

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.03.048

热养护下矿物掺合料高性能混凝土强度 损失和孔结构研究

王晓琰¹, 李 峰^{1,2}, 岳 阳^{1,2}, 方 顺^{1,2}

(1.甘肃五环公路工程有限公司, 甘肃 兰州 730050; 2.甘肃省桥梁工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 为了研究热养护对矿物掺合料高性能混凝土后期强度和微观结构的影响,不同恒温时长、不同恒温温度养护下矿物掺合料高性能混凝土进行强度试验和孔结构分析。结果表明:与标准养护相比,热养护能快速提升混凝土早期强度,但热养护温度越高、时间越长,混凝土后期的强度损伤越大,孔隙率也越大。80℃热养护 48 h 后转标准养护 28 d 的强度损失为 50℃的 4.4 倍,总孔隙率为 1.091 倍。与标准养护和自然养护相比,后养护方式采用 Ca(OH)₂ 饱和水溶液养护,对热养护混凝土的后期强度和孔径分布有一定的改善。

关键词: 热养护;早期强度;强度损失;孔结构

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)03-0186-04

0 引 言

目前对于混凝土材料热养护的研究较多。田耀刚等^[1-3]研究了热养护的静养时间、升温降温速率、恒温温度等各项热养护参数对混凝土抗硫酸盐侵蚀、抗碳化性能和抗冻性的影响。贺智敏等^[4]分析了热养护工艺和热养护参数对混凝土的毛细吸水性的影响,以及热养护后混凝土的表皮损伤,得出了加入矿物掺合料能够有效降低损伤程度的结论。刘宝举等^[5-6]通过复掺矿粉和粉煤灰改善了热养护混凝土的力学性能,增强了热养护混凝土后期强度,并且研究了超细粉煤灰代替等量的水泥材料后热养护混凝土的抗冻性、抗渗性、氯离子扩散系数等耐久性指标。耿建等^[7]通过压汞法研究了热养护制度对混凝土孔结构的影响规律,得出延长混凝土静养时间能有效改善热养护混凝土的孔结构的结论。但是目前关于热养护矿物掺合料高性能混凝土强度损失、孔结构和后养护对强度损失的修复研究较少。本试验主要研究了矿物掺合料高性能混凝土热养护下的强度损失、孔结构分布,以及不同后养护条件对热养护混凝土的强度损失的影响。

1 试验

1.1 试验材料

试验选用兰州祁连山水泥厂生产的 P·O 42.5

水泥,水泥的各项指标见表 1。粉煤灰为兰州鑫合源有限责任公司生产的Ⅱ粉煤灰,粉煤灰各项指标见表 2。矿粉采用兰州榆中鸿源有限责任公司生产的 S95 级矿粉,矿粉各项指标见表 3。减水剂采用上海三瑞聚羧酸系高性能减水剂;细骨料选用甘肃白银天然河砂,Ⅱ级砂细度为 2.45,表观密度为 2 599 kg/m³,堆积密度为 1 515 kg/m³;粗骨料选用 5~25 mm 连续级配碎石,紧密度为 1 700 kg/m³。

表 1 P·O 42.5 水泥各项指标

比表面积 / (m ² ·kg ⁻¹)	安定性	凝结时间		抗压强度		抗折强度	
		/min		/MPa		/MPa	
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
345	合格	100	140	22.5	46.8	5.4	8.9

表 2 Ⅱ级粉煤灰各项指标

细度 (45 μm 方孔筛筛余)	需水量比	含水量	烧失量
20	89	0.2	5

表 3 S95 矿粉各项指标

比表面积 (m ² ·kg ⁻¹)	密度 (g·cm ⁻³)	流动度比	活性指数 /%	
			7 d	28 d
435	2.9	105	80	101

1.2 试验方法

(1)强度试验。根据 GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验标准,按设计的配合比(见表 4)成型尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的混凝土立方体试块。静养 24 h 拆模后,一部分进行 50℃、60℃、70℃、80℃四种热养护温度养护,然后测其 3 h、6 h、9 h、12 h、24 h、48 h,以及热养护完成后转标准养护

