

不同养护条件下混杂钢纤维超高性能混凝土的早龄期力学性能及开裂特性

阚黎黎¹, 王 飞¹, 鄢海江¹, 段昕智^{2,3}

(1. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 上海市市政规划设计研究院有限公司, 上海 200031;
3. 上海城市路域生态工程技术研究中心, 上海 201418)

摘 要: 结合烧失量与单轴拉、压实验, 研究了空气及热水(1 d, 60 °C 热水+2 d 空气)养护条件下混杂钢纤维超高性能混凝土(UHPC)试件的 3 d 龄期水化程度与力学性能, 同时利用数字图像相关技术与光学显微镜对拉伸试件表面的开裂特性进行了表征, 并通过扫描电子显微镜对其微观结构进行了分析。结果表明: 与空气养护相比, 热水养护加快了 UHPC 基体的水化反应进程, 温度的升高是促进水化反应的主要因素; 热水养护 UHPC 试件的初裂、抗拉及抗压强度明显提高, 但其拉伸应变性能的变化并不明显; 试件的最大裂缝宽度总体上有所降低; 基体变得更加致密, 纤维与基体的界面粘结也更强。随着纤维掺量的增加, UHPC 的拉伸应变有所提高, 总体积掺量为 2.5% (长、短纤维比例分别为 1.25: 1.25, 1.5: 1.0)试件的拉伸应变均超过了 2×10^{-3} ; 掺 1.5% (体积分数)长纤维与 1.0%短纤维试件在热水养护下产生了较多宽度小于 50 μm 的微裂缝。DIC 技术获得的理论应变与单轴拉伸实测应变之间具有较好的吻合度。

关键词: 超高性能混凝土; 混杂钢纤维; 养护条件; 早龄期; 力学性能; 开裂特性

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)02-0429-09

网络出版时间: 2022-01-20



Mechanical Properties and Cracking Characteristics of UHPC with Hybrid Steel Fibers at Early Age under Different Curing Conditions

KAN Lili¹, WANG Fei¹, WU Haijiang¹, DUAN Xinzhi^{2,3}

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Municipal Planning & Design Institute Co. Ltd., Shanghai 200031, China;

3. Shanghai Engineering Research Center of Urban Road Ecological Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: The hydration degree and mechanical properties of ultra-high performance concrete (UHPC) specimens with hybrid steel fibers cured in air and hot water (1 d, 60 °C hot water + 2 d air), respectively, were investigated via ignition loss tests and uniaxial tensile and compressive tests. Also, the surface cracking characteristics of tensile specimens were characterized by digital image correlation technique and optical microscopy, and the microstructures were analyzed by scanning electron microscopy. The results show that compared with the results obtained in air curing, hot water curing accelerates the hydration reaction progress of the UHPC matrix, and an increase in temperature mainly contributes to the promotion of hydration reaction, thus improving the initial cracking, tensile and compressive strength of the UHPC specimens in hot water curing. However, the tensile strain capacity changes slightly. In general, the maximum crack width of the specimen decreases, the matrix becomes denser, and the interface bonding between the fibers and the matrix is stronger. The tensile strain of UHPC increases with the increase of fiber content, in which the tensile strains of the specimens with 2.5% (volume fraction) of fibers (a ratio of long fibers to short fibers is 1.25: 1.25 and 1.5: 1.0, respectively) are more than 2×10^{-3} , the specimen with 1.5% long fibers and 1.0% short fibers produces more tensile cracks with the width of $< 50 \mu\text{m}$ in hot water curing. The uniaxial tensile strains predicted by DIC are in reasonable agreement with the strains measured.

Keywords: ultra-high performance concrete; hybrid steel fibers; curing conditions; early age; mechanical properties; cracking characteristics

收稿日期: 2021-04-28。 修订日期: 2021-07-08。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508329)。

第一作者: 阚黎黎(1980—), 女, 博士, 副教授。

Received date: 2021-04-28. Revised date: 2021-07-08.

First author: KAN Lili(1980—), female, Associate Professor.

E-mail: kanlilil@163.com

超高性能混凝土(UHPC)因其超高强度、高韧性以及优异的耐久性,已成为当前高性能混凝土领域的研究热点之一,在公路桥梁、海工结构以及维修加固等领域已取得一定的应用^[1-2]。对于 UHPC, 早龄期的加热养护,是其短期获得高强度的关键因素^[3]。高温环境可促进 UHPC 基体内水泥水化、提高硅灰等矿物活性,有利于更多水化硅酸钙(C-S-H)凝胶的生成^[4],从而使材料获得较好的力学性能。探究养护机制对 UHPC 材料性能的影响,对工程结构设计及实际应用具有重大意义。为此,国内外学者展开了大量的研究。

Yazici 等^[5]研究了常温水养护、高压养护及蒸汽养护下 UHPC 的力学性能,发现,与常温水养护相比,高压和蒸汽养护环境下 UHPC 的抗压强度显著提高,但是其抗弯强度和韧性有所降低。Massidda 等^[6]探究了饱和蒸汽高压养护对 UHPC 力学性能的影响,结果表明,经过室温预养 3 d 后继续高压蒸汽 3 h, UHPC 的抗压及抗弯强度分别可高达 200 MPa 和 30 MPa。Wu 等^[7]对比了 UHPC 在 3 种不同养护机制(标准、热水及蒸汽养护)下的力学强度,发现 UHPC 试件在热水和蒸汽养护条件下均表现出了优异的抗压与抗弯性能。詹国良等^[8]研究显示: 80 °C 蒸汽养护条件下 UHPC 的抗折和抗压强度明显高于标准养护。吴炎海等^[9]研究表明,与标准养护相比,90 °C 热水养护可明显提高 UHPC 的抗压强度。高小建等^[10]采用微波养护方式制备矿粉-UHPC,发现微波养护能够加速基体的水化、促进晶体产物和 C-S-H 的生成。由此可看出,尽管这些不同养护方式对 UHPC 强度的发展产生了有效的促进作用,但较为复杂的养护工艺、对设备的较高要求以及对能源的大量消耗也从一定程度上限制了材料的推广应用。因此,研究利用常规养护工艺实现 UHPC 力学性能的提升显得十分必要。另一方面,结构材料的早期力学性能对预制件的场地周转、工期控制,尤其是抢修加固工程的投入使用都有着重要的影响,而针对 UHPC 早期性能的系统研究目前并不多见,尤其是对早期拉伸性能的研究更为有限。再者,因较低的水胶比, UHPC 基体中存在大量未水化的胶凝组分,这为材料开裂后自愈合的发生提供了非常有利的条件^[11]。需要注意的是,材料本身的裂缝宽度也是影响自愈合的重要因素^[12]。因此,研究材料早期的开裂特性对材料自愈合性能的分析十分关键,进而也间接为后期结构的维修加固提供一定的理论参考。

