

养护条件对 UHPC 强度和毛细吸水性的影响

施范铎^{1,2}, 贺智敏^{1,2*}, 刘畅¹, 魏玲玲¹, 巴明芳¹

(1. 宁波大学 土木与环境工程学院, 浙江 宁波 315211;

2. 宁波大学 滨海城市轨道交通协同创新中心, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为优化超高性能混凝土(UHPC)预制构件养护工艺, 研究了不同养护条件对 UHPC 强度和毛细吸水性的影响, 并采用孔结构测试、热重分析和扫描电镜观察, 对其机理进行了分析. 结果表明: 热养护显著提高了 UHPC 的 7 d 强度, 这与加速火山灰反应有关, 但高温和干热养护对其后期强度增大不利, 甚至出现约 3% 的强度倒缩; 不论何种养护, UHPC 总体均具有较低的毛细吸水性, 毛细吸水系数随试件吸水时间和养护龄期增长而显著降低, 干热养护试件的毛细吸水性高于其他养护条件; 从综合性能考虑, 干热养护温度宜控制在 100 °C 以下, 超过 150 °C 会显著增大 UHPC 的总孔和大孔孔隙率, 并增大毛细吸水性. 电镜观察到热养护试件内部存有微裂纹, 而钢纤维可以抑制周围水化产物微裂纹的发生.

关键词: 超高性能混凝土; 养护条件; 毛细吸水性; 孔结构; 力学强度

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2022) 03-0010-09

超高性能混凝土(UHPC)是通过引入超细活性矿物组分和纤维, 采用不同粒径颗粒最紧密堆积制备得到的具有超高强度、耐久性的新型水泥基工程材料, 在土木工程领域具有广阔的应用前景^[1-2].

由于高掺量胶凝材料的存在, 养护对 UHPC 性能与结构有显著影响, 且不同于普通混凝土. 目前已有不少学者研究了不同养护条件对 UHPC 强度性能的影响, 如赵金侠等^[3]研究发现, 相比于常温养护, 高温养护有利于提高 UHPC 早期强度, 但早期快速收缩造成的内部结构裂纹会导致 UHPC 后期强度下降. Liu 等^[4]研究了养护温度(150、200、250、300 °C)和养护时间(4、8、12 h)对活性粉末混凝土力学性能的影响, 发现在一定温度范围内 UHPC 的抗压强度随养护温度和压力的增大而增强. Yang 等^[5]研究发现, 经 90 °C 热水养护 6 d 后, UHPC 的抗压强度、抗弯强度和断裂能较 20 °C 常温水养时有所提高. Hiremath 等^[6]研究发现, 热水-干热组合养护可以显著提高 UHPC 早期的抗压强

度, 其中干热养护温度、持续时长为重要的影响因素. 牛旭婧等^[7]以养护温度、热养护时长等为组合养护参数, 研究了养护对 UHPC 抗压强度、劈裂抗拉强度和抗高温爆裂性能的影响, 发现组合养护制度(90 °C 热水养护 2 d, 然后 250 °C 干热养护 3 d)可以显著提升 UHPC 的力学性能. 目前对 UHPC 养护制度的研究主要围绕抗压强度、劈裂抗拉强度、高温爆裂和断裂性能等, 而对其毛细吸水性研究较少^[8]. 服役环境下的 UHPC 结构一般处于非饱和状态, 含有侵蚀性离子的液态水侵入 UHPC 内部主要是通过毛细吸附作用^[9]. 毛细吸水性可以表征混凝土表面状况, 且测试精度高, 因此毛细吸水性常作为混凝土耐久性的一种评价指标^[10-11].

本文结合工程实践, 模拟预制构件生产实际设计养护方式, 以强度、毛细吸水性与孔结构作为评价指标, 分析不同养护条件对 UHPC 性能与孔结构的影响及其相互之间的关系. 通过热分析和扫描电镜研究其机理, 以实现 UHPC 预制构件生

收稿日期: 2021-11-26.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY17E080007); 宁波市自然科学基金(202003N4137); 宁波大学滨海城市轨道交通协同创新中心开放基金(2020004).

第一作者: 施范铎(1997-), 男, 浙江永康人, 在读硕士研究生. 主要研究方向: 混凝土材料. E-mail: 2318878173@qq.com

*通信作者: 贺智敏(1973-), 男, 湖南邵阳人, 博士/副教授, 主要研究方向: 混凝土材料. E-mail: hezhimin@nbu.edu.cn

产的材料设计和优化.

1 原材料及试验方法

1.1 原材料与配合比

水泥为 42.5 级普通硅酸盐水泥, 密度为 3.13 g·cm⁻³; 偏高岭土平均粒径为 2 μm, 密度为 2.3 g·cm⁻³, 比表面积约为 25 000 m²·kg⁻¹; 矿粉比表面积为 426 m²·kg⁻¹. 水泥、偏高岭土和矿粉的化学组成见表 1. 细骨料采用河砂和石英砂, 河砂的细度模数为 2.62, 表观密度为 2.6 g·cm⁻³, 符合 II 区级配; 石英砂的细度模数为 4.28. 纤维采用长度为 20 mm、直径为 0.35 mm 的光滑镀铜端勾型钢纤维和长度为 13 mm、直径为 0.2 mm 的平直型钢纤维. 选用固含量为 10% 的聚羧酸高效液体减水剂, 拌合水为洁净自来水.

