

低活性矿渣内养护水泥砂浆自收缩与孔结构分析

杜玉会, 李双喜

Analysis of autogenous shrinkage and pore structure of cement mortar with low-activity slag as internal curing material

DU Yuhui, LI Shuangxi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20210628001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

干湿循环作用下滑带土孔隙结构与基质吸力响应规律研究

Response laws of pore structure and matrix suction of slip zone soils under action of wetting-drying cycles
水利水运工程学报. 2018(3): 95 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.03.013>

低速水流作用下水泥砂浆溶蚀特性研究

Study on leaching characteristics of cement mortar under flowing water with low velocity
水利水运工程学报. 2019(1): 50 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.01.007>

不同养护方式下锂渣反应程度和微观形貌

Reaction degree and morphology of cement-lithium slag slurry using different curing methods
水利水运工程学报. 2018(2): 104 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.02.014>

不同养护方式对水泥-锂渣浆体水化程度影响

Influences of different curing methods on cement-lithium slag slurry hydration degree
水利水运工程学报. 2017(3): 86 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.03.012>

粗糙度对结构物-细砂界面剪切特性的影响

Effects of roughness on shear properties of structure-sands interface
水利水运工程学报. 2019(3): 85 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.011>

水性胶乳固化剂对水泥基弹性灌浆料性能的影响

Effects of waterborne latex curing agent on performance of elastic cement-based grouting material
水利水运工程学报. 2019(2): 1 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.001>



DOI:10.12170/20210628001

杜玉会, 李双喜. 低活性矿渣内养护水泥砂浆自收缩与孔结构分析 [J]. 水利水电工程学报, 2022(3): 136-144. (DU Yuhui, LI Shuangxi. Analysis of autogenous shrinkage and pore structure of cement mortar with low-activity slag as internal curing material[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(3): 136-144. (in Chinese))

低活性矿渣内养护水泥砂浆自收缩与孔结构分析

杜玉会^{1,2}, 李双喜^{1,2}

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 采用预吸水饱和状态的低活性矿渣作为内养护材料部分替代砂, 研究不同低活性矿渣掺量内养护砂浆的力学性能与自收缩变化规律, 并通过 MIP、SEM 和 XRD 测试结果探讨了低活性矿渣内养护砂浆的微观机理。结果表明: 不同低活性矿渣掺量砂浆试样在标准养护与密封养护条件下抗压强度发展规律相似, 即随着低活性矿渣掺量的增加, 砂浆早期强度下降幅度较大, 但随着龄期的延长, 砂浆后期强度降低幅度小于早期降低幅度; 并且低活性矿渣能有效抑制浆体各阶段的自收缩, 尤其在快速收缩阶段和短暂膨胀阶段作用最为明显; 低活性矿渣内养护作用下, 虽增加了浆体的孔隙率, 但有效降低了平均孔径, 改善了各类型孔的分布比例, 细化孔隙结构; 内养护作用使浆体水化产物 C-S-H 凝胶增多, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 被消耗, 界面过渡区薄弱结构得到显著改善。

关键词: 低活性矿渣; 内养护; 自收缩; 孔结构; 界面过渡区

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2022)03-0136-09

高性能混凝土因其卓越的力学和耐久性能等优点, 在道桥工程、特种工程、军事工程、海洋工程等建设及修复领域有着广泛的应用前景^[1-3], 但由于其低水胶比的特点, 常表现为过大的早期自干燥收缩, 严重影响混凝土的耐久性^[4]。因此, 抑制混凝土收缩开裂是提高混凝土耐久性乃至使其具有超高性能的关键。但高性能混凝土的渗透性通常较低, 传统的外部养护方式难以有效缓解混凝土内部的自收缩^[5]。内养护材料因其自身的结构特性, 既能从根本上解决混凝土的自收缩, 还能提高混凝土结构的自身抗力^[6-7]。内养护主要是以内养护材料为介质, 向混凝土内部提供水源。按照内养护材料的不同, 将其分为轻骨料(LAW)和高吸水性树脂(SAP)两类^[8-9]。其中 SAP 吸水倍率高, 但存在分布不均的缺点, 难以成为混凝土结构构架的一部分^[10-11], 轻骨料存在骨料上浮的问题, 对强度影响较大^[12-13]。如楚英杰等^[14-15]认为, 随着天然砂的日趋短缺, 和目前现有内养护材料存在的不足, 利用工业废渣制备内养护材料, 是实现混凝土可持续发展的另一途径。

鉴于此, 本研究利用低活性矿渣表面粗糙、内部多孔, 并且粒度大小和物理性能皆与砂子相近的特点, 将其作为内养护材料替代部分砂, 结合其粗糙表面与水泥浆体形成的“嵌锁”结构, 将更有力地调控混凝土的收缩变形。目前国内外对低活性矿渣内养护效应方面的研究鲜有报道, 主要研究其磨细粉体替代水泥对混凝土抗氯离子渗透性与抗碳化的影响^[16-18], 或将其颗粒料替代砂石对混凝土力学性能和抗冻方面的影响研究^[19-21]。因此本文重点通过宏观与微观手段的结合, 研究低活性矿渣的内养护效应。

