

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201808105

超高性能轻质混凝土的力学性能及微观结构

王俊颜, 闫珠华, 耿莉萍

(先进土木工程材料教育部重点实验室(同济大学), 上海 201804)

摘要:超高性能轻质混凝土(ultra-high performance lightweight concrete, UHPLC)是一种由高强水泥浆体、漂珠和纤维组成的密度低于 $1\ 950\ \text{kg}/\text{m}^3$ 的新型水泥基结构材料。本文研究了不同养护制度及养护龄期对UHPLC抗压强度、轴拉力学性能和弯曲性能的影响,最后利用扫描电镜观察了UHPLC中漂珠的微观形貌。结果表明:随着龄期增长,UHPLC的抗压强度、轴拉性能和弯曲性能均提高,并出现明显的应变强化现象,说明养护龄期对UHPLC基体强度和纤维-UHPLC基体的界面黏结强度均有显著提高作用;高温蒸汽养护3 d可促进UHPLC基体早期强度发展,使UHPLC的抗压强度和弯曲性能迅速达到标准养护28 d时的水平,显著缩短养护龄期,但对纤维-基体界面黏结强度的贡献不大,黏结强度仍主要受龄期影响;UHPLC实测密度为 $1\ 815.2\ \text{kg}/\text{m}^3$,100 mm立方体抗压强度达103.1 MPa,极限抗拉强度达7.60 MPa,极限拉应变达0.431%,出现明显的应变强化现象,弯曲峰值强度达22.43 MPa,满足了RPC160的抗折强度要求,实现了水泥基结构材料轻质高强的目标。

关键词:超高性能轻质混凝土;轴拉性能;弯曲性能;微观结构

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)06-0018-07

The mechanical property and microstructure of ultra-high performance lightweight concrete

WANG Junyan, YAN Zhuhua, GENG Liping

(Key Lab of Advanced Civil Engineering Materials (Tongji University), Ministry of Education, Shanghai 201804, China)

Abstract: Ultra-high performance lightweight concrete (UHPLC) is a new type of cement-based structural material with a density of less than $1\ 950\ \text{kg}/\text{m}^3$ and is composed of high-strength cement paste, cenospheres, and fibers. This study investigated the effects of different curing systems and curing ages on the mechanical properties of UHPLC, which includes compressive strength, tensile performance, and flexural performance. Besides, the microscopic morphology of the cenospheres was also observed by scanning electron microscopy (SEM). Results show that, the compressive strength, tensile strength and bending peak strength increased obviously as the curing age increased, and UHPLC exhibited strain-hardening behavior. It indicates that curing age has a significant effect on the strength of UHPLC matrix and the interfacial bond strength between fiber and UHPLC matrix. High-temperature steam curing for 3 days, which can make the compressive strength and bending properties of the UHPLC matrix to the level of standard of curing for 28 days, can promote early strength development and shorten the curing age. However, it contributed less to the bond strength, which is still mainly affected by age. The actual density of UHPLC was $1\ 815.2\ \text{kg}/\text{m}^3$ and its cubic compressive strength reached 103.1 MPa. During direct tensile test, its ultimate tensile strength and ultimate tensile strain was 7.60 MPa and 0.431% respectively, and it exhibited strain-hardening behavior. Moreover, its bending strength reached 22.43 MPa, meeting the strength demand of RPC160. The required lightweight and high-strength cement based structural materials has been achieved.

Keywords: ultra-high performance lightweight concrete; tensile property; flexural property; microstructure

超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)是根据颗粒最紧密堆积和纤维增强技术进行设计的新品种水泥基结构材料。它能够充分发挥与利用均布其内部的钢纤维的抗拉强度,从而表现出高抗拉强度、高韧性和应变硬化行为^[1]。同时由

于UHPC本身的高致密性、多点微裂纹开裂方式以及裂纹自修复性能,使得UHPC具有优异的抗渗性能和耐久性能^[2]。UHPC现已广泛应用于公路桥梁、海工结构、防爆工程等领域,但随着大跨结构及高层建筑的快速发展,对混凝土材料提出更高标准。假如在保持UHPC超高力学性能及耐久性的同时,进一步降低其密度,将进一步降低UHPC结构自重、减少地基压力,为建筑的大跨度化、高层化创造更有力条件。

