

碱矿渣陶粒混凝土密实性及硫酸盐腐蚀试验

林华艺, 林旭健, 季韬, 梁咏宁, 程可佳, 郑文元, 朱木强

(福州大学土木工程学院, 福建 福州 350116)

摘要: 通过孔结构、抗渗性和硫酸盐腐蚀试验, 研究碱矿渣陶粒混凝土的密实性以及受硫酸盐腐蚀混凝土的退化性能. 研究表明, 对于同种骨料, 碱矿渣混凝土的密实性优于普通混凝土; 对于同种水泥, 陶粒混凝土的电通量较高, 其密实性比砾石混凝土的差. 混凝土在硫酸盐溶液中浸泡会使混凝土强度先提高再降低, 但碱矿渣混凝土强度下降幅度比普通混凝土的小, 且碱矿渣陶粒混凝土的下降幅度比碱矿渣砾石混凝土的小. 碱矿渣陶粒混凝土具有较好的耐硫酸盐腐蚀能力.

关键词: 碱矿渣陶粒混凝土; 孔结构; 抗渗性; 硫酸盐腐蚀; 密实性

中图分类号: TU528.2

文献标识码: A

Experimental study for the compactibility and sulfate corrosion resistance of alkali-activated slag ceramsite concrete

LIN Huayi, LIN Xujian, JI Tao, LIANG Yongning, CHENG Kejia,
ZHENG Wenyuan, ZHU Muqiang

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

Abstract: By the pore structure test, the anti-permeability test and sulfate corrosion test of alkali-activated slag ceramsite concrete, the compactibility and degradation under sulfate corrosion of concrete were studied. The results show that, the compactibility of alkali-activated slag concrete is better than that of ordinary concrete for the same kind of aggregate. Compared with the same cement, the ceramsite concrete has higher electric flux, and its compactibility is worse than gravel concrete. The strength of ordinary concrete under sulfate solution decreases after the strength increasing at beginning. However, the situation of decending strength of alkali-activated slag concrete is better than that of ordinary concrete, and the situation of decending strength of alkali-activated slag ceramsite concrete is better than that alkali-activated slag gravel concrete. Therefore, the alkali-activated slag ceramsite concrete has superior resistance to sulphate corrosion.

Keywords: alkali-activated slag ceramsite concrete; pore structure; anti-permeability; sulfate attack; compactibility

0 引言

硅酸盐水泥是建筑工程中不可或缺的建筑材料, 但随着我国建材行业的发展和国家政策的调整, 建筑材料逐渐转向环保、节能、无污染. 在绿色材料发展潮流的冲击之下, 硅酸盐水泥存在的不足显露出来: 一方面, 能源与资源消耗大, 另一方面, 熟料煅烧过程中会释放大量温室气体, 对环境污染极大^[1-2]. 因此, 研究胶凝材料制备的新原理, 加强工业废渣的利用, 是一项具有科学意义和实际意义的工作^[3-4].

20世纪30年代, Purdon等^[5]研究发现, 少量NaOH在水泥硬化过程中可起催化作用, 使水泥中铝硅酸盐易溶而形成硅酸钠和偏铝酸钠, 进一步与氢氧化钙反应形成水化硅、铝酸钙, 使水泥硬化并重新生成NaOH, 催化下一轮反应, 由此提出“碱反应”理论. 此后, 前苏联开展大量相关研究, 开发新型碱矿渣水

收稿日期: 2015-06-24

通讯作者: 季韬(1972-), 博士, 教授, 主要从事结构工程研究, jt72@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51479036)

泥,我国于 20 世纪 80 年代也开始相关研究,取得大量的研究成果^[6]。大量研究和实践发现,与硅酸盐水泥相比,碱矿渣水泥具有低需水量、低水化热、强度高、耐久性好、护筋性优良、优越的负温硬化性能等优点^[7-11]。陶粒混凝土属于高性能轻骨料混凝土,比传统混凝土轻 20% 以上,而且耐久性好。从建筑节能方面考虑,其能耗将节约 40% ~ 60%^[12]。另外,轻骨料原料主要为工业废渣,可以节约碎石的消耗,也有利于环境保护和可持续发展的需要。