收稿日期: 2021-06-28

基金项目: 新疆自然科学基金面上项目(2019D01A46); 2021 年自治区研究生科研创新项目(XJ2021G163)

作者简介: 杜玉会(1996—), 女, 四川眉山人, 硕士研究生, 主要从事水利工程高性能混凝土方面的研究。

E-mail: 2609651039@qq.com 通信作者: 李双喜(E-mail: xjlsx123@126.com)

1 试验内容

1.1 试验原材料

试验所用水泥为山东鲁城 P·I 42.5 硅酸盐水泥, 其化学成分和矿物组成见表 1, 物理性能指标见表 2。低活性矿渣为新疆宝新盛源板结高炉矿渣, 筛除粒径大于 4.75 mm 的颗粒, 细度模数为 2.6, 颗粒级配区间为Ⅱ区, 颗粒级配见图 1(a); 参照规范 GB/T 18046—2017《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》测得玻璃体含量为 50%(文中所有含量均指质量分数, 下面不再说明)(见图 1(b)); 形貌如图 2 所示, 各项质量指标见表 3。标准砂采用 ISO 标准砂。粉煤灰为新疆乌鲁木齐 F 类Ⅱ级粉煤灰, 比表面积为 471 m²/kg, 需水量比为 90%。减水剂为聚羧酸高性能减水剂, 减水率 30% 以上。

表 1 P·I 42.5 硅酸盐水泥主要化学成分及矿物组成										
Tab. 1 Main chemical composition and mineral composition of Portland cement P·I 42.5										
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	f-CaO	Fe ₂ O ₃	矿物组成			
							C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
21.32	4.31	61.26	2.47	2.55	0.80	3.54	57.22	19.29	6.34	10.76

表 2 P·I 42.5 硅酸盐水泥物理性能								
Tab. 2 Physical properties of Portland cement P·I 42.5								
密度/ (g·cm ⁻³)	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	标准稠度/ %	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
			初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
3.14	342	25.8	185	255	5.8	8.6	27.7	51.2

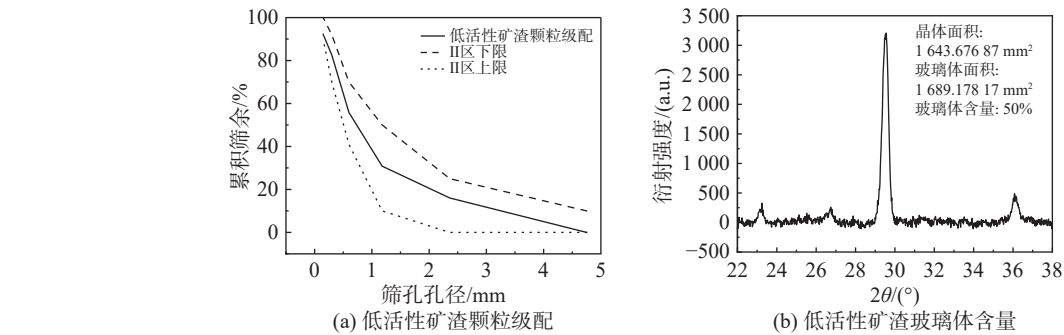


图 1 低活性矿渣性能指标

Fig. 1 Performance index of low-activity slag

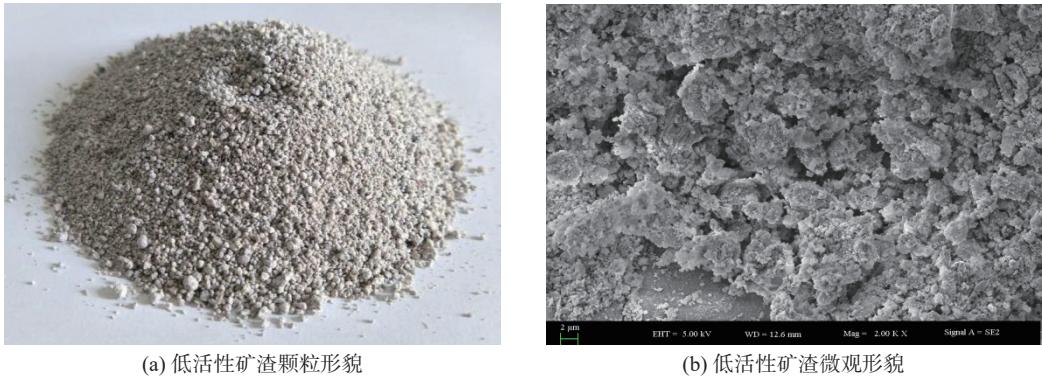


图 2 低活性矿渣形貌

Fig. 2 Morphology of low-activity slag

表 3 低活性矿渣质量指标
Tab. 3 Low activity slag quality index detection report

指标	数值	指标	数值	指标	数值
碱含量	1.11%	紧密密度	1 085 kg/m ³	CaO含量	38.3%
氯离子含量	0.01%	细度模数	2.6	f-CaO含量	0.1%
表观密度	2 270 kg/m ³	压碎值	28%	MgO含量	5.6%
堆积密度	970 kg/m ³	含水率	6.6%	吸水率	(8~10)%