表 1 胶凝材料的化学组成

材料	质量分数/%						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	烧失量
普通水泥	16.23	2.81	4.30	69.52	1.33	4.17	2.2
偏高岭土	59.60	36.07	0.82	0.51	—	0.09	—
矿粉	31.79	9.88	1.10	43.85	5.46	3.16	—

试验参照工程常用的配合比, 水胶比为 0.18, 减水剂掺量为胶凝材料质量的 2%; 矿物掺合料采用外掺法, 偏高岭土和矿粉掺量分别为水泥质量的 30% 和 20%; 河砂和石英砂以 8:2 混合后使用, 砂胶比为 1:1; 钢纤维掺量为胶凝材料体积的 2%.

1.2 养护条件

为了便于性能对比, 将所有试件在相同条件下成型, 试件浇筑完成后立即用塑料薄膜覆盖, 放置于标准养护室中, 养护 1 d 后取出进行脱模处理, 然后立即根据养护制度(表 2)进行养护. 养护完毕, 将所有试件继续标准养护(温度(20±2) °C, 相对湿度 90% 以上, 以下简称标养)至测试龄期.

表 2 养护制度

养护类型	养护制度	技术说明
单一养护	常温浸水养护 (W)	标养室 20 °C 浸水养护至所需龄期
	蒸汽养护 (VN3)	蒸养 3 d, 恒温 90 °C, 再标养至测试龄期
	热水养护 (S3T4)	60 °C 水养 3 d, 100 °C 水养 4 d, 再标养至测试龄期

续表

养护类型	养护制度	技术说明
组合养护	浸水-热水养护 (W3T4)	20 °C 水养 3 d, 100 °C 水养 4 d, 再标养至测试龄期
	浸水-干热养护 1 (W2GT3)	20 °C 水养 2 d, 100 °C 烘箱养护 3 d, 再标养至测试龄期
	浸水-干热养护 2 (W4GT3)	20 °C 水养 4 d, 100 °C 烘箱养护 3 d, 再标养至测试龄期
	浸水-干热养护 3 (W4GF3)	20 °C 水养 4 d, 150 °C 烘箱养护 3 d, 再标养至测试龄期

为阐明不同养护条件对 UHPC 试件表面质量的影响, 对比测试了表面打磨试件和未打磨试件 3 个龄期的毛细吸水性.

1.3 试验方法

1.3.1 力学性能试验

根据文献[12]进行试件抗折和抗压强度测试和评定, 得到一组 3 个 40 mm×40 mm×160 mm 棱柱体试件的强度测定值后, 再进行强度评定得到试验结果.

1.3.2 毛细吸水性试验

采用混凝土初始表面吸水性测试方法(Initial Surface Absorption Test, ISAT)测定混凝土的毛细吸水性^[13]. 将成型边长为 50 mm 立方体试件, 养护至测试龄期后, 分为打磨和不打磨试件. 打磨试件采用 120#砂纸打磨表面, 不打磨试件不做表面处理. 采用毛细吸水性试验装置(图 1)测得吸水性数据, 再采用线性拟合得到毛细水吸附系数(S). 详细测试过程参见文献[13].

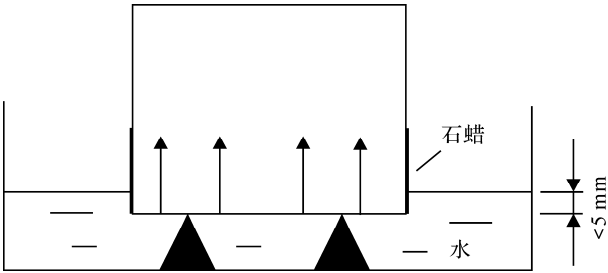


图 1 毛细吸水性试验装置

1.3.3 孔结构试验

孔结构测试采用“可蒸发水含量法”^[14], 首先成型边长为 50 mm 立方体试件, 试件经真空饱水后的质量为 M_0 , 然后放置在保持约 90% 相对湿度的干燥器中达到水分扩散平衡, 此时质量为 M_1 , 最后在 105 °C 烘箱中烘干至恒重, 冷却至室温, 称

取质量为 M_2 , 大孔(孔径大于 30 nm)和总孔的孔隙率采用式(1)计算得到; 小孔孔隙率为总孔隙率与大孔孔隙率的差值.

$$P = V_w / V_c = ((M_0 - M_i) \rho_c) / (M_0 \rho_w) \times 100\%, \quad (1)$$

式中: P 为试件对应的孔隙率; V_w 为试件中水的体积, cm^3 ; V_c 为待测试件体积, cm^3 ; ρ_c 为试件密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; ρ_w 为水的密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; M_i 为试件失水后质量, g .

1.3.4 热重分析试验

热重分析试样分别取自经历 W、VN3、S3T4、W3T4、W2GT3、W4GT3 和 W4GF3 养护过程, 龄期为 28 d 的 UHPC 立方体试件中部压碎试样. 先用铁锤轻轻敲碎水泥石, 再用套筛尽量筛除砂砾, 最后将试样研磨成粉末, 过 $80 \mu\text{m}$ 方孔筛, 用无水乙醇终止水化, 等待测试. 热重分析测试采用德国耐驰 STA449C 型热重分析仪, 测试温度为 $25 \sim 1000^\circ\text{C}$, 升温速率为 $10^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$, 全程氮气保护.

1.3.5 电镜分析

电镜分析试样分别取自经历 W、VN3、W3T4、W2GT3 和 W4GF3 养护过程, 龄期为 28 d 的 UHPC 立方体试件中部压碎试样. 将破碎试件进行制样, 样品用无水乙醇浸泡终止水化, 观测前做喷金处理. 采用韩国 COXEM 的 EM30⁺ 型台式扫描电镜观测 UHPC 的微观结构.

