

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.238



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 低活性矿渣内养护水泥砂浆自收缩与电阻率的关系

杜玉会, 李双喜

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

**摘要:**以预吸水低活性矿渣替代细集料作为内养护材料, 研究低活性矿渣内养护砂浆自收缩与电阻率的变化规律, 揭示两者的关系。结果表明: 随着低活性矿渣掺量的增加, 砂浆早期强度降低幅度大, 随着龄期的延长, 砂浆中后期强度降低幅度小于早期, 建议低活性矿渣的合适掺量取为细集料质量的15%~25%; 低活性矿渣内养护对砂浆电阻率发展影响明显, 凝结硬化前, 浆体电阻率随低活性矿渣掺量的增大而增大; 凝结硬化后, 浆体电阻率随低活性矿渣掺量的增大而减小; 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, 同时, 36 h龄期后电阻率与自收缩有很好的对应关系, 可通过电阻率发展趋势预测自收缩的变化情况。

**关键词:**水泥砂浆; 内养护; 自收缩; 电阻率; 低活性矿渣

**中图分类号:** TU525.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2023)06-0173-07

## Relationship between autogenous shrinkage and resistivity of cement mortar internal cured with low active slag

DU Yuhui, LI Shuangxi

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

**Abstract:** Using pre-absorbent low active slag as internal curing material instead of fine aggregate, the autogenous shrinkage and resistivity variation of low active slag internal curing mortar were studied, and the relationship between them was revealed. The results show that with increase of low active slag content, the early strength of mortar decreases greatly, with the extension of age, the strength reduction in the middle and late stages of mortar is smaller than that in the early stage. It is suggested that the appropriate content of low-activity slag is 15%-25% of the fine aggregate quality. The internal curing of low active slag has obvious influence on the resistivity development of mortar. Before setting hardening, the resistivity of mortar increases with the increase of low active slag content. After it, the slurry resistivity decreases with the increase of low active slag content. The internal curing of low active slag can effectively inhibit the autogenous shrinkage at various stages of the slurry, especially in the rapid shrinkage stage and transient expansion stage. At the same

**收稿日期:** 2021-07-07

**基金项目:** 新疆自然科学基金(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, 主要从事高性能混凝土研究, E-mail: 2609651039@qq.com。

李双喜(通信作者), 男, 副教授, E-mail: xjlsx123@126.com。

**Received:** 2021-07-07

**Foundation items:** Natural Science Foundation of Xinjiang (No. 2019D01A46); Graduate Research Innovation Project of Autonomous Region of 2021 (No. XJ2021G163)

**Author brief:** DU Yuhui (1996-), main research interest: high performance concrete, E-mail: 2609651039@qq.com.

LI Shuangxi (corresponding author), associate professor, E-mail: xjlsx123@126.com.

time, the resistivity after 36 h has a good correlation with autogenous shrinkage, and the change of autogenous shrinkage can be predicted by the development trend of resistivity.

**Keywords:** cement mortar; internal curing; autogenous shrinkage; resistivity; low active slag

因渗透性差,外部养护水分难以进入高性能混凝土内部,由此产生的自收缩会导致其开裂敏感性提高<sup>[1-2]</sup>。目前,常用于降低混凝土收缩开裂的方式有内养护、添加减缩剂或膨胀剂等<sup>[3-5]</sup>。研究发现,减缩剂仅对干燥环境下的干燥收缩抑制效果较好,并且由于其成本较高,推广使用受限<sup>[6]</sup>。膨胀剂发挥其膨胀效能需水量大,若膨胀剂掺量不合理,将导致过度或不均匀膨胀,进而导致混凝土开裂<sup>[7]</sup>。而内养护是利用高吸水材料在混凝土硬化过程中释放水分,起到“蓄水池”的作用,维持混凝土体系内部的湿度,以减小自干燥收缩,达到传统养护方式达不到的养护效果<sup>[8]</sup>。其中,有机类SAP高吸水性树脂<sup>[9-12]</sup>的研究及应用较为广泛,其吸水倍率较高但SAP吸水后易黏结,在浆体内分布不均匀,与混凝土的界面结合能力较弱<sup>[13]</sup>。而在无机内养护材料中,有研究发现,轻骨料<sup>[14]</sup>、浮石<sup>[2]</sup>、沸石<sup>[15]</sup>和珊瑚砂<sup>[16]</sup>等具有一定内养护作用,但存在骨料上浮的问题。笔者选取低活性矿渣替代细集料作为内养护材料,其原状矿渣的粒度、物理性能与沙子相近,多