1.2 试验配合比

试验配合比见表 4, 其中低活性矿渣浸泡水中预吸水 5 d 达到饱和, 以饱和面干状态掺加, 试验测得低活性矿渣饱和面干吸水率为 10%, 低活性矿渣掺量以矿渣质量占细集料质量的 15%、25% 计, 粉煤灰掺量以粉煤灰质量占胶凝材料质量的 25% 计; 文中有效水胶比 (m_w/m_B)_E 指浆体拌合水量与胶凝材料质量的比值(均取 0.3); 总水胶比指浆体拌合水和低活性矿渣额外引入的内养护水的总量与胶凝材料质量之比; 内养护水量是饱和面干低活性矿渣预吸的自由水量, 本文通过掺加饱和面干的低活性矿渣, 引入内养护水, 增加了总水胶比, 但有效水胶比不发生变化。

表 4 试验砂浆配合比
Tab. 4 Mortar mix proportions

组号	内养护水	标准砂	低活性矿渣	水	水泥	粉煤灰	减水剂
A0	0	1 350.0	0	162	405	135	0.8
A1	20.25	1 147.5	202.5	162	405	135	0.8
A2	33.75	1 012.5	337.5	162	405	135	0.8

1.3 试验方法

力学性能试验参照《水泥胶砂强度检测方法(ISO 法)》分为标准与密封两种养护方式, 其中密封养护在振捣成型 24 h 后立即采用塑料薄膜密封, 在温度为(20±2) ℃ 的环境中密封养护至龄期。自收缩试验采用 NELD-NES730 型号非接触式混凝土收缩变形测定仪, 根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)中的非接触法进行检测, 数据记录频率为 1 次/15 min, 测试温度为(20±2) ℃, 湿度为(60±5)%, 测试龄期为 168 h, 主要通过两端的位移传感器测定在无约束状态下所发生的形变。

微观试验(MIP、SEM、XRD): 取 28 d 龄期样品, 从内部选取出 2 cm×2 cm×2 cm 试块, 经无水乙醇终止水化, 50 ℃ 真空干燥 8 h。采用 Auto Pore lv 9510 型高性能全自动压汞仪(MIP)对样品孔结构进行检测, 德国蔡司 SUPRA-55VP 型扫描电子显微镜(SEM)观测微观形貌。在进行 X 射线衍射测试前需将处理好的试块研细至 80 μm 以下, 采用日本理学(RIGAKU)Ultima IV 仪(XRD)进行检测。

2 试验结果与分析

2.1 力学性能

图 3 为低活性矿渣内养护砂浆对其强度的影响。从图 3 可看出两个明显的特征: (1)不同低活性矿渣掺量试样在标准养护与密封养护条件下抗压强度发展规律相似, 即随着低活性矿渣掺量的增加, 砂浆早期强度下降幅度较大, 但随着龄期的延长, 砂浆后期强度降低幅度小于早期降低幅度, 且部分低活性矿渣掺量组的砂浆抗压强度与基准组持平或略高。这主要因为低活性矿渣引入的内养护水增加了总水胶比, 使得硬

化浆体的孔隙率增加, 并因为低活性矿渣的物理性能、颗粒强度等劣于标准砂导致力学性能下降。但随着龄期的延长, 浆体孔隙中的水分被消耗, 内部湿度场发生明显变化, 致使自干燥效应显著, 此时处于饱水状态的低活性矿渣颗粒会由于湿度梯度的作用释放预吸的水分^[19-21], 供未完全水化的胶凝材料颗粒进一步水化; 并且后期化学活性不断被激发, 使得浆体水化更加充分, 促进强度的发展^[22]。(2)标准养护与密封养护的强度差值差异不明显, 主要因为密封养护环境下, 无法与外界进行湿度交换, 阻止了水分的蒸发损失。而标准养护时, 既能在内部湿度梯度作用下释放低活性矿渣预吸的自由水进行内养护, 同时后期释水的低活性矿渣能把外部水转化内养护水(二次内养护), 从而使试件的强度呈增加趋势。总之, 低活性矿渣内养护砂浆对其强度的影响有两方面: 一是, 低活性矿渣的多孔性, 整体上增加了浆体的孔隙率; 二是, 低活性矿渣预吸的自由水虽然增加了浆体的总水胶比, 但不会提高有效水胶比。因此, 预吸附加水能促进水泥水化进程, 后期能弥补低活性矿渣引入的孔隙对强度的损失。