目前,还没有学者研究碱矿渣水泥在轻骨料混凝土中的性能,对于碱矿渣水泥在混凝土中的应用也比较少。碱矿渣陶粒混凝土的研发,将充分发挥轻质、保温隔热、耐久性好等优点,更好地应用到建筑结构中,比如轻质砌块、建筑板材(空心隔墙板、屋面板)、耐火隔热制品等,随着研究深度的增加,必然会逐渐应用到框架结构上。本研究将通过孔结构试验、抗渗性试验和硫酸盐腐蚀试验等,着重碱矿渣陶粒混凝土的密实性及受硫酸盐腐蚀退化性能。

1 试验研究

1.1 试验材料

1) 水泥:福建炼石牌 42.5R 普通硅酸盐水泥,表观密度为 $3\ 050\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,比表面积为 $360\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$,烧失量 LOI 为 1.06%。其中主要成分有 82.5% 的熟料、5.5% 的二水石膏、4.0% 的粉煤灰、4.0% 的石灰石及 4.0% 的矿渣。

2) 细骨料:采用闽江河砂,根据 GB/T 14684 - 2001^[13] 测得细骨料的细度模数为 2.5,粒径小于 5 mm,堆积密度为 $1\ 481\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,表观密度为 $2\ 590\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

3) 粗骨料:所用普通砾石按照 GB/T 14685 - 2011^[14] 规定的方法对砾石的各项指标进行测定,测得砾石的表观密度为 $2\ 660\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,堆积密度为 $1\ 532\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,吸水率为 0.2%,压碎值为 8.45%。选用湖北宜昌宝珠陶粒开发有限责任公司生产的圆球型页岩陶粒,参照 GB/T 17431.2 - 2010^[15] 测定轻骨料陶粒的基本性能指标,其中:表观密度为 $1\ 460\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,堆积密度为 $845\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,筒压强度为 5.6 MPa,空隙率为 42.1%,1 h 和 24 h 吸水率分别为 2.0% 和 4.06%。圆球型页岩陶粒的颗粒级配见表 1。

表 1 圆球型页岩陶粒的颗粒级配

Tab. 1 Gradation of ceramsite

筛余	<i>d</i> /mm				
	< 5	5	10	16	20
分计值	1	38	53	8	0
累计值	100	99	61	8	0

4) 矿渣:所用矿渣为泰宇混凝土厂提供,其主要化学成分为 32.85% 的 SiO_2 、37.44% 的 CaO 、13.01% 的 Al_2O_3 等。其中:碱度系数 M_0 为 1.051,质量系数 K_{KC} 为 1.731,活性系数 M_a 为 0.39。

5) 水:所用水为福州地区的自来水。

6) 碱激发剂:NaOH 由北京康普汇维科技有限公司生产,为颗粒状,纯度为 99%。 Na_2SO_4 采用上海埃彼化学试剂有限公司生产的无水硫酸钠,为颗粒状,纯度为 99%。 Na_2SiO_3 采用液体水玻璃,固体含量为 33.7%,其中: Na_2SiO_3 含量为 25.86%, Na_2O 含量为 7.84%,模数为 3.3。

1.2 试验配合比

采用两组碱矿渣水泥作为研究对象,一个是中性钠盐碱矿渣水泥,各组分比例为 Na_2SO_4 10%、普通硅酸盐水泥 5%、矿渣 85%,另一个是以 Na_2SO_4 和 Na_2SiO_3 作为复合剂激发剂的碱矿渣水泥,各组分比例为 Na_2SO_4 7.5%、 Na_2SiO_3 2.5%、普通硅酸盐水泥 5%、矿渣 85%,并以普通硅酸盐水泥作为基准组进行参考。采用两种骨料作为研究对象,分别为天然碎石和页岩陶粒。参考 JGJ 55 - 2011^[16]、JGJ 51 - 2002^[17] 和文[18]设计混凝土配合比,并利用正交试验对水泥用量、净水灰比、体积砂率等参数进行优化,最终选定水泥用量为 $480\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,净水灰比为 0.35,体积砂率为 0.35。试验配合比见表 2。表 2 中,JZT 表示采用普通硅酸盐水泥和陶粒制成的混凝土;JZS 表示采用普通硅酸盐水泥和砾石制成的混凝土;FHT