孔性使其可以预吸大量的自由水。相较于其他内养护材料具有一定的化学活性,不存在分布不均与骨料上浮的问题。低活性矿渣作为内养护剂既能解决混凝土收缩开裂等问题,又能有效缓解天然砂的资源消耗,还能进一步提高低活性矿渣的利用率。但现有研究主要利用其磨细粉体制备水泥<sup>[17-18]</sup>,或利用其颗粒料部分替代砂<sup>[19-20]</sup>来研究其对混凝土力学性能的影响,而将低活性矿渣颗粒作为内养护材料研究其内养护效应并讨论自收缩与电阻率相互关系鲜有报道。笔者以预吸水低活性矿渣作为内养护材料,通过非接触式自收缩试验和非接触式电阻率试验,探究在内养护的作用下水泥砂浆自收缩与电阻率之间的关系。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

水泥:山东鲁城P·I 42.5硅酸盐水泥,其化学成分及矿物组成指标见表1,物理性能指标见表2。

表1 P·I 42.5硅酸盐水泥化学成分及矿渣组成

Table 1 Chemical composition and mineral composition of Portland cement P·I 42.5

烧失量	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	矿物熟料的组成			
							C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
0.45	21.32	4.31	61.26	2.47	2.55	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

Table 2 Physical properties of Portland cement P·I 42.5

细度 (0.08 mm)/%	密度/ (g/cm <sup>3</sup> )	比表面积/ (m <sup>2</sup> /kg)	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
0.9	3.14	342	25.8	185	255	5.8	8.6	27.7	51.2

低活性矿渣:新疆宝新盛源板结高炉矿渣,破碎、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,玻璃体含量为50%,如图1所示。微观形貌如图2所示,各项质量指标见表3。

标准砂:ISO标准砂。

粉煤灰:新疆乌鲁木齐F类Ⅱ粉煤灰,比表面积为471 m<sup>2</sup>/kg,需水量比为90%。

减水剂:聚羧酸高性能减水剂,减水率30%以上。

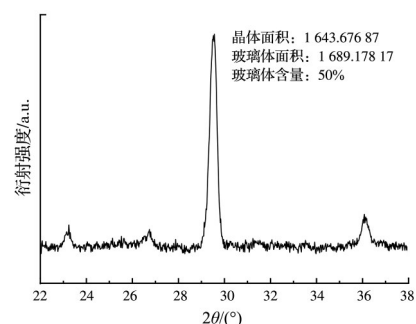
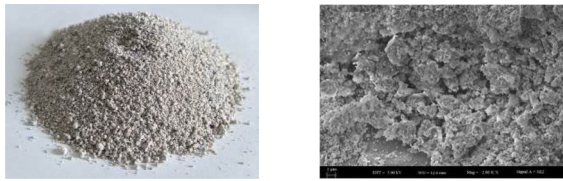


图1 低活性矿渣玻璃体含量

Fig. 1 Vitreous content of low active slag



(a) 低活性矿渣颗粒形貌 (b) 低活性矿渣微观形貌

图 2 低活性矿渣形貌

Fig. 2 Morphology of low active slag particles

1.2 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,最终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百分比计,分别为 0%(B0)、15%(B1)、25%(B2)、35%(B3),粉煤灰掺量以粉煤灰占胶凝材料质量的 35% 计;有效水胶比  $(m_w/m_B)_E$  指浆体拌和水量与胶凝材料质量的比值;内养护水量指饱和面干低活性矿渣预吸的自由水量;总水胶比指浆体拌和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,通过掺加饱和面干的低活性矿渣引入内养护水,增大了总水胶比,但有效水胶比不会发生变化。