2 试验结果与分析

2.1 力学性能

经历不同养护制度后 UHPC 的抗压和抗折强度如图 2 所示. 从图 2 可见, 相较常温浸水养护, 其他 6 种养护制度下的 UHPC 因高温作用水泥快速水化, 且矿物掺合料二次水化反应生成了较多的水化产物, 因此其他 6 种热养护可以有效提高 UHPC 的 7 d 抗压和抗折强度; 组合养护相比单一热养护对 UHPC 强度提升效果更好, 与常温浸水养护试件 7 d 抗压强度相比, 单一热养护和组合养护最高分别可以提升 9.3% 和 25%.

但从 28、120 d 抗压和抗折强度看, 热养护后的试件后期强度不如 20°C 水养护, 150°C 干热养护下 120 d 试件的抗压强度出现了约 3% 的倒缩, 而 20°C 浸水养护试件后期强度持续增长. 其原因在

于热养护使水化速度加快, 生成的水化产物来不及分散, 导致过于粗大, 并包裹有未水化水泥颗粒, 不利于后期水化. 另外, 由于各组分的热膨胀系数不同, 加速热养护过程中的热膨胀易于引发微裂纹, 导致后期强度降低^[15].

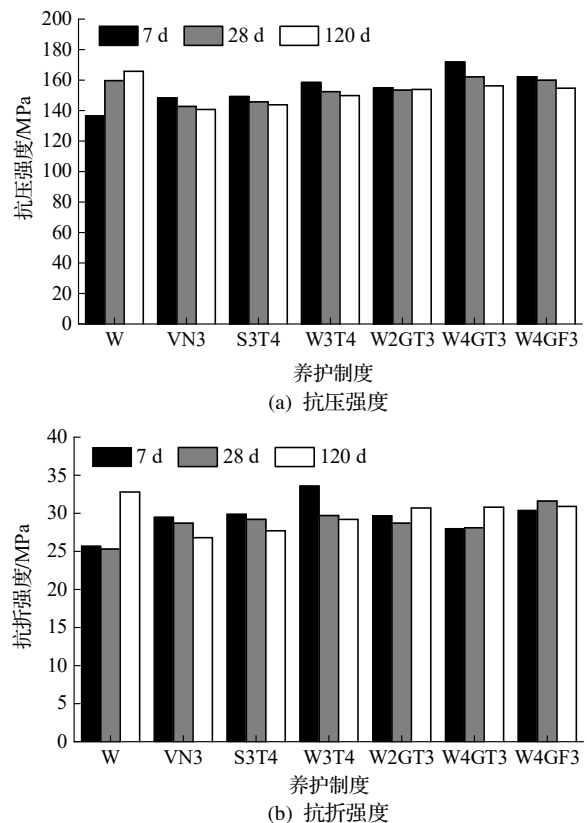


图 2 不同养护制度下混凝土力学性能

由图 2(b) 可见, 除 20°C 浸水养护试件, 其他热养护试件 7 d 后的抗折强度基本无增长; 在热养护试件中, 3 种浸水-干热养护 UHPC 的 120 d 抗折强度明显高于未经过干热养护 UHPC 的抗折强度. 原因可能是干热养护使基体与钢纤维之间的黏结强度有所提高, 这与文献[4]的研究结果类似.

2.2 毛细吸水性

2.2.1 UHPC 的毛细吸水量

图 3~图 5 为不同养护制度对 UHPC 打磨试件 7、28、120 d 龄期的毛细吸水量的影响. 由图 3 可见, 初期 0~240 min 吸水量随时间增长较快, 后期毛细吸水量增速明显放缓. 这是因为水分在往内部传输时会遇到如凝胶孔这种比毛细孔更小的孔隙. 另外, 在界面过渡区存在更大的毛细孔, 水传输至孔中水/空气界面处形成亚稳或稳定的半月板

形态, 从而阻碍水的侵入^[13].

7 d 龄期时 3 种浸水-干热养护制度下试件的毛细吸水量较高, 最高值 W4GF3 组单位面积毛细吸水量达到 1.46 mm, 比 W 组高约 1 倍; 而 W3T4、VN3、S3T4 组的毛细吸水量较低且很接近. 其原因是浸水预养时间越长, 试件内部吸收水分越多, 后期高温干热养护时大量水分向外界蒸发, 在试件内部形成较多的毛细孔, 养护温度越高表现越明显. W4GT3 组在干热养护完成恢复至室温后, 即刻进行 7 d 龄期毛细吸水性测试, 相较经标养 2 d 的 W2GT3 组更为缺水, 试件自身越干燥, 水越容易进入混凝土内部, 最终导致 W4GT3 组早期的毛细吸水性强于 W2GT3 组.

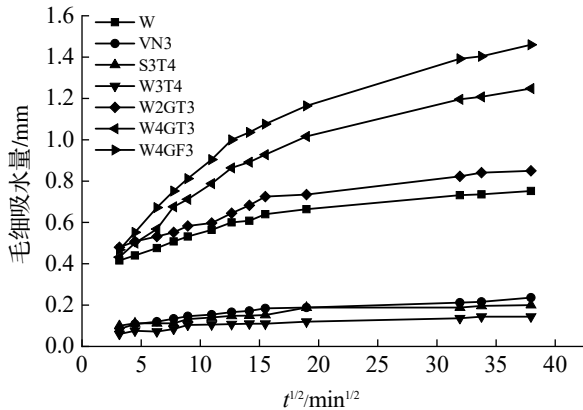


图3 打磨试件 7 d 毛细吸水量

由图 4 和图 5 可见, 随着龄期的增长, 各试件组毛细吸水量大幅降低, 且差异减小, 尤其是干热养护试件. 说明在经历早期干热养护后, 内部处于极度干燥状态, 后续标准养护提供了有效的补水, 进一步生成的水化产物减少了毛细孔, 从而降低了毛细吸水量.