基于此,本工作系统研究了两种常规养护方式

(空气及 60 °C 热水养护)下, 3 d 早龄期 UHPC 基体的水化程度、3 种不同混杂钢纤维 UHPC 的单轴拉伸(包括: 初裂强度、抗拉强度、拉伸应变)及抗压等力学性能,并基于多缝开裂机制应力准则探讨了拉伸应变性能的变化机理;同时,通过数字图像相关技术(DIC)与光学显微镜分析了拉伸过程中的开裂特性,对理论应变与实测应变之间的差异进行了讨论;最后,借助扫描电子显微镜(SEM),从微观结构层面阐释了力学性能的差异。

1 实验

1.1 原材料

UHPC 基体原材料组成质量比为: $w(\text{水泥}): w(\text{硅灰}): w(\text{砂}): w(\text{水}): w(\text{减水剂})=1:0.2:1.2:0.22:0.006$ 。其中,水泥选用 P-II 52.5 硅酸盐水泥、比表面积为 373 m²/kg,硅灰的比表面积为 28 000 m²/kg,二者的化学组成见表 1;细集料选用最大粒径为 1.25 mm 的天然河砂;水为自来水;选用减水率大于 30% 的液体高性能聚羧酸减水剂;采用两种镀铜平直型钢纤维,其直径和长度分别为 0.2 mm 和 13 mm/18 mm;不同规格纤维混掺体积量分别为:长纤维 1.25% + 短纤维 1.0%(L1.25S1.0)、长纤维 1.25% + 短纤维 1.25%(L1.25S1.25)和长纤维 1.5% + 短纤维 1.0%(L1.5S1.0)。

表 1 水泥和硅灰的化学组成

Material	Mass fraction w/%								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
Cement	19.3	3.8	3.4	63.5	2.8	3.5	0.10	0.8	1.44
Silica fume	93.0	0.3	0.8	0.3	0.3	0.8	0.36		1.50

1.2 试件制备及养护

将水泥、硅灰和细集料加入到搅拌机中,干搅约 2 min 使材料混合均匀;将减水剂倒入称好的水中,搅拌形成均匀混合液,然后倒入搅拌机中,搅拌约 5 min 至浆体达到可流动状态;手动缓慢加入混杂的钢纤维,继续搅拌 3~5 min 后,将拌合物浇注到实验模具中,在振动台上振动约 10 s;用塑料薄膜包裹试件外层(防止水分蒸发),置于实验室中养护 24 h 脱模后,放置于两种不同养护制度(空气养护:温度为(20~23) °C,相对湿度为(70±5)%;热水养护:60 °C 热水养护 1 d 后继续空气养护)至 3 d 龄期。

1.3 方法

1.3.1 化学结合水测试 基于烧失量法测定不同养护条件下(为探究 60 °C 热水养护较常温空气养护

导致水化程度变化的主要因素(湿度或温度), 增加常温水养护条件)UHPC 基体(净浆)在 1, 2 d 及 3 d 龄期的化学结合水量, 每组 3 个试样。不同试件相同位置取样并研磨成粉, 过 80 μm 筛(无筛余); 每次取约 1 g 粉末进行测试。先将粉末试样置于 105 $^{\circ}\text{C}$ 的高温炉中至质量恒定, 冷却后称重; 快速把试样放回高温炉, 以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 950 $^{\circ}\text{C}$, 将试样烧至质量恒定, 冷却后再次称取质量。根据式(1)和式(2)^[13-15]计算出试样的化学结合水量:

$$W_t = \frac{m_1 - m_2}{m_2} - \frac{L}{1 - L} \quad (1)$$

$$L = L_C W_C + L_S W_S \quad (2)$$

式中: W_t 为试样 t 龄期的化学结合水量(%); m_1 和 m_2 分别为试样灼烧前后的质量; L_C 和 L_S 分别为水泥和硅灰的烧失量, W_C 和 W_S 分别为净浆试样中水泥和硅灰的占比。

1.3.2 单轴拉伸实验 采用万能试验机进行单轴拉伸实验。试件受拉段的标准距离为 80 mm, 两端分别固定 2 个 LVDT 来监测拉伸过程中试件的变形, 具体试件尺寸及实验设备参见文献[16]。采用位移加载模式, 加载速率为 0.5 mm/min。

1.3.3 抗压实验 采用边长为 100 mm 的立方体进行抗压强度实验, 加载速率为 1 MPa/s。

1.3.4 拉伸开裂特性观测 单轴拉伸过程中, 通过 DIC 技术实时监测并可视化表征试件表面裂缝的发展状态, 基本原理参见文献[16]。需要注意的是, 水泥基材料为非均质材料, 采用 DIC 分析时必须对试件表面进行预处理^[17]: 先在观测区段均匀喷涂 1 层白漆; 再随机喷涂黑漆, 形成大小均匀的散斑, 具体处理过程及分析方法详见文献[16]。实验结束后, 立即使用最高放大率为 150 倍、精度为 10 μm 的光学显微镜对试件表面的残余裂缝特性进行观测统计。

