

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.023



开放科学(资源服务)标识码OSID:



砖混建筑垃圾资源化再生利用研究进展

焦杨¹, 方祥位¹, 申春妮², 田竞³, 黄晟⁴, 江文琛⁴

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆科技大学土木与水利工程学院, 重庆 401331;
3. 重庆高远建筑垃圾综合利用有限公司, 重庆 400039; 4. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 砖混结构的迭代更新将产生大量砖混建筑垃圾, 资源化利用砖混建筑垃圾能有效解决天然砂石资源短缺和减轻建筑垃圾堆填危害。砖混再生材料根据粒径分为砖混再生粗骨料、细骨料和粉料3类。砖混再生粗骨料可应用于再生混凝土和无机结合料稳定材料等; 再生细骨料常应用于再生砂浆、再生砌块和对土/固化土性能改良等方面; 砖混再生粉化学成分与水泥、石灰粉、粉煤灰等相似, 可通过离子交换、生成膨胀物质、火山灰反应和结晶等作用作为胶凝材料使用; 废砖再生粉具有良好的火山灰活性, 可作为原材料通过碱激发制备废砖再生粉基地聚合物胶凝材料, 具有良好的流动性、力学性能和高温性能, 反应机理依次主要为硅铝单体溶出、单体重构、缩聚和填充胶结等。今后应在砖混再生原材料性能、应用途径、再生产品力学特性及固化机理、处置及应用标准等方面深入研究。

关键词: 建筑垃圾; 资源化利用; 砖混再生材料; 废砖粉基地聚合物; 力学特性

中图分类号: X705 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-14

Research progress on recycling and utilization of brick-concrete construction waste

JIAO Yang¹, FANG Xiangwei¹, SHEN Chunni², TIAN Jing³, HUANG Sheng⁴,
JIANG Wenchen⁴

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, P. R. China;
3. Chongqing Gaoyuan Construction Waste Recycling Comprehensive Utilisation Co., Ltd, Chongqing 400039, P. R. China; 4. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: The iterative renewal of the brick-concrete structure will produce a large amount of brick-concrete construction waste, and the resource utilization of brick-concrete construction waste can effectively solve the

收稿日期: 2024-10-16

基金项目: 重庆市建设科技计划(城科字 2024 第 2-2 号); 重庆英才创新创业示范团队项目(cstc2024ycjh-bgzxm0012); 中央高校基本科研业务费(2023CDJKYJH105); 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司科学研究项目(K2023K124A)

作者简介: 焦杨(2001-), 女, 主要从事建筑固废再生利用研究, E-mail: 2483796455@qq.com。

方祥位(通信作者), 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: fangxiangwei1975@163.com。

Received: 2024-10-16

Foundation items: Chongqing Construction Science and Technology Plan Project (No. City Science-2024-2-2); Chongqing Talent Innovation and Entrepreneurship Demonstration Team Projects (No. cstc2024ycjh-bgzxm0012), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2023CDJKYJH105); Scientific Research Project of Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd (No. K2023K124A).

Author brief: JIAO Yang (2001-), main research interest: recycling of building solid waste, E-mail: 2483796455@qq.com.

FANG Xiangwei (corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: angxiangwei1975@163.com.

shortage of natural sand and gravel resources as well as alleviate the harm of construction waste landfill. The brick-concrete recycled materials are divided into three categories according to the particle size: brick recycled coarse aggregate, fine aggregate and powder. Brick-concrete recycled coarse aggregate can be used as aggregate for recycled concrete and base course of road base project; recycled fine aggregate is often used in recycled mortar, recycled blocks and improved performance of soil /cured soil and so on. The chemical composition of brick-concrete recycled powder is similar to cement, lime powder, fly ash, etc., which can be used as cementitious materials through ion exchange, generation of expanded substances, pozzolanic reaction and crystallization, etc. Waste brick recycled powder has good pozzolanic activity, which can be used as raw materials for the preparation of waste brick recycled powder base polymer cementitious materials through alkali excitation, which has good fluidity, mechanical properties and high-temperature performance, and the reaction mechanisms primarily involve sequential processes, including the leaching of silica-alumina monomers, monomer restructuring, polycondensation, and cementation through filler incorporation Future research should prioritize in-depth investigations into the performance characteristics of recycled brick-concrete materials and their application pathways, mechanical properties of recycled products and solidification mechanisms, as well as the formulation of disposal and application standards.

Keywords: construction waste; resource utilization; brick-concrete recycled material; waste brick based geopolymer; mechanical properties

基础设施建设的快速发展伴随着大量建筑物的拆除和新建,在此过程中产生的建筑垃圾高达城市垃圾总量的 30%~40%。大量建筑垃圾的产生会造成占用土体、污染土壤、水体和空气、影响市容等恶劣影响,因此,建筑垃圾的治理问题受到社会的广泛关注。从 20 世纪末开始,中国相继出台了一系列关于建筑垃圾处理的政策,提出到 2025 年,建筑垃圾综合利用率要达到 60%,将建筑垃圾资源化处理的战略地位提升到了前所未有的高度^[1]。

建筑垃圾主要分为建筑施工垃圾、建筑装修垃圾和建筑拆除垃圾 3 类。目前拆除建筑主要包括混凝土结构、砖混结构和砖(石)木结构等,形成了混凝土、砖块、碎石、瓦等拆除建筑垃圾。在建筑垃圾资源化利用方面,日本和欧美国家走在前列,特别是拆除混凝土结构处理技术相对成熟,再生品质较高,利用率高可达 90% 以上^[2]。砖混结构在全球占比不大,但在中国住宅和办公用房中的占比相对较高,其中城市中占比约为 28%,乡镇中占比约为 42%^[3]。砖混结构建筑常用砖块分为烧结砖和非烧结砖两种,烧结砖制作需经过高温焙烧,有烧结黏土砖、烧结页岩砖、烧结煤矸石砖和烧结粉煤灰砖等;而非烧结砖制作过程主要是成型和养护,有灰砂砖、粉煤灰砖、炉渣砖、水泥砖和混凝土空心砌块等,二者在成分结构上存在较大差别。中国已建成的砖混建筑多以烧结黏土砖为主。虽然中国于 1992 年便提出“推行禁止使用烧结黏土砖,提倡使用新型节能墙体材料”的政策,也取得较大成就,但由于烧结黏土砖具有原料易得、生产简易、成本极

为低廉、投资少利润大等特点,根据《国务院办公厅关于进一步推进墙体材料革新和推广节能建筑的通知》(国办发[2005]33 号)可知,直至 2010 年左右,中国每年仍有几千亿块烧结黏土砖被生产和应用。砖混结构具有抗震性差、可建层数低、稳定性差等缺点。随中国城镇化发展,强度更高、稳定性更强的钢筋混凝土结构和钢结构等结构将逐步将其替代。砖混结构迭代更新将产生大量建筑垃圾,主要包含废弃混凝土和废砖块等。

砖混建筑垃圾经破碎后可加工成再生粗细骨料,可用于生产相应强度等级的再生混凝土、再生砂浆、再生胶凝材料或制备诸如砌块、墙板、地砖等建材制品,粗细骨料添加固化类材料后,也可用于公路路面基层等^[4-12]。资源化利用砖混建造垃圾可有效解决天然砂石资源短缺和减轻建筑垃圾堆填危害,有助于资源节约和环境协调。

总体上,中国砖混建筑垃圾数量巨大,资源化利用技术和水平有待提高。可以预计未来一定时期内将有大量砖混建筑结构拆除,拆除砖混结构的再生品质相对混凝土结构再生品质较差,对砖混建造垃圾的资源化利用技术将被更加重视和发展。笔者对砖混建筑垃圾物理化学性质、再生粗骨料、细骨料和粉料特性及应用等方面进展进行总结分析,为砖混建筑垃圾资源化利用提供参考。

1 砖混再生材料理化性质

1.1 化学组成

砖混建筑垃圾主要物质成分为砖渣、混凝土渣

块、陶瓷、钢筋以及少量轻物质等,其化学成分主要为SiO₂、Al₂O₃、CaO、Fe₂O₃等氧化物,通过破碎、筛分、水洗等工艺对砖混建筑垃圾进行处理可得到可再利用率高的砖混再生材料。表1为砖混再生材料、废弃混凝土再生材料和粉煤灰的化学成分对比^[13-15]。

与混凝土再生材料相比,砖混建筑垃圾中SiO₂较大,CaO含量较少,砖混建筑垃圾所含火山灰活性成分(SiO₂、Al₂O₃)含量达到总量的2/3,远超混凝土再生材料中火山灰活性成分含量;与粉煤灰相比,二者化学组成相似^[16]。