图 5 为打磨试件 120 d 时毛细吸水量变化. 与 28 d 相比, 120 d 时其毛细吸水性随时间的变化规律发生了显著变化, 由原先的曲线变成了直线. 28 d 时各试件毛细吸水性变化存在 2 个不同的吸附阶段, 初始阶段水吸附速率较大, 随后水吸附速率随之降低, 呈指数型衰减. 原因是早期吸水性主要受毛细孔影响, 以毛细作用为驱动力; 后期吸水性变化受混凝土中孔径更小的凝胶孔控制, 以扩散过程为主. 因此认为在 120 d 后, UHPC 表层和内部的孔隙变得更为均匀、孔隙细化、大毛细孔数量进一步减小.

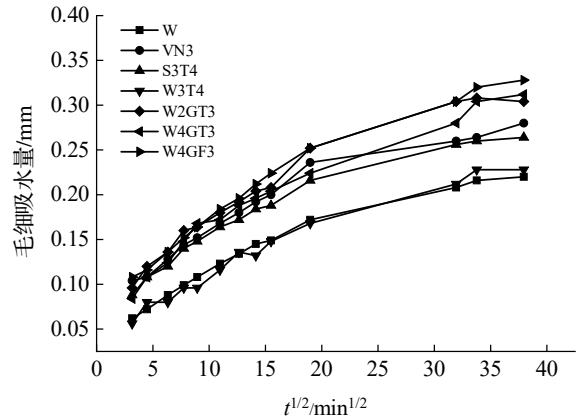


图4 打磨试件 28 d 毛细吸水量

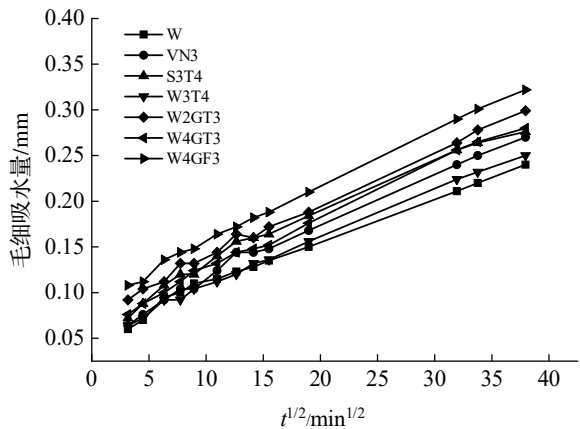


图5 打磨试件 120 d 毛细吸水量

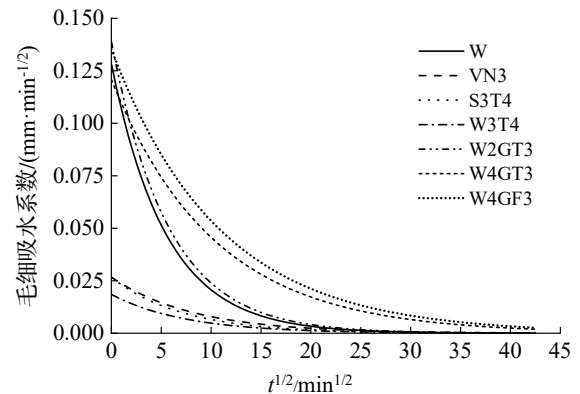
2.2.2 UHPC 的毛细吸水系数

为了得到毛细吸水系数随时间的变化趋势, 可利用如下指数函数描述^[16].

$$A(t) = d\Delta W / (d\sqrt{t}) = A_i \exp(-b\sqrt{t}), \quad (2)$$

式中: A_i 为初始毛细吸水系数; ΔW 为吸水质量, g; t 为测量时间, min; b 为拟合常数.

图 6 为各龄期试件的毛细吸水系数随时间的变化规律.



(a) 7 d 打磨试件

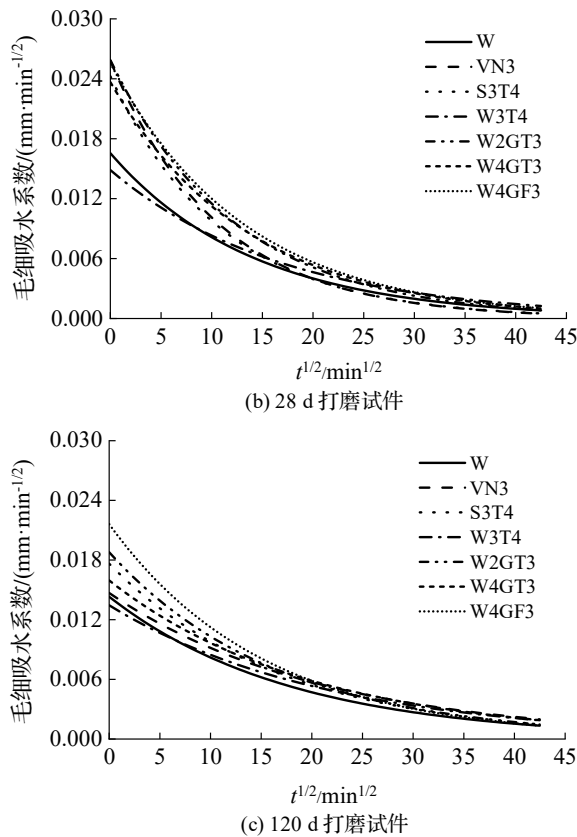


图6 各龄期试件毛细吸水系数变化曲线

由图6可见,毛细吸水系数随试件吸水时间和龄期增长而显著降低.各试件的毛细吸水系数曲线呈平滑的下降趋势,在约1600 min后达到极低水平,接近稳定状态.相比普通混凝土,UHPC的毛细吸水性降低更快,达到稳定时间更短,原因是其孔结构更为致密^[16].