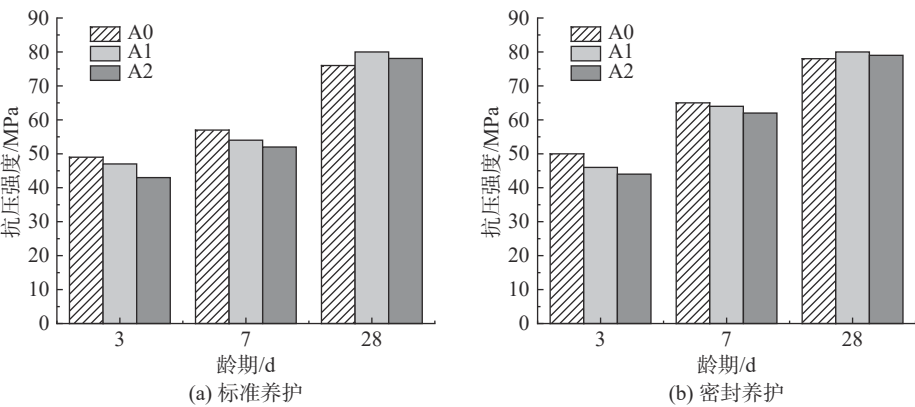


图 3 低活性矿渣不同养护方式对抗压强度的影响

Fig. 3 Effect of low active slag and water cement ratio on compressive strength of concrete

2.2 自收缩

图 4 为不同配合比砂浆 7 d 龄期的自收缩发展曲线。由图 4 可看出: 不同低活性矿渣掺量组的自收缩发展变化曲线均呈现 3 个阶段特征^[23], 即 AB(快速收缩阶段)、BC(短暂膨胀阶段)、CD(缓慢收缩阶段)。(1)各组在快速收缩阶段, 低活性矿渣掺量组相比较基准组收缩时间持续缩短, 收缩值持续下降。(2)在短暂膨胀阶段, 与基准组相比低活性矿渣掺量组进入膨胀阶段的时间提前, 且膨胀时间延长, 膨胀值增大, 随着低活性矿渣掺量的增加, 持续时间逐渐延长。(3)水泥水化反应进程进入衰减期, 浆体逐渐降温, 收缩进入缓慢增长阶段(CD)。

根据上述描述, 低活性矿渣内养护能有效抑制浆体各阶段的自收缩, 尤其在快速收缩阶段和短暂膨胀阶段作用最为明显。主要原因有两方面: 首先, 因为水泥水化和环境都将引发水泥毛细孔自由水含量减少、内部相对湿度下降, 进而在毛细孔内形成弯月面引发毛细负压力, 导致混凝土收缩^[24], 只要水化不断进行, 自收缩将持续产生^[25]。孔祥明等^[26]认为, 当混凝土相对湿度维持在 100% 的阶段, 吸水的内养护材料会在混凝土中引入一种自膨胀变形, 从而大幅抵消减缩。随着水分进一步消耗, 内养护剂可以显著延缓混凝土相对湿度的降低, 从而降低同龄期混凝土毛细孔张力及收缩应力值。因此低活性矿渣的掺加使浆

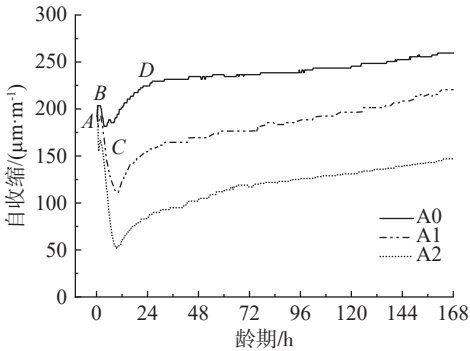


图 4 低活性矿渣对混凝土自收缩的影响

Fig. 4 Effect of low-activity slag on autogenous shrinkage of concrete

体内部湿度增加,延缓了浆体内部自干燥的产生。其次,预湿饱水低活性矿渣的掺加,增加了浆体的总水胶比。水泥石中除了凝胶颗粒外还含有大量的水,水分在混凝土组成材料中的膨胀能力最大,热膨胀系数约为 $210\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,比水泥石的热膨胀系数高 1 个数量级^[27],所以低活性矿渣的引入增加了浆体的热膨胀系数。浆体产生的热膨胀变形,对自收缩进行补偿。因此,自收缩的降低及热变形的增大使砂浆提前进入了短暂膨胀阶段,并且增大了此阶段的膨胀值。现有研究^[28-30]也证实内养护材料的掺加使得浆体内部的热膨胀系数增加,即产生膨胀补偿自收缩。

