

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.041

基于浆体取代法再生砖粉泡沫混凝土试验研究

廖师贤¹,黄蕾²

(1.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114;2.广州大学 土木工程学院,广东 广州 510006)

摘要:泡沫混凝土是一种多孔的轻质建筑材料,具有隔音降噪、隔热耐火、保温抗冻等特点。但存在强度低、开孔率高、整体性差等缺陷,限制了其在建筑材料领域中的广泛应用。再生砖粉可以通过建筑废弃的黏土砖制备,并且有一定的火山灰活性。在水泥基复合材料中将废砖作为外加掺合料,可以使泡沫混凝土的力学性能有所提高。考虑水泥取代法存在的问题,试验采用浆体取代法制备再生砖粉泡沫混凝土,从受压力学性能和微观结构两个方面对砖粉泡沫混凝土进行探究。结果表明:再生砖粉的加入使泡沫混凝土的强度提高;通过对再生砖粉泡沫混凝土水化产物及微观形貌分析,再生砖粉取代率越大,再生砖粉更能发挥其火山灰活性,使反应生成的水化产物越多,此外由于掺入再生砖粉,试件产生了微集料效应,即再生砖粉填充了泡沫混凝土的微小孔隙,使其微观结构也变得更加密实。

关键词:泡沫混凝土;再生砖粉;受压力学性能;微观结构

中图分类号:U414

文献标志码:A

0 引言

中国每年旧城区改造以及建筑拆除将产生大量废弃黏土砖,其富含活性物质,将其制成再生砖粉能有效处理建筑垃圾并在工程中加以利用^[1-3]。其制备流程为:首先利用发泡剂制备泡沫,常用的方法有物理发泡和机械发泡,其次利用掺合料、水、外加剂和胶凝材料制备以水泥为基体的浆体,在其中添加制备好的泡沫,浇筑成型前搅拌充分、混合均匀,最后对试件进行养护,常用的方法有蒸气养护和自然养护,由此得到泡沫混凝土,其具有多孔、轻质的特点^[4]。与素混凝土相比,泡沫混凝土具有隔音降噪、隔热耐火、保温抗冻等优点,在地质条件较差位置的填土替换和地基填充、房屋建筑的隔音墙、寒冷地区的保温墙板等各个领域广泛应用^[5-11],具有一定的研究意义和工程应用前景。

但泡沫混凝土也存在缺陷,如吸水率高、开孔率高、易收缩、强度低、整体性差等^[12-14],泡沫混凝土的研究和应用因此受到限制。而泡沫混凝土最主要的缺陷是强度低^[15-20],难以满足实际工程的结构要求。

目前,对再生砖粉作为掺合料应用于水泥基材料的研究较多,然而对于再生砖粉在泡沫混凝土中的应用,研究手段均采用水泥取代法^[21-23],结果表明再生砖粉的取代率大于一定值后对泡沫混凝土的性能影响大都是负面的,尚未发现利用浆体取代法制备再生砖粉泡沫混凝土的研究。

本文以再生砖粉为泡沫混凝土的主要原料,通过浆体取代法对再生砖粉泡沫混凝土展开试验研究,旨在探究采用不同浆体取代率对泡沫混凝土抗压强度和微观结构的影响规律,不仅为改善泡沫混凝土强度提供技术支持和奠定理论基础,还有望减少建筑行业生产混凝土和处理废砖产生的污染、能耗、材料消耗,具有重要的环保效益、社会效益和经济效益。

1 试验设置

1.1 原材料

再生砖粉泡沫混凝土由试验室配置,试件主要组分为再生砖粉、水泥、发泡剂、纤维素、减水剂和水;其中再生砖粉的原料来自某红砖厂艺术区拆除

收稿日期:2021-03-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51608137)

作者简介:廖师贤,男,硕士研究生.E-mail:1348876853@qq.com

现场(表1);水泥强度等级为42.5级(表2);发泡剂使用椰油酰胺丙基甜菜碱;纤维素使用羟丙基甲基纤维素,减水剂使用聚羧酸减水剂(表3)。

表1 再生砖粉的化学成分 %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	SO ₃
68.79	15.23	6.28	3.71	2.02	1.79	0.85	0.13