表示采用 Na_2SiO_3 和 Na_2SO_4 复合激发的碱矿渣水泥和陶粒制成的混凝土; FHS 表示采用 Na_2SiO_3 和 Na_2SO_4 复合激发的碱矿渣水泥和砾石制成的混凝土。

表2 中性钠盐碱矿渣混凝土配合比

Tab.2 Mix proportion of neutral sodium - salt alkali - activated slag (AAS) cement concrete

($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

组别	$\rho_{\text{水泥}}$	$\rho_{\text{砾石}}$	$\rho_{\text{陶粒}}$	$\rho_{\text{砂}}$	$\rho_{\text{水}}$	$\rho_{\text{矿渣}}$	$\rho_{\text{Na}_2\text{SO}_4}$	$\rho_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}$	ρ_{NaOH}
JZT	480	-	638	607	168	-	-	-	-
JZS	480	1 157	-	607	168	-	-	-	-
FHT	24	-	638	607	168	408	36	7.1	4.9
FHS	24	1 157	-	607	168	408	36	7.1	4.9

普通水泥混凝土搅拌过程:陶粒在净水中预湿 24 h→将陶粒、砂和水泥倒入搅拌机中搅拌 0.5 min→将水倒入搅拌机中搅拌 2.5 min→振捣采用振动台振实和手工压实结合,振捣时间以拌合物捣实和避免骨料上浮为原则,宜为 10~30 s。

碱矿渣水泥混凝土搅拌过程:陶粒在净水中预湿 24 h→将矿渣和水泥倒入搅拌机中干拌 3 min→将激发剂(Na_2SO_4 、 Na_2SiO_4 、 NaOH)溶解在水中,再将水倒入上一步中得到的混合物中,搅拌 1 min→将砂和预湿的陶粒倒入搅拌机中搅拌 2.5 min→振捣采用振动台振实和手工压实结合,振捣时间以拌合物捣实和避免骨料上浮为原则,宜为 10~30 s。

2 试验方案

2.1 孔结构试验

孔结构采用的试验仪器为北京金埃谱公司生产的 V-Sorb2800 孔结构分析仪。

1) 样品制备. 将达到测试龄期的混凝土试块放入烘箱内,在 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 温度下烘干,用锤头破碎混凝土试块,得到混凝土小颗粒,然后装入洁净的样品管中。

2) 样品预处理. 将装有样品的样品管安装到预处理区域,此时应当注意预处理温度不应高于 $80\text{ }^\circ\text{C}$,因为研究表明钙矾石在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 时会开始分解。

3) 样品测试. 将预处理后的样品管安装到测试区,选择“孔径分布测定”,开始测试。

2.2 抗渗性试验

采用电通量法(ASTM C1202 法)测定混凝土渗透性能。

1) 真空饱水:使用 NEL-VJH 型混凝土智能真空饱水机,将试样放入真空室中,层间应保持通气。开启真空饱水机自动真空饱水,饱水完毕后从真空室中取出试样进行电通量试验。

2) 配制溶液:配制 3% 的 NaCl 溶液、 $0.3\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaOH 溶液,使之充分溶解后静置备用。