收稿日期: 2021-06-19

作者简介: 王晓琰(1980—),男,本科,高级工程师,从事交通工程相关工作。

表4 混凝土配合比

单位:kg

水泥	水	粉煤灰	矿粉	粗骨料 (中)	粗骨料 (小)	细骨料	减水剂
312	153.6	48	120	812	348	711	4.32

28 d 的试块抗压强度;一部分进行标准养护,测其28 d 龄期的抗压强度。

(2)微观孔结构试验。将养护至相应龄期的混凝土试块放入 VJH 真空饱水机,在 -0.075 MPa 条件下无水抽真空 3 h,然后保持真空注入蒸馏水,湿抽 1 h 后转为常压浸泡。常压浸泡 18 h 后取出试块,用塑料保鲜膜缠绕包裹,放入核磁共振仪线圈,利用 Macro MR12-150H-I 核磁共振仪,进行孔结构测试。

(3)后养护试验。将 50°C 、 60°C 、 70°C 、 80°C 热养护温度下养护 48 h 的混凝土试块降至 20°C 后,分别转为 $(20 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ 标准养护、 $(20 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ 水养护[饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水溶液]、自然养护(出棚洒水养护 2 d 后覆塑料薄膜),养护至 28 d 龄期,进行抗压强度和孔结构测试。

2 试验结果与分析

2.1 热养护对混凝土抗压强度的影响

不同热养护温度的混凝土均以 $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的升温速率升至设定的恒温温度,养护至相应时长后,以 $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的降温速率降至室温测其抗压强度。 50°C 、 60°C 、 70°C 、 80°C 恒温温度下养护相应时长的混凝土抗压强度如图 1 所示。

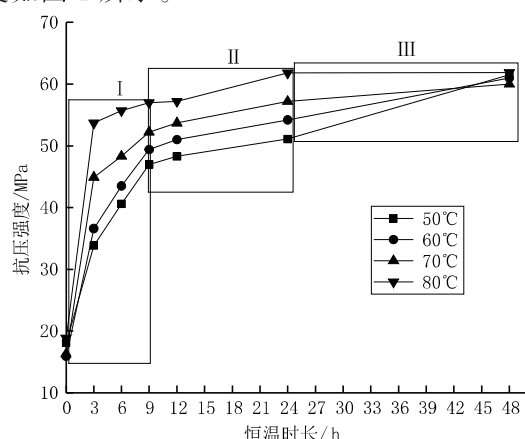


图1 热养护条件下混凝土抗压强度

从图 1 可以看出,热养护条件下,随着热养护温度和时长的增加,混凝土早期强度逐渐增长,热养护温度越高,强度增长越快。 50°C 恒温养护 9 h 时混凝土抗压强度基本达到设计强度的 75% 以上。 80°C 恒温养护 9 h 时抗压强度达设计强度的 95% 以上。24 ~ 48 h 时, 50°C 、 60°C 、 70°C 恒温养护下混凝土强度还在继续增长,但 80°C 恒温下的混凝土强度已基本不

再增长。混凝土强度增长规律大体可分为三个阶段:0 ~ 9 h 快速增长阶段、9 ~ 24 h 稳定增长阶段、24 ~ 48 h 缓慢增长阶段。恒温养护 48 h 之后,混凝土强度基本达到最大值。这是因为高温高湿的养护条件加快了矿物掺合料高性能混凝土中水泥的水化速率生成 CH,而高温促使矿物掺合料中的 SiO_2 和 Al_2O_3 能快速与 CH 生成水化 CaSiO_3 和水化 $\text{Ca}(\text{AlO}_2)_2$ 等一系列水化产物,所以在热养护条件下,混凝土一、二阶段强度增长较快。第三阶段时,水泥的水化反应基本完成,水化产物数量和水化速度趋于疲软,所以混凝土强度增长缓慢。

将热养护 48 h 的试块降至 20°C ,转入标准养护室进行恒温 $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$,湿度 95% 的标准养护,养护 28 d 龄期后测其抗压强度,并与蒸养 48 h 以及拆模后标准养护 28 d 龄期的试块进行对比,其结果如图 2 所示。