表 1 再生材料化学成分表
Table 1 Chemical composition induction of recycled materials

再生材料	化学成分/%										
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Mn ₂ O ₃
砖混再生材料 ^[13]	4.29	50.00	21.8	7.91	2.22	1.04	0.70	3.99	1.01	0.15	0.13
混凝土再生材料 ^[13]	25.97	37.44	5.05	2.38	3.83	0.53	0.17	0.94	0.21	0.04	0.07
砖混再生材料 ^[14]	7.84	58.52	19.03	5.90	3.03	0.30	1.30	2.881	0.77		
混凝土再生材料 ^[14]	80.72	10.28	3.04	1.89	1.80	0.75	0.27	0.43	0.39		
砖混再生材料 ^[15]	9.26	58.37	15.06	6.12	2.74	1.04					
粉煤灰 ^[15]	4.41	54.16	29.98	5.68	0.89	1.12					

对废弃砖块再生粉进行X射线衍射(XRD)分析(图1),主要矿物相为石英,次要相为长石、赤铁矿、透辉石和莫来石^[17-20],Zhao等^[21]发现废砖粉含有较多α-SiO₂和一定量的玻璃体,具有潜在火山灰活性。Tironi等^[22]通过强度活性指数法测试7种不同来源的煅烧黏土(5种高岭土和2种膨润土)的火山灰活性均大于75%,进一步说明煅烧黏土火山灰活性较好。因此,砖混再生粉可作为水泥替代品应用于水泥基材料或作为地聚合物胶凝材料的原材料。

点,这些特点导致MRCA混凝土的力学性能偏低,此外,再生骨料表面裹覆的旧砂浆也是造成其性能缺陷的原因之一,需对砖混再生骨料进行再处理^[4, 23-33]。

砖混再生细骨料,通常认为粒径0.075~2 mm,含有黏土砖、旧砂浆、瓦碎粒等,性质与再生粗骨料相似,具有空隙率高、吸水率大等物理特征^[34]。

砖混再生粉料,通常认为粒径为0~0.075 mm,扫描电镜观察发现,粉体颗粒表面粗糙,边缘处存在锐利尖角、凹槽和缺口^[13],在更高放大倍数下,还可观察到颗粒表面附着大量更为细小的粉体和密集分布、交错纵横的裂隙,裂隙的存在是粉体吸水率上升的主要原因^[16]。

2 砖混建筑垃圾再生利用

砖混建筑垃圾再生骨料主要成分为混凝土和烧结黏土砖,混凝土骨料性质较好,可作为骨料单独使用,而黏土砖骨料性质较差,无法作为骨料单独使用,须与性质较好的骨料混合使用,若单独使用可将其进行研磨作为胶凝材料进行使用。

2.1 砖混再生粗骨料利用

砖混再生粗骨料中黏土砖含量高,黏土砖再生骨料具有表观密度低,吸水率和压碎指标高的特点,因此砖混再生骨料同样存在上述不足,直接利用会影响再生产品的性能,经过改性后可更好地应用于再生混凝土和无机结合料稳定材料中。

2.1.1 再生混凝土

砖混再生骨料的吸水率通常为8%~15%,压碎指标通常大于30%,达不到规范对再生粗骨料性能要求^[26],会影响再生混凝土的力学性能。在可加工性上,随砖混再生粗骨料掺量增加,再生混凝土

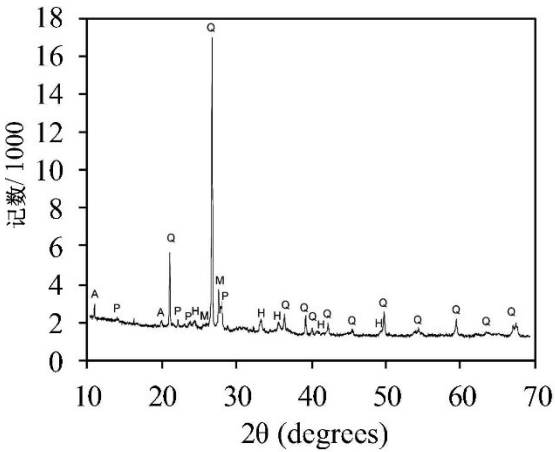


图 1 废砖粉 XRD 分析图像^[18]
Fig.1 XRD analysis of waste brick powder^[18]

1.2 物理特征

根据再生用途和相关标准规程确定,不同粒径的废弃砖混再生材料物理特征不同。

砖混再生粗骨料(Mixed Recycled Coarse Aggregate, MRCA),通常认为粒径大于2 mm,主要由碎砖、碎石以及旧砂浆组成,骨料颗粒多为多边形,密度与普通骨料相比较低^[23]。MRCA具有高吸水性、高压碎性、高空隙率以及低表观密度等特

可加工性逐渐降低,这是因为砖混再生粗骨料的表面会附有大量微粉,随砖混再生骨料掺量增加,微粉含量也随之增大,且砖混再生粗骨料裂纹较多,导致骨料的吸水率增高,降低混凝土的坍落度和流动度^[27-28]。在力学性能方面,砖混再生骨料对不同类型的混凝土的影响不同。用来制备轻质骨料混凝土时,砖混再生粗骨料对混凝土强度有积极影响,这是因为砖混再生粗骨料与陶粒轻质骨料相比具有更高的强度^[27];用来制备普通硅酸盐混凝土时,随砖混再生骨料含量增大,混凝土强度逐渐降低^[29]。这是因为砖混骨料强度与混凝土用骨料相比更差,且由于破碎工艺等原因,在生产过程中再生骨料表面会产生微裂纹,进一步提高砖混骨料的吸水率和压碎指标。除了砖混再生骨料的吸水率、强度,研究还发现提高砖混再生骨料中针片状颗粒的含量可提高再生混凝土的密实度^[30]。

为了改善再生混凝土的性能,通常对砖混再生粗骨料进行配合比优化和添加外加剂^[30]。与天然骨料混合使用时,随天然骨料掺量增加,再生混凝土强度先增大后减小^[31];与天然骨料或混凝土再生骨料混合使用时,随混凝土再生骨料掺量增加,再生混凝土强度增加^[32]。不同种类的外加剂对砖混再生混凝土的效果不同,研究发现加入SK-3引气减水剂使再生骨料混凝土内部产生大量微小气泡,导致再生混凝土强度降低^[32];再生混凝土加入长葛市海运化工材料厂生产的液体胶结剂后,其强度随胶结剂掺量增加先增大后减小^[33]。

目前对砖混再生骨料颗粒本身的性能改进研究还较缺乏,可借鉴其他骨料的改良方法,利用物理、化学、生物等方法对其进行强化^[24-25],降低砖混再生粗骨料的吸水率、压碎指标等性质,提高再生混凝土的性能。

2.1.2 无机结合料稳定材料

与混凝土用再生骨料标准相比,无机结合料稳定材料用再生骨料标准相对较低^[35],故砖混再生粗骨料可作为被稳定材料制备稳定材料大量应用于道路基层和底基层。砖混再生骨料稳定材料常用结合料为水泥和粉煤灰,与天然骨料、废混凝土再生骨料相比,其具有更多微孔结构,可与结合料形成很好的吸附界面体系,但砖混再生骨料本身强度较低,需要的结合料掺量更多,综合考虑结合料掺量以5%~6%为宜^[36]。微观结果表明,水泥中熟料矿物 C_2S 、 C_3S 水化产生CSH凝胶,起粘结骨料、填充微孔隙、优化孔结构分布作用,随着水泥掺量的增加,再生水稳材料强度逐渐增大;粉煤灰有利于砖混再生水稳材料的后期强度发展,随着养护时间

的增长,粉煤灰中 Al_2O_3 、 SiO_2 等活性物质发生二次水化反应,生成凝胶物质使砖混再生水稳材料无侧限抗压强度不断增大^[37]。

另外,研究表明,不同级配设计的砖混再生粗骨料稳定材料水稳性不同。级配不同的试样,相同次数干湿循环下,细颗粒较多的试样受干湿循环的影响更大^[38]。微观结果表明,干湿循环使填充于土体孔隙间的柱状晶体的溶解和流出,分布密集度减低,最终呈无序排列的针状分叉,结构破坏^[38]。为提高砖混再生粗骨料基层底基层的水稳性与力学性能,可对其进行防渗处理,使用水泥和外加剂等方法进行改良^[39]。

2.2 砖混再生细骨料利用

砖混再生细骨料与再生粗骨料类似,具有表观密度低,吸水率高等特点,主要应用于再生砂浆、再生砌块或作为固化不良土体的骨架提高固化土性能等。

2.2.1 再生砂浆和再生砌块

砖混再生细骨料的密度低于标准砂、而空隙率、压碎指标、坚固性指标和需水量比等均大于标准砂。砖混再生细骨料对再生砂浆性能的影响与其对再生混凝土性能影响相似:随砖混再生细骨料替代率增大,再生砂浆的流动性降低,抗弯强度稍增大后明显减小,抗折强度则持续降低^[14, 40-42]。也有研究表明,保持再生砂浆稠度不变时,再提高再生骨料掺量,再生砂浆的抗压和抗折强度变化不大^[34]。砖混再生细骨料替代天然砂制备地聚物砂浆时,随砖混再生细骨料替换率增加,力学性能降低,50%替换率时抗压强度与普通砂浆相近^[43]。总体上,与标准砂、废弃混凝土再生细骨料相比,砖混再生细骨料用于再生砂浆时会降低砂浆强度,其原因可能是砖混再生细骨料表面存在无法处理掉的旧砂浆,拌合时由于旧砂浆与新砂浆之间的物料模量差,二者之间会产生界面过渡,强度不均匀。

