62	5.22

续表 2

成分	淤泥	粘土
MgO	2.03	1.43
SO <sub>3</sub>	1.275	0.521
K <sub>2</sub> O	2.08	2.18
IL	2.895	3.874
烧失量	9.335	5.245

## 1.2 试验方法

淤泥与粘土的比例分别为 7:3、3:2 和 1:1(如表 3),将原料混合均匀,根据质量计算加入适量自来水使混合物含水率为 40%,充分搅拌 5 min,拌合完成的原料装入塑料袋闷料 24 h。设计砖块试样干密度为 1.55 g/cm<sup>3</sup>,将原料分三层压样成型,模具大小为 7 cm×7 cm×7 cm。试样在自然条件下风干 48 h 拆模,放入 105℃ 的烘箱内烘干 24 h。最后,烘干后的试样在高温炉进行烧结,烧结温度分别为 1 000℃、1 050℃、1 100℃。严格控制升温速率,从室温升到烧结温度所需时间为 1 h,在相应烧结温度下保温烧结 2 h,最后关闭加热装置让试样自然冷却,烧制完成。

表 3 原料混合配比

试样编号	原料/%		烧结温度/℃
	淤泥	粘土	
S1	70	30	1 000、1 050、1 100
S2	60	40	1 000、1 050、1 100
S3	50	50	1 000、1 050、1 100

本次研究中,根据烧结普通砖试验规范(GB 5101—2003)<sup>[13]</sup>,分别对砖块的烧失率、线收缩率、吸水率和抗压强度进行了测试。线收缩率为长、宽、高 3 个方向线收缩率的平均值,吸水率采用真空抽气法进行测定,抗压强度采用岩石单轴压缩机进行试验。XRD 和 SEM 的试验仪器分别为瑞士 ARL 公司的 X'TRA 和日本 Hitachi 公司的 S-3400N II。

## 2 烧成品宏观物理力学性质

砖坯烧结后的试样如图 3 所示,试样的尺寸、色泽等性质随粘土掺量和烧结温度的变化较明显,当烧结温度增加到 1 100℃ 时,3 种试样均不同程度出现过烧现象,且过烧程度随粘土含量减小而逐渐严重。为了研究原料用于制砖的适宜烧结温度和粘土含量,分别测试了试样的体积密度、烧失率、吸水率、线收缩率和抗压强度。



图 3 烧结后的试样

## 2.1 体积密度

体积密度是烧成品的重要特性,可以表征试样的烧结效率和致密化程度。一般而言,随着烧结温度的提高,烧结样品的密度随之提高。主要由于随着温度的提高,温度的热驱动力随之增强,促使致密化,也有利于试验材料中的矿物颗粒团聚和晶体生长<sup>[14]</sup>。从图 4 可以看出,所有烧成品密度普遍较低,为 1.2~1.45 g/cm<sup>3</sup> 之间,主要是由于淤泥中大量有机质的烧失。随着粘土含量增加,砖块密度也随之增大。当烧结温度为 1 050℃ 时,试样的表观密度较 1 000℃ 和 1 100℃ 高,而并未随着烧结温度增加,体积密度增加。这主要是由于当烧结温度增加到 1 100℃ 时,3 种不同配比的试样均出现了过烧的现象,体积出现明显膨胀,从而使密度急剧下降。