表2 水泥的化学成分 %

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	LOI
59.07	21.87	6.02	3.44	2.79	2.08	3.82

表3 减水剂技术指标

外观	pH	含气量/%	水泥净浆流度/mm	含水率/%	减水率/%
灰白色粉末	7.1	1.7	280	1.81	26.2

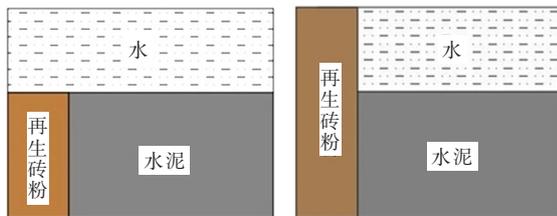
1.2 试件配合比

试验再生砖粉浆体取代率为变量,其中水灰比为0.40、浆体取代率分别为0%、4%、8%、12%,设计4组配合比,其中再生砖粉泡沫混凝土配合比见表4。本试验采用浆体取代法,不同于普通的水泥取代法(通过砖粉取代水泥),而是使用砖粉取代浆体,两者的区别示意图如图1所示。

表4 再生砖粉泡沫混凝土配合比

试件编号	水泥/ (kg·m ⁻³)	水/ (kg·m ⁻³)	再生砖粉/ (kg·m ⁻³)	泡沫体积/ m ³
NM-0.40-0	199	499	0	0.7
PR-0.40-4	177	443	105.6	0.7
PR-0.40-8	155	388	211.2	0.7
PR-0.40-12	133	332	316.8	0.7

注:不添加再生砖粉的试件作为空白对照组,记为NM;采用浆体取代法的试件作为试验组,记为PR,PR-0.40-4中,0.40表示水灰比为0.40,4表示再生砖粉浆体取代率为4%,其余类似。



(a) 水泥取代法 (b) 浆体取代法

图1 两种取代法的区别

1.3 抗压强度和微观结构测试

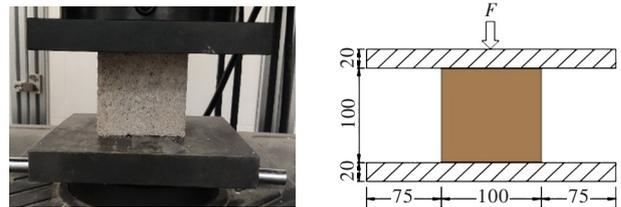
抗压强度试验如图2所示。取一组100 mm×

100 mm×100 mm的立方体试件放置在试验机的中心位置,采用位移法进行加载,加载速度为2.0 mm/min,试件压缩量最大值达到90%或试件发生急剧变形时,判定试件发生破坏,停止加载。此时试件最大破坏荷载记为 F 。抗压强度 f 的计算公式如下:

$$f = \frac{F}{s} \quad (1)$$

式中: F 为试件最大破坏荷载(N); s 为试件的受压面积(mm²); f 为抗压强度(MPa),精确至0.01 MPa。

微观结构测试使用场发射扫描电子显微镜(SEM)和X射线粉末衍射仪(XRD),对再生砖粉泡沫混凝土微观结构和组成成分进行分析。



(a) 试验过程实物图

(b) 试验过程示意图

图2 抗压强度试验过程(单位:mm)

2 试验结果

2.1 破坏模式

图3为不同水灰比下泡沫混凝土试件的破坏模式。从图3可以看出:随着浆体取代率的提高,试件受到破坏时完整度增加,其破坏程度有下降的趋势,表明试件抵抗受压变形的能力因再生砖粉的掺入而得到明显改善。当浆体取代率为0时,试件呈现出明显的脆性破坏。施加荷载的方向与裂缝方向非平行,二者存在一定的夹角。随着试验的进行,试件上的裂缝迅速发展,当受压试验结束时,试件的完整性严重下降,大范围的碎落出现在试件的边缘;当浆体取代率为4%时,由于再生砖粉的掺入,裂缝的宽度减小,其发展规律为自上而下;当再生砖粉浆体取代率为8%时,试件几乎不产生碎落破坏,具有良好的完整性;当再生砖粉浆体取代率为12%时,试件上的裂缝宽度较小、数量较少、其方向基本与加载方向平行,并且在4组试件中其完整度最高。此类现象表明:适量掺入再生砖粉可以明显改善泡沫混凝土的抗变形能力。而在采用浆体取代率较小的分组中,