收稿日期: 2018-08-22

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51609172);
上海市科委项目(17DZ1204200)

作者简介: 王俊颜(1982—),男,研究员,博士生导师

通信作者: 王俊颜,14529@tongji.edu.cn

国内外对高强轻质混凝土已经进行了多年研究.丁庆军等^[3]配制出表观密度 1 850 ~ 2 050 kg/m³、28 d 抗压强度 50.7 ~ 62.9 MPa、抗折强度 4.9 ~ 8.9 MPa 的高强高韧性轻集料混凝土.黄绍龙等^[4]研发出了适用于钢箱梁桥面的轻质高韧性混凝土桥面铺装材料,其表观密度为 1 950 kg/m³,抗折强度达 9.5 MPa. Iqbal 等^[5]研究了钢纤维的掺量对高强轻质自密实混凝土的影响,结果显示,随着钢纤维掺量从 0% 增加到 1.25%,高强轻质自密实混凝土的密度基本保持不变(1 741 ~ 1 749 kg/m³),28 d 抗压强度从 67.8 MPa 下降到 59.74 MPa,28 d 抗折强度则从 3.7 MPa 增加到 7.62 MPa. 上述研究的高强轻质混凝土的力学性能虽然已有大幅提升,但仍显著低于常规密度 UHPC 的性能.

本文作者之前在新加坡国立大学参与研发了超轻高强水泥复合材料 (ultra lightweight cement composites, ULCC)^[6-7],是一种由高强水泥浆体、均布其中的漂珠和纤维组成的混合物,其密度仅为 1 450 kg/m³,但抗压强度高达 60 MPa,比强度高达 41.3 (N/m²)/(kg/m³). 本课题组结合 ULCC 的设计理念,以漂珠代替部分细砂作为轻集料,采用多元粉体最紧密堆积优化设计方法,进一步把水胶比降低到 0.25 以内,并加入 2% 体积掺率的钢纤维,研发出超高性能轻质混凝土 (ultra high performance lightweight concrete, UHPLC),使其在 1 950 kg/m³ 的轻质混凝土密度范围以内,实现 80 MPa 以上的超高抗压强度和拉伸应变强化特性,该材料将有望应用于桥梁、海洋工程等对结构自重有高要求的结构工程.

本文研究了不同养护制度 (标准养护及高温蒸汽养护) 及养护龄期对 UHPLC 力学性能的影响,包括抗压强度、轴拉力学性能和弯曲力学性能,最后利用扫描电镜观察了 UHPLC 中漂珠的微观形貌,为 UHPLC 的实际应用与推广提供了基础数据.

1 试验概况

1.1 试验原材料及配合比

UHPLC 的基体配合比见表 1,其设计密度为 1 800 kg/m³,水胶比为 0.22,钢纤维掺量为 2%. 其中水泥采用江南小野田水泥厂生产的 P · II 52.5 硅酸盐水泥,28 d 抗压强度为 60.1 MPa;硅灰采用埃肯公司生产的微硅粉,平均粒径为 0.10 ~ 0.15 μm,比表面积为 22 000 m²/kg,SiO₂ 质量分数为 94.48%;细骨料采用粒径范围在 0.16 ~ 0.3 mm 的单级配石英砂和粒径范围在 10 ~ 300 μm 的漂珠,其粒径分布曲线见图 1;减水剂采用粉末状聚羧酸系高效减水剂,减水率为 23%;钢纤维采用平直形钢纤维,相

关性能参数见表 2.