3) 电通量试验:将真空饱水后的混凝土试件安装在有机玻璃夹具上,先在夹具里注入清水,检测是否漏水,当不漏水后用石蜡封住试块四周;然后在正极(红色接线柱)夹具中注入已配制好的 NaOH 溶液,负极(黑色接线柱)夹具中注入已配制好的 NaCl 溶液。将各组夹具与电通量测试主机用信号线连接起来,打开电源,设置各通道及时间步数,每隔 15 min 仪器将自动记录显示的电量,6 h 后试验完成,读取各通道的电量。其中,电量数值 $>4000\text{ C}$ 、 $2000 \sim 4000\text{ C}$ 、 $1000 \sim 2000\text{ C}$ 、 $100 \sim 1000\text{ C}$ 、 $<100\text{ C}$ 分别对应混凝土渗透性高、中等、低、很低、可忽略五个等级,由此来评价混凝土渗透性的好坏。

2.3 受硫酸盐腐蚀混凝土退化性能试验

采用加速腐蚀试验方法(烘干-浸泡循环)进行研究,研究表明^[19],烘干-浸泡的加速腐蚀方法比全浸腐蚀的速率更快。按照以下步骤配置质量分数为 10% 的 Na_2SO_4 溶液:将纯度 98% 以上(近似 100%)的无水硫酸钠倒入水中搅拌至完全溶解,无水硫酸钠与水的质量比为 1:9。

所设计的循环制度为:室温 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 下,采用质量分数为 10% 的 Na_2SO_4 溶液浸泡 2 d(48 h)→取出擦干表面水分 2 h→ $80\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温烘干 20 h→冷却观察 2 h,即为一个循环,每个循环为 72 h(3 d)。

本试验主要研究受硫酸盐腐蚀时,碱矿渣陶粒混凝土与普通混凝土早期退化过程的不同,快速区分不同混凝土耐硫酸根离子的能力,最多循环次数定为 10 次. 试件尺寸为 40 mm × 40 mm × 160 mm,成型 24 h 后脱模,标准养护 28 d,在清水中浸泡 2 d 后,直接测量和进行 5 次上述循环后测量以下指标:① 擦干试件表面,测得干质量;② 80 °C 烘干 20 h,测得干质量;③ 测 5、10 次循环后试件的抗压和抗折强度.

3 试验结果及分析

3.1 混凝土孔结构试验结果及分析

通过对混凝土采样后测定孔结构,得到的孔径分布情况见表 3、表 4.

表 3 混凝土不同孔径范围的总孔体积

Tab. 3 Total pore volume of different range of diameter of concrete (mL · g⁻¹)

编号	总孔体积	总孔体积分布		
		$d = 2 \sim 20$ nm	$d = 20 \sim 50$ nm	$d = 50 \sim 200$ nm
JZT	0.038 21	0.008 79	0.015 32	0.014 10
JZS	0.039 85	0.008 89	0.017 36	0.013 59
FHT	0.015 85	0.012 14	0.001 43	0.000 29
FHS	0.016 57	0.014 14	0.001 89	0.000 54

表 4 混凝土不同孔径孔隙的体积分布情况

Tab. 4 Volume distribution of concrete of different diameter pore

编号	\bar{d}/nm	各孔径所占比例/%		
		$d = 2 \sim 20$ nm	$d = 20 \sim 50$ nm	$d = 50 \sim 200$ nm
JZT	24.4	24.28	42.31	33.41
JZS	25.6	22.32	43.57	34.11
FHT	11.9	87.62	10.32	2.06
FHS	12.6	85.32	11.42	3.26

碱矿渣混凝土的孔直径比普通混凝土小得多,直径小于 20 nm 的孔占 70% 以上,而普通混凝土仅占约 20%. 普通混凝土 50 nm 以上的孔达到 30% 以上,而碱矿渣混凝土仅占 10% 以下. 从水化产物层面来解释,碱矿渣水泥基体内,由矿渣反应生成的水化产物多是箔片状的 C-S-H,以未水化矿渣为中心节点形成了密切的网络结构,产生的大部分为凝胶孔,使得混凝土具有更低的孔隙率^[20-21]. 而在普通硅酸盐水泥中 C-S-H 多为纤维状,其网络连接较弱,大部分为毛细孔^[22-23]. 因此,普通混凝土的孔径相对较大,且其总孔体积远远大于碱矿渣混凝土.