其裂缝发展方向与加载方向垂直,如PR-0.40-4,原因为:在试件加载过程中,泡沫混凝土层间出现交错挤压现象,在试件的薄弱部位产生此类裂缝。

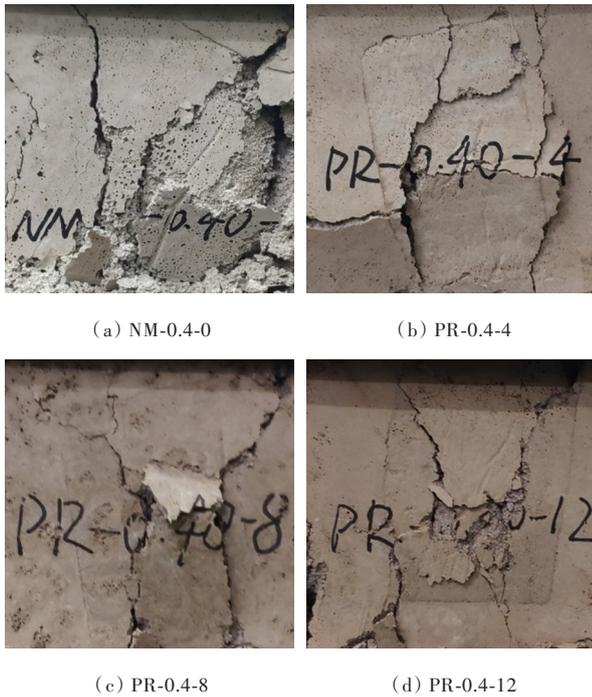


图 3 不同浆体取代率下泡沫混凝土的破坏模式

2.2 抗压强度

水灰比为 0.40 时,泡沫混凝土应力-应变曲线与再生砖粉浆体取代率的关系,如图 4 所示。

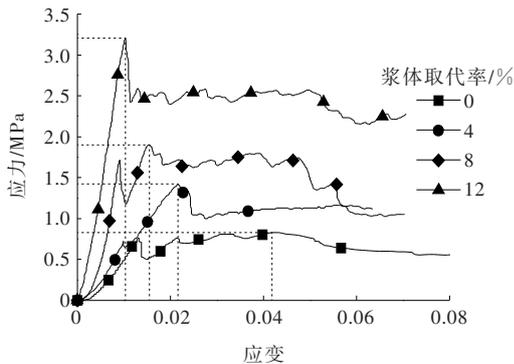


图 4 应力-应变曲线

从图 4 可知:掺入再生砖粉的泡沫混凝土的应力-应变曲线可以分为 4 个阶段,依次为:弹性变形阶段、应力振荡阶段、应变软化阶段和平台阶段(可见不同浆体取代率的 4 条曲线,在 4 个不同阶段分界点应变取值不同)。在弹性阶段,随着浆体取代率的增大,其对应的应力-应变曲线变得更加陡峭(浆体取代率越高,峰值越高,如 12%),应力对应的应变范围

也随之减小(即应变 x 取值较小);在应力振荡阶段,当浆体取代率从 0 增加到 12% 时,应力峰值对应的应变数值由 0.042 下降到 0.01(第一个应力峰值,浆体取代率 0 对应应变 $x=0.042$,浆体取代率 12% 对应应变 $x=0.01$),并且应力值的振荡幅度增大(即浆体取代率为 12% 时,应力取值较大,相对原点变化大);在应变软化阶段,应力值的变化较小(相对于第二峰值,平台阶段分界点与第二峰值应力差距较小,不如第一峰值与原点差值大);在平台阶段,应力值随再生砖粉浆体取代率的提高呈现减小的趋势(不同浆体取代率的曲线平台阶段对应不同的应力值大小,作 x 轴平行线交于 y 轴即可,4% 与 8% 曲线平台阶段预计比较接近,但按趋势延伸 8% 对应应力将大于 4%,12% 平台阶段应力值明显最大,0 平台阶段应力值明显最小),且在较小区域内上、下波动(与钢筋试验类似,并非所有曲线都有明显的平台阶段,应变软化阶段与平台阶段分界点有时也并不明显,但呈现大概趋势比较平缓,类似开口向下的抛物线,可预估分界点大致位置)。