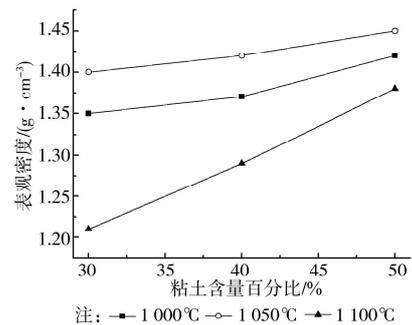


图 4 试样表观密度变化规律

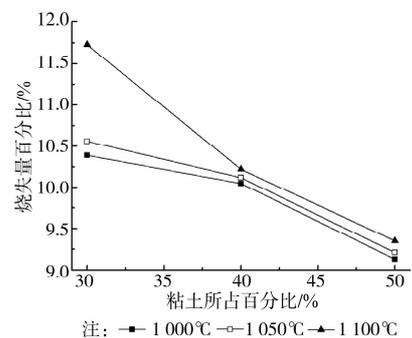


图 5 试样烧失量百分比变化规律

## 2.2 烧失率

试样在烧结过程中,由于有机质的烧失和晶体矿物间物理化学反应过程中部分固体相晶体变为气体逃逸到空气中,因此,试样的质量将减小。3 种配比条件下试样在不同温度下的烧失率变化规律如图 5 所示,烧失率分布在 9%~12% 之间。随着粘土含量的增加,烧失量逐渐减小,这主要是因为粘土含量增加,淤泥相对含量减小,从而试样中有机质的含量也相应减小。随着烧结温度的增加,各组样品的烧失率均逐渐增大,但总体变化幅度较小。其主要原因是试样在烧结过程中质量损失的主要部分是有机质等物质的烧失,从试验中可以发现,当高温炉温度增加到 400~700℃ 之间时,炉内排除大量刺激性气体,当温度超过 700℃ 时无明显刺激性气体排除,有机质的烧失在 700℃ 以下时就基本完成,因此,温度从 1 000℃ 增加到 1 100℃ 时,烧失量变化幅度较小。

## 2.3 线收缩率

线收缩率是反应试样在烧结过程中空隙的收紧或收缩规律。试样烧结后收缩率的变化如图 6 所示,可以看到线收

缩率均为负值,表明试样烧结后体积有所增大。1 050℃时,不同配比试样线收缩率均小于-1%,明显低于1 000℃和1 100℃的试样。当烧结温度为1 000℃和1 050℃时,粘土含量的变化时试样收缩率变化较小,而烧结温度为1 100℃时,随着粘土含量的增加,试样线收缩率变化显著,且逐渐减小。从烧结完成后试样的外观可以明显看出(见图3),只有在烧结温度为1 100℃条件下3种不同配比的试样都出现了过烧的现象,随着粘土含量的增加,过烧的程度越弱,粘土含量在该烧结温度下对烧结效果影响非常显著,因此,当温度增加到1 100℃时,线收缩率随粘土含量增加而明显减小。

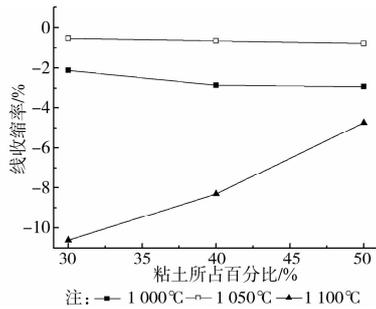


图 6 试样线收缩率变化规律

#### 2.4 吸水率试验

吸水率是反映试样的开口空隙的数量的指标,吸水率越大,开口空隙越多,反之亦然。试样烧结后吸水率变化规律如图7所示,1 050℃的烧结温度下的试样吸水率最低,1 000℃烧结温度下的样品稍高,1 100℃烧结温度下的样品最高。随着粘土含量的增加,各个烧结温度下的试样吸水率均有所降低,说明在高温烧结过程中,淤泥成分中玻璃类晶体逐渐膨胀使空隙增大,粘土的掺入有利于减少试样烧结后开口空隙的数量。综合对比,1 050℃烧结温度下粘土掺量为50%时的试样吸水率最低,为17.28%,满足现有规范对烧制砖吸水率的要求。

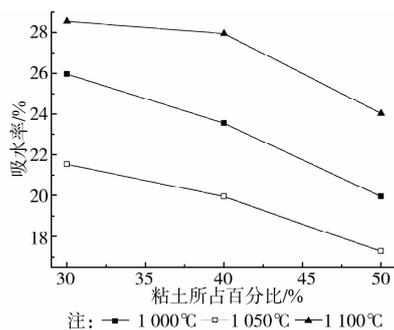


图 7 试样吸水率变化规律

#### 2.5 抗压强度

抗压强度是反应试样结构强度的指标,决定了烧制砖的用途。抗压强度是试样内部颗粒胶结强度以及空隙分布特征的集中体现,其变化规律如图8所示。随着粘土含量的增加,试样抗压强度有所提升,粘土含量40%增至50%的强度增幅大于粘土含量30%增至40%的强度增幅,说明继续增加粘土含量,试样的强度还会有提升的空间。在不同烧结温度下,试样的抗压强度有较大差异,1 050℃烧结温度下试样所获得的抗压强度最高,1 100℃烧结温度下试样抗压强度