2.3 孔结构

图 5 和表 5 为低活性矿渣内养护砂浆的孔结构测试结果。由图 5(a)可知,低活性矿渣掺加后砂浆的孔隙率略微增加,低活性矿渣掺量组孔隙率分别为基准组的 1.08 和 1.35 倍,且随着低活性矿渣掺量的增加而变大。这是由于低活性矿渣预吸水增加了浆体的总水胶比及在释水后留下释水孔,增大了浆体的孔隙率。

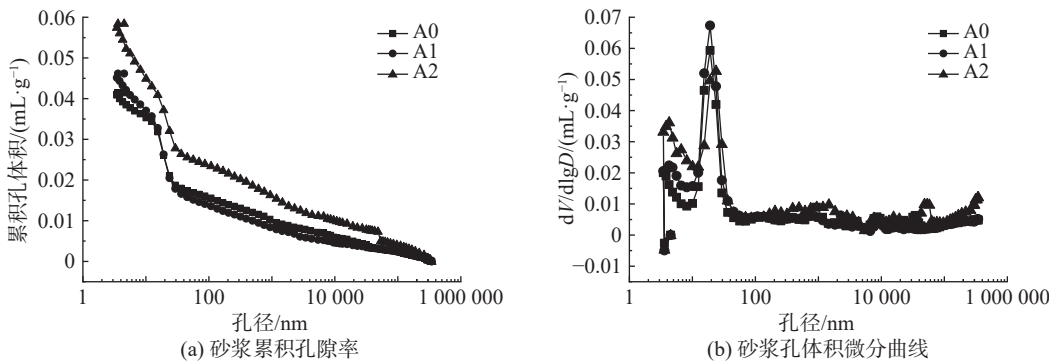


图 5 不同低活性矿渣内养护砂浆孔结构影响
Fig. 5 Effect of different low-activity slags on pore structure of mortar

表 5 砂浆的孔结构参数及分布
Tab. 5 Pore structure parameters and distribution of mortar

组号	孔隙率/%	平均孔径/nm	最可几孔径/nm	孔径分布/(mL·g ⁻¹)			
				3~10 nm	10~100 nm	100~1 000 nm	>1 000 nm
A0	9.15	17.98	17.1	0.006 5	0.019 5	0.005 7	0.009 2
A1	9.95	15.41	16.5	0.009 5	0.022 7	0.005 4	0.007 5
A2	12.39	14.64	15.1	0.014 4	0.020 2	0.008 4	0.012 5

由图 5(b)可知,曲线分别在 3、10、100、1 000 nm 孔径界限间出现了 3 个含量峰值。根据 Kumar 等^[31]研究将孔径范围在 3~10 nm 的孔隙定义为凝胶孔,10~100 nm 的孔隙为小毛细孔,100~1 000 nm 的孔隙为大毛细孔,1 000 nm 以上的为气孔。由图 5(b)孔分布微分曲线和表 5 可知,在掺入低活性矿渣内养护时,凝胶孔和小毛细孔的特征峰明显提高,大毛细孔特征峰位于基准组之上,并且平均孔径和最可几孔径随低活性矿渣掺量的增加而降低,低活性矿渣掺量组(A1、A2)相比较基准组(A0)的平均孔径分别降低了 14.29% 和 18.57%,最可几孔径分别降低了 3.6% 和 11.6%。因为低活性矿渣的内养护水会与浆体内部的毛细孔网络联通,根据周围湿度变化,通过毛细孔作用,实现释水进而提高浆体的水化程度,更多水化产物的生成,有效细化了浆体内部的孔结构,使得浆体内部孔隙的平均孔径和最可几孔径显著降低。总之,低活性矿渣的掺加,虽然增加了浆体的孔隙率,但有效降低了平均孔径,改善了各类型孔的分布比例,细化孔隙结构,有效解决了浆体孔结构差异较大的问题。

2.4 界面过渡区

界面过渡区是水泥基材料中较为薄弱的区域,其致密程度通常对水泥及材料力学性能和耐久性能有重

要影响。28 d 龄期不同低活性矿渣掺量界面过渡区的微观结构如图 6 所示。由图 6(a)可发现界面过渡区处的缝隙宽度较大, 而图 6(b)和(c)表面形成致密的水化产物与孔隙外部水化产物结合, 产生边界不明显的过渡区, 使得水泥石与骨料相互融合形成机械咬合状态, 骨料与浆体之间无明显界限, 粘结较为紧密。良好的界面粘结性能可作为强度发展的前提之一, 这与后期力学性能发展迅速结果一致^[32]。