利用砖混细骨料代替部分传统细骨料可生产再生砌块,但砌块强度有所降低^[44-45]。砌块形状也会影响砌块强度,研究表明影响砌块综合性能的因素中孔洞率的影响程度最大,故在今后的研究中可考虑形状对砖混再生砌块性能的影响^[46]。

2.2.2 砖混再生细骨料提高土/固化土的力学性能

砖混再生细骨料掺入细粒土或固化细粒土中,可在土体或固化土体中起骨架作用,提高其力学性能。对不同土体,掺入砖混再生骨料改良效果不同。红黏土作为高液塑限土,掺入砖混再生细骨料可改变红黏土的级配,减少黏土颗粒的弱结合水,使土中的自由水含量上升,从而快速降低了红黏土

的液限、塑限含水率,进而使红黏土的最优含水率降低,最大干密度增大^[47]。黄土作为是湿陷性土,掺入砖混再生细骨料可使黄土原有的架空结构发生改变,形成新的“镶嵌型”结构,再生骨料颗粒与黄土颗粒之间的胶结作用加强,阻止剪切破坏的抵抗反力增强,从而提高抗剪强度;研究表明黄土的抗剪强度随着再生骨料含量和粒径增加而增大,最优掺量约为 60%^[48]。膨胀土作为高水敏感性土,掺入砖混再生骨料较少时,骨料悬浮在土体中,几乎没有改良效果;当骨料掺量为 40%~50% 时,土体与骨料颗粒相互挤密,含水量增加则会促进颗粒之间的滑移,土体工程特性显著提高;骨料掺量超过 50% 后,对土体的改良效果不再提高^[49-50]。

土体中仅掺入砖混再生骨料主要起骨架作用,对土体的改良效果有限,为了提高效果,常与传统的石灰或粉煤灰等胶凝材料结合使用。随着龄期的增长生石灰和粉煤灰发生化学反应后生成的胶凝物质逐渐包裹再生细骨料和土颗粒,降低颗粒自由度,随胶凝材料的胶凝作用增强,土体性质提高^[47]。

2.3 砖混再生粉利用

砖混建筑垃圾的化学组成中火山灰活性较高,可作为粉煤灰的替代品。因此,可利用砖混再生粉作为胶凝材料或作为地基聚合物胶凝材料的原材料。

2.3.1 砖混再生粉胶凝材料

砖混再生粉与水泥、石灰粉、粉煤灰等胶凝材料化学相似,其 SiO_2 和 Al_2O_3 含量较高,具有一定的火山灰活性,能发生火山灰反应^[16],可作为胶凝材料。但砖混再生粉胶凝作用不如水泥等胶凝材料,通常与水泥、石灰粉混合使用^[51]。使用时,由于砖混再生粉颗粒表面粗糙,边缘存在锐利尖角、凹槽,随其掺量增加,混合胶凝材料流动性降低,需水量增加,制得净浆试件强度随掺量增加而下降^[52]。提高砖混再生粉细度可提高净浆试件强度,一方面细度使化学反应更充分,另一方面使其具有更好的填充效果。将砖混再生粉和石灰粉分别与水泥混合发现,砖混再生粉有助于养护后期强度增加,石灰粉则主要在养护前期发生反应;在砖混再生粉和水泥混合材料中加入石灰粉,可发现石灰粉可促进砖混再生粉的水合作用^[53-56]。

砖混再生粉作为胶凝材料时,其作用机理和反应产物与水泥、粉煤灰相似,主要包括离子交换作用、生成膨胀物质、火山灰反应和结晶等作用^[57-63]。

1) 离子交换作用

游离的 Ca^{2+} 与双电层中的 Na^+ 、 K^+ 等弱金属离

子发生交换,颗粒外围双电层厚度变薄,土体凝聚力增强,水稳定性增高,如图 2 所示。此外 Ca^{2+} 的正电荷与聚集体颗粒表面的负电荷平衡,聚集体之间的连接更为紧密,整体的密实度提高。

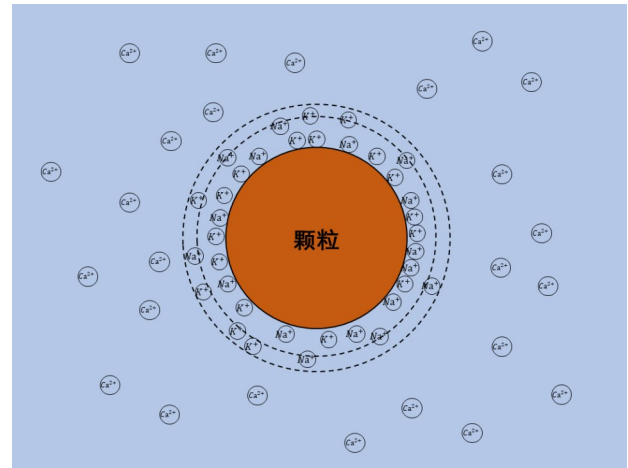
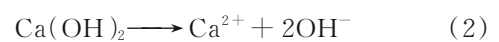
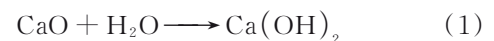


图 2 颗粒表面双电层离子交换

Fig.2 Particle surface double layer ion exchange

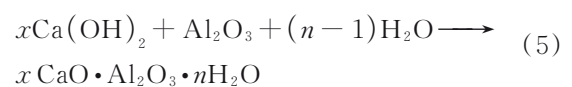
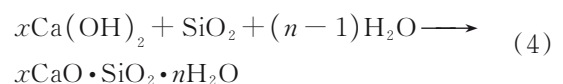
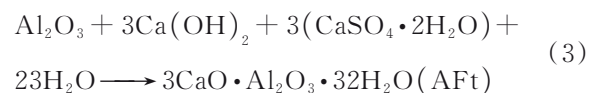
2) 生成膨胀物质

养护早期,砖混再生粉中的游离 CaO 与水反应生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,如式(1), $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 可填充孔隙,使体积增大。进一步发生式(2)的反应,生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 进一步电离生成 Ca^{2+} 和 OH^- 提高土体的 PH 值,使其环境呈强碱性,并与土中矿物成分发生反应。



3) 火山灰反应

养护初期,发生式(3)反应,生成针状的钙矾石 (AFt),使结构更为致密;养护中后期,式(3)、式(4)、式(5)反应均发生,钙矾石含量增多,生成棒状的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶填充物,相邻块体之间内聚力增强,结构更为致密、均匀,且其反应中生成的 C-S-H 和 C-A-H 产物可促进水泥初期水化反应。



4) 结晶析出

反应生成物质浓度饱和时晶体在孔隙裂缝中结晶析出,起到填充孔隙和胶结作用,增加颗粒之间的黏聚力。

砖混再生粉中的 SiO_2 和 Al_2O_3 大部分以玻璃体形式存在,晶相较少,化学性质稳定,作为胶凝材料

时只发生部分火山灰反应,若通过碱激发将其破坏,可使其反应更加充分,制成砖混再生粉基地聚合物。

2.3.2 废砖再生粉基地聚合物

废砖再生粉具有良好的火山灰活性,可作为主要原材料通过碱激发制备废砖再生粉基地聚合物胶凝材料^[64-67]。废砖粉基地聚合物具有较好的流动性、抗压强度、抗弯与劈裂抗拉和高温性能等,可制备混凝土、砌块和砂浆,以及固化不良土体等。

1) 流动性

地聚合物的流动性较好时可在固体表面形成均匀的薄层,增强平整度和耐磨性,在工程应用中具有重要意义。水固比、Si/Al 比和 $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 比对废砖粉基地聚合物流动性有重要影响。

废砖粉基地聚合物与其他基材地聚合物相比,一般需要更高的水固比。废砖粉表面多孔,棱角众多,在反应发生前可快速吸收混合物中的水分,减少混合物中游离水量,且其颗粒表面粗糙不利于地聚合物流动。保持流动性不变时,随废砖粉掺量增加,地聚合物需水量增大,初凝时间显著降低^[68-69]。