2.2.3 表面打磨和未打磨试件的毛细吸水性

为了考察试件表面打磨处理对毛细吸水性的影响,在相同条件下测试打磨和未打磨UHPC试件的毛细吸水性,结果如图7所示.由图7可见,无论试件表面是否打磨,试件的毛细吸水性变化规律一致,但是打磨试件的毛细吸水性通常略低于未打磨试件.

混凝土热养护研究表明^[17],受早期水汽热湿传输作用的影响,蒸养混凝土表面(由表及里10 mm范围)的毛细吸水性及氯离子扩散速率均高于其内部.

本文采用的蒸汽养护和浸水-干热组合养护属于热养护,由于试件表面对温度变化更为敏感,热养护在促进混凝土胶凝材料水化的同时也存在一

定程度的表面损伤效应,故采用打磨后试件表面测试毛细吸水性通常略低.

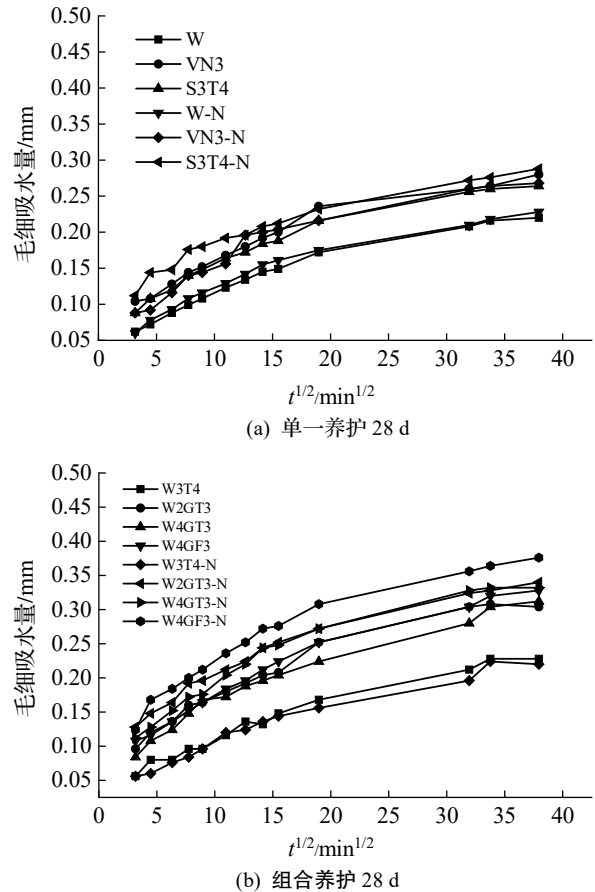


图7 表面打磨对试件毛细吸水量的影响

2.3 不同养护条件下的UHPC孔结构

为了分析不同养护条件对UHPC孔结构的影响,测试了试件在7、28、120 d龄期的孔隙率,并对孔径分布进行了分析,结果如图8所示.由图8可见,不论何种养护,UHPC的孔隙率均低于2.7%,比普通混凝土明显致密.对于7 d龄期,总孔隙率大小排序为W4GF3>W>W4GT3>W2GT3>W3T4>S3T4>VN3,即蒸汽养护和热水养护的较低,干热养护的较高.150℃干热养护UHPC在120 d时孔隙率比常温水养护高0.9%.对于大孔孔隙率,3种浸水-干热养护试件的大孔(孔径大于30 nm)孔隙率均高于其他养护下试件,150℃干热养护120 d的大孔孔隙率比常温水养护高0.08%.

随着龄期增长,常温浸水养护试件的总孔隙率下降幅度明显大于其他养护制度组,说明常温

浸水养护试件虽然早龄期水化和微观结构形成较慢, 但后期水化作用生成了较多的水化产物, 孔结构得以细化. 从前述强度发展规律看, 其 28 d 强度即可与热养护试件相当, 120 d 强度高于所有热养护试件, 这可与孔结构发展互为印证.