表 3 低活性矿渣技术指标

Table 3 Technology index of low active slag

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

表 4 砂浆配合比

Table 4 Mix ratio of mortar

序号	组号	$(m_w/m_B)_E$	配合比/(kg/m <sup>3</sup> )						
			内养护水	标准砂	低活性矿渣	水	水泥	粉煤灰	减水剂
1	B0	0.36	0	1 350	0	194.4	405	135	0.6
2	B1	0.36	20.25	1 147.5	202.5	194.4	405	135	0.6
3	B2	0.36	33.75	1 012.5	337.5	194.4	405	135	0.6
4	B3	0.36	49.95	877.5	472.5	194.4	405	135	0.6

1.3 试验方法

强度试验:参照《水泥胶砂强度检测方法(ISO 法)》在标准养护箱中养护至规定龄期,然后进行测试。

电阻率试验:采用中衡港科(深圳)科技有限公司生产的无电极电阻率测定仪(CCR-3型),测试温度为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,相对湿度为  $(50 \pm 2)\%$ ,根据表 4 中配合比拌制砂浆,将新拌砂浆迅速倒入环形模具中并微微振动模具,排除气泡,然后加盖密封,启动测试。从加水到开始记录数据的时间间隔不超过 10 min,记录频率为 1 次/min,测试龄期为 168 h。测试完毕后,用千分尺测量样品的高度并进行校正,可以得到 168 h 内电阻率随时间发展的曲线。

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检测,记录频率为 1 次/15 min,测试温度为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,湿度为  $(60 \pm 5)\%$ ,测试龄期为 168 h,主要通过两端的位移传感器测定无约束状态下混凝土发生的形变,测试装置如图 3 所示,试模尺寸为  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 515\text{ mm}$ 。具体操作步骤为:1)测试前在试模里涂一层润滑脂,然后再铺 2 层聚四氟乙烯薄膜,层与层之间涂刷润滑脂,降低摩擦对试验结果的影响;2)将标靶固定在



(a) 测定仪主机



(b) 试样测试装置

图 3 非接触式混凝土收缩变形测定仪

Fig. 3 Non-contact measuring instrument for concrete shrinkage deformation



试模两端,两个标靶距离大于400 mm,开始浇筑浆体试样;3)立即密封处理,防止水分蒸发,调试试模两端的位移传感器,在浆体初凝前开始测试。在整个测试过程中,试样在变形测定仪上放置的位置、方向均应始终保持固定不变。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 低活性矿渣对砂浆力学性能的影响

图4为低活性矿渣内养护砂浆对其强度的影响。从图4可以看出,抗压强度和抗折强度呈相似的发展规律,即掺入低活性矿渣后,在龄期3 d时砂浆的强度降低幅度较大,但随着龄期的延长,低活性矿渣的内养护效应开始显现,与基准组相比,低活性矿渣掺量组后期强度发展相对较快,强度降低幅度明显变小,养护28 d时强度与基准组持平或略高于基准组。总之,低活性矿渣的引入整体上会抑制砂浆早期强度的发展,但在龄期7 d后强度显著得到补偿。主要原因是低活性矿渣本身的物理性能、颗粒强度等劣于标准砂,并且预吸水低活性矿渣以饱和面干状态引入,其粗糙表面也将吸收一部分拌和水量,使得浆体拌和水量减少,碱离子浓度下降,从而延缓了早期的水化,导致其早期强度有所降低。但随着龄期的延长,浆体内部相对湿度逐渐降低,这时处于吸水膨润状态的低活性矿渣会由于湿度梯度的作用释放出水分,供未完全水化的胶

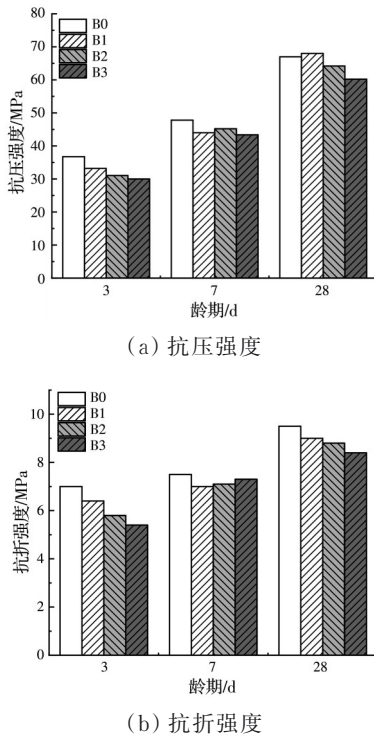


图4 不同低活性矿渣掺量对砂浆力学性能的影响  
Fig. 4 Effect of different low active slag content on mechanical properties of mortar