Si/Al 比以及 $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 比增加可提高废砖粉基地聚合物的流动性,图 3 给出了 Si/Al 比与流动直径的关系^[64, 70]。由图 3 可知,当水固比一定时,地聚合物的流动性随着 Si/Al 以及 $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 值的增加而增加。当 Si/Al 比恒定时,随 $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 比增大,可溶性 SiO_2 含量增加,地聚合物中的 Si-O-Si 键以及 Al-O-Al 键在凝胶化前破裂;同时, Na_2O 含量增加会产生更多可破坏原材料中 Si-O-Al 键和 Si-O-Si 键的羟基,地聚合物的流动性提高^[71]。

2) 抗压强度

废砖粉基地聚合物抗压强度是力学性能最重

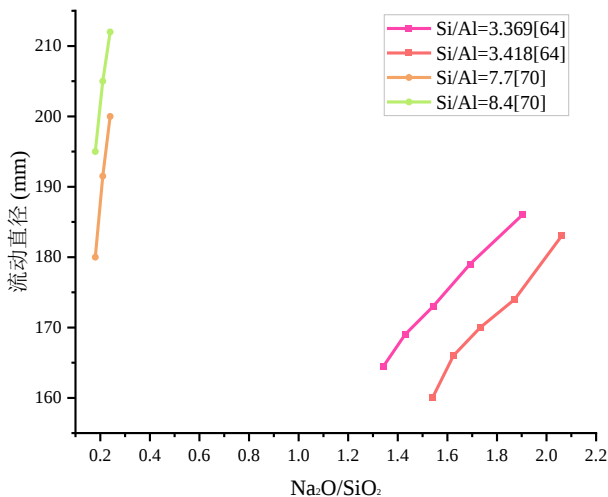


图 3 Si/Al 比与流动直径关系曲线

Fig.3 Curve of the relationship between Si/Al ratio and flow diameter

要的指标,受原材料 Si/Al 比、原材料种类与活性、碱激发剂浓度等多种因素影响。

Duxson 等^[71]认为地聚合物原材料的 Si/Al 比存在界限值, Si/Al 比小于该值,抗压强度随 Si/Al 比增加而增大;当 Si/Al 比超过该值,抗压强度不再变化。Si/Al 比小于 1.65 时,地聚合物内部可见众多大孔隙,试样结构松散,随 Si/Al 比增加试样逐渐密实, Si/Al 比超过 1.65,试样的微观结构逐渐均匀, Si/Al 比不再是影响地聚合物强度的主要因素^[71],如图 4 所示。研究还发现 Si/Al 比对地聚合物抗压强度的影响主要发生在养护前期, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 比一定, 7 d 抗压强度变化规律一致, 28 d 抗压强度变化规律则不明显,如图 5 所示^[70]。

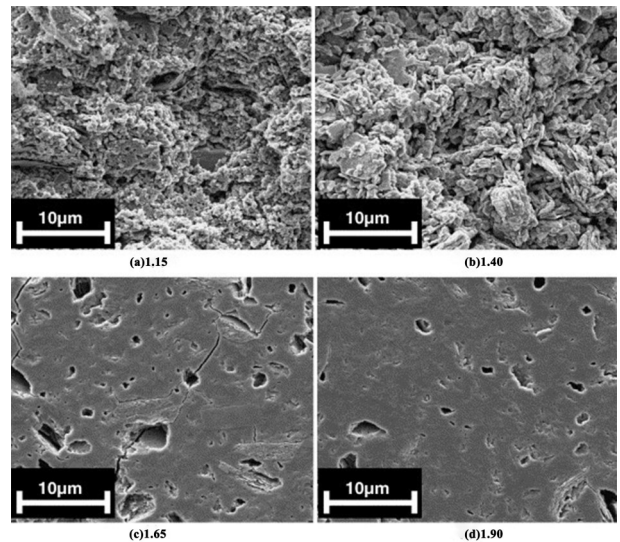


图 4 地聚合物 SEM 显微照片, Si/Al 比^[71]

Fig.4 SEM Micrograph of Geopolymer, Si/Al ratio^[71]

地聚合物原材料种类与活性是影响地聚合物抗压强度的重要因素。研究表明^[72-73],胶凝材料活性主要受比表面积、粒度分布、无定形相含量和可溶性分数控制,通常来说高炉矿渣活性最好,其次为粉煤灰、偏高岭土和废砖粉,废砖和废混凝土材料活性相似。

废砖粉基地聚合物 7 d 抗压强度较低,一般为 10 MPa 左右,强度发展主要发生在养护后期, 28 d 抗压强度一般在 30 MPa 左右,但关于废砖粉基地聚合物养护后期强度发展较快的微观原因目前尚未明晰。现有研究通常将废砖粉与其他胶凝材料混合制备复合地聚合物材料。图 6 汇总了废砖粉(B)分别与粉煤灰(FA)、高炉矿渣(GGBS)、混凝土废料(CW)和偏高岭土(MK)组成复合地聚合物的抗压强度。

从图 7 可知,砖混再生粉与高炉矿渣和粉煤灰复合基地聚合物强度较高,其次为偏高岭土和混凝

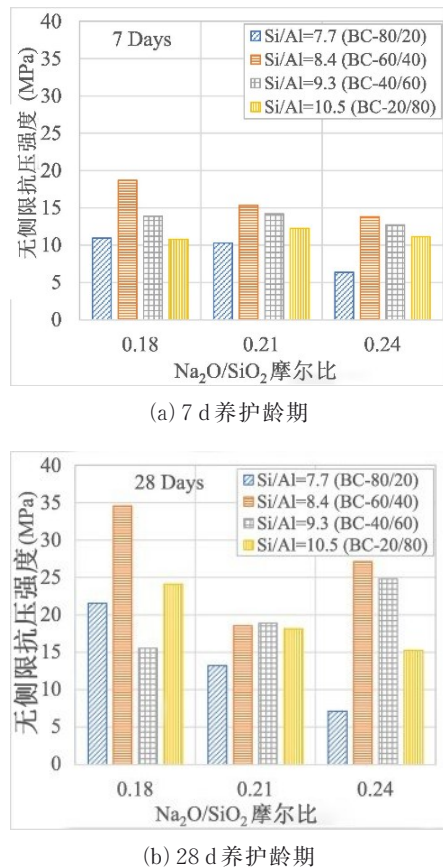
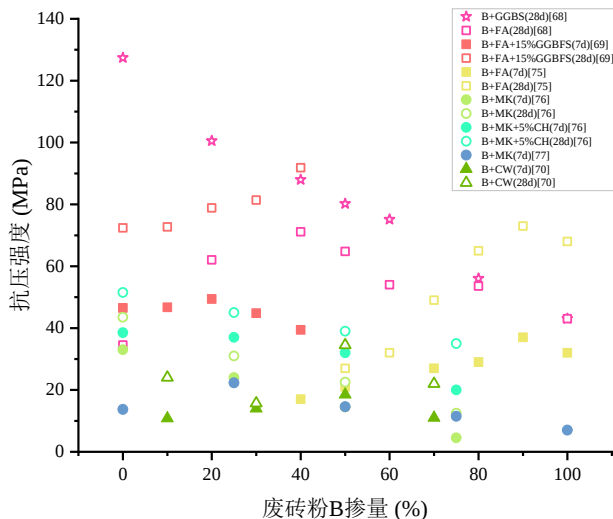
图5 抗压强度与 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 关系^[70]Fig.5 The relationship between compressive strength and $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ as well as $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ^[70]

图6 废砖粉复合地聚合物抗压强度汇总

Fig.6 Compressive Strength of Composite Geopolymer Made from Waste Brick Powder

土废料。随废砖粉掺量增加,废砖粉-高炉矿渣复合地聚合物抗压强度减小^[68],废砖粉对地聚合物强度起消极作用,即废砖粉火山灰活性比高炉矿渣低,二者化学成分也验证这一点^[74]。废砖粉-粉煤灰基地聚合物材料抗压强度先增大后减小^[68, 75],废砖粉和粉煤灰可相互影响,二者存在最优配比,100%废

砖粉基地聚合物抗压强度小于100%粉煤灰基地聚合物。对废砖粉-偏高岭土复合地聚合物抗压强度变化趋势研究略有争议,文献[76]表明强度逐渐降低,文献[77]表明强度变化趋势为先增加后减小^[76-77]。废砖粉-混凝土废料复合地聚合物抗压强度先增大后减小,再向混合原材料中加入粉煤灰或高炉矿渣可使抗压强度显著提高^[70]。以上现象说明:废砖粉与粉煤灰、偏高岭土和混凝土废料之间存在协同作用,与高炉矿渣之间协同作用不明显。