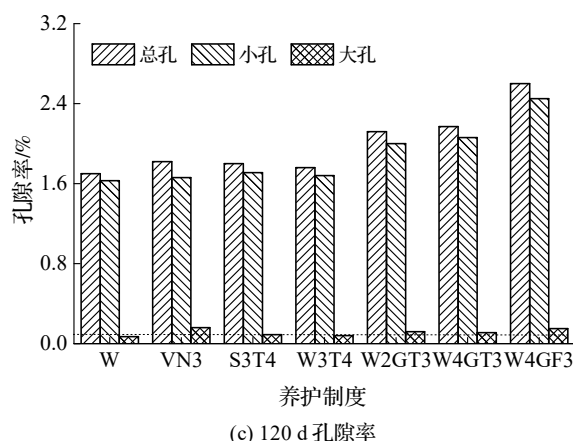
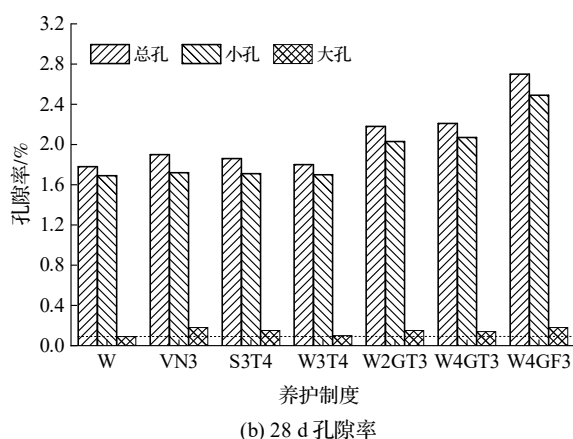
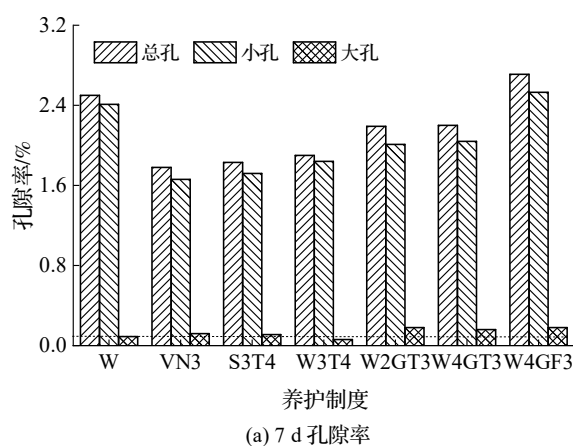


图 8 不同养护制度下 UHPC 孔隙率及其孔径分布

2.4 水化程度与微观分析

水泥混凝土的热分析曲线通常会有几个较为明显的吸热峰, 其中对应 30~170 °C 的吸热峰主要

是水泥水化产物层间水、石膏、钙矾石(Aft)分解; 180~300 °C 的吸热峰主要是 C-S-H 凝胶、水化铝酸钙分解; 400~500 °C 的吸热峰是由于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 分解引起; 700~900 °C 的吸热峰是因为 CaCO_3 的分解以及硬硅钙石脱水引起.

由图 9(a)可见, 差热曲线上有 2 个明显的吸热峰, 区间分别为 30~300 °C 和 600~720 °C. 由图 9(b)和表 3 可知, 在上述温度范围内失重明显, 30~300 °C 区间吸热峰说明随着水化龄期的增长, 水化反应仍在不断进行, 在 28 d 时已经生成了大量的钙矾石、C-S-H 凝胶等水化产物; 600~720 °C 区间吸热峰说明 28 d 时已经生成了大量的碳酸钙, 这与强度和孔结构数据一致.

各试件均未见对应氢氧化钙分解的吸热峰, 说明试件中氢氧化钙的含量极低, 这应归因于矿物掺合料的二次水化消耗.

图 10 为各配合比不同养护制度下混凝土内部物相微观形貌的代表性电镜照片.

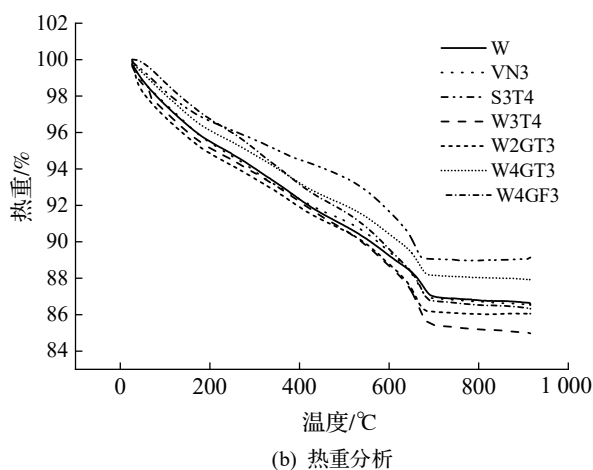
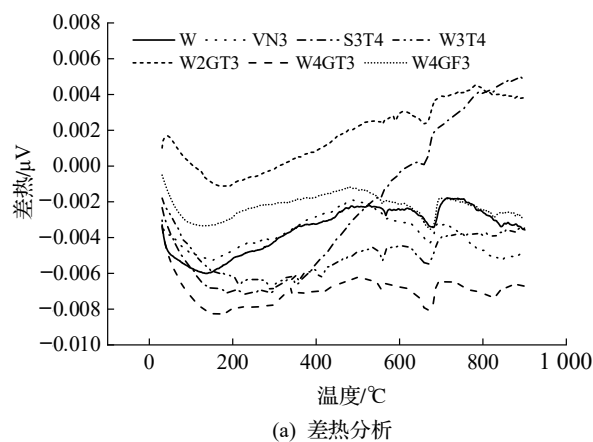
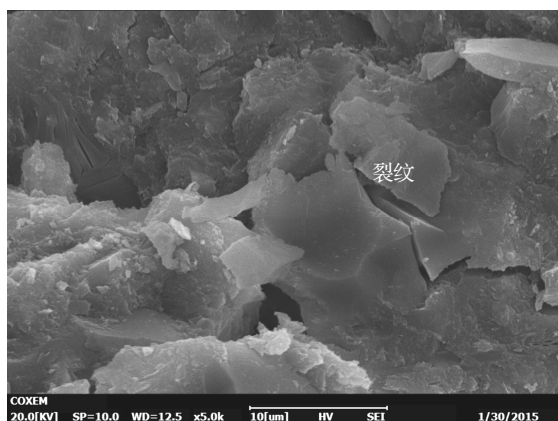