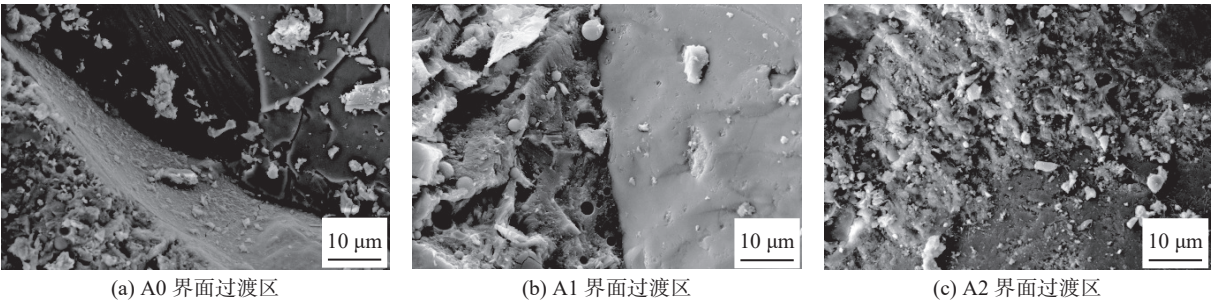


图 6 低活性矿渣内养护混凝土对界面过渡区的影响

Fig. 6 Effect of low-activity slag curing concrete on interface transition zone

2.5 X 射线衍射

图 7 为 28 d 龄期砂浆的 XRD 衍射图谱。可见: 各试样的 SiO_2 峰值差别最为明显, 随着低活性矿渣掺量的增加而降低。这主要是因为砂浆中含有大量的细集料, 在选取试样时难免在水化产物内部含有不同量的砂^[33-34], 且低活性矿渣主要替代一部分砂子, 故而 SiO_2 衍射峰值随其掺量的增加而降低, 在此不对 SiO_2 峰值变化做机理分析。对比各组衍射峰值发现, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 峰值随着低活性矿渣掺量的增加而降低, 主要是因为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的强碱性提升了反应环境的碱度, 一部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和低活性矿渣中的 SiO_2 和 Al_2O_3 发生二次水化反应生成 C-S-H。

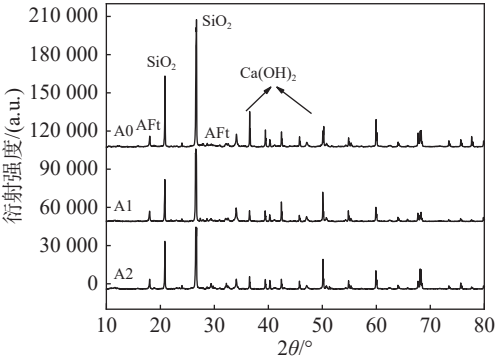


图 7 不同低活性矿渣掺量砂浆 28 d 龄期 XRD 衍射图谱

Fig. 7 XRD patterns of mortars with different low active slag contents at 28 d

3 结 语

利用低活性矿渣表面粗糙、内部多孔、并且粒度大小和物理性能皆与砂子相近的特点, 将其作为内养护材料替代部分砂, 试验研究了低活性矿渣内养护砂浆对其强度和结构等特性的影响。结果表明: (1)低活性矿渣内养护砂浆在标准养护与密封养护条件下, 其内养护作用相似, 即随着低活性矿渣掺量的增加, 砂浆早期强度下降幅度较大, 但随着龄期的延长, 砂浆后期强度降低幅度小于早期降低幅度。(2)低活性矿渣内养护作用能有效抑制砂浆各个阶段的自收缩, 尤其在快速收缩阶段和短暂膨胀阶段作用最为明显。(3)低活性矿渣的掺加, 虽然增加了浆体的孔隙率, 但浆体的平均孔径和最可几孔径明显降低, 孔结构分布得到改善, 有效解决了浆体孔结构差异较大的问题。(4)低活性矿渣内养护作用下, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 被大量消耗, 水化产物 C-S-H 凝胶增多, 填充了界面过渡区的缝隙, 使界面过渡区的结构更加致密。

参 考 文 献:

[1] 王德辉, 史才军, 吴林妹. 超高性能混凝土在中国的研究和应用[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(1): 141-149. (WANG Dehui,