通过对比陶粒混凝土和砾石混凝土可以发现,两种不同骨料的混凝土总孔径体积相差不大,但在陶粒混凝土中,直径 20 nm 以下的孔要比砾石混凝土多约 3%. 这主要是因为陶粒在混凝土中的内养护作用,使得陶粒附近的水泥石得到更加充分的水化,水泥石结构也更加致密.

3.2 混凝土电通量结果及分析

混凝土氯离子渗透性试验结果见表 5. 从试验结果看,无论是采用砾石还是陶粒,碱矿渣混凝土的电通量均要低于普通混凝土. 其主要原因在于,矿渣的比表面积比普通硅酸盐水泥大,其参与反应的接触面积大,其形成的水化产物连接更多,形成更加致密的空间网络. 另外,矿渣还具备更强的物理填充作用,因此,碱矿渣混凝土的水泥石结构比普通混凝土更密实,孔隙率更低. 混凝土的氯离子渗透系数与水泥石的孔结构及混凝土的界面过渡区密切相关,合理的水泥石

表 5 混凝土氯离子渗透性试验结果试验结果

Tab. 5 The results of test of chloride ion permeability in concrete

编号	Q/C	渗透性评价
JZT	3 983.96	中
JZS	2 721.65	中
FHT	1 455.53	低
FHS	934.27	很低

孔径分布及致密的界面过渡区都会使混凝土抗渗性能更加优异. 电通量试验结果与孔结构的试验结果一致, 均说明碱矿渣混凝土孔径更小、更加密实. 因此, 碱矿渣混凝土抗渗性能要优于普通混凝土.

另外, 陶粒混凝土的电通量均比同种水泥的普通混凝土大. 目前陶粒对混凝土抗渗性的影响并没有定论, 李宝城^[24]认为轻骨料存在自养护作用, 让骨料附近的水泥水化充分; 崔宏志^[25]认为轻骨料的多孔材性, 可以从水泥浆体中吸收部分的水分, 改善骨料与硬化水泥石界面, 从而改善抗渗性. 从本试验结果来看, 内部具有较多孔隙的陶粒会为氯离子在混凝土中的迁移提供通道, 虽然饱水陶粒对界面过渡区有明显的内养护作用, 但是由于本研究所采用的是表面结构较为致密的页岩陶粒, 相比于普通陶粒, 致密结构会使通道减少, 削弱陶粒的吸水返水作用, 从而减弱陶粒对混凝土过渡区的增强作用. 因此, 低吸水性陶粒会对混凝土的抗渗性产生负面影响.

3.3 受硫酸盐腐蚀混凝土退化性能及分析

采用养护 28 d 后的混凝土试块进行浸泡, 在质量分数为 10% 的 Na₂SO₄ 溶液浸泡下, 抗压、抗折强度与循环次数的关系见图 1, 强度损失率见表 6.

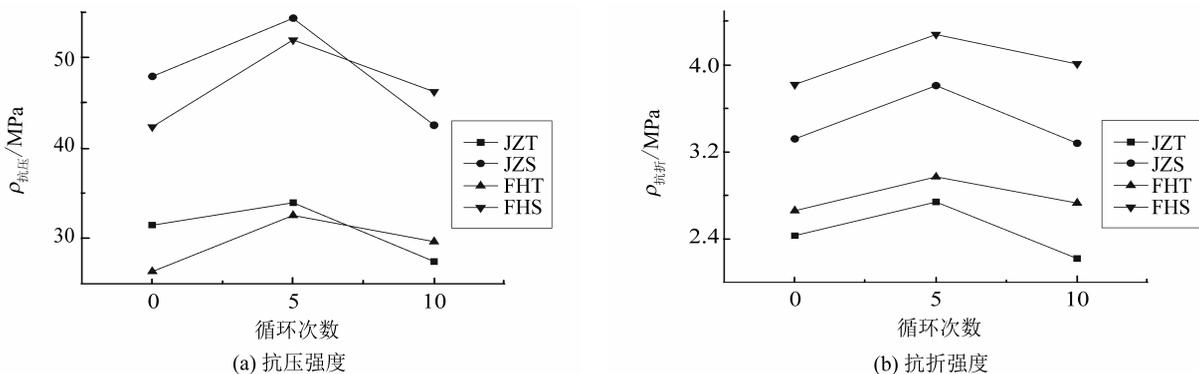


图 1 抗压、抗折强度与循环次数的关系

Fig. 1 Relation between compressive strength, tensile strength and cycle number

表 6 10% Na₂SO₄ 浓度浸泡下混凝土的抗压、抗折强度 (损失率)