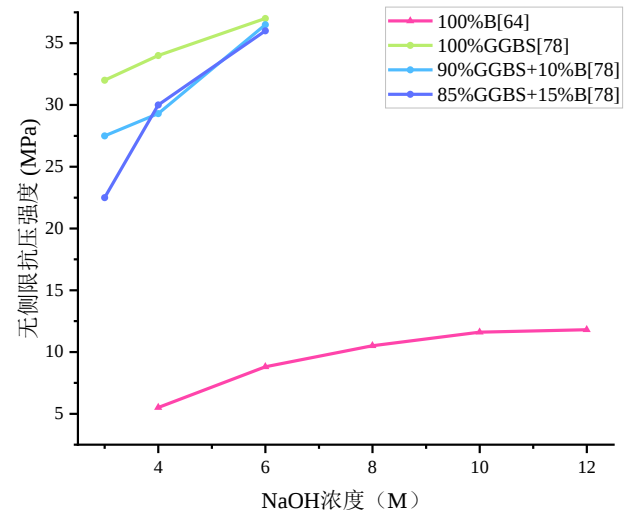


图7 NaOH 浓度对地聚合物抗压强度的影响

Fig.7 The relationship curves between NaOH concentration and the compressive strength of geopolymer

碱激发剂浓度越大,可使原材料中 Si、Al 单体溶出越充分,地聚合物物理力学性能越好。图7为 NaOH 浓和地聚合物抗压强度关系曲线。随 NaOH 溶液浓度增大,地聚合物抗压强度增大。废砖粉对高炉矿渣地聚合物抗压强度起消极作用,由左侧3条折线可以得 NaOH 浓度为 4 mol/L 时,15% 废砖粉复合地聚合物强度要稍大于 10% 废砖粉复合地聚合物,即随着 NaOH 溶液浓度增大,充分破坏废砖粉中以玻璃体形式存在的无定形相,地聚合反应更充分^[78]。

3) 抗弯与劈裂抗拉强度

废砖粉基地聚合物抗弯和劈裂抗拉强度较低,通常需要采用 PVC 纤维、玄武岩纤维、树脂等手段进行改良。废砖粉复合地聚合物抗弯强度随废砖粉掺量的变化规律与其抗压强度相似。废砖粉-高炉矿渣基地聚合物抗拉强度随着废砖粉掺量增加而减小^[68];废砖粉-粉煤灰和废砖粉-偏高岭土复合地聚合物抗弯强度均随废砖粉掺量增加先增大后减小^[77]。这些结果说明废砖粉与粉煤灰、偏高岭土之间存在协同作用,与高炉矿渣之间协同作用不明显。

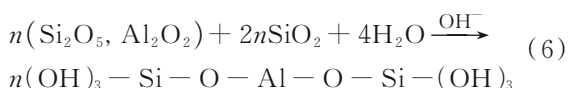
4) 高温性能

地聚合物由硅氧四面体和铝氧四面体组成的三维网络状结构使其具有良好的耐高温性能,且煅烧粘土作为高温稳定材料,由其制成的地聚合物具有良好的耐高温性能。Giannopoulou 等^[17]研究表明,在超高温(>800℃)下废砖粉基地聚合物由于凝胶聚合物烧结产生自愈合现象,使废砖粉基地聚合物抗压强度随环境温度升高降低后增大,地聚合物表面因高温产生的裂纹也逐渐扩大后消失。

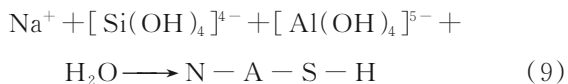
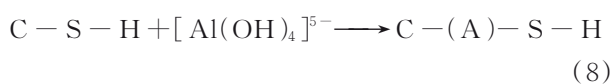
综上,废砖粉基地聚合物具有较好的流动性、力学性能和高温性能,这些优良特性取决于地聚合物原材料和碱激发剂的性能及其复杂的反应。废砖再生粉 CaO 含量小于 16.7%,属于低钙体系^[79],低钙地聚合物反应机理主要包括 Si、Al 单体溶出、单体重构、缩聚和填充胶结等^[80-89]。

① Si、Al 单体溶出。硅铝酸盐中高能态的铝氧键(—Al—O—)、硅氧键(—Si—O—)等共价键受 OH⁻离子作用断裂,从表面释放出可自由移动的 Si 单体[Si(OH)₄]⁴⁻和 Al 单体[Al(OH)₄]⁵⁻,这些单体进一步参与砖混再生粉地聚合物中无定形凝胶的形成。

② 单体重构。如式(6)所示,Na⁺与[Si(OH)₄]⁴⁻和 Al[(OH)₄]⁵⁻发生缩聚反应,形成单聚体。



③ 缩聚。如式(7)~式(9)所示,单聚体累积,由低聚态向高聚态转化,最终形成三维网络状结构 C-A-S-H 和 N-A-S-H 凝胶。



④ 胶结填充。凝胶产物增多,填充砖混再生粉颗粒之间空隙,胶结颗粒,提高结构密实度和强度。

2.4 砖混再生材料工程应用

中国发布了《混凝土用再生粗骨料》(GB/T 25177—2010)、《再生混凝土结构技术标准》(JGJ/T 443—2018)等一系列标准^[90]。砖混再生骨料通常达不到Ⅰ类再生粗骨料要求,但随砖占比变化能满足Ⅱ类、Ⅲ类再生粗骨料要求。故目前对砖混再生混凝土实际工程应用较少,多为混凝土再生骨料和少砖渣建筑垃圾再生混凝土工程应用。为弥补混凝土用砖混再生骨料的相关分类标准缺失,部分学者以砖含量为主要分类控制指标,以表观密度、吸

水率和压碎指标为技术指标,将砖混再生骨料分为Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ类,便于实际工程参考应用^[91-92]。将砖混建筑垃圾中的混凝土和黏土砖进行分离再分别利用也是再生利用砖混建筑垃圾的途径之一。其中混凝土骨料性质较好,可作为再生骨料单独使用;黏土砖骨料性质较差,须与性质较好的骨料混合使用,或可将其研磨成粉作为胶凝材料进行使用。

砖混再生骨料稳定材料在实际工程中的应用较多,如杭州市凤起东路便道钱江新城市政园林建设有限公司砖厂内部分道路^[93]、郑州市二七区景中路(萍湖路—南四环)道路工程^[94]、北京市房山区某公路^[95]、北京建工资源循环利用股份有限公司某项目再生骨料水泥稳定无机料试验路^[96]等。上述工程均使用砖混再生骨料稳定基层,结合料为水泥或石灰和粉煤灰,工程建成至今在各项性能指标上表现良好,没有出现任何工程质量问题,进一步证明再生料运用到道路工程中的可行性。

砖混再生骨料作为绿色低碳材料替代天然骨料应用于实际工程中,碳排放降低,且显著降低天然骨料开采量及填埋场占用土地,具有较显著的环境效益。但为提高再生材料性能增加水泥的用量会导致生产水泥阶段产生等效碳排放有所增加,且水泥生产和运输是等效碳排放最多的过程。总的来说,碳排放量减少使用再生骨料具有环境友好性^[97]。

3 结论与展望

砖混结构的迭代更新将产生大量砖混建筑垃圾,由于砖混再生材料的品质相对混凝土再生材料品质较差,资源化利用砖混建筑垃圾研究起步较晚,但也取得了丰硕成果。近年来,对砖混建筑垃圾的理化性质,再生粗骨料、细骨料和粉料的改性和应用等方面研究得到了重视,利用砖混建筑垃圾制备再生混凝土、再生砌块、再生砂浆、再生胶凝材料,作为路基基层和加固不良土体等方面都有初步应用。为了更好地资源化利用砖混建筑垃圾,解决天然砂石资源短缺和减轻建筑垃圾堆填危害,有以下几方面需深入研究。

1) 提升砖混再生原材料性能。砖混再生原材料性能受其组成成分、颗粒裂隙、颗粒表面微粉含量和颗粒形状等因素影响,砖混再生粉性能受其组分、细度和掺和料等因素影响。提升砖混再生原材料性能可从以下几方面着手:系统研究不同组分(如废砖、废混凝土比例)对再生原材料性能的影响,确定较优配比,基于此对建筑垃圾进行精细化分类和预处理;优化骨料生产工艺,减少破碎、筛

分、水洗等环节对再生骨料的损伤,减少骨料颗粒裂隙产生;研究与其他材料混合使用对砖混再生原材料性能提升效果,并深入研究其相互作用机理;研究物理、化学、生物矿化等不同处理方法对砖混再生原材料品质提升效果,得到不同处理方法对砖混再生材料的改良机制。

2)拓展砖混再生原材料应用途径。目前,砖混再生混凝土、再生稳定材料和再生砂浆的研究较为成熟,但在胶凝材料及地聚合物领域的研究相对不足;在实际工程中,砖混再生稳定材料应用较多,其他再生产品应用较少。从以下几方面拓展其应用途径:砖混轻质混凝土应用研究,砖混再生骨料密度较普通骨料低,性能较陶粒等轻骨料好,由其制成的轻质混凝土性能较普通轻质混凝土有所提升,深入研究砖混再生骨料对轻质混凝土性能的影响;对于性能较差的砖混再生材料,可将混凝土和砖块分开,分别研究废弃混凝土和废弃砖块机械性能及其再生产品的力学性能,或将其应用于矿坑回填等工程,研究其渗透性、变形特性和沉降特性等性能;研究砖混再生粉作为新型胶凝材料改良固化土体力学变形性能;进一步深入研究砖混再生粉基地聚合物性能及微观机理;将砖混再生混凝土、再生砂浆、砖混再生粉胶凝材料以及砖混再生粉基地聚合物等砖混再生产品应用于实际工程,研究其应用效果。