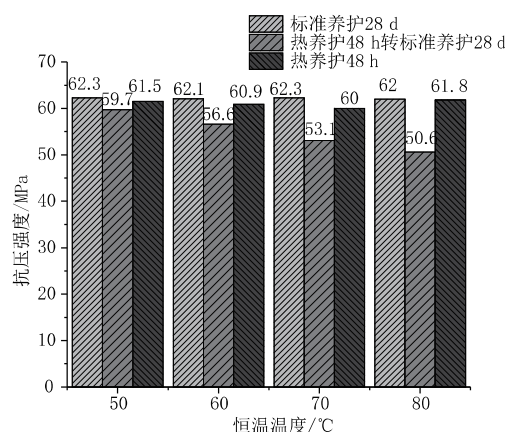


图2 抗压强度

由试验结果可知,与标准养护相比,热养护虽然能够快速使混凝土在短期内就能达到设计强度,但是热养护后转为标准养护的 28 d 抗压强度却低于标准养护 28 d 的强度和蒸养出棚时的强度。这表明热养护后对混凝土后期强度有一定的损伤。由图 2 可以看出,进行 50°C 、 60°C 、 70°C 、 80°C 热养护后转标准养护 28 d 的混凝土强度损失率分别为 4.2%、8.9%、14.8%、18.4%。通过分析发现,混凝土在标准养护条件下,其胶凝体系水化速度较慢,水化程度充分,水化产物分布均匀。而热养护过程中,水泥及其掺合料水化速度加快,水化产物迅速堆积、分布不均,水化产物包裹着未水化的颗粒,水分子向未水化的水泥颗粒及其掺合料颗粒扩散速度减慢。并且由于水化产物迅速堆积而产生了一定的粗晶体,在混凝土内部产生较多孔隙的同时,也产生了一定的拉应力,造成更多有害孔和裂隙的出现。过高的热养护温度使早期水化生成的钙矾石分解,但在后期标准养护中

又重新生成。而这些裂隙在标准养护中为钙矾石产生析出提供了空间条件,使混凝土后期强度降低。

2.2 热养护对混凝土孔结构的影响

采用 Macro MR12-150H-I 核磁共振仪对养护相应龄期的混凝土进行孔结构测试,试验结果如图 3 所示。

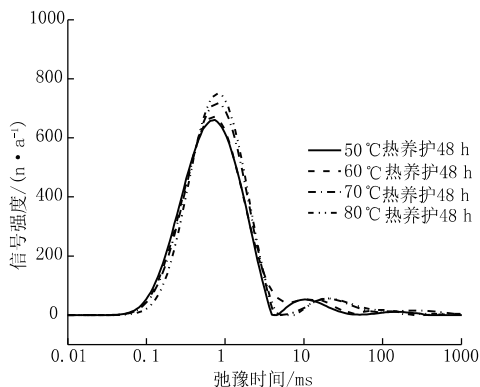


图 3 48 h T2 谱分布

通过观察图 3 中的 T2 曲线可以发现,四种温度下的 T2 谱都是三个波峰,从左到右依次称为第 1 波峰、第 2 波峰、第 3 波峰。三个波峰对应有不同的弛豫区间和信号强度。弛豫时间和信号强度代表孔径的大小和相对应孔径孔隙的数量。通过数据可知,随着热养护温度升高,信号强度逐渐增大,50℃下热养护 48 h 的第一峰信号强度为 660.77,80℃的信号强度达到 750.4。这说明混凝土中小孔的比例随着热养护温度的升高逐渐增大。图 4 中的孔喉分布也证明了这一点,50℃时 0~0.1 μm 孔径为 86%,60℃时 0~0.1 μm 孔径为 87.6%,70℃时 0~0.1 μm 孔径为 88.5%,80℃时 0~0.1 μm 孔径为 90%。而随着温度的升高,大孔的比例逐渐减小。当热养护温度达到 80℃时,0.1~0.25 μm 孔径增加了 3.39%。这说明随着热养护温度的升高,大孔慢慢向小孔转化。但是随着温度的升高,总孔隙率却不断增加,50℃、60℃、70℃、80℃热养护 48 h 的总孔隙率分别为 5.61%、5.73%、6.0%、6.12%。这主要是因为混凝土中的矿物掺合料在较高的热养护温度下,水化速度加快,反应生成了更多的含有凝胶孔的凝胶,细化了混凝土内部的孔径。同时高温热养护增加混凝土内部有害孔的数量,导致总孔隙率的增加。

从图 5 可知,热养护转标准养护后,T2 谱第一峰小于标准养护 28 d 的峰值,其纵坐标随着热养护温度的升高而减小,横坐标左移,第三峰的纵坐标与 48 h 的 T2 谱相比有所增加,且热养护温度越高增加的幅度越大。这说明热养护转标准养护 28 d 后,混