试件抗压强度和在相同水灰比情况下相对于浆体取代率为 0 的抗压强度相对增长率如图 5 所示。

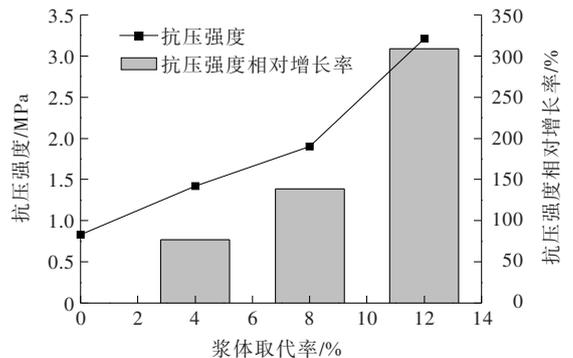


图 5 抗压强度曲线

从图 5 可以看出:泡沫混凝土试验组的抗压强度均大于空白组,是由于试验组掺入再生砖粉所致,且抗压强度随着浆体取代率的提高有提高的趋势。其中,PR-0.40-4、PR-0.40-8 和 PR-0.40-12 的抗压强度相较于 NM-0.40-0 分别提高了 71.08%、128.92% 和 286.75%,编号为 PR-0.40-12 试件的抗压强度达到了 3.21 MPa,接近编号 NM-0.40-0 的试件强度的 4 倍,此时泡沫混凝土的内部结构更加密实,且随着浆体取代率的提高该现象更加显著。是因为再生砖粉可以对泡沫混凝土的内部进行充填。浆体取代率的提

高意味着泡沫混凝土含水量的降低,泡沫混凝土浆体的稠度随之增加,因此其内部结构在试件成型后变得更为稳定。从微观的角度分析可知,随着再生砖粉浆体取代率的提高,反应生成的水化产物增多,其微观结构随着再生砖粉浆体取代率的提高更为致密,而在宏观的抗压强度试验中表现为抗压强度提高。

2.3 微观分析

(1) 水化产物

图6为不同再生砖粉浆体取代率下再生砖粉泡沫混凝土XRD图谱。

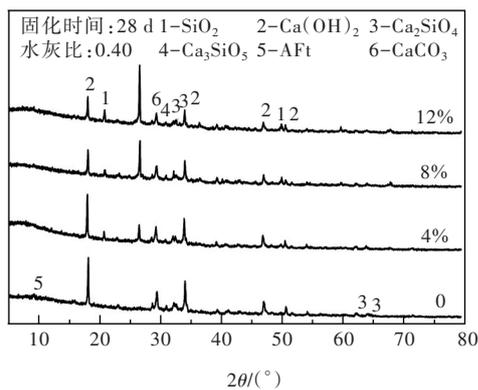


图6 不同再生砖粉浆体取代率的再生砖粉泡沫混凝土XRD图谱

由图6可以发现:①水泥基材料主要的水化产物为C—S—H(水化硅酸钙)凝胶,但C—S—H为凝胶而不是晶体状态,在XRD图谱中没有明显的特征峰;②浆体取代率为0的泡沫混凝土,其主要化学成分包括未发生水化反应的 SiO_2 以及水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。其中以 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量最高,因此其衍射峰最强;③图谱中出现了 CaCO_3 的衍射峰,一个可能原因是在取样过程中小部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生碳化所致,而其衍射峰不明显,表明碳化程度较低;④图谱中存在较弱的AFt的衍射峰,说明在不掺入再生砖粉时,泡沫混凝土中的钙矾石未全部参与化学反应;⑤ Ca_3SiO_5 和 Ca_2SiO_4 的衍射峰亦存在于图谱中,二者是水泥熟料的组成成分,可知在泡沫混凝土试样中仍含有水泥熟料 C_2S 和 C_3S 的颗粒未完全水化。