1.3.5 微观结构分析 从拉伸试件上截取约 10 mm 厚的薄片作为测试样品。实验前, 对样品表面进行喷金处理。使用扫描电子显微镜(SEM)对基体以及纤维-基体界面的微观形貌进行观测, 加速电压为 30 kV, 本研究使用的放大倍率为 500 和 1 000 倍。

2 结果与讨论

2.1 化学结合水

常温空气、常温水及热水养护条件下, 早龄期 UHPC 基体化学结合水量随时间的变化关系如图 1 所示。由图 1 可见, 化学结合水量随龄期的延长不断增加, 2 d 前增长较快, 之后减缓。1 d 化学结合

水量为 6.08%, 2 d、3 d 时, 常温空气养护下化学结合水量分别为 6.28%、6.40%; 常温水养护下分别为 6.59%、6.71%; 热水养护下分别为 8.33%、8.60%。化学结合水量可相对表征水化速率的快慢及水化程度的高低^[15]。与常温空气养护相比, 常温水养及热水养护均加快了 UHPC 的水化反应速率: 拆模后 1 d (即 2 d 水化时间) 常温空气养护下的水化速率为 0.2%/d; 而常温水及热水养护的水化速率则分别可提升至 0.51%/d、2.25%/d。由此可见, 相较常温水养护(湿度)而言, 热水养护(温度)对基体水化的促进作用更为明显, 热水养护下 UHPC 的 3 d 水化程度比空气养护提高了 34.4%, 而常温水养护仅提高了 4.8%。

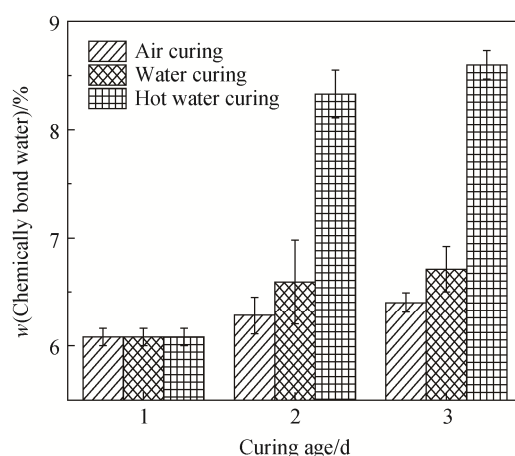


图 1 不同养护条件下早龄期 UHPC 基体的化学结合水量
Fig. 1 Chemically bond water content of the UHPC matrix at early ages under different curing conditions

2.2 单轴拉伸性能

空气和热水两种养护条件下, 不同规格纤维混杂 UHPC 3 d 早龄期的拉伸应力-应变曲线见图 2。

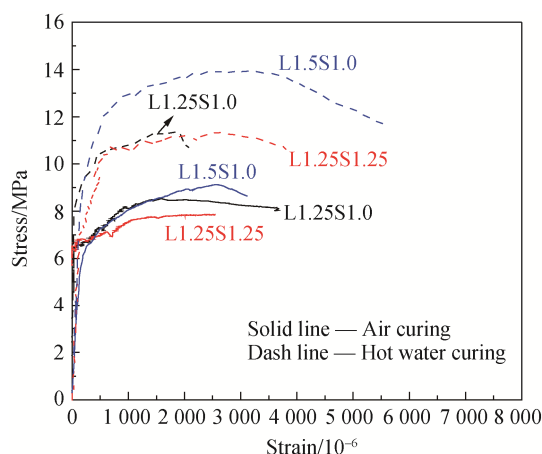


图 2 两种养护条件下不同混杂钢纤维 UHPC 的 3 d 拉伸应力-应变曲线

Fig. 2 Tensile stress-strain curve of the UHPC with different hybrid steel fibers at 3 d under two kinds of curing conditions

表 2 给出了拉伸性能的主要特征参数,包括初裂强度(基体初次开裂时对应的应力)、抗拉强度(极限拉

伸应力)及拉伸应变性能(极限拉伸应力所对应的应变)。

表 2 拉伸性能特征参数
Table 2 Characteristic parameters of tensile properties

Curing condition	Mixture	Initial cracking strength σ_{oc} /MPa	Tensile strength σ /MPa	Tensile strain capacity/ 10^{-6}
Air	L1.25S1.0	6.44±0.32	8.53±0.37	1 599±316
	L1.25S1.25	6.04±0.79	7.85±0.62	2 320±362
	L1.5S1.0	6.53±0.12	9.11±0.44	2 593±426
Hot water	L1.25S1.0	8.25±0.05	11.42±0.46	1 788±95
	L1.25S1.25	8.12±0.27	11.33±0.13	2 572±119
	L1.5S1.0	8.93±0.53	13.93±0.19	2 945±456