凝材料颗粒进一步水化<sup>[21]</sup>,发挥其内养护作用,使得内部湿度显著增大;并且低活性矿渣具有一定的化学活性,后期化学活性不断被激发<sup>[19]</sup>,使得浆体水化充分,有效改善了浆体的收缩,使得孔结构细化,促进了强度的发展。

### 2.2 低活性矿渣对砂浆自收缩的影响

图5为不同配合比高性能砂浆龄期为7 d时的自收缩发展曲线。由图5可以看出,不同低活性矿渣掺量组的自收缩发展变化曲线均呈3个明显的阶段,即AB段(快速收缩阶段)、BC段(短暂膨胀阶段)、CD段(缓慢收缩阶段)。对比各组在快速收缩阶段的自收缩发展规律发现,与基准组相比,低活性矿渣掺量组收缩持续时间较短,收缩值较小。收缩时间由基准组的0~7 h(B0)缩短为0~5 h、0~4 h、0~4 h(B1、B2、B3),收缩值分别由120  $\mu\text{m/m}$ (B0)缩短为50、26、25  $\mu\text{m/m}$ (B1、B2、B3),随着低活性矿渣掺量的增加,收缩时间持续缩短,收缩值持续下降。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,B0、B1、B2和B3的膨胀时间分别为7~9 h、5~10 h、4~12 h、4~13 h,各组膨胀值分别为40、58、73、103  $\mu\text{m/m}$ (B0、B1、B2、B3),由此看出,低活性矿渣内养护砂浆的膨胀值随其掺量的增加而变大。总体而言,低活性矿渣对浆体的自收缩具有一定的补偿作用,在缓慢收缩阶段,低活性矿渣掺量达到35%时完全消除自收缩,体积基本稳定,最终表现为自膨胀状态,有较多学者也发现了此现象<sup>[22-24]</sup>。

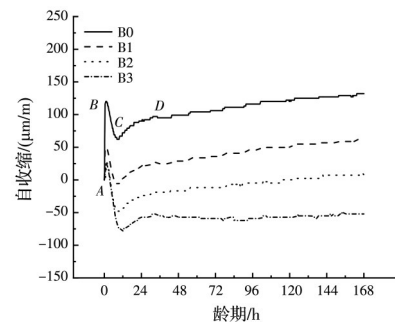


图5 不同低活性矿渣掺量对砂浆自收缩的影响  
Fig. 5 Effect of different low active slag content on autogenous shrinkage of mortar

根据上述分析,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。主要有两方面原因:1)水泥水化和环境干燥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,导致混凝土收缩<sup>[25-26]</sup>。自收缩是水泥基体骨架成型后胶凝材料继续水化引起内部湿度降低而引起的收缩,只要水化不断进

行,自收缩就会持续产生。在浆体内部湿度梯度的作用下,预湿低活性矿渣释放水分,延缓浆体内部自干燥的产生。2)预湿低活性矿渣的掺加增大了浆体的总水胶比,B1、B2、B3的内养护水量分别为20.75、33.75、49.95 g/cm<sup>3</sup>。除凝胶颗粒外,水泥石中还含有大量的水,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210×10<sup>-6</sup> °C<sup>-1</sup>,比水泥石的热膨胀系数高1个数量级<sup>[27]</sup>,所以低活性矿渣引入的内养护水大大提高了混凝土的热膨胀系数。浆体产生的热膨胀变形明显对自收缩进行补偿,自收缩的降低及热变形的增大进而使浆体提前进入短暂膨胀阶段,并且增大了此阶段的膨胀值,即表现为短暂膨胀阶段的特征变化,现有研究<sup>[28-30]</sup>也证实,内养护材料的掺加会引入内养护水,使得浆体内部的热膨胀系数增大,产生膨胀补偿自收缩。