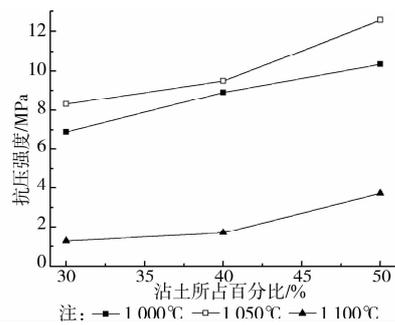


图 8 试样抗压强度变化规律

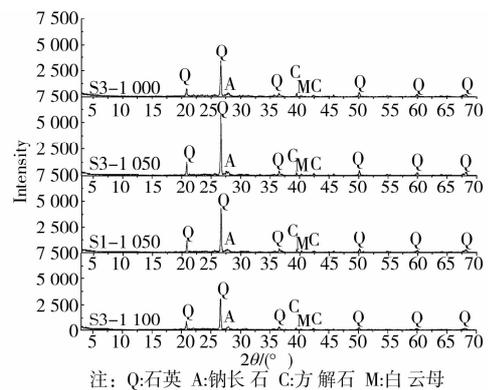


图 9 烧成品 XRD 衍射图

最低。说明该种原料配比条件下烧结的最佳温度为1 050℃左右,而温度达到1 100℃时,各种配比的试样均出现过烧的现象,砖块各种性能急剧下降,因而砖块抗压强度明显降低。

### 3 烧成品微观性质

#### 3.1 XRD 分析

通过 XRD 对烧成品进行矿物成分分析(如图9),高温烧结后试样的矿物晶体主要为石英,还有少量的钠长石、方解石和白云母,通过与试验材料矿物成分的对比,矿物种类未发生明显变化。烧结温度和粘土含量对矿物晶体的生成有一定影响:当粘土含量均为50%时(S3),烧结温度从1 000℃提高到1 100℃,石英等矿物衍射强度先增加后减少,说明过高或过低的烧结温度都不利于矿物晶体的生成;当烧结温度均为1 050℃时(S1-1 050、S3-1 050),粘土含量从30%增加50%,石英等矿物衍射强度有显著增加,这是由粘土与淤泥矿物成分的差异所致。

#### 3.2 SEM 分析

SEM 图片揭示了烧成品的微观结构特征,如图11所示。对比图10(b)和图10(c),随着粘土含量增加,试样中大孔隙逐渐减少,且颗粒间聚集更加紧密,说明粘土含量增加可有效改善烧成品颗粒间积聚的紧密程度,在宏观上表现为吸水率减小,抗压强度增加;对比图10(a)、图10(c)和图10(d),粘土含量均为50%,当烧结温度为1 050℃时,颗粒间接触更为紧密,颗粒聚集体大小分布较均匀,几乎未见大孔隙,当烧结温度降低为1 000℃时,液相晶体结晶对空隙填充作用不够充分,有少量大孔隙的存在且颗粒聚集体大小分布不均匀,当烧结温度增加到1 100℃时,颗粒间胶结比较好,但是大孔隙急剧增多,颗粒骨架支撑作用减弱,宏观物理力学性质急

剧下降,试样出现过烧现象。

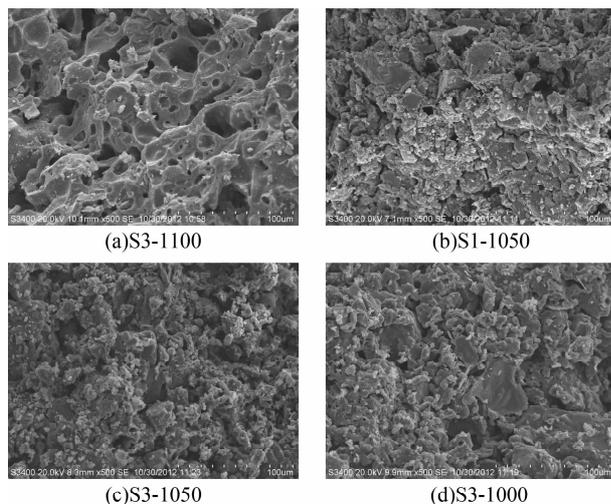


图 10 烧成品 SEM 图像(500×)

以粘土含量 50% 为例,烧结温度 1 050℃ 时,烧成品的烧失率、吸水率、线收缩率和抗压强度等性质均优于烧结温度为 1 000℃ 和 1 100℃ 时。因此,烧结温度对试样烧结效果的影响显著<sup>[15]</sup>。分析其原因是:当烧结温度较低时,少量固体矿物转化为液相,液相对空隙的填充和对颗粒的胶结等作用效果不够,造成试样烧结不充分,导致砖块的力学性质较低;当烧结温度过高时,液相的含量急剧增加,部分矿物在相变过程中体积膨胀,使得试样出现较明显膨胀,砖块呈现不规则形状并逐渐变黑,即出现过烧现象。因此,适宜的烧结温度是保证烧结效果的首要条件。综合对比不同试样烧结后的宏观性质,1 050℃ 比较接近适宜的烧结温度。