由图 2 和表 2 可看出,在同种养护条件下,不同纤维混杂对 UHPC 基体的初裂强度并没有产生明显的影响。另一方面,不同养护条件导致了 UHPC 初裂强度明显的差异,空气养护下 UHPC 的初裂强度处于 6.0~6.5 MPa 范围,热水养护下可提升至 8.0~9.0 MPa 之间(提高了 20%以上),这与 2.1 热水养护下 UHPC 基体较高的水化程度相对应。与常温养护相比,热水养护能够加速水泥及硅灰的水化反应进程,更多水化产物的生成导致基体结构更加致密^[4,18],从而提升了基体的初裂强度。当纤维总掺量由 2.25%增加到 2.5%时,两种养护制度下,不同规格纤维混掺对 UHPC 的抗拉强度有明显的影响:在 L1.25S1.0 的基础上增加 0.25%的短纤维后(L1.25S1.25),UHPC 的抗拉强度均有所下降;而增加 0.25%的长纤维后(L1.5S1.0),空气及热水养护下其抗拉强度分别提高了 7%和 22%。Yang 等^[19]认为增加纤维掺量会导致基体密实度降低,从而不利于强度的发展;但是另一方面,更多纤维的掺入从一定程度上增强了纤维的有效桥接作用,有利于 UHPC 拉伸强度的提高。当前的实验结果可能是这两种效应共同作用的结果:当增加短纤维掺量时,密实度降低带来的不利影响可能占主导地位;而增加相同含量的长纤维时,纤维长度的提高增加了纤维-基体间的接触面积,进而产生了更强的桥接效应,这可能是 UHPC 强度提升的主要原因。由此可见,纤维掺量的增加并不一定会对强度产生有益作用,纤维的适宜混杂可能才是强度提高的关键。与空气养护相比,热水养护条件下对应相同规格混杂钢纤维 UHPC 的拉伸强度均有所提高,这应归因于热水对水化反应的促进效应,纤维-基体界面生成了更多的水化产物,增加了二者之间的粘结作用力,从而提高了 UHPC 的抗拉强度。

此外注意到,本研究中 UHPC 的 3 d 拉伸应变

均在 $1\ 500\ 10^{-6}$ 以上。当混杂纤维含量为 2.5%时,无论何种养护方式,两种混杂 UHPC 试件(L1.25S1.25 和 L1.5S1.0)的拉伸应变均明显高于 $2\ 000\ 10^{-6}$,属于高应变硬化 UHPC^[20](小狗骨试件 15 mm 的厚度会限制长为 18 mm 钢纤维的三维随机分布,使之趋于沿受拉方向分布,一定程度上有利于高应变硬化行为^[21])。基于多缝开裂机制应力准则^[22–23]:当抗拉强度 σ 大于初裂强度 σ_{oc} 时可产生多缝开裂行为,采用抗拉强度与初裂强度的比值(σ/σ_{oc})来评价 UHPC 的拉伸应变硬化性能,两者之间的关系如图 3 所示。由图 3 可见,所有混杂 UHPC 试件的 σ/σ_{oc} 比值均超过了 1。这表明,所有试件均满足纤维增强脆性基体复合材料产生应变硬化现象的基本条件之一,即 $\sigma \geq \sigma_{oc}$ ^[23],从而可以很好地解释单轴拉伸过程中的应变硬化现象(图 2)。相同养护制度下, σ/σ_{oc} 随不同纤维混杂的变化趋势与拉伸应变表现出了很好的一致性: σ/σ_{oc} 越大,拉伸应变也越大;L1.5S1.0 试件拥有最大的 σ/σ_{oc} 以及最高的拉伸应变(图 3)。因此,

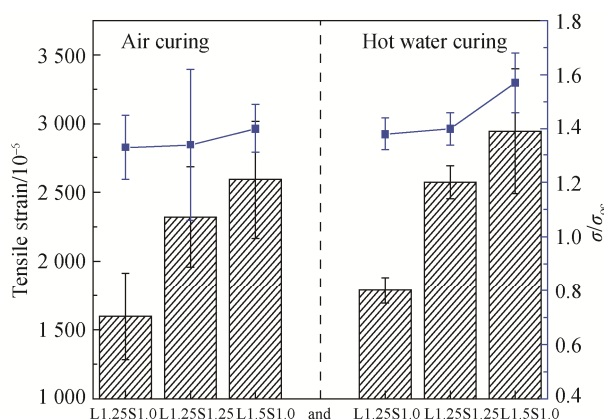


图 3 两种养护条件下不同混杂钢纤维 UHPC 拉伸应变与 σ/σ_{oc} 的关系

Fig. 3 Relationship curve between tensile strain and σ/σ_{oc} for the UHPC with different hybrid steel fibers under two kinds of curing conditions

通过 σ/σ_{oc} 去理解 UHPC 的拉伸应变行为具有一定的可行性。然而, 需要指出的是, 尽管 σ/σ_{oc} 与应变性能的变化趋势相一致, 但是二者之间具体的相关关系并不能很好地建立, 这与纤维增强复合材料的性能受基体、纤维及二者界面性能等多方面复杂因素的影响^[24]有关。

2.3 抗压强度

两种养护条件下, 不同钢纤维混杂 UHPC 试件在 3 d 养护龄期的抗压强度如图 4 所示, 抗压强度与抗拉强度的变化趋势并不完全一致: 常温养护条件下, 与 L1.25S1.0 相比, 增加不同规格纤维掺量均使 UHPC 的抗压强度稍有下降; L1.5S1.0 试件的抗压强度值略高于 L1.25S1.25。解释抗拉强度的机理一定程度上也同样适用于抗压强度。基于 L1.25S1.0, 增加 0.25% 的纤维掺量会降低基体的密实度, 导致抗压强度减小。需要注意的是短纤维的长径比较小(60 vs. 90), 相同体积分数下短纤维的数量会更多, 更易产生纤维团聚现象, 从而不利于强度的发展^[25], 这合理解释了 L1.25S1.25 的强度值低于 L1.5S1.0 的原因。热水养护条件下, 较 L1.25S1.0 而言, 增加 0.25% 掺量的长、短纤维分别导致抗压强度提高了 16% 和 7.8%。类似于抗拉强度, 较空气养护而言, 热水养护下的水化促进作用同样导致了 UHPC 抗压强度的明显提高。空气养护下, 不同纤维混杂 UHPC 的 3 d 抗压强度处于 73~79 MPa 之间; 而热水养护下, 其强度值可提高至 105~123 MPa (L1.5S1.0 增长率最大, 可达 63.2%)。可见, 即使常温养护, 本研究中 UHPC 的 3 d 抗压强度也满足了绝大多数工程的要求, 这一早强特性使得 UHPC 材料更加适宜应用于如快速修复等一些特殊工程。