### 2.3 低活性矿渣对砂浆电阻率的影响

图6为不同低活性矿渣掺量下砂浆的电阻率发展规律。从图6(a)可以看出,砂浆电阻率发展存在3个明显特征:1)在凝结硬化前,曲线先下降到最低点M,随着时间的延长,曲线迅速上升后进入缓慢上升阶段。2)对比水化龄期为24 h时的各组电阻率发展曲线,其中低活性矿渣组的电阻率曲线始终位于空白组的上方,且电阻率随其掺量的增加而变大。分析其原因为,低活性矿渣以饱和面干状态掺入,粗糙表面会吸收一部分的拌和水,从而导致参与溶解的自由水减少,使水泥颗粒的溶解速度变缓,液相离子浓度减小,并使得液相体积变小,因此导电较弱,电阻率较大。3)随着龄期的延长,掺低活性矿渣组的电阻率曲线明显位于空白组的下方,且电阻率随其掺量的增加而减小。主要原因是,随着龄期的延长和水化反应的进行,孔隙中的水分被消耗,由于湿度梯度的作用,处于吸水膨润状态的低活性矿渣开始释放预吸收的自由水,发挥其内养护作用。浆体内部自由水增多,液相体积增大,使得导电空间变大,电阻率变小,因此低活性矿渣掺量组

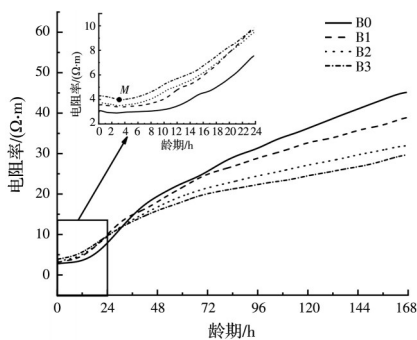


图 6 不同低活性矿渣掺量砂浆电阻率发展曲线  
Fig. 6 Resistivity development curve of mortar with different low activity slag content

电阻率曲线位于基准组下方。

### 2.4 电阻率与自收缩相关性分析

目前自收缩测试方法复杂多样,但电阻率的测试方法精确且统一,并且由于浆体的自收缩和电阻率发展都是由水泥水化引起,自收缩受到水泥水化的直接影响,而电阻率则是水泥水化过程的直观表达<sup>[31]</sup>。若可以通过测试浆体的电阻率建立其与相同条件下自收缩之间的数学关系,进而探讨二者之间的关系,将能更好地表征浆体自收缩的变化规律。图7比较了不同低活性矿渣掺量对砂浆自收缩与电阻率的相关性。由图7可知,不同低活性矿渣掺量的浆体电阻率与自收缩皆在36 h后存在很好的线性相关性,即浆体的电阻率越大,则自收缩也越大,自收缩与电阻率发展呈线性相关,归纳得出拟合关系式,如式(1)所示。其中,在36~168 h龄期内,样品线性拟合方程的k<sub>as</sub>值、b<sub>as</sub>值和相关系数R<sup>2</sup>如表5所示。

$$\epsilon_{as} = k_{as} \cdot \rho + b_{as} \quad (1)$$

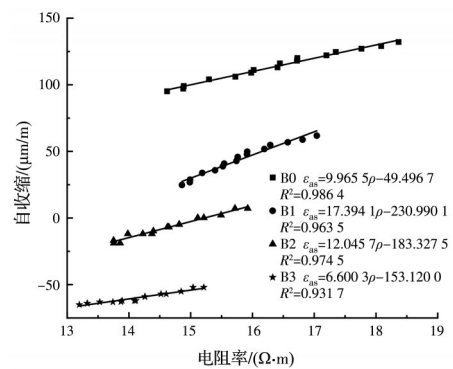


图 7 36 h后样品自收缩与电阻率的关系

Fig. 7 Relationship between autogenous shrinkage and resistivity of samples after 36 h