3)进一步深入研究砖混再生产品力学特性及固化机理。砖混再生骨料因其吸水率和压碎指标高等特点,其再生混凝土、再生砂浆等力学特性及固化机理与普通再生产品存在差异,还需深入研究,特别是深入探讨宏观力学特性与微观演化特征的关系,以及砖混再生粉及其地聚合物作为固化材料固化土体、稳定材料的力学特性及其微观反应机理。

4)完善砖混建筑垃圾处置及应用标准制定。砖混再生骨料需要更为具体、针对性的标准对其生产应用进行规范。一方面,完善砖混建筑垃圾处置标准,制定砖混建筑垃圾分类、预处理及处置的技术标准,以及不同组分的分离方法和处理工艺,提高利用率;另一方面,建立砖混再生材料应用技术标准,针对不同应用场景(如混凝土、砂浆、路基填充等),制定砖混再生材料如强度、吸水率、耐久性等基本性能指标,建立分级利用体系,确保工程应用的可靠性和安全性。

参考文献

- [1] 国家发展和改革委员会.“十四五”循环经济发展规划[EB/OL]. (2021-07-01)[2024-10-16]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202107/t20210707_1285530.html.
- National Development and Reform Commission. Planning for circular economic development during the 14th Five-Year Plan Period [EB/OL]. (2021-07-01)[2024-10-16]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202107/t20210707_1285530.html. (in Chinese)
- [2] 北固. 看德国、日本、新加坡如何高效回收利用建筑垃圾[N]. 建筑时报, 2020-06-04(A06).
- BeiGu. Examining Germany, Japan, and Singapore How to Efficiently Recycle and Reuse Construction Waste [N]. Construction Times, 2020-06-04 (A06). (in Chinese)
- [3] 中国人民大学国家发展与战略研究院. 从“七普”数据看我国城镇住房的发展[EB/OL]. (2022-07-13)[2022-10-24]. <http://nads.ruc.edu.cn/cms/web/search/index.jsp>.
- National Academy of Development and Strategy. An Analysis of Urban Housing Development in China Based on Data “the 7th NPC” [EB/OL]. (2022-07-13)[2022-10-24]. <http://nads.ruc.edu.cn/cms/web/search/index.jsp>. (in Chinese)
- [4] WU H X, GAO J M, LIU C, et al. Reusing waste clay brick powder for low-carbon cement concrete and alkali-activated concrete: A critical review [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 449: 141755.
- [5] POONGODI K, MURTHI P. Development of fibre reinforced green mortar made with waste brick material as fine aggregate for sustainable masonry construction [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 68: 1575-1580.
- [6] WU H X, LIANG C F, WANG C Q, et al. Properties of green mortar blended with waste concrete-brick powder at various components, replacement ratios and particle sizes [J]. Construction and Building Materials, 2022, 342: 128050.
- [7] VELARDO P, SÁEZ DEL BOSQUE I F, SÁNCHEZ DE ROJAS M I, et al. Effect of incorporating biomass bottom ash and construction and demolition waste powder on the physical-mechanical properties and micro-structure of ternary-blended mortars [J]. Construction and Building Materials, 2024, 432: 136628.
- [8] LIU H B, LI Q Y. Preparation of artificial aggregates from concrete slurry waste and waste brick masonry powder: CO₂ uptake and performance evaluation [J]. Construction and Building Materials, 2023, 382: 131356.
- [9] YAPHARY Y L, LU J X, ZHAO B, et al. Utilization of CO₂ cured CSW-MSWIBA cold bonded aggregate into lightweight concrete products for masonry units [J]. Construction and Building Materials, 2021, 276: 122203.
- [10] 陈廷柱, 王昀韬, 刘涛, 等. 建筑垃圾再生骨料性能研

- 究与应用进展[J]. 水泥工程, 2023(5): 70-74.
- CHEN T Z, WANG Y T, LIU T, et al. Research and application progress on performance of recycled aggregate of construction waste [J]. Cement Engineering, 2023(5): 70-74. (in Chinese)
- [11] CONG P L, GAO H L, ZHAO Y F. Chemical shrinkage and drying shrinkage of calcium carbide residue-waste red brick powder based cementitious materials pastes [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 92: 109774.
- [12] CARDOZA A, COLORADO H A. Alkaline activation of brick waste with partial addition of ordinary Portland cement (OPC) for reducing brick industry pollution and developing a feasible and competitive construction material [J]. Open Ceramics, 2024, 18: 100569.
- [13] İLCAN H, DEMIRBAŞ A O, ULUGÖL H, et al. Low-alkaline activated construction and demolition waste-based geopolymers [J]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 134546.
- [14] YUAN S C, LI K P, LUO J L, et al. Effects of brick-concrete aggregates on the mechanical properties of basalt fiber reinforced recycled waste concrete [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 80: 108023.
- [15] WANG Z H, YUAN Q, ZHOU C D, et al. Study on the macro-properties and micro-mechanism of solidification construction and demolition waste residue by alkali-activation technology [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 78: 107544.
- [16] 洪永鹏. 再生砖混粉体性能提升技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- HONG Y P. Research on performance improvement technology of recycled brick-concrete powder [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)
- [17] GIANNOPOULOU I, ROBERT P M, SAKKAS K M, et al. High temperature performance of geopolymers based on construction and demolition waste [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 72: 106575.
- [18] SILVA G, CASTAÑEDA D, KIM S, et al. Analysis of the production conditions of geopolymer matrices from natural pozzolana and fired clay brick wastes [J]. Construction and Building Materials, 2019, 215: 633-643.
- [19] LIANG G W, LUO L, YAO W. Reusing waste red brick powder as partial mineral precursor in eco-friendly binders: Reaction kinetics, microstructure and life-cycle assessment [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 185: 106523.
- [20] DAI T, LIU T L, ZHENG T, et al. Effect of waste clay brick powder on microstructure and properties in blended oil well cement pastes at HTHP conditions [J]. Geoenery Science and Engineering, 2024, 237: 212823.
- [21] ZHAO Z F, GRELLIER A, KARIM BOUARROUDJ MEL, et al. Substitution of limestone filler by waste brick powder in self-compacting mortars: Properties and durability [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 43: 102898.
- [22] TIRONI A, TREZZA M A, SCIAN A N, et al. Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays [J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 37: 319-327.
- [23] 刘庆东, 张信龙, 秦文萍, 等. 废弃砖再生骨料的强化及其应用研究[J]. 混凝土, 2018(2): 42-45.
- LIU Q D, ZHANG X L, QIN W P, et al. Study on strengthening and application of recycled aggregate of discarded brick [J]. Concrete, 2018(2): 42-45. (in Chinese)
- [24] 王亚松, 覃铃玲, 李松, 等. 建筑垃圾再生骨料改性技术研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2022(9): 99-105.
- WANG Y S, QIN L L, LI S, et al. Research progress on modification technology of construction waste recycled aggregates [J]. China Concrete and Cement Products, 2022(9): 99-105. (in Chinese)
- [25] KAZMI S M S, MUNIR M J, WU Y F, et al. Influence of different treatment methods on the mechanical behavior of recycled aggregate concrete: A comparative study [J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 104: 103398.
- [26] 混凝土用再生粗骨料: GB/T 25177—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- Recycled coarse aggregate for concrete: GB/T 25177—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011. (in Chinese)
- [27] YANG X, JIN C, LIU T, et al. Effect of brick-based construction and demolition waste on the performance and microstructure of lightweight aggregate concrete [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 78: 107665.
- [28] 马昆林, 刘建, 申景涛, 等. 砖混再生粗骨料及其在混凝土中的研究与应用进展[J]. 材料导报, 2023, 37(18): 119-130.
- MA K L, LIU J, SHEN J T, et al. Research and application progress of mixed recycled coarse aggregate and its application in concrete [J]. Materials Reports, 2023, 37(18): 119-130. (in Chinese)
- [29] 元成方, 李爽, 曾力, 等. 砖砼混合再生粗骨料混凝土力学性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(2): 398-402.
- YUAN C F, LI S, ZENG L, et al. Mechanical properties of brick and concrete mixed recycled coarse aggregate concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(2): 398-402. (in Chinese)
- [30] 杨秀芬, 黄佳富, 戴大旺, 等. 再生砖混粗骨料颗粒的形态表征与分析[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(8): 2659-2669.