- SHI Caijun, WU Linmei, et al. Research and applications of ultra-high performance concrete (UHPC) in China[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(1): 141-149. (in Chinese))
- [2] FARIED A S, MOSTAFA S A, TAYEH B A, et al. The effect of using Nano rice husk ash of different burning degrees on ultra-high-performance concrete properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 290: 123279.
- [3] FERDOSIAN I, CAMÕES A. Mechanical performance and post-cracking behavior of self-compacting steel-fiber reinforced eco-efficient ultra-high performance concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 121: 104050.
- [4] 闫志刚, 安明喆, 尹必晶, 等. 超高桥塔高强混凝土性能研究及收缩调控[J]. *铁道工程学报*, 2020, 37(3): 40-46. (YAN Zhigang, AN Mingzhe, YIN Bijing, et al. Performance and shrinkage control of high strength concrete for super high bridge tower[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2020, 37(3): 40-46. (in Chinese))
- [5] 黄杰. 养护制度影响下高性能混凝土早期收缩机理分析[J]. *江苏建筑职业技术学院学报*, 2021, 21(1): 11-14. (HUANG Jie. Analysis of early shrinkage mechanism of high performance concrete under the influence of maintenance system[J]. *Journal of Jiangsu Vocational and Technical College of Architecture*, 2021, 21(1): 11-14. (in Chinese))
- [6] 王朦诗, 张戎令, 宁贵霞, 等. SAP对膨胀混凝土力学性能及孔隙结构的影响[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(8): 165-169. (WANG Mengshi, ZHANG Rongling, NING Guixia, et al. Effect of superabsorbent polymer on mechanical properties and pore structure of expansive concrete[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(8): 165-169. (in Chinese))
- [7] MUTHUSAMY N, NIVETHITHA M, NANDINI V, et al. Effect of internal curing agents in self compacting concrete[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 955: 012030.
- [8] 王立成, 张磊. 混凝土内养护技术研究进展[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(6): 1471-1478. (WANG Licheng, ZHANG Lei. Research progress on concrete internal curing technology[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(6): 1471-1478. (in Chinese))
- [9] ALASKAR A, ALSHANNAG M, HIGAZEY M. Mechanical properties and durability of high-performance concrete internally cured using lightweight aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 288: 122998.
- [10] PARSEH I, HAJIZADEH Y, JAAFARZADEH N, et al. Removal behavior of gaseous furfural using a biofilter packed with perlite, ripe compost, and oak woodchips[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 149: 135-143.
- [11] ZHU H, WANG Z J, XU J, et al. Microporous structures and compressive strength of high-performance rubber concrete with internal curing agent[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 215: 128-134.
- [12] PAUL A, MURGADAS S, DELPIANO J, et al. The role of moisture transport mechanisms on the performance of lightweight aggregates in internal curing[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 268: 121191.
- [13] CUEVAS K, LOPEZ M. The effect of expansive agent and cooling rate in the performance of expanded glass lightweight aggregate as an internal curing agent[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 271: 121505.
- [14] 楚英杰, 王爱国, 孙道胜, 等. 骨料特性影响混凝土体积稳定性的研究进展[J]. *材料导报*, 2022(5): 1-19. (CHU Yingjie, WANG Aiguo, SUN Daosheng, et al. Research progress on the influence of aggregate characteristics on the volume stability of concrete[J]. *Materials Reports*, 2022(5): 1-19. (in Chinese))
- [15] SADOWSKA-BURACZEWSKA B, GRZEGORCZYK-FRĄNCZAK M. Sustainable recycling of high-strength concrete as an alternative to natural aggregates in building structures[J]. *Sustainability*, 2021, 13(8): 4286.
- [16] 刘波, 郭永智. 大掺量矿渣粉在大体积预应力混凝土中的应用[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2018, 14(10): 24-28. (LIU Bo, GUO Yongzhi. Application of large volume slag powder in mass prestressed concrete[J]. *Highway Traffic Technology (Application Technology Edition)*, 2018, 14(10): 24-28. (in Chinese))
- [17] 丁红霞. 大掺量矿渣粉—水泥基胶凝材料和混凝土性能及其优化的研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (DING Hongxia. Study on the performance and optimization of high volume blast furnace slag powder cement based materials and concrete[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [18] 黄成华, 王培铭, 孙家瑛. 矿渣超量取代水泥高性能混凝土性能研究[J]. *混凝土*, 2004(2): 28-30, 42. (HUANG Chenghua, WANG Peiming, SUN Jiaying. Study on properties of HPC with excessive slag replacing parts of cement[J]. *Concrete*, 2004(2): 28-30, 42. (in Chinese))
- [19] 朱蓓蓉, 於林峰, 张树青, 等. 矿渣代砂水泥砂浆及混凝土物理力学性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2008, 11(4): 386-391. (ZHU Beirong, YU Linfeng, ZHANG Shuqing, et al. Study on physical and mechanical performance of mortar and concrete