表 5 36~168 h内样品拟合方程的系数

Table 5 Coefficients of fitting equation of samples in 36-168 h

组号	k <sub>as</sub>	b <sub>as</sub>	R <sup>2</sup>
B0	9.965 5	-49.496 7	0.986 4
B1	17.394 1	-230.990 8	0.963 5
B2	12.047 5	-183.327 5	0.974 5
B3	6.600 3	-153.120 2	0.931 7

综上所述,电阻率与自收缩呈良好的线性关系。主要原因在于,样品内部的孔隙被离子浓度随时间变化的水溶液所充满,这些孔相数目的改变通过电阻率的变化反映出来,则电阻率表征浆体内部孔结构及孔隙率的变化,同时孔相数目和毛细孔变化又是造成自收缩的决定性原因,故自收缩随电阻率的变化而变化,其为水泥水化的宏观表现,电阻率为水化的直观表达。

### 3 结论

1)低活性矿渣掺量增加时,砂浆早期强度下降,但随着龄期的延长,砂浆中后期强度降低幅度小于早期,建议低活性矿渣的合适掺量取细集料质量的15%~25%。

2)低活性矿渣内养护对砂浆电阻率的发展影响明显,凝结硬化前,浆体电阻率随低活性矿渣掺量的增大而增大;凝结硬化后,浆体电阻率随低活性矿渣掺量的增大而减小,其中,砂浆水化进程的溶解结晶期延后,诱导凝结期、硬化加速期和硬化减速期均有所提前。

3)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。

4)在龄期36 h后,低活性矿渣内养护砂浆的电阻率与自收缩有很好的线性相关性,可通过电阻率发展趋势预测自收缩的变化情况。

### 参考文献

- [1] DING H Y, ZHANG L, ZHANG P Y. Factors influencing strength of super absorbent polymer (SAP) concrete [J]. Transactions of Tianjin University, 2017, 23(3): 245-257.
- [2] 安明喆, 韩松, 王月, 等. 桥塔用内养护高强度抗裂混凝土性能研究[J]. 铁道建筑, 2020, 60(1): 44-48.  
AN M Z, HAN S, WANG Y, et al. Study on performance of high strength crack resistant concrete with internal curing for bridge pylons [J]. Railway Engineering, 2020, 60(1): 44-48. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] 邓宗才, 连怡红, 赵连志. 膨胀剂、减缩剂对超高性能混凝土自收缩性能的影响[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(1): 61-69.  
DENG Z C, LIAN Y H, ZHAO L Z. Influence of expansion agent and shrinkage reducing agent on autogenous shrinkage of UHPC [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 47(1): 61-69. (in Chinese)
- [5] 李飞, 詹炳根. 内养护剂、膨胀剂、减缩剂对高强混凝土早期收缩的影响[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(9): 1254-1259.  
LI F, ZHAN B G. Influence of super absorbent polymer, expansion agent and shrinkage reducing agent on early autogenous shrinkage of high-strength concrete [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2016, 39(9): 1254-1259. (in Chinese)
- [6] 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 B B, OU Z W, LUO W, 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)
- [7] 刘路明, 方志, 黄政宇, 等. 膨胀剂与内养剂对超高性能混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11): 1706-1715.  
LIU L M, FANG Z, HUANG Z Y, et al. Effects of expansive agent and super-absorbent polymer on performance of ultra-high performance concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(11): 1706-1715. (in Chinese)
- [8] 钟佩华. 高吸水性树脂(SAP)对高强混凝土自收缩性能的影响及作用机理[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.  
ZHONG P H. Study on the autogenous shrinkage and mechanism of high strength concrete with super absorbent polymer [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
- [9] FARZANIAN K, VAFAEI B, GHAREMANINEZHAD A. The behavior of superabsorbent polymers (SAPs) in cement mixtures with glass powders as supplementary cementitious materials [J]. Materials (Basel, Switzerland), 2019, 12(21): 3597.
- [10] SHEN D J, FENG Z Z, KANG J C, et al. Effect of Barchip fiber on stress relaxation and cracking potential of concrete internally cured with super absorbent polymers [J]. Construction and Building Materials, 2020, 249: 118392.
- [11] WANG P J, CHEN H M, CHEN P Y, et al. Effect of internal curing by super absorbent polymer on the autogenous shrinkage of alkali-activated slag mortars [J]. Materials, 2020, 13(19): 4318.
- [12] GE Z, FENG Y J, ZHANG H Z, et al. Use of recycled fine clay brick aggregate as internal curing agent for low water to cement ratio mortar [J]. Construction and Building Materials, 2020, 264: 120280.
- [13] 马先伟, 项建平, 王继娜, 等. SAP对高性能水泥基材料水化及性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2019, 37(6): 946-952.  
MA X W, XIANG J P, WANG J N, et al. Effect of SAP's particle size on properties and hydration of high performance cement-based materials [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2019, 37(6): 946-952. (in Chinese)
- [14] 袁英杰, 郭为强, 王坤林, 等. 预湿轻细骨料内养护混凝土微观结构与渗透性能[J]. 公路交通科技, 2019, 36(1): 22-30.