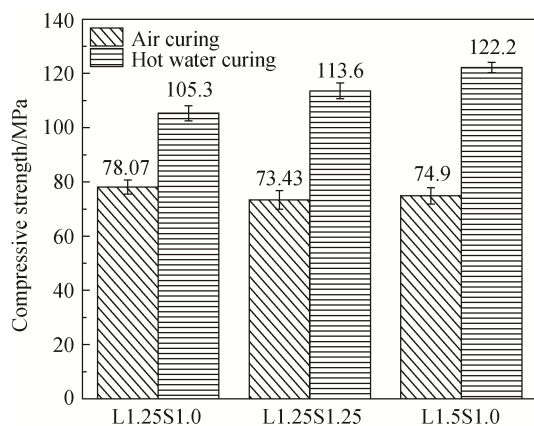


图 4 两种养护条件下不同混杂钢纤维 UHPC 的 3d 抗压强度
Fig. 4 Compressive strength of the UHPC with different hybrid steel fibers at 3d under two kinds of curing conditions

为进一步探究水化程度与 UHPC 抗压强度之间的关系, 图 5 为 1~3 d 热水养护 UHPC 基体的化学结合水量与 L1.5S1.0 组试件的抗压强度。可以看出, 与前 1 d 相比, 第 2 d 和第 3 d 化学结合水量的增长率分别为 37.0% 及 3.2%, 抗压强度的增长率分别为 54.6% 及 18.2%, 即抗压强度的增长与水化程度的提高具有一定的正相关性。

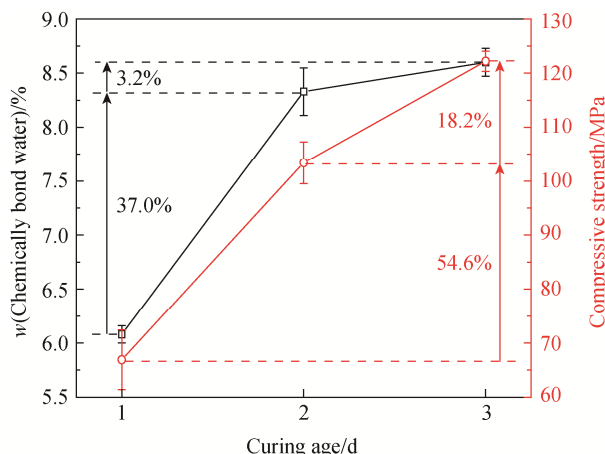


图 5 热水养护下早龄期基体的化学结合水及 L1.5S1.0 试件的抗压强度

Fig. 5 Chemically bond water of the matrix paste and compressive strength of the L1.5S1.0 specimens at early ages under hot water curing

2.4 开裂特性

图 6 为热水养护下 L1.5S1.0 组 UHPC 拉伸试件在不同加载时刻表面裂缝的应变云图。可以看出, 随着加载的持续, 试件表面标距内的裂缝经历了从无到有、从有到多的发展过程。在 300 s 时(位移 14.4 μm , 伸长率 0.018%), 拉伸荷载达到了基体的初裂强度, 导致中间部位出现了第一条裂缝(图 6a)。此后, 受拉方向的钢纤维开始发挥桥接作用, 抑制裂缝扩展的同时将荷载向两侧未开裂的部位传递, 360 s 时(位移 52.0 μm , 伸长率 0.065%)试件下端出现了新的裂缝(图 6b)。需要指出的是, 新裂缝出现的位置距初始裂缝较远, 这显然有别于普通混凝土材料(持续的加载会导致普通混凝土的初始裂缝逐步扩展直至材料失效, 从而表现出应变软化行为)。当荷载进一步增加到极限抗拉强度(430 s)时, 共约有 11 条裂缝分布在试件的表面, 其中, 破坏主裂缝出现在试件的中下部(不是初始裂缝), 且新裂缝出现的位置并不局限于主裂缝的周围(图 6c)。

分别利用数字图像相关技术(DIC)和光学显微镜来表征对应极限应力及卸载后试件表面的开裂特

性(包括不同裂缝宽度范围的裂缝数量、总裂缝数量及最大裂缝宽度),结果详见表 3。可以发现,无论何种养护环境,更多纤维的掺入使得裂缝数量增多,最大裂缝宽度减小,表明了更加有效的纤维桥接作用。对比 L1.25S1.0 组,由于纤维掺量的增多,在拉伸作用下 L1.25S1.25 与 L1.5S1.0 组 UHPC 试件表面出现了更多 50 μm 以下的微裂缝。相较于空气养

护,热水养护下 UHPC 试件的最大裂缝宽度更小,这主要是因为其更为致密的基体微观结构导致钢纤维-基体界面相互作用力增强,裂缝间纤维的桥接作用可更为有效地约束裂缝的扩展。总体而言,不同混杂钢纤维 UHPC 早龄期受拉产生的裂缝绝大多数宽度都小于 50 μm ,这为裂缝自愈合现象的发生提供了有利条件^[12]。