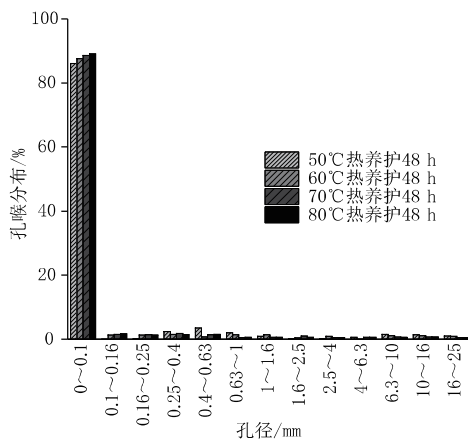


图 4 48 h 孔喉分布

凝土内部大孔和有害孔的数量增加,导致内部小孔的比例降低。

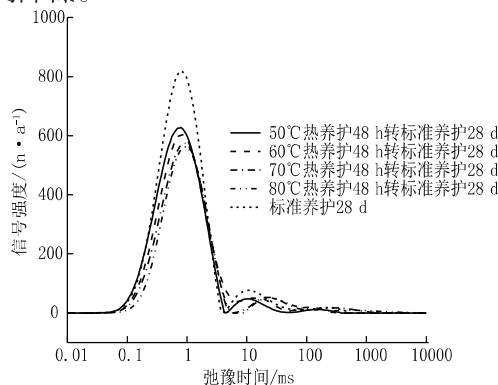


图 5 28 d T2 谱分布

从图 6 可以看出,50℃热养护转标准养护 28 d 龄期时,0~0.1 μm 孔径为 88.02%,比 48 h 时增加 2%,比标准养护小 3.34%;0.10~0.25 μm 孔径为 0.3%,比 48 h 时增加 0.124%,比标准养护多 0.14%。而 80℃热养护转标准养护 28 d 龄期时,0~0.1 μm 孔径为 85.01%,比 48 h 时降低了 4.01%,比标准养护小 6.35%;0.10~0.25 μm 孔径为 2.43%,比 48 h 时减少 0.54%,孔径大于 0.25 μm 比 48 h 时多 4.54%,比标准养护多 4.7%。50℃、60℃、70℃、80℃热养护 48 h 后转标准养护 28 d 的总孔隙率分别为 5.76%、5.95%、6.25%、6.41%,标准养护 28 d 的总孔隙率为 7.42%。

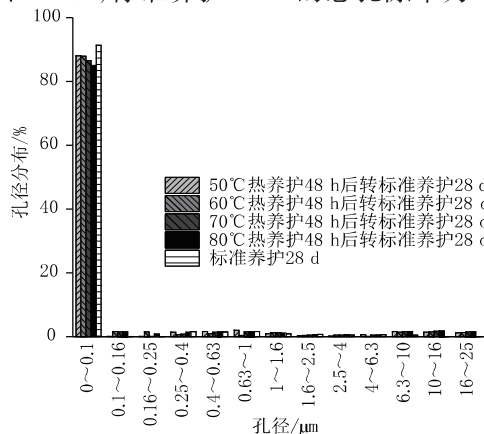


图 6 28 d 孔喉分布

2.3 后养护方式对混凝土强度和孔结构的影响

为探究热养护结束后各种后养护制度对混凝土强度的影响,将热养护后的试块降至室温后,分别转为 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$,湿度 95%标准养护、水养护[(饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水溶液)]和自然养护(出棚洒水养护 2 d 后覆膜养护)。养护至 28 d 龄期后进行抗压强度试验和孔结构测试,强度结果如图 7 所示。

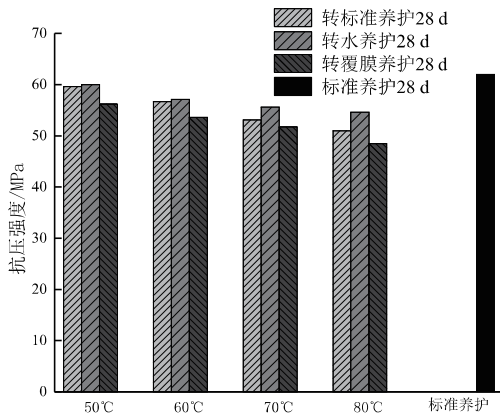


图 7 不同养护制度的抗压强度

从图 7 可以看出,对于热养护混凝土而言,不同的后养护制度对其强度影响不同。采用饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水溶液养护的热养护混凝土,28 d 龄期的抗压强度明显高于标准养护和自然养护。与标准养护相比,80℃热养护后采用水养护的方式,其 28 d 龄期的强度损失率为 11.9%,而热养护后转为标准养护和自