- YUAN Y J, GUO W Q, WANG K L, et al. Microstructure and permeability of internally cured concrete made with pre-wetted lightweight fine aggregate [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(1): 22-30. (in Chinese)
- [15] ZHENG X, ZHANG J, DING X P, et al. Frost resistance of internal curing concrete with calcined natural zeolite particles [J]. Construction and Building Materials, 2021, 288: 123062.
- [16] LIU K Z, YU R, SHUI Z H, et al. Influence of external water introduced by coral sand on autogenous shrinkage and microstructure development of Ultra-High Strength Concrete (UHSC) [J]. Construction and Building Materials, 2020, 252: 119111.
- [17] 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 C H, WANG P M, SUN J Y. Study on properties of HPC with excessive slag replacing parts of cement [J]. Concrete, 2004(2): 28-30, 42. (in Chinese)
- [18] 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 H X. 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)
- [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 B R, YU L F, ZHANG S Q, 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, 李科, 薛欣欣, 等. 不同养护条件下GBFS高强水泥基材料的力学性能[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(5): 1046-1052.  
SHI D S, LI K, XUE X X, et al. Mechanical properties of GBFS high-strength cement-based materials under different curing conditions [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(5): 1046-1052. (in Chinese)
- [21] YANG Y H, WU J C, ZHAO S W, et al. Effects of long-term super absorbent polymer and organic manure on soil structure and organic carbon distribution in different soil layers [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 206: 104781.
- [22] LIU H J, BU Y H, MA R, et al. High-strength metakaolin-based hollow-core microspheres as an internal curing agent for mitigation of autogenous shrinkage of well cement [J]. Construction and Building Materials, 2021, 272: 121970.
- [23] LV Y, YE G, DE SCHUTTER G. Utilization of miscanthus combustion ash as internal curing agent in cement-based materials: Effect on autogenous shrinkage [J]. Construction and Building Materials, 2019, 207: 585-591.
- [24] 刘高鹏, 廖宜顺, 刘立军, 等. 苧麻纤维水泥基材料的力学性能与自收缩试验研究[J]. 功能材料, 2019, 50(7): 7176-7181.  
LIU G P, LIAO Y S, LIU L J, et al. Experimental study on mechanical properties and autogenous shrinkage of cement-based materials with ramie fiber [J]. Journal of Functional Materials, 2019, 50(7): 7176-7181. (in Chinese)
- [25] 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 Y D, ZHANG J, WANG Z B. 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)
- [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 X M, ZHANG Z L. 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 D X. 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 Y J. 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 D, QIAN J S, DANG Y D, et al. Characteristic and mitigation of concrete shrinkage related to moisture migration [J]. Materials Review, 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 L F. 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] 左义兵, 魏小胜. 粉煤灰水泥浆体的电阻率与化学收缩及自收缩的相互关系[J]. 重庆大学学报, 2015, 38(4): 45-54.  
ZUO Y B, WEI X S. Relations among electrical resistivity, chemical shrinkage and autogenous shrinkage of fly ash cement pastes [J]. Journal of Chongqing University, 2015, 38(4): 45-54. (in Chinese)