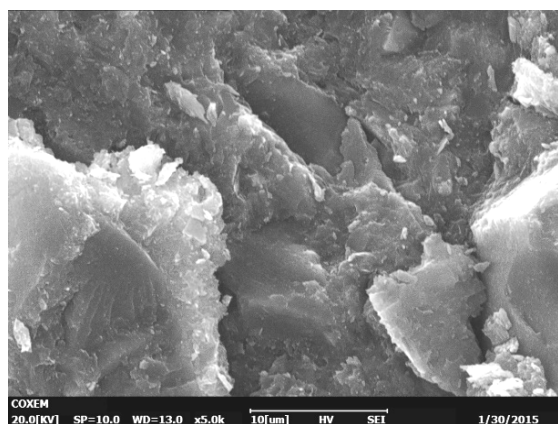
图 9 28 d 热分析结果

表 3 热重分析确定的关键温度区间的失重量 %

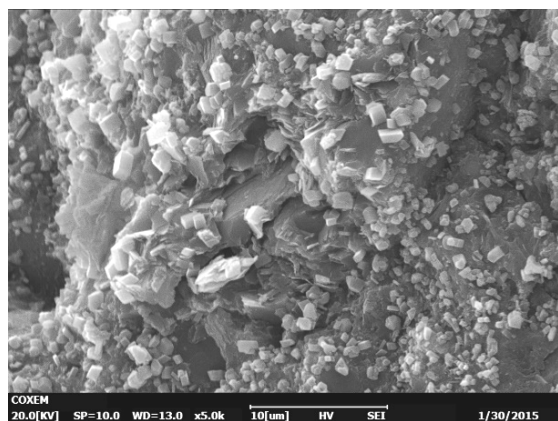
温度/℃	W	VN3	S3T4	W3T4	W2GT3	W4GT3	W4GF3
30~105	2.203	2.161	1.636	2.387	2.832	1.757	1.411
110~170	1.276	1.360	1.049	1.290	1.257	1.261	1.239
180~300	1.781	1.914	1.272	1.682	1.686	1.635	1.981
400~500	1.452	1.182	0.966	1.567	1.294	1.210	1.493
600~720	2.331	2.580	2.887	3.478	2.802	2.481	3.075
30~1 000	13.089	13.153	10.837	14.619	13.918	11.862	13.625



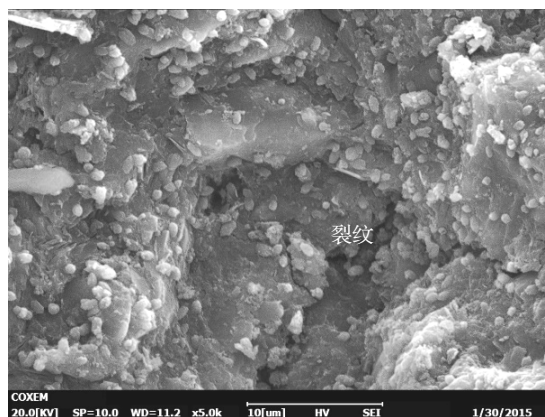
(a) VN3



(b) W3T4



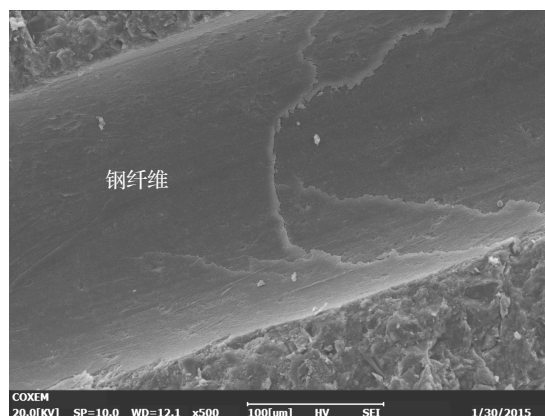
(c) W2GT3



(d) W4GF3



(e) W-1



(f) W-2

图 10 不同养护条件下试件 28 d 电镜分析结果

由图 10(a)~(d)可见, 热养护条件下由于水化加速, 生成的水化产物来不及分散而聚集形成粗大的水化产物, 如 C-S-H 凝胶常为块状且在 VN3、W3T4 和 W4GF3 试件中均发现有微裂纹, 表明由于热膨胀系数不同, 热养护容易使混凝土中不同组分发生不一致热膨胀, 从而容易产生微观裂纹, 这些裂纹在荷载或其他驱动力作用下扩展、连生成

为贯穿裂缝,会降低混凝土强度。

从图 10(e)可见,对比热养护试样,常温浸水养护下,试样早期水化速度相对较慢,生成的水化产物比较细小,有利于分散,分布相对均匀,不会阻碍未水化水泥颗粒进一步水化。故后期水化产物生成更多,微观结构未见明显孔洞,更为致密,后期强度发展更好。这也说明了为什么常温水养护试件其后期强度高于其他热养护。

由图 10(f)可见,常温浸水养护混凝土内部的钢纤维虽然与水化产物之间存在明显的界面,但是钢纤维周围的水化产物相互黏结紧密,比较致密。通过观察其他养护条件下多个钢纤维存在的微区,发现钢纤维可以抑制水化产物裂纹的发生,这对于提高热养护混凝土性能非常有利。