然养护的混凝土强度损失率分别为 18.4%、21.7%。这说明后期水养护对热养护混凝土强度损失有一定的修复作用。这主要是因为进行水养护能够促进胶凝材料中水泥和矿物掺合料的二次水化,而且当二次水化反应消耗混凝土内部 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 时,水溶液中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 能够不断补充,促使矿物掺合料的水化更加彻底,从而生成更多的水化产物,使混凝土内部结构更加致密,稳定强度提高。

从图 8 中各个热养护温度不同后养护条件下混凝土 T2 分布图分析可以看出,相对于热养护后采用水养护和自然养护,水养护能够有效增加热养护混凝土中孔径小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的小孔的比例,降低孔径大于 $10 \mu\text{m}$ 有害孔的数量。50℃蒸养护转水养护总孔隙率为 5.22%,转标准养护总孔隙率为 5.61%,转自然养护总孔隙率为 5.79%。由此可见,进行水养护后能够促使混凝土内部大孔向小孔转化,细化混凝土内部孔隙,降低总孔隙率,提高混凝土的宏观性能。

3 结 论

(1)对混凝土进行热养护能够快速有效地提升其早期强度,且随着养护温度升高和养护时长的增加,混凝土强度不断增长。热养护虽然能够提升混凝土

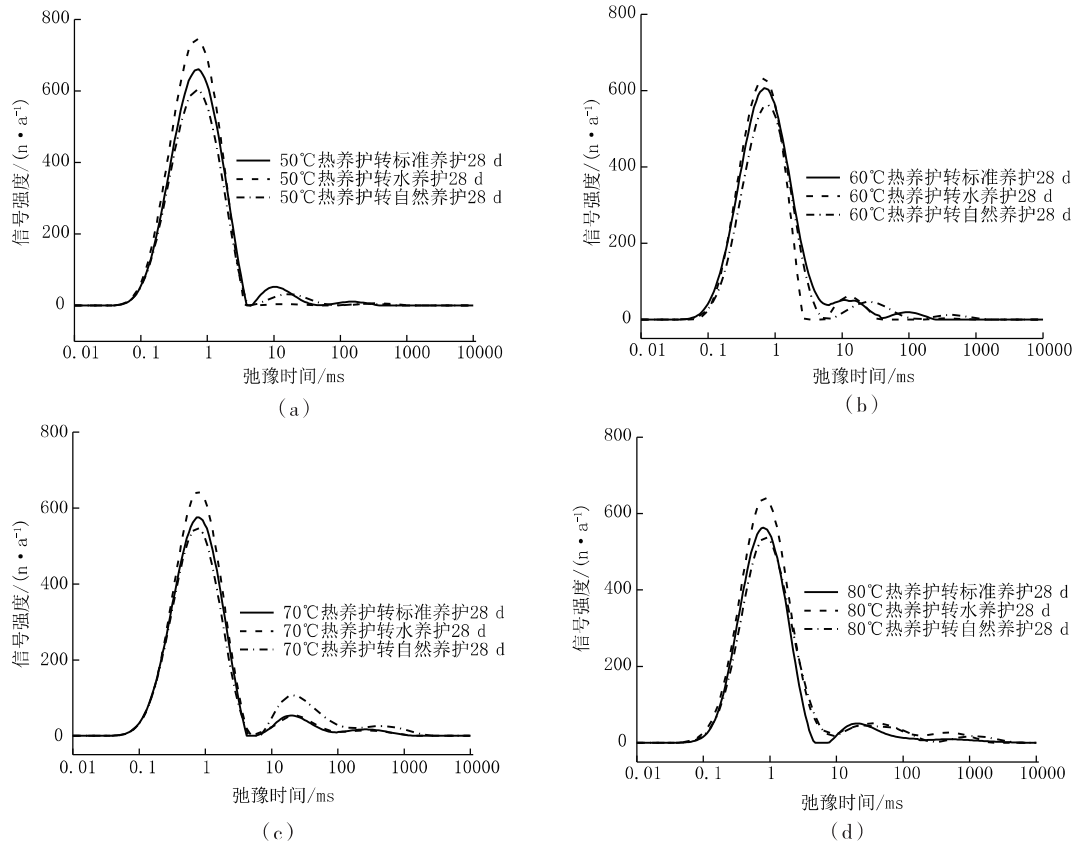


图 8 不同养护方式下的混凝土 T2 谱分布

4 结 语

本文在达索 3DE 平台(2015X)上采用骨架驱动 + 模板方法建立钢组合梁拱桥模型。模板的建立过程与设计思路一脉相承,形成了一系列钢组合梁拱桥的构件模板,丰富了专业构件库内容,并通过构件库的标准化模板调用流程完成了全桥模型的搭建。

在模板建立过程中,通过模型校核发现了拱梁结合段结构之间存在较大偏差、主拱板件之间的碰撞冲突。由此,找到设计图纸上表达有误的地方,及时发现了设计隐患,最终通过设计调整,由模型验证确认。最后,还对模型进行统一的构件编码,基于编码提取了模型构件的设计属性信息形成一系列的构件设计属性信息表,为模型的深度应用创造了便利条件。

通过 BIM 技术将复杂桥梁结构进行构件拆解,将难以理解的二维图纸转换为更为直观和真实的三维模型展示,提前做到施工放样深度,为更全面更深入辅助优化设计提供有效的手段。

参考文献:

- [1] 王伟.永宁黄河公路大桥主桥设计中的 BIM 应用探析[J].中国勘察设计,2017(1):80-82.