随着再生砖粉浆体取代率的提高, SiO_2 衍射峰值逐渐变大,因为再生砖粉自身含有大量的 SiO_2 ,随着砖粉使用量的增加,图谱中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的峰形变得尖锐,峰值降低,但对称性提高,原因是随着再生砖粉

浆体取代率的提高,再生砖粉泡沫混凝土的水泥含量在胶凝体系中逐渐降低,而再生砖粉在试验中的化学反应无 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成;另一个原因是水泥水化后的产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与再生砖粉中大量活性成分如 SiO_2 等再次发生水化反应, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 被消耗,而在最终产物中含量有所降低。另外 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体层间联结力较弱,是典型的层状晶体,因此试件 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量高的部位成为裂缝产生的源头,严重影响水泥的内部结构,由于再生砖粉中活性物质可以消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,泡沫混凝土内部结构因此变得更加致密。随着再生砖粉加入, Ca_2SiO_4 和 Ca_3SiO_5 峰形消失,表明再生砖粉的加入使水泥水化反应更加完全。

(2) 微观形貌

图7为水灰比为0.4,浆体取代率分别为0、4%、8%和12%时,再生砖粉泡沫混凝土微观形貌图。

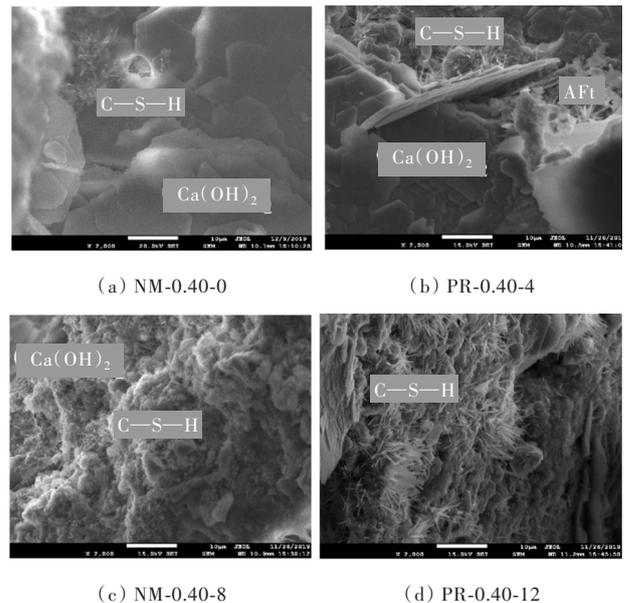


图7 不同浆体取代率下再生砖粉泡沫混凝土微观形貌图(放大2000倍)

由图7(a)可知:样品中存在少量C—S—H凝胶,呈现出针棒状,大量的氢氧化钙晶体呈现出片状,并且泡沫混凝土的反应产物之间的空隙较大,结构松散;图7(b)与图7(a)相比,也存在着一些孔隙,可以观察到空隙处有钙矾石晶体存在,针状的C—S—H凝胶附着在未完全水化的颗粒上,大量的氢氧化钙晶体层叠在一起,也可见水化产物之间存在大量孔隙,可知其间并没有紧密相接;图7(c)中可见胶凝材料的空隙中和未完全水化的颗粒表面,存在大量水化产物,胶凝材料颗粒之间连接紧密,且少许胶凝材

料的颗粒较为清晰;图7(d)与图7(a)、(b)、(c)对比可知,试件的整体结构最为密实,水化产物较为丰富,并且水化产物之间堆积最为紧密。

总体来说,随着再生砖粉浆体取代率的提高,泡沫混凝土孔壁结构的密实度有提高的趋势,泡沫混凝土水化产物的分布、层叠、附着、连接呈现出一定的规律,形成致密的微观网状结构,使气壁结构与气孔结构相连接,对微观孔隙起到一定的支撑作用。

3 结论

传统泡沫混凝土的强度一般较低,为了提高传统泡沫混凝土的强度,扩大泡沫混凝土的应用领域,本文基于浆体取代法,从宏观的力学性能和微观结构两个方面,研究再生砖粉浆体取代率对再生砖粉泡沫混凝土力学性能的影响,得到以下结论:

(1) 掺入再生砖粉能提高泡沫混凝土的力学性能。当试件的水灰比相同时,随着再生砖粉浆体取代率的提高,抗压强度有提高的趋势。当水灰比为0.40,浆体取代率为12%时,试件的抗压强度最大,达到3.21 MPa。