为了提高淤泥的利用效率,本文研究了高淤泥含量的试样的烧结试验。由于淤泥中有机质含量较高,可以起到成孔的作用,所以烧结出的砖块体积密度较低,具有轻质保温的特点,可有效减小砖块运输使用的成本,但淤泥含量不能过高,含量 50% 为宜。以烧结温度为 1 050℃ 为例,粘土含量从 30% 提高到 50%,砖块体积密度从 1.4 g/cm<sup>3</sup> 提高到 1.45 g/cm<sup>3</sup>,烧失率从 10.56% 降低到 9.21%,吸水率从 21.53% 降低到 17.28%,抗压强度从 8.31 Mpa 增加到 12.56 Mpa,说明粘土含量对砖块性质也有较大影响。

当粘土含量为 50% 时,烧结温度为 1 050℃ 时,砖块的线收缩率、吸水率、抗压强度均能满足 GB 5101—2003 对普通砖的要求,且具有轻质保温的特点。基于以上结果,以城市景观河道淤泥和粘土为原料烧结制砖是可行的,可以实现淤泥资源化利用。

#### 4 结 论

1) 由于淤泥中有机质含量较高,烧结过程中可以起到成孔的作用,烧结后的砖体密度为 1.2~1.45 g/cm<sup>3</sup> 之间,具有轻质保温的特点,可以降低建筑物的能源消耗,同时也可以减少砖块运输成本。

2) 烧结温度对试样烧结效果影响显著,当烧结温度为 1 100℃ 时,3 种不同配比的试样均出现过烧现象,当烧结温度为 1 050℃ 时,砖块的各种性质均优于其他烧结温度,因此,控制烧结温度为 1 050℃,保温 2 h 是较为合适的烧

条件。

3) 随着粘土含量增加,烧成品物理力学性质可明显改善。当粘土含量为 50%,烧结温度为 1 050℃ 时,砖块的线收缩率、吸水率、抗压强度等性质均能满足 GB 5101—2003 对普通砖的要求。

试验结果表明以城市景观河道淤泥和粘土为原料烧结制砖是可行的。这一研究结果对城市景观河道淤泥的处置有重要的实际应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 朱伟,张春雷,刘汉龙,等. 疏浚泥处理再生资源技术的现状[J]. 环境科学与技术,2002,25(4):39-41.  
Zhu W, Zhang C L, Liu H L, et al. The status of dredged spoils utilization [J]. Environmental Science and Technology, 2002, 25(4): 39-41.
- [2] Chiu C F, Zhu W, Zhang C L. Yielding and shear behaviour of cement-treated dredged materials [J]. Engineering Geology, 2008, 103:1-12.
- [3] 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(12): 1999-2002.  
Ji F L, Zhu W, Zhang C L. Study of treatment technology of dredging sludge with geosyntheticizing method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(12): 1999-2002.
- [4] 徐杨,阎长虹,许宝田,等. 城市河道淤泥特性及改良试验初探[J]. 水文地质工程地质,2013,40(1):110-114.  
Xu Y, Yan C H, Xu B T, et al. The study on properties and modification test of dredged material of urban river [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013,40(1):110-114.
- [5] 任伯帆,龙腾锐,陈秋南,等. 粉煤灰-粘土砖烧制过程处理城市污水污泥的试验研究[J]. 环境科学学报,2003,23(3):414-416.  
Ren B Z, Long T R, Chen Q N, et al. The experimental study on utilization of the urban sewage sludge in the process of sintering brick with fly-ash and clay [J]. ACTA Scientiae Circumstantiae, 2003,23(3):414-416.
- [6] 李旺,王晨,姜雪丽,等. 高含量城市污泥制备轻质微孔砖的研究[J]. 新型建筑材料,2008,3:45-48.  
Li W, Wang C, Jiang X L, et al. Study on preparation of lightweight porous brick with high content of urban sewage sludge [J]. New Building Materials, 2008, 3:45-48.
- [7] Chen L, Lin D F. Applications of sewage sludge ash and nano-SiO<sub>2</sub> to manufacture tile as construction material [J]. Construction and Building Materials, 2009,49(6):3312-3320.
- [8] Kung Y C, Ping H C, Ching R H, et al. Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks [J]. Journal of Hazardous Materials,2009,5:76-82.
- [9] Hongtao H, Qin Y Y, Yuan S, et al. Preparation and mechanism of the sintered bricks produced from Yellow River silt and red mud [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 203-204: 53-61.
- [10] Bilgin N, Yeprem H A, Arslan S, et al. Use of waste marble powder in brick industry [J]. Construction and Building Materials, 2012, 29: 445-457.
- [11] 范英儒,邓成,罗晖,等. 污水污泥制备页岩烧结砖的试验研究[J]. 土木建筑与环境工程,2012,34(1):130-135.