- [2] 赵项.浅谈 BIM 技术在主题乐园 EPC 项目中的应用[J].建设监理,2020(5):10-12.
- [3] 黄亚斌.BIM 技术在设计中的应用实现[J].土木工程信息技术,2010,2(4):71-78.
- [4] 黄俊炫,张磊,叶艺.基于 CATIA 的大型桥梁三维建模方法[J].土木工程信息技术,2012,4(4):51-55.
- [5] 李斌,宗志坚,郭莉莉,等.基于 CATIA V5R20 的水利水电工程三维设计应用教程[M].郑州:黄河水利出版社,2011.
- [6] 张磊.三维技术在拱桥方案设计中的应用实例[J].土木工程信息技术,2013,5(4):86-92.

~~~~~  
(上接第 189 页)

的早期强度,但对混凝土后期强度有一定的损伤,前期热养护温度越高,后期强度损失越大。

(2)热养护能够促进胶凝体系中矿物掺合料的水化速度,激发火山灰效应,细化混凝土内部孔径,促使大孔向小孔转化,但同时也增加了有害孔的数量,增大了总孔隙率,热养护后转为标准养护 28 d,有害孔的孔径和数量进一步增大。

(3)与标准养护和自然养护相比,热养护后采取  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  水溶液养护的方式,对热养护混凝土产生损伤有一定的修复作用,能够降低混凝土的强度损失率,优化内部孔结构,降低总孔隙率,提高混凝土的性能。

### 参考文献:

- [1] 田耀刚,李炜光,彭波,等.蒸养参数对高强混凝土抗冻性能的影响[J].建筑材料学报,2010,13(4):515-519.
- [2] 田耀刚,彭波,丁庆军,等.蒸养参数对高强混凝土碳化性能的影响[J].建筑材料学报,2009,12(6):720-723.
- [3] 田耀刚,彭波,丁庆军,等.蒸养参数对高强混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2010(3):1-4.
- [4] 贺智敏,龙广成,谢友均,等.蒸养混凝土的毛细吸水特性研究[J].建筑材料学报,2012,15(2):190-195.
- [5] 刘宝举,谢友均.蒸养超细粉煤灰混凝土的强度与耐久性[J].建筑材料学报,2003(2):123-128.
- [6] 刘宝举,谢友均,李建.粉煤灰-矿渣复合超细粉蒸养混凝土力学性能[J].建筑材料学报,2002(4):311-315.
- [7] 耿健,彭波,孙家瑛.蒸汽养护制度对水泥石孔结构的影响[J].建筑材料学报,2011,14(1):116-118,123.