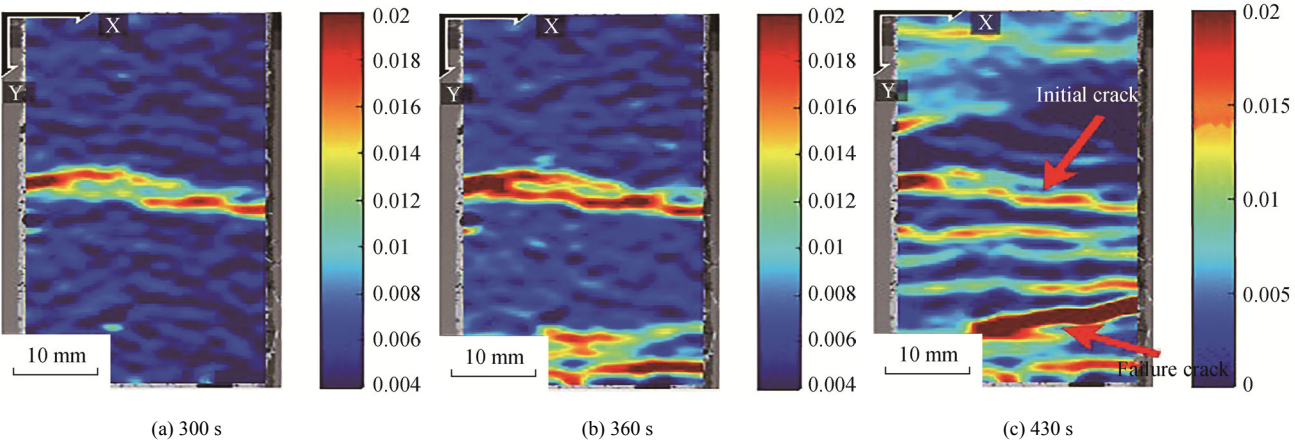


图 6 热水养护 L1.5S1.0 拉伸试件在不同加载时刻表面裂缝的应变云图(色柱代表应变大小,单位: %)

Fig. 6 Strain contour maps of surface cracks in the L1.5S1.0 tensile specimen under hot water curing at different loading time (chromatographic column represents the strain values, unit: %)

表 3 两种养护条件下不同混杂钢纤维 UHPC 拉伸试件表面裂缝特性

Table 3 Surface crack characteristics of the UHPC tensile specimens with different hybrid steel fibers under two kinds of curing conditions

Curing conditions	Mixture	Measure methods	$\leq 10\ \mu\text{m}$	10–20 μm	20–50 μm	$> 50\ \mu\text{m}$	Total crack numbers	Maximum crack width/ μm
Air	L1.25S1.0	DIC	2	0	0	1	3	134
		OM	0	0	0	1	1	147
	L1.25S1.25	DIC	4	1	1	1	7	108
		OM	1	1	2	1	5	136
	L1.5S1.0	DIC	1	3	0	2	6	92
		OM	0	0	3	2	5	107
Hot water	L1.25S1.0	DIC	0	0	1	1	2	97
		OM	0	0	1	1	2	120
	L1.25S1.25	DIC	4	0	2	2	8	87
		OM	0	1	1	2	4	104
	L1.5S1.0	DIC	2	5	4	0	11	32
		OM	1	6	2	0	9	47

Note: DIC refers to the crack characteristics corresponding to the ultimate tensile stress obtained by DIC; OM represents the measured residual crack characteristics by optical microscope after unloading, when the load reaches the ultimate tensile stress.

对比通过两种不同测试技术得到的开裂特性,可以发现:相较于光学显微镜,通过 DIC 技术获得的裂缝数量较多,而最大裂缝宽度较小。造成裂缝数量差异的主要原因为: DIC 技术是对加载试件的实时非接触自动观测,而光学显微镜表征的是卸载后试件的裂缝信息,部分微裂缝卸载后会发生回缩现象甚至完全闭合。光学显微镜技术测得主裂缝宽

度较大的原因,应该归咎于卸载时试验机存在的惯性力加重了 UHPC 试件的损伤程度。对于纤维增强脆性基体复合材料,多裂缝的产生可从一定程度上体现材料的拉伸应变行为^[26]。基于两种技术得到的开裂特性,可分别计算出对应的理论应变值。具体分析过程为:光学显微镜获取裂缝中心宽度→除以标准间距(80 mm)→得到单条裂缝对应应变→累加

得到总应变; DIC 云图读取裂缝中心应变值大小→叠加单条裂缝应变即为拉伸试件的“理论应变”。图 7 为两种技术得到的理论应变与实测结果的对比。可以发现, DIC 得到的应变值与实测值具有较好的吻合度, 偏差基本上都在数据波动范围之内。由此可见, DIC 技术可以较为准确地表征 UHPC 在单轴拉伸过程中的开裂状态, 且可以得到较为可靠的裂缝信息。