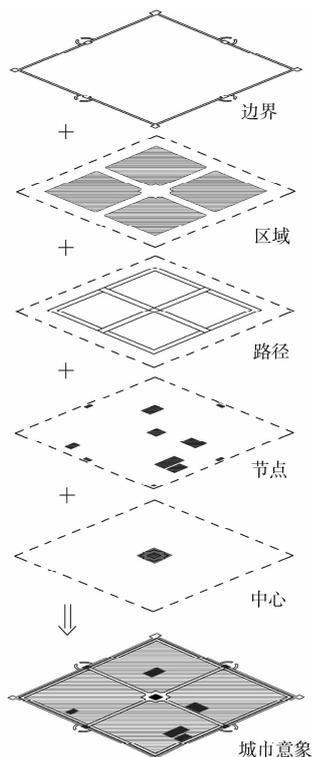


图 15 要素叠加

加深了人们在行程中关键时刻的意象;接下来,这些节点意象又因标志物的存在得到加强,同时还为保证这些标志物受到关注提供了一个环境;再进一步,道路所获得的个性和速度,不单单是因为其自身的形式或节点的连接,而且道路穿

行的区域、经过的边界和沿路的标志物也在其中起到重要作用。可见,元素之间的固有联系已经在某种程度上将它们紧密地联系在一起,共同作用加强人们对空间的感知过程,从而获得整体全面的城市意象。

## 5 结 语

路网关系、边界、区域、中心、节点以及轴线这些物质空间形态内容是古城整体空间形态与景观得以延续的关键,也是古城的非物质性城市意象元素,如民俗风情、历史事件与人物、城市活动的物质空间载体。通过对兴城古城的 5 大认知要素的分析与控制,形成兴城强烈的空间意向特征,促进古城空间形态的保护和可持续的开发与利用。同时,也为其他古城的空间形态控制与保护研究提供相应参考。

### 参考文献:

- [1] (美)凯文·林奇. 城市意象[M]. 方益萍,何晓军,译. 北京:华夏出版社,2001:5-20.
- [2] 沈福熙. 城市意象—城市形象极其情态语义[J]. 同济大学学报:社会科学版,1999,10(3):19-23.
- [3] (美)凯文·林奇. 城市的印象[M]. 项秉仁,译. 北京:中国建筑工业出版社,1990:54,60,72,72.
- [4] 王其亨. 风水理论研究[M]. 天津:天津大学出版社,1992:121.
- [8] (美)阿摩斯·拉普普特. 建成环境的意义[M]. 黄兰谷,译. 北京:中国建筑工业出版社,1992:76.
- [9] (美)罗杰·特兰西克. 找寻失落的空间[M]. 朱子瑜,等,译. 北京:中国建筑工业出版社,2008:30-45.

(编辑 王维朗)

(上接第 129 页)

- Fan Y R, Deng C, Luo H, et al. Experimental analysis on preparation of fired brick with shale and sewage sludge [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(1):130-135.
- [12] 谢厚礼,彭家惠,郑云,等. 成孔剂对烧结页岩砖性能的影响[J]. 土木建筑与环境工程,2012,34(2):149-154.
- Xie H L, Peng J H, Zheng Y, et al. Influence of pore-forming agents on the properties of sintered shale brick [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(2):149-154.
- [13] GB 5101-2003 烧结普通砖 [S]. 北京:中国标准出版社,2003.
- [14] Kung Y C, Yi C C, Kuang L C. Scrap glass effect on building materials characteristics manufactured from water treatment plant sludge [J]. Environmental Engineering Science, 2010, 27(2):137-145.
- [15] 宋杰光,吴伯麟. 温度制度对高性能石英砂烧结砖的性能影响研究 [J]. 武汉科技大学学报:自然科学版,2005,28(1):5-7.
- Song J H, Wu B L. Influence of temperature system on behaviors of high-performance quartz sand Sintering Brick [J]. Journal of Wuhan University of Science & Technical: Natural Science Edition, 2005, 28(1):5-7.

(编辑 胡玲)