- YANG X F, HUANG J F, DAI D W, et al. Morphological characterization and analysis of recycled brick concrete coarse aggregate particles [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(8): 2659-2669. (in Chinese)
- [31] 王贵美. 砖混建筑废弃物再生碎砖混凝土耐久性研究 [J]. 混凝土, 2024(6): 161-165.
- WANG G M. Study on durability of recycled brick concrete from brick and concrete building wastes [J]. Concrete, 2024(6): 161-165. (in Chinese)
- [32] 黄炜, 葛培, 李萌, 等. 混杂纤维再生砖骨料混凝土正交试验及卷积神经网络预测分析[J]. 材料导报, 2021, 35(19): 19022-19029.
- HUANG W, GE P, LI M, et al. Orthogonal test and convolution neural network prediction of hybrid fiber recycled brick aggregate concrete [J]. Materials Reports, 2021, 35(19): 19022-19029. (in Chinese)
- [33] 高琦, 柳炎, 李福安, 等. 基于正交试验的砖混再生骨料混凝土配合比设计[J]. 中外建筑, 2018(12): 160-162.
- GAO Q, LIU Y, LI F A, et al. Mix proportion design of brick concrete recycled aggregate concrete based on orthogonal test [J]. Chinese & Overseas Architecture, 2018(12): 160-162. (in Chinese)
- [34] 马昆林, 莫文波, 莫建红, 等. 砖混再生细骨料再生砂浆性能及工程应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(8): 2073-2080.
- MA K L, MO W B, MO J H, et al. Performance and engineering application of brick-concrete recycled fine aggregate mortar [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(8): 2073-2080. (in Chinese)
- [35] 公路路面基层施工技术细则: JTG/T F20—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- Technical guidelines for construction of highway roadbases: JTG/T F20—2015 [S]. Beijing: People's Communications Publishing House Co., Ltd, 2015. (in Chinese)
- [36] 赵连地. 水泥稳定砖混类再生骨料基层沥青路面结构及路用性能研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- ZHAO L D. Study on typical pavement structure and road performance of brick-concrete recycled aggregate used in base [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [37] 佟英男. 砖混集料水泥稳定碎石基层材料的设计研究 [D]. 内蒙古: 包头: 内蒙古科技大学, 2023.
- TONG Y N. Research on the design of brick-concrete aggregate cement stabilized gravel base material [D]. Baotou, Inner Mongolia: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2023. (in Chinese)
- [38] 王朝相. 干湿循环条件下建筑垃圾再生材料的水稳性及改良与应用研究 [D]. 西安: 长安大学, 2020.
- WANG C X. Research on water stability, improvement and application of recycling materials of construction waste under dry-wet cycle conditions [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese)
- [39] 张志伟. 道路用砖混类建筑垃圾再生材料试验研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- ZHANG Z W. Experimental research on recycled materials of brick and concrete construction waste for road [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020. (in Chinese)
- [40] 张立卿, 肖振荣, 刘莎, 等. 废弃陶瓷对水泥基复合材料力学性能影响与机制的研究综述[J]. 复合材料学报, 2024, 41(6): 2829-2844.
- ZHANG L Q, XIAO Z R, LIU S, et al. A review of the effect of ceramic wastes on mechanical properties and mechanisms of cementitious composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(6): 2829-2844. (in Chinese)
- [41] 张梦缘, 祁熙鹏, 杨雄杰, 等. 砖混再生细骨料砂浆力学性能、耐久性能及微观形貌研究[J]. 市政技术, 2022, 40(8): 112-119.
- ZHANG M Y, QI X P, YANG X J, et al. Study on mechanical properties, durability and micromorphology of brick concrete recycled fine aggregate mortar [J]. Journal of Municipal Technology, 2022, 40(8): 112-119. (in Chinese)
- [42] 张京旭. 废弃橡胶及再生砖混细骨料在人行道路面层的应用研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2020.
- ZHANG J X. Application research of waste rubber and recycled brick and concrete aggregate on sidewalk surface [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2020. (in Chinese)
- [43] EL-SEIDY E, CHOUGAN M, AL-NOAIMAT Y A, et al. The impact of waste brick and geo-cement aggregates as sand replacement on the mechanical and durability properties of alkali-activated mortar composites [J]. Results in Engineering, 2024, 21: 101797.
- [44] RAHUL D S, VIKAS REDDY S, N T, et al. Influence of brick waste and brick waste fines as fine aggregate on the properties of paver blocks-Preliminary investigation [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 43: 1496-1502.
- [45] 肖曦彬, 郭智刚, 刘正雄, 等. 砖混建筑废弃物免烧砖制备工艺影响抗压强度的研究[J]. 砖瓦, 2023(10): 21-24.
- XIAO X B, GUO Z G, LIU Z X, et al. Production process of recycled brick made from brick-concrete construction waste [J]. Brick-Tile, 2023(10): 21-24. (in Chinese)
- [46] 覃向阳, 李小华, 曾智, 等. 建筑垃圾多孔砌块孔洞特性分析及优化模型建立[J]. 建筑节能(中英文), 2024, 52(1): 140-148.
- QIN X Y, LI X H, ZENG Z, et al. Hole characteristics

- and establishment of the optimization model about construction waste porous block [J]. Building Energy Efficiency, 2024, 52(1): 140-148. (in Chinese)
- [47] 孙健森. 建筑垃圾再生细骨料与二灰改良桂林红黏土强度试验研究 [D]. 广西 桂林: 桂林理工大学, 2018.
SUN J S. Construction waste recycling fine aggregate and fly ash improvement study on strength test of Guilin red-clay [D]. Guilin, Guangxi: Guilin University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [48] 蔡乔. 建筑垃圾再生骨料改良黄土的抗剪强度特性研究 [D]. 太原: 中北大学, 2018.
CAI Q. Study on shear strength characteristics of improved loess with recycled aggregate of construction waste [D]. Taiyuan: North University of China, 2018. (in Chinese)
- [49] 周志清, 王定鹏. 建筑垃圾改良膨胀土填筑路基可行性研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(5): 716-722.
ZHOU Z Q, WANG D P. Feasibility study on filling roadbed with expansive soil improved by construction waste [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2021, 53(5): 716-722. (in Chinese)
- [50] 翟聚云, 樊姝芳, 言志信, 等. 建筑垃圾膨胀土回填地基工程特性及应用研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(3): 321-327.
ZHAI J Y, FAN S F, YAN Z X, et al. Study on the engineering characteristics and application of construction waste expansive soil backfill foundation [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2020, 52(3): 321-327. (in Chinese)
- [51] 李述俊, 赵霄龙, 李秋义, 等. 再生微粉基本性能及活性试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(10): 3314-3319, 3325.
LI S J, ZHAO X L, LI Q Y, et al. Experimental study on basic properties and activity of recycled fine powder [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(10): 3314-3319, 3325. (in Chinese)
- [52] 田桥罗. 利用再生黏土砖粉制备活性掺合料试验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2022.
TIAN Q L. Experimental research on utilization of recycled clay brick powder as active admixture [D]. Xi'an: Chang'an University, 2022. (in Chinese)
- [53] 杨旭彤. 废弃黏土砖粉的活性激发及其性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.
YANG X T. Study on activation and properties of waste clay brick powder [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020. (in Chinese)
- [54] 崔宁, 栾仲豪. 砖混类再生微粉泡沫胶凝材料力学性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(7): 2421-2429.
CUI N, LUAN Z H. Mechanical properties of recycled fine powder foamed cementitious materials for brick and concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(7): 2421-2429. (in Chinese)
- [55] SINKHONDE D. Identification of 2-d shape parameters for waste brick powders from varying milling methods: A discussion of quantitative image analysis [J]. Heliyon, 2024, 10(4): e26666.
- [56] SHI C, QIAN X, YIN J, et al. Synergistic performance enhancement of cementitious materials by co-incorporation of waste brick powder and limestone powder [J]. Construction and Building Materials, 2024, 436: 136893.
- [57] ZHANG X C, FANG X W, LIU J L, et al. Durability of solidified sludge with composite rapid soil stabilizer under wetting-drying cycles [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01374.
- [58] SHEN C N, ZHANG X C, FANG X W, et al. Experimental study on durability of solidified sludge under sulfate erosion [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2025, 37(4): 04025037.
- [59] LI S H, FANG X W, LI Y H, et al. Solidification of loess using a composite geopolymer based on slag powder and fly ash: Influencing factors and mechanism analysis [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2024, 36(12): 04024428.
- [60] 龙开荃, 方祥位, 申春妮, 等. 复合型早强土壤固化剂固化淤泥强度特性研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(增刊 1): 309-318.
LONG K Q, FANG X W, SHEN C N, et al. Strength characteristics of sludge solidified by composite rapid soil stabilizer [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(Sup 1): 309-318. (in Chinese)
- [61] 龙开荃. 淤泥快速固化及力学特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
LONG K Q. Study on rapid solidification of sludge and mechanical properties of solidified sludge [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022. (in Chinese)
- [62] FANG X W, HE Y, LONG K Q, et al. Mechanism of rapid solidification sludge with soil stabilizer based on calcium sulfoaluminate cement [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2023, 35(7): 04023160.
- [63] ZHANG X C, FANG X W, HU F H, et al. Freeze-thaw cycle characteristics of solidified sludge with composite rapid soil stabilizer [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2023, 35(11): 04023429.
- [64] RIHAN MAAZE M, SHRIVASTAVA S. Design development of sustainable brick-waste geopolymer brick using full factorial design methodology [J]. Construction and Building Materials, 2023, 370: 130655.
- [65] REIG L, TASHIMA M M, BORRACHERO M V, et al. Properties and microstructure of alkali-activated red