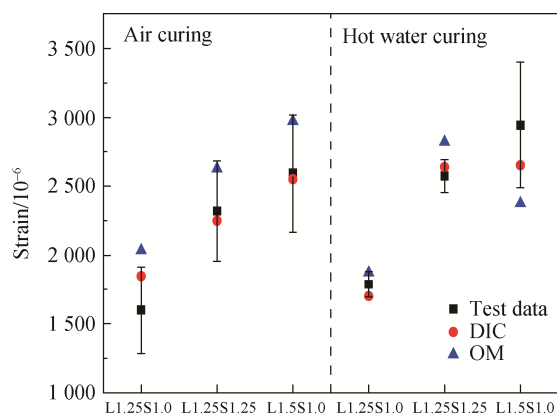
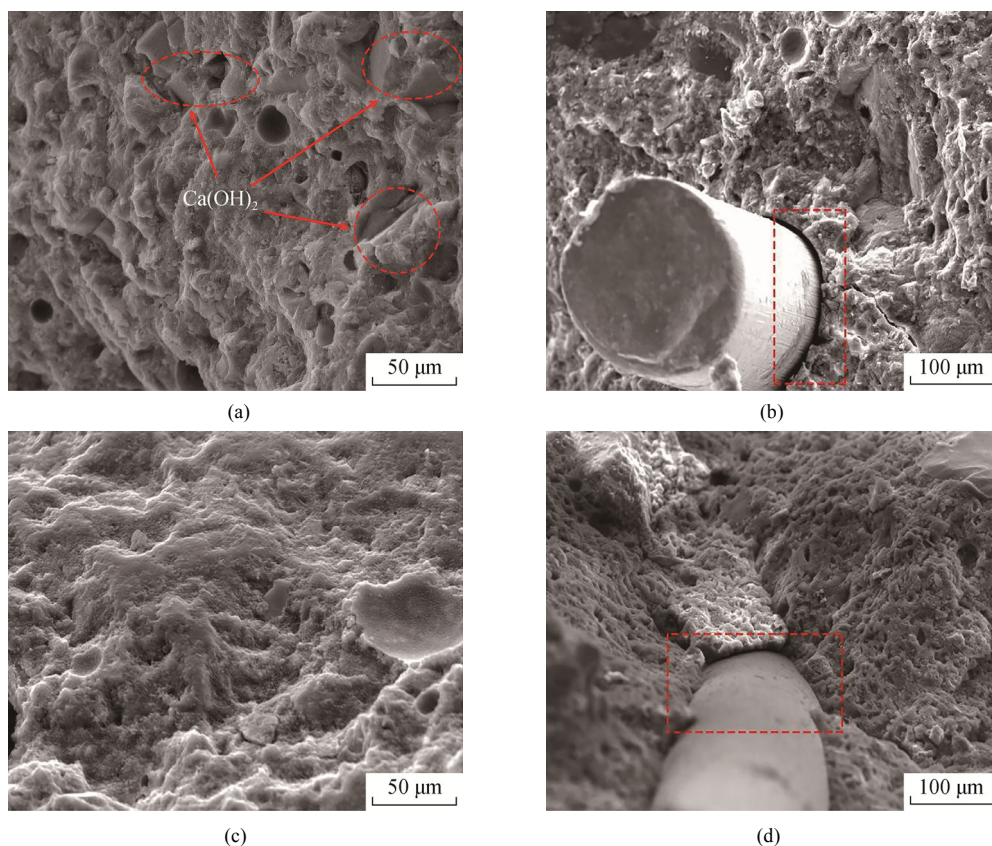


图 7 UHPC 试件理论应变与实测应变对比

Fig. 7 Comparison between theoretic strains and the tested strains for UHPC specimens

2.5 微观结构

图 8 对比了空气及热水养护条件下 L1.5S1.0 试样 3 d 早龄期的微观形貌。可以发现, 空气养护下试样微观结构相对疏松, 基体中出现的孔洞较多, 可明显观察到板状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (图 8a), 表明空气养护下早龄期 UHPC 的二次水化反应程度较低; 纤维与基体界面存在相对较大的空隙(图 8b), 说明二者之间的粘结力较弱。热水养护下, 基体密实度较高, 表面微孔数目相对较少(图 8c)。正如 2.2 所述, 热水养护促进了水泥的水化及硅灰的二次水化反应, 导致更多 C-S-H 凝胶的生成, 这些水化产物对基体的内部缺陷进行了有效填充, 从而形成了较为致密的微观结构; 而且, 基体中基本观察不到 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体(图 8c 及图 8d), 这也从一定程度上证实了热水养护对 UHPC 基体二次水化反应的促进作用^[27]。此外, 由图 8d 可见, 热水养护下纤维-基体界面空隙相对较小或不明显, 水化产物包裹在纤维表面, 致使二者之间形成了较强的界面粘结力。较为致密的基体结构以及较强的纤维-基体界面粘结, 很好地对应了 L1.5S1.0 试件在热水养护条件下表现出的较优力学性能。



(a-b) air curing, (c-d) hot water curing.

图 8 两种养护条件下 L1.5S1.0 试样 SEM 照片

Fig. 8 SEM images of L1.5S1.0 samples under two kinds of curing conditions

3 结论

1) 与常温空气养护相比, 常温水及热水养护均能加快 UHPC 的水化反应速率, 但热水养护的促进效应更为明显; 热水养护 UHPC 的 3 d 水化程度比空气养护提高了 34.4%, 而常温水养护仅提高了 4.8%。

2) 无论何种养护制度, 不同规格钢纤维混杂对 UHPC 试件 3 d 的拉伸初裂强度无明显影响, 混掺 1.5%长纤维与 1.0%短纤维的 UHPC 试件表现出了最高的抗拉强度, 纤维总体积掺量为 2.5%(长短纤维比例分别为 1.25:1.25、1.5:1.0) UHPC 试件在 3 d 龄期时拉伸应变均超过了 2×10^{-3} ; 与空气养护相比, 热水养护提高了初裂强度与抗拉强度, 但对拉伸应变的影响并不明显。

3) UHPC 抗拉强度 σ 与初裂强度 σ_{oc} 的关系满足纤维增强脆性基体复合材料的多缝开裂机制应力准则; 相同养护条件下, 抗拉强度与初裂强度的比值 σ/σ_{oc} 与拉伸应变的变化趋势具有很好的一致性: σ/σ_{oc} 越大, 拉伸应变也越大。

4) 空气养护条件下, 不同钢纤维混杂 UHPC 试件的 3 d 抗压强度变化较小, 处于 73~79 MPa 范围; 热水养护下, 纤维总掺量的增加明显提高了抗压强度, 其中长短纤维分别掺加 1.5%和 1.0%UHPC 试件的抗压强度最高, 可达 122 MPa; 热水养护下 UHPC 试件的抗压强度均高于空气养护。

5) 在拉伸作用下, 热水养护 UHPC 试件的最大拉伸裂缝宽度较小, 其中混掺 1.5%长纤维与 1.0%短纤维试件产生了较多宽度小于 50 μm 的微裂缝; 利用 DIC 技术获得的理论拉伸应变与实测拉伸应变具有较好的吻合度。

6) 与空气养护相比, 热水养护使得纤维混杂 UHPC 试件的基体结构更为致密, 纤维与基体的粘结作用更强; 微观结构的差异很好地佐证了宏观力学实验结果。

参考文献:

- [1] 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]. *Cem Concr Res*, 2019, 118: 1–13.
- [2] WANG Z, WANG J Q, ZHU J Z, et al. Energy dissipation and self-centering capacities of posttensioning precast segmental ultra-high performance concrete bridge columns[J]. *Struct Concr*, 2020, 2(21): 517–532.
- [3] YU R, SPIESZ P, BROUWERS H J H. Mix design and properties

assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)[J]. *Cem Concr Res*, 2014, 56: 29–39.