表 1 UHPLC 配合比

胶凝材料		石英砂	漂珠	水	减水剂	钢纤维
水泥	硅灰					
938	108	121	256	233	3.2	156

表 2 钢纤维的力学性能

直径/mm	长度/mm	长细比	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
0.16	16	100	2 500	200

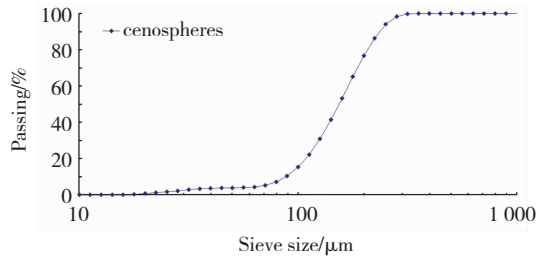


图 1 漂珠粒径分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution of cenospheres

1.2 试件制备及养护方法

1) 试件制备方法

UHPLC 成型搅拌程序为:启动搅拌机→投入粉料 (水泥、硅灰、漂珠、石英砂)→干拌 3 min→加水 and 减水剂→搅拌 3 ~ 5 min (物料达到流化状态)→投入纤维→继续搅拌 2 min 以上→出料. 搅拌完成后,将搅拌物浇筑在钢模中,经抹面后加盖塑料膜,以防止水分快速散失,室温下静置 48 h 后拆模.

2) 养护方法及试件分类

将脱模后的试件分别用下列 2 种制度进行养护: 1) 标准养护:温度为 20 ± 3 °C,相对湿度 90% 以上; 2) 高温蒸汽养护:在 100 °C 蒸汽条件下恒温养护 70 h,升温速率为 50 °C/h,降温速率 10 °C/h.

试件分成 A、B、C、D 四个组,具体信息见表 3. 每组含 3 个抗压试件、3 根轴拉试件以及 3 根弯曲试件. 用于抗压试验的试件是边长 100 mm 的立方体试件. 轴拉试件尺寸见图 2(a),其中间段的截面尺寸为 50 mm × 100 mm,均大于纤维长度的三倍值,有助于纤维在试件中的三维均匀分布,降低纤维取向分布的影响. 用于四点弯曲试验的棱柱体试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 400 mm,见图 2(b).

表 3 试件分类及编号

组别	编号	养护方式
A	UHPLC - N28d	标准养护 28 d
B	UHPLC - N120d	标准养护 120 d
C	UHPLC - H3d	高温蒸汽养护 3 d
D	UHPLC - H3d - N120d	高温蒸汽养护 3 d + 标准养护 117 d

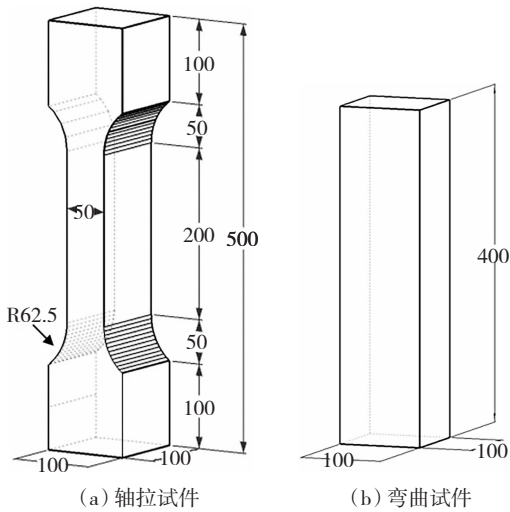


图 2 试件尺寸示意 (mm)

Fig. 2 Dimensions of specimens (mm)

1.3 加载装置和试验方法

1.3.1 轴拉试验仪器

在 30 t 电子伺服万能试验机上进行 UHPLC 的轴拉试验. 为避免轴拉加载偏心, 本课题组设计了一套专用夹具, 见图 3. 骨头形试件由上下两个特制夹具固定住, 中间纯拉段固定有两个矩形金属架, 两者之间距离即为试件的测试标距 L , 本文定为 150 mm. 两个金属架用来安装精度为 0.000 1 mm 的 4 个线性可变位移计 (LVDT), 以便测量轴向拉伸变形, 并转化为试件的应变值 $\varepsilon (\varepsilon = \frac{\Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3 + \Delta l_4}{4L} \times 100\%)$, $\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3, \Delta l_4$ 为 4 个位移计变形值, 最终与电脑采集的轴拉应力值形成轴拉应力 - 应变曲线). 试验加载速度设置为 0.05 mm/min, 直至试件拉应力小于峰值应力的 20% 结束试验, 整个试验过程在 1 h 左右.