Tab. 6 The loss of mechanical properties of concrete under 10% Na₂SO₄ solution

编号	干湿循环次数	抗压损失率/%	抗折损失率/%	编号	干湿循环次数	抗压损失率	抗折损失率
JZT	0	0	0	FHT	0	0	0
	5	-7.85	-12.76		5	-23.48	-11.65
	10	12.80	8.64		10	-12.48	-2.63
JZS	0	0	0	FHS	0	0	0
	5	-13.40	-14.76		5	-22.63	-12.04
	10	5.38	1.20		10	-9.17	-4.97

注: 损失率 = (1 - 溶液浸泡下的强度 / 标准养护下的强度) × 100%

由图 1 可知, 4 组混凝土的抗压强度在 10% 硫酸钠溶液浸泡下随干湿循环次数的增加先增长后减小. 臧兴震^[26]的研究表明, 混凝土的抗压强度在初期增长较快, 而在浸泡 120 d 后开始下降, 这与本试验的规律是一致的. 说明硫酸根溶液对混凝土初期强度有提升作用, 对混凝土后期强度有损害. 根据文[5]可知, 混凝土受到硫酸盐的侵蚀作用后, 水泥石内部生成了大量的膨胀性物质(钙矾石), 使得在初期混凝土内部的孔隙变小, 内部结构更加紧密, 混凝土强度有所增强. 但是随着腐蚀程度增加, 钙矾石造成的混凝土内部压力逐渐增大, 当其达到混凝土的极限抗压强度后, 水泥石内部开始出现微裂缝. 当侵蚀进一步加深, 微裂缝逐渐变大, 最后演变成宏观的混凝土表面裂缝, 混凝土的强度随着裂缝不断增长而逐渐降低. 段德峰等^[27]的研究也表明了随着腐蚀循环次数的增加, 混凝土孔隙率是先减少后增大的, 并通过微观试验, 观察了水泥石内部结构的一个破坏过程, 与本试验的结果相符.

由表 6 可知, 在抗压强度方面, JZT 和 JZS 两组普通混凝土均先分别增长 7.85% 和 13.40%, 然后强度下降低于初始值, 分别降低了 12.80% 和 5.38%, 但是 FHT 和 FHS 两组碱矿渣混凝土先增长幅度为

23.48% 和 22.63%，后期虽然强度有所下降，但仍高于初始强度。在抗折强度方面，循环 5 次后，JZT 和 JZS 两组普通混凝土分别增长 12.76% 和 14.76%，循环 10 次后分别降低 8.64% 和 1.2%，FHT 和 FHS 两组碱矿渣混凝土同样先增长后降低，但是循环 10 次后抗折强度仍高于初始强度。可以得出碱矿渣混凝土的耐硫酸根离子能力要远远强于普通硅酸盐混凝土。

4 结语

1) 对于同种水泥，陶粒混凝土与砾石混凝土总孔径相差不大，但是因为陶粒在混凝土中的内养护作用，使得陶粒附近的水泥石得到更加充分的水化，水泥石结构也更加致密，其直径 20 nm 以下的孔要比砾石混凝土的多 3% 左右。

2) 与普通混凝土相比，碱矿渣混凝土更加密实，其抗氯离子渗透性更强，然而由于陶粒中存在许多孔洞，给氯离子的迁移提供通道，其负面作用比饱水陶粒改善界面过渡区和水泥石孔结构的正面作用大，因此陶粒混凝土的电通量更大。