- clay brick waste [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 43: 98-106.
- [66] ZAHARAKI D, GALETAKIS M, KOMNITSAS K. Valorization of construction and demolition (C&D) and industrial wastes through alkali activation [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 121: 686-693.
- [67] ALLAHVERDI A, KANI E N. Use of construction and demolition waste (CDW) for alkali-activated or geopolymer cements[M]//*Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*. Amsterdam: Elsevier, 2013: 439-475.
- [68] AHMED J K, ATMACA N, KHOSHNAW G J. Building a sustainable future: An experimental study on recycled brick waste powder in engineered geopolymer composites [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 20: e02863.
- [69] SHARMIN S, SARKER P K, BISWAS W K, et al. Characterization of waste clay brick powder and its effect on the mechanical properties and microstructure of geopolymer mortar [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 412: 134848.
- [70] MAHMOODI O, SIAD H, LACHEMI M, et al. Synthesis and optimization of binary systems of brick and concrete wastes geopolymers at ambient environment [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 276: 122217.
- [71] DUXSON P, PROVIS J L, LUKEY G C, et al. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2005, 269(1/2/3): 47-58.
- [72] ELYASIGORJI F, TABATABAI H. Prediction of strength activity index using chemical and physical properties of pozzolans [J]. *Cement*, 2024, 18: 100116.
- [73] YAMAMOTO T. Formulation optimization and proposal of Assessed Pozzolanic-activity Index (API) method for rapid evaluation of pozzolanic activity of fly ash [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 432: 136394.
- [74] PASUPATHY K, RAMAKRISHNAN S, SANJAYAN J. 3D concrete printing of eco-friendly geopolymer containing brick waste [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2023, 138: 104943.
- [75] XUE R T, HOU Y. Preparation and properties of alkali-activated fly ash-waste brick porous building materials [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2024, 108: 583-589.
- [76] BORÇATO A G, THIESEN M, MEDEIROS-JUNIOR R A. Incorporation of clay brick wastes and calcium hydroxide into geopolymers: Compressive strength, microstructure, and efflorescence [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 88: 109259.
- [77] ROVNANÍK P, ROVNANÍKOVÁ P, VYŠVAŘIL M, et al. Rheological properties and microstructure of binary waste red brick powder/metakaolin geopolymer [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 188: 924-933.
- [78] ROY A, SADIQUL ISLAM G M. Geopolymer using different size fractions of recycled brick-based mixed demolition waste [J]. *Cleaner Materials*, 2024, 11: 100224.
- [79] 王晴, 康升荣, 吴丽梅, 等. 地聚合物凝胶结构建模及分子动力学模拟[J]. *材料导报*, 2020, 34(4): 4056-4061. WANG Q, KANG S R, WU L M, et al. Structural modeling and molecular dynamics simulation of geopolymers gel [J]. *Materials Reports*, 2020, 34(4): 4056-4061. (in Chinese)
- [80] MIJARSH M J A, MEGAT JOHARI M A, AHMAD Z A. Compressive strength of treated palm oil fuel ash based geopolymer mortar containing calcium hydroxide, aluminum hydroxide and silica fume as mineral additives [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 60: 65-81.
- [81] 周恒宇, 王修山, 胡星星, 等. 地聚合物固化淤泥强度增长影响因素及机制分析[J]. *岩土力学*, 2021, 42(8): 2089-2098. ZHOU H Y, WANG X S, HU X X, et al. Influencing factors and mechanism analysis of strength development of geopolymer stabilized sludge [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(8): 2089-2098. (in Chinese)
- [82] 章定文, 王安辉. 地聚合物胶凝材料性能及工程应用研究综述[J]. *建筑科学与工程学报*, 2020, 37(5): 13-38. ZHANG D W, WANG A H. Review on property of geopolymer binder and its engineering application [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2020, 37(5): 13-38. (in Chinese)
- [83] DUXSON P, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A, PROVIS J L, et al. Geopolymer technology: The current state of the art [J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42(9): 2917-2933.
- [84] 周恒宇. 不同钙系地聚合物固化淤泥质软土力学特性及耐久性研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2021. ZHOU H Y. Investigation of mechanical properties and durability of different calcium-based geopolymer stabilized silty soft soil [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2021. (in Chinese)
- [85] WANG Q, ZHANG R B, XU H R, et al. Study on mechanical properties and microstructure of fly-ash-based geopolymer for solidifying waste mud [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 409: 134176.
- [86] 郭晓璐, 施惠生, 夏明. 不同钙源对地聚合物反应机制的影响研究[J]. *材料研究学报*, 2016, 30(5): 348-354. GUO X L, SHI H S, XIA M. Effect of different

- calcium resources on reaction mechanism of geopolymers [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2016, 30(5): 348-354. (in Chinese)
- [87] YAO X, ZHANG Z H, ZHU H J, et al. Geopolymerization process of alkali-metakaolinite characterized by isothermal calorimetry [J]. Thermochimica Acta, 2009, 493(1/2): 49-54.
- [88] 杜红艳, 王朝相, 余成, 等. 水泥改良建筑垃圾再生材料微观结构研究[J]. 路基工程, 2021(5): 81-84.
DU H Y, WANG C X, YU C, et al. Study on microstructure of cement improved recycled materials for construction waste [J]. Subgrade Engineering, 2021(5): 81-84. (in Chinese)
- [89] 陈永亮, 张轶轲, 陈铁军, 等. 碱激发高钙粉煤灰发泡地聚合物的制备及机理[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(8): 2787-2798.
CHEN Y L, ZHANG Y K, CHEN T J, et al. Preparation and mechanism of foaming geopolymers with alkali activated high calcium fly ash [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(8): 2787-2798. (in Chinese)
- [90] 汪小南. 再生混凝土结构工程应用研究综述[J]. 城市道桥与防洪, 2023(11): 203-206, 325.
WANG X N. Review on application of recycled concrete structure engineering [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2023(11): 203-206, 325. (in Chinese)
- [91] 徐开东, 王继娜, 李志新, 等. 砖混建筑垃圾再生骨料应用技术指标系统化研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(9): 2905-2911.
XU K D, WANG J N, LI Z X, et al. Systematized study on application technology indicators of recycled aggregate reproduced by masonry construction waste [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(9): 2905-2911. (in Chinese)
- [92] 陶航宇, 陈萍, 龚亦凡, 等. 基于砖含量的再生砖混粗骨料分类研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(3): 957-963.
TAO H Y, CHEN P, GONG Y F, et al. Classification of recycled brick and concrete coarse aggregate based on brick content [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(3): 957-963. (in Chinese)
- [93] 余红明. 砖混骨料再生水泥稳定材料的性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
YU H M. Research on the properties of cement stabilized recycled mixed aggregates materials [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)
- [94] 郑明博. 建筑废弃物再生混合料试验研究及路用性能分析[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.
ZHENG M B. Experimental research and road performance analysis of construction waste recycling mixture [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020. (in Chinese)
- [95] 张金喜, 张硕, 苏词, 等. 建筑垃圾全再生半刚性道路基层路用性能研究[J]. 公路, 2023, 68(10): 74-82.
ZHANG J X, ZHANG S, SU C, et al. Research on performance of road pavement with recycled semi-rigid base course made of full construction waste material [J]. Highway, 2023, 68(10): 74-82. (in Chinese)
- [96] 李岩凌, 王淼, 刘文才, 等. 砖混类建筑垃圾的资源化利用技术研究与应用[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(11): 71-76.
LI Y L, WANG M, LIU W C, et al. Resource utilization technology research and application of brick-mixed construction waste [J]. New Building Materials, 2024, 51(11): 71-76. (in Chinese)
- [97] 雷颖, 肖建庄, 王春晖. 太原市再生混凝土建筑结构碳排放研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(1): 97-105.
LEI Y, XIAO J Z, WANG C H. Research on carbon emission of recycled aggregate concrete structures in Taiyuan [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(1): 97-105. (in Chinese)

(编辑 XXX)