- [4] HEINZ D, URBONAS L, GERLICHER T. Effect of heat treatment method on the properties of UHPC, Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, 2012: 283–290.
- [5] YAZICI H, DENIZ E, BARADAN B. The effect of autoclave pressure, temperature and duration time on mechanical properties of reactive powder concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2013, 42: 53–63.
- [6] MASSIDDA L, SANNA U, COCCO E, et al. High pressure steam curing of reactive-powder mortars [J]. *ACI*, 2001, 200: 447–464.
- [7] WU Z M, SHI C J, HE W. Comparative study on flexural properties of ultra-high performance concrete with supplementary cementitious materials under different curing regimes[J]. *Constr Build Mater*, 2017 136: 307–313.
- [8] 詹国良, 林东, 沈云泽, 等. 养护制度对活性粉末混凝土强度影响机理研究[J]. *建筑科学*, 2016, 32(5): 96–100.
ZHAN Guoliang, LIN Dong, SHEN Yunze et al. Build Sci(in Chinese), 2016, 32(5): 96–100.
- [9] 吴炎海, 何雁斌, 杨幼华, 等. 养护制度对活性粉末混凝土(RPC)强度的影响[J]. *福州大学学报*, 2003, 31(5): 593–597.
WU Yanhai, HE Yanbin, YANG Youhua et al. *J Fuzhou Univ :Nat Sci Ed(in Chinese)*, 2003, 31(5): 593–597.
- [10] 高小建, 李双欣. 微波养护对掺矿渣超高性能混凝土力学性能的影响及机理[J]. *材料导报*, 2019, 33(1): 271–276.
GAO Xiaojian, LI Shuangxin. *Mater Rev(in Chinese)*, 2019, 33(1): 271–276.
- [11] 安明喆, 刘亚州, 张戈, 等. 再水化作用对超高性能混凝土基体显微结构和水稳定性的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2020, 48(11): 1722–1731.
AN Mingzhe, LIU Yazhou, ZHANG Ge, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2020, 48(11): 1722–1731.
- [12] KAN L L, SHI H S, SAKULICH A R, et al. Self-healing characterization of engineered cementitious composite materials[J]. *ACI Mater J*, 2010, 107(6): 617–624.
- [13] ZHANG Y M, SUN W, YAN H D. Hydration of high-volume fly ash cement pastes[J]. *Cem Concr Compos*, 2000, 22 (6): 445–452.
- [14] ZHANG J, YAN C W, BAI P C, WANG X X, LIU S G, LIU Z G. Effects of calcium silicate slag on hydration of cementitious pastes[J]. *Materials*, 2019, 12: 3094.
- [15] AN M Z, WANG Y, YU Z R. Damage mechanisms of ultra-high-performance concrete under freeze–thaw cycling in salt solution considering the effect of rehydration[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 198: 546–552.
- [16] 阚黎黎, 庞成凯, 王飞, 等. 聚乙烯纤维增强高延性碱矿渣复合材料的拉压性能及裂缝分布[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(12): 4309–4316.
KAN Lili, PANG Chengkai, WANG Fei, et al. *Act Mater Compos Sin (in Chinese)*, 2021, 38(12): 4309–4316.
- [17] ZHAO P, ZSAKI A M, NOKKEN M R. Using digital image correlation to evaluate plastic shrinkage cracking in cement-based materials[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 182: 108–117.

- [18] 蒋睿. 早期养护方式对超高性能混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(10): 1659–1668.
JIANG Rui. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(10): 1659–1668.
- [19] YANG E H, WANG S X, YANG Y Z, et al. Fiber-bridging constitutive law of engineered cementitious composites[J]. J Adv Concr Technol, 2008, 6(1): 181–193.
- [20] MCS-EPFL Lausanne, Recommendation: Ultra-High Performance Fibre Reinforced Cement-based composites (UHPFRC) Construction material, dimensioning und application, Zurich, Switzerland, 2016.
- [21] 苟鸿翔, 朱洪波, 周海云, 等. 定向分布钢纤维对超高性能混凝土的增强作用[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(10): 1757–1765.
GOU Hongxiang, ZHU Hongbo, ZHOU Haiyun, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 31(12): 1757–1765.
- [22] LI V C, LEUNG C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites[J]. J Eng Mech, 1992, 118: 2246–2264.
- [23] 刘建忠, 韩方玉, 周华新, 等. 超高性能混凝土拉伸力学行为的研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(12): 24–32.
LIU Jianzhong, HAN Fangyu, ZHOU Huaxin, et al. Mater Rev(in Chinese), 2017, 31(12): 24–32.
- [24] KANDA T, LI V C. Practical design criteria for saturated pseudo strain hardening behavior in ECC[J]. J Adv Concr Technol, 2006, (4): 59–72.
- [25] 高峰, 郝负洪, 吴安利, 等. 低模量聚酯纤维/水泥基复合材料抗冲击性能及损伤机制[J]. 复合材料学报, 2021, 38(11): 3838–3849.
GAO Feng, HAO Yuanhong, WU Anli, et al. Act Mater Compos Sin (in Chinese), 2021, 38(11): 3838–3849.
- [26] LI V C. Tailoring ECC for special attributes: A review[J]. Inter J Concr Struct Mater, 2012, (6): 135–144.
- [27] ZHANG H R, JI T, LIN X Y. Pullout behavior of steel fibers with different shapes from ultra-high performance concrete (UHPC) prepared with granite powder under different curing conditions[J]. Constr Build Mater, 2019, 211: 688–702.