(2) 掺入再生砖粉能改变泡沫混凝土的水化产物和微观结构。当试件的水灰比相同时,随着浆体取代率的提高,再生砖粉的火山灰活性得到更好的发挥,导致反应生成的水化产物增多,从而消耗部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,进而提高了结构的受力性能;从微观结构角度分析,随着浆体取代率的提高,试件的水化产物更多、微观结构更加密实,原因是产生了微集料效应,使水泥的水化反应进行得更加彻底,试件的微小孔隙得到再生砖粉的填充,使试件的抗压强度相应提高。

参考文献:

- [1] CACHIM P B. Mechanical properties of brick aggregate concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(3): 1292-1297.
- [2] POON C S, CHAN D. Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base[J]. *Construction and Building Materials*, 2006, 20(8): 578-585.
- [3] 祁斐. 关于利用建筑废砖制备再生混凝土的若干问题[J]. *现代装饰(理论)*, 2013(11): 237.
- [4] 张欣, 叶剑锋, 周海兵, 等. 新型外墙保温隔热材料的试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2013, 32(5): 982-986.
- [5] 郑靓, 王新祥, 王元光, 等. 泡沫混凝土研究进展综述[J]. *广东土木与建筑*, 2018, 25(11): 21-26.
- [6] 何英敏. 泡沫混凝土屋面及楼地面保温施工浅谈[J]. *黑龙江科技信息*, 2017(5): 178.
- [7] 侯兴华, 何飞, 李健. 泡沫混凝土填芯砌块墙体技术经济分析[J]. *建筑节能*, 2015, 43(10): 124-127.
- [8] 陈桥梁, 谭睿. 浅析泡沫混凝土在建筑工程屋面保温中的应用及质量控制[J]. *建材发展导向*, 2018, 16(8): 25-27.
- [9] 丁杨, 周双喜, 王中平, 等. 屋面保温材料研究现状及应用综述[J]. *化工新型材料*, 2017, 45(10): 17-19.
- [10] 范安华, 伯冬冬, 李贺. 泡沫混凝土在建筑施工中的应用探讨[J]. *建筑技术开发*, 2019, 46(23): 38-39.
- [11] 郭雷, 关辉, 杨学春. 甲基硅烷类防水剂对泡沫混凝土抗冻性的影响[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2018, 39(12): 2075-2079.
- [12] 李天, 王智, 周涛涛. 泡沫混凝土的研究应用现状[J]. *混凝土*, 2019(1): 26-29.
- [13] 侯明显, 朱先昌, 李国青, 等. 泡沫混凝土的研究与应用概述[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(2): 410-416.
- [14] 宋国林, 王在杭, 于咏妍, 等. 泡沫混凝土材料的研究与应用[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2019(5): 56-58.
- [15] AMRAN Y H M, FARZADNIA N, ALI A A A. Properties and applications of foamed concrete: A review[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 101: 990-1005.
- [16] ALIABDO A A, ABD-ELMOATY A E M, HASSAN H H. Utilization of crushed clay brick in concrete industry[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2014, 53(1): 151-168.
- [17] 张长森, 刘学军, 苟和生, 等. 废砖制备轻质节能保温墙材的试验研究[J]. *新型建筑材料*, 2010, 37(10): 27-29, 52.
- [18] NACERI A, HAMINA M C. Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar[J]. *Waste Management*, 2009, 29(8): 2378-2384.
- [19] 葛智, 王昊, 郑丽, 等. 废黏土砖粉混凝土的性能研究[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2012, 42(1): 104-105, 108.
- [20] LIU S H, DAI R P, CAO K J, et al. The role of sintered clay brick powder during the hydration process of cement pastes[J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2017, 41(2): 159-165.
- [21] SCHACKOW A, STRINGARI D, SENFF L, et al. Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 62: 82-89.
- [22] 程海丽, 田海泽. 废粘土砖粉潜在活性探究[J]. *再生资源与循环经济*, 2014, 7(12): 25-27.
- [23] NACERI A, HAMINA M C. Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar[J]. *Waste Management*, 2009, 29(8): 2378-2384.