- containing blast furnace slag aggregates[J]. *Journal of Building Materials*, 2008, 11(4): 386-391. (in Chinese))
- [20] 石东升, 丁晓宇. 基于正交分析的粒化高炉矿渣代砂混凝土冻融试验[J]. *混凝土*, 2016(8): 75-77, 81. (SHI Dongsheng, DING Xiaoyu. Freezing and thawing cycle experiment of granulated blast furnace slag concrete based on orthogonal analysis[J]. *Concrete*, 2016(8): 75-77, 81. (in Chinese))
- [21] 李明轩. 粒化高炉矿渣代砂配制混凝土的试验研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018. (LI Mingxuan. Experimental study of granulated blast furnace slag as fine aggregate concrete[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2018. (in Chinese))
- [22] 张守祺, 路振宝, 昂源, 等. 高吸水树脂吸液特性对混凝土性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2020, 48(8): 1278-1284. (ZHANG Shouqi, LU Zhenbao, ANG Yuan, et al. Effect of super-absorbent polymer water absorption characteristics on performance of concrete[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 48(8): 1278-1284. (in Chinese))
- [23] DE MEYST L, MANNEKENS E, VAN TITTELBOOM K, et al. The influence of superabsorbent polymers (SAPs) on autogenous shrinkage in cement paste, mortar and concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 286: 122948.
- [24] 韩宇栋, 张君, 王振波. 预吸水轻骨料对高强混凝土早期收缩的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2013, 41(8): 1070-1078. (HAN Yudong, ZHANG Jun, WANG Zhenbo. Influence of pre-wetted lightweight aggregate on early-age shrinkage of high strength concrete[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 41(8): 1070-1078. (in Chinese))
- [25] 徐彬彬, 欧忠文, 罗伟, 等. 饱水轻骨料和减缩剂对UHPC水化过程和自收缩的影响[J]. *材料导报*, 2020, 34(22): 22065-22069. (XU Binbin, OU Zhongwen, LUO Wei, et al. Effect of saturated lightweight aggregate and SRA on the hydration process and autogenous shrinkage of UHPC[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(22): 22065-22069. (in Chinese))
- [26] 孔祥明, 张珍林. 高吸水性树脂对高强混凝土自收缩的减缩机理[J]. *硅酸盐学报*, 2014, 42(2): 150-155. (KONG Xiangming, ZHANG Zhenlin. Shrinkage-reducing mechanism of super-absorbent polymer in high-strength concrete[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2014, 42(2): 150-155. (in Chinese))
- [27] 闫东星. 硬化水泥砂浆热膨胀系数影响因素[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 35(3): 45-49. (YAN Dongxing. Study on influence parameters of thermal expansion coefficient of hardened mortar[J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 35(3): 45-49. (in Chinese))
- [28] 黄义建. 混凝土内部水分迁移过程监测与收缩变形机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015. (HUANG Yijian. Research on monitoring of water transportation in concrete and mechanism of shrinkage deformation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese))
- [29] 乔墩, 钱觉时, 党玉栋, 等. 水分迁移引起的混凝土收缩与控制[J]. *材料导报*, 2010, 24(17): 79-83, 95. (QIAO Dun, QIAN Jueshi, DANG Yudong, et al. Characteristic and mitigation of concrete shrinkage related to moisture migration[J]. *Materials Reports*, 2010, 24(17): 79-83, 95. (in Chinese))
- [30] 逢鲁峰. 掺高吸水树脂内养护高性能混凝土的性能和作用机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013. (PANG Lufeng. Study on the performance and mechanism of internal curing high-performance concrete with super absorbent polymer[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2013. (in Chinese))
- [31] KUMAR R, BHATTACHARJEE B. Study on some factors affecting the results in the use of MIP method in concrete research[J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(3): 417-424.
- [32] LO T Y, CUI H Z. Effect of porous lightweight aggregate on strength of concrete[J]. *Materials Letters*, 2004, 58(6): 916-919.
- [33] 王猛. 掺加多孔保水材料对内养护混凝土性能的作用及分析[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2019. (WANG Meng. Effect and analysis of adding porous water retaining material to curing concrete performance[D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2019. (in Chinese))
- [34] BANDARA M M H W, MAMPEARACHCHI W K. Mitigate the curing problems of concrete pavements by using heated non-expansive clay particles as internal curing agent[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2021, 22(4): 969-982.

Analysis of autogenous shrinkage and pore structure of cement mortar with low-activity slag as internal curing material

DU Yuhui^{1,2}, LI Shuangxi^{1,2}

(1. School of Water Resources and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Key Laboratory of Water Conservancy Project Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, China)

Abstract: The pre-saturated low-activity slag was used as a partial replacement of sand for internal curing materials. The mechanical properties and autogenous shrinkage of internal curing mortar with different low-activity slag contents were studied. The microscopic mechanism of low-activity slag internal curing mortar was discussed based on MIP, SEM and XRD test results. The results show that the compressive strength development law of mortar specimens with different low-activity slag contents under standard curing and sealing curing conditions is similar, that is, with the increase of low-active slag content, the early strength of mortar decreases greatly, but with the extension of age, the late strength reduction of mortar is less than early strength reduction. Moreover, low-activity slag can effectively inhibit the autogenous shrinkage of the slurry at various stages, especially in the rapid shrinkage stage and the transient expansion stage. Under the internal curing effect of low-activity slag, although the porosity of the slurry is increased, the average pore diameter is effectively reduced, the distribution ratio of various types of pores is improved, and the pore structure is refined. The hydration product C-S-H gel increases, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ is consumed, and the weak structure of the interface transition zone is significantly improved.

Key words: low activity slag; internal maintenance; autogenous shrinkage; pore structure; interface transition zone

著作权使用声明

本刊声明: 本刊图文版权归编辑部所有, 未经允许不得任意转载、摘编。本刊已许可相关媒体、数据库、网络平台等以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议, 请在投稿时说明, 本刊将按作者说明处理。