3 结论

(1)热养护可以有效提高 UHPC 的早期强度,对比常温浸水养护的 7 d 抗压强度,单一热养护和组合养护最高分别提升了 9.3% 和 25%。延长浸水预养时长可以促进 UHPC 早期强度,但是高温和干热养护对 UHPC 后期强度增长不利。常温浸水养护试件的后期强度增长迅速,120 d 强度高于其他热养护试件。

(2)7 d 龄期时,常温浸水养护和 3 种浸水-干热养护试件的毛细吸水量较高,养护温度越高毛细吸水量越大;后期毛细吸水量大幅降低,且各试件差异减小。毛细吸水系数随试件吸水时间和龄期的增长而显著降低。打磨后试件表面测试毛细吸水性通常略低。

(3)热养护促进了胶凝材料水化,早期能降低混凝土孔隙率,但后期不利于细化其孔径;常温浸水养护早期微观结构形成较慢,但后期水化生成较多的水化产物,孔结构得以细化。150 °C 干热养护将显著增大 UHPC 的总孔和大孔的孔隙率,120 d 时仍比常温水养护分别高 0.9% 和 0.08%,并增大毛细吸水性,对耐久性不利。

(4)热分析表明 UHPC 早期水化迅速,在 28 d 已经生成了大量的钙矾石、C-S-H 凝胶等水化产物。因矿物掺合料的二次水化消耗,试件中氢氧化钙的含量极低。电镜观察到热养护试件水化产物粗大,内部存在微裂纹,而钢纤维可以抑制周围水化

产物微裂纹的发生。

参考文献:

- [1] Shi C J, Wu Z M, Xiao J F, et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design[J]. Construction and Building Materials, 2015, 101:741-751.
- [2] 孙瑜,王焕然,王飞,等. 波形钢板-UHPC 组合桥面板结构截面优化[J]. 宁波大学学报(理工版), 2020, 33(3): 105-110.
- [3] 赵金侠,黄亮,谢建和. 不同配比和养护条件对超高性能混凝土微观结构的影响[J]. 中国公路学报, 2019, 32(7):111-119.
- [4] Liu J T, Yang Y, Gu C P, et al. Influence of dry heating regime on the mechanical and shrinkage properties of reactive powder concrete[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2018, 19(12):926-938.
- [5] Yang S L, Millard S G, Soutsos M N, et al. Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(6):2291-2298.
- [6] Hiremath P N, Yaragal S C. Effect of different curing regimes and durations on early strength development of reactive powder concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, 154:72-87.
- [7] 牛旭婧,卮颖,朋改非,等. 养护制度对超高性能混凝土抗高温爆裂性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8): 1212-1222.
- [8] Shen P L, Lu L N, He Y J, et al. The effect of curing regimes on the mechanical properties, nano-mechanical properties and microstructure of ultra-high performance concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2019, 118: 1-13.
- [9] Wang X B, Sun M J, Guo S B. Water absorption characteristics of cement-based materials based on the chemical reaction[J]. Construction and Building Materials, 2019, 220:607-614.
- [10] Zhang P, Wittmann F H, Vogel M, et al. Influence of freeze-thaw cycles on capillary absorption and chloride penetration into concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 100:60-67.
- [11] Wang Y R, Cao Y B, Zhang P, et al. Water absorption and chloride diffusivity of concrete under the coupling effect of uniaxial compressive load and freeze-thaw cycles[J]. Construction and Building Materials, 2019, 209:566-576.
- [12] GB/T 17671-1999. 水泥胶砂强度检测方法[S].

- [13] Martys N S, Ferraris C F. Capillary transport in mortars and concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(5):747-760.
- [14] Ngala V T, Page C L. Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(7): 995-1007.
- [15] Helmi M, Hall M R, Stevens L A, et al. Effects of high-pressure/temperature curing on reactive powder concrete microstructure formation[J]. Construction and Building Materials, 2016, 105:554-562.
- [16] 鲍玖文, 胡文文, 张鹏, 等. 有机硅憎水剂对混凝土强度与毛细吸水性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(10):1644-1652.
- [17] 贺智敏, 龙广成, 谢友均, 等. 蒸养混凝土的表层损伤效应[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(6):994-1000; 1008.

Effect of curing condition on mechanical strength and capillary water absorption of UHPC

SHI Fanhua^{1,2}, HE Zhimin^{1,2*}, LIU Chang¹, WEI Lingling¹, BA Mingfang¹

(1.School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Collaborative Innovation Center of Coastal Urban Rail Transit, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to optimize the curing process of ultra-high performance concrete (UHPC) prefabricated components, the effect of different curing conditions on mechanical strength and capillary water absorption of UHPC was investigated, and the mechanism was analyzed by pore structure test, thermogravimetric analysis and scanning electron microscope. Test results indicate that, heat curing regime has a very significant increase on 7 day mechanical strength, which is most likely related to acceleration of the pozzolanic reaction. However, the high temperature curing and dry-heat curing hinder its later strength growth, with its 28 day strength is even lower than 7 day strength. UHPC generally has lower capillary water absorption. The capillary water absorption coefficient drops remarkably with the extension of specimen suction time and curing age. The capillary water absorption of dry heat curing specimen is higher than those of other curing condition. Considering the comprehensive performance, the dry heat curing temperature should be controlled below 100 °C. When the hot curing temperature is over 150 °C, total and large pore porosity of UHPC will increase significantly, and the capillary water absorption will also increase. It was observed by scanning electron microscope that a few micro cracks appear in the heat curing specimen, but steel fiber could restrain the micro cracks around the hydration products.

Key words: ultra-high performance concrete; curing condition; capillary water absorption; pore structure; mechanical strength

(责任编辑 史小丽)