3) 对于同种骨料，普通混凝土的总孔体积是碱矿渣混凝土的两倍以上。普通混凝土经过硫酸盐浸泡 10 次循环后强度下降明显，而碱矿渣混凝土强度反而有所增长。从 FHT 和 FHS 两组碱矿渣混凝土与 JZT 和 JZS 两组普通混凝土的强度衰变对比，可以得出碱矿渣混凝土较硅酸盐混凝土的耐硫酸盐侵蚀能力更好。

参考文献:

- [1] 黄赞. 碱激发胶凝材料的研究进展[J]. 水泥, 2011(2): 9-13.
- [2] SHI C, JIMENEZ A F, PALOMO A. New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to Portland cement[J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(7): 750-763.
- [3] 杨胜多. 碱激发胶凝材料发展趋势[J]. 科技信息, 2010(17): 253-253.
- [4] ROY D M. Alkali-activated cements opportunities and challenges[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(2): 249-254.
- [5] PURDON A. The action of alkalis on blast-furnace slag[J]. Journal of the Society of Chemical Industry, 1940, 59(9): 191-202.
- [6] 杨南如. 碱胶凝材料形成的物理化学基础(I) [J]. 硅酸盐学报, 1996, 24(2): 209-215.
- [7] 张书政, 龚克成. 地聚合物[J]. 材料科学与工程学报, 2003, 21(3): 430-436.
- [8] 杨长辉, 蒲心诚. 论碱矿渣水泥及混凝土的缓凝问题及缓凝方法[J]. 重庆建筑大学学报, 1996, 18(3): 67-72.
- [9] 史才军, KRIVENKO P V, ROY D. 碱-激发水泥和混凝土[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [10] ROY D, SILSBEE M, WOLFECONFER D. New rapid setting alkali activated cement compositions[C]//MRS Proceedings Online Proceeding Library. Cambridge Town: Cambridge Univ Press, 1989: 179-203.
- [11] COLLINS F, SANJAYAN J G. Strength and shrinkage properties of alkali-activated slag concrete containing porous coarse aggregate[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(4): 607-610.
- [12] 管小健. 陶粒混凝土在工程中的施工应用技术[J]. 福建建材, 2015(2): 37-39.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑用砂: GB/T 14684-2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建设用卵石, 碎石: GB/T 14685-2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 轻集料及其试验方法: GB/T 17431.2-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [16] 中华人民共和国建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55-2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [17] 中华人民共和国建设部. 轻骨料混凝土技术规程: JGJ 51-2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [18] 陈先锋. 轻骨料对高性能混凝土早期自收缩的影响机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2011.
- [19] 刘俊, 牛荻涛, 宋华. 掺合料混凝土在不同硫酸盐环境中的性能分析[J]. 混凝土, 2010(5): 3-6.
- [20] 成立. 三种碱激发胶凝材料的反应机理及其产物[J]. 荆门职业技术学院学报, 2005, 19(6): 92-95.
- [21] 王聪. 碱激发胶凝材料的性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [22] 王甲春, 阎培渝. 海洋混凝土污损生物腐蚀机理的研究进展[J]. 混凝土, 2009(10): 24-26.
- [23] 高育欣, 余保英, 王军. 超硫酸盐水泥的水化产物及孔结构特性[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(3): 118-122.
- [24] 李宝城, 江守恒, 杨书凯, 等. 轻骨料混凝土抗渗性能研究[J]. 低温建筑技术, 2011(2): 10-11.
- [25] 崔宏志, 邢锋. 轻骨料混凝土渗透性研究[J]. 混凝土, 2009(12): 5-10.
- [26] 臧兴震. 混凝土在硫酸盐腐蚀环境下的性能研究[J]. 商品与质量(房地产研究), 2014(7): 222-223.
- [27] 段德峰, 黄显冲, 王晓川. 受硫酸盐腐蚀混凝土微观结构分析[J]. 四川建筑科学研究, 2015(2): 202-207.

(责任编辑: 沈芸)