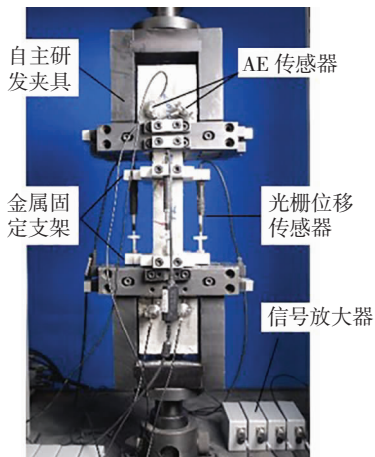


图 3 轴拉试验装置

Fig. 3 Set-up of direct tensile test

1.3.2 四点弯曲试验仪器

本文四点弯曲试验按 ASTM C1609^[8] 的方法进行. 试验装置见图 4, 加载装置采用 30 t 电子伺服万

能试验机, 试验加载跨度为 300 mm, 采用等位移加载控制方法. 试件跨中两侧对称布置两个光栅位移传感器以测量其挠度值, 并与数据采集系统和试验机测得的荷载值形成荷载 - 跨中挠度曲线. 试验加载速度为 0.5 mm/min, 当荷载值超过 0.5 kN 时, 试验进入正式加载阶段, 整个试验过程约 15 min.

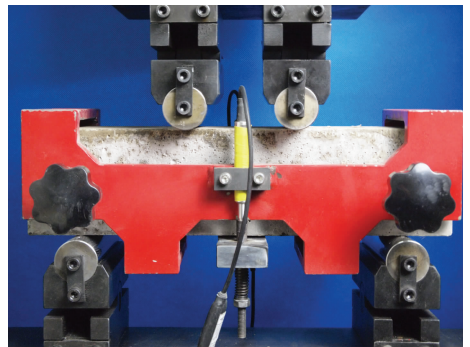
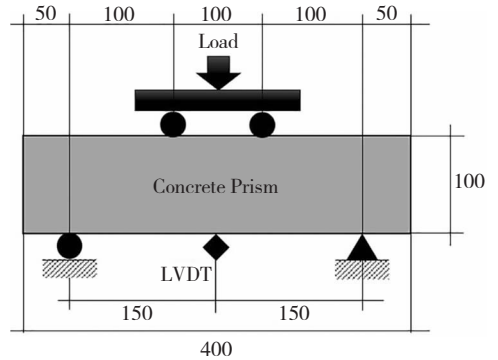


图 4 四点弯试验装置

Fig. 4 Set-up of four-point bending test

2 结果与分析

2.1 抗压试验结果

表 4 给出了 UHPLC 的 100 mm 立方体抗压强度, 由数据可知, 不同养护制度的 UHPLC 的抗压强度为 90 ~ 105 MPa. 标准养护条件下, 随着养护时间从 28 d 增加至 120 d, UHPLC 抗压强度增加 10 MPa. 高温蒸汽养护 3 d 的 UHPLC - H3d 的抗压强度略微超过标准养护 28 d UHPLC - N28d 的抗压强度, 然而再继续标准养护 117 d 后, 抗压强度无明显增长, 且低于标准养护 120 d 的强度.

表 4 UHPLC 立方体抗压强度

Tab. 4 Cubic compressive strength of UHPLC MPa

组别	编号	抗压强度	标准偏差
A	UHPLC-N28d	93.5	1.6
B	UHPLC-N120d	103.1	0.8
C	UHPLC-H3d	96.8	0.3
D	UHPLC-H3d-N120d	98.6	2.0

2.2 轴拉试验结果

轴拉试验中,各类型UHPLC均含3根试件,每根试件的原始试验数据采用插值法筛选出3 000个点,应变的取值范围为0~0.6%,然后绘制出3根试件的轴拉应力-应变曲线,再采用绘图软件Origin9.0对3条应力-应变曲线进行平均和离散

性处理,见图5,最后将每组试件的平均应力-应变曲线汇总于图6.本文根据极限应变值把UHPLC对应为瑞士SIA 2052规范^[9]的UO(应变软化)、UA(强化极限应变>0.15%)和UB(强化极限应变>0.2%)3种等级的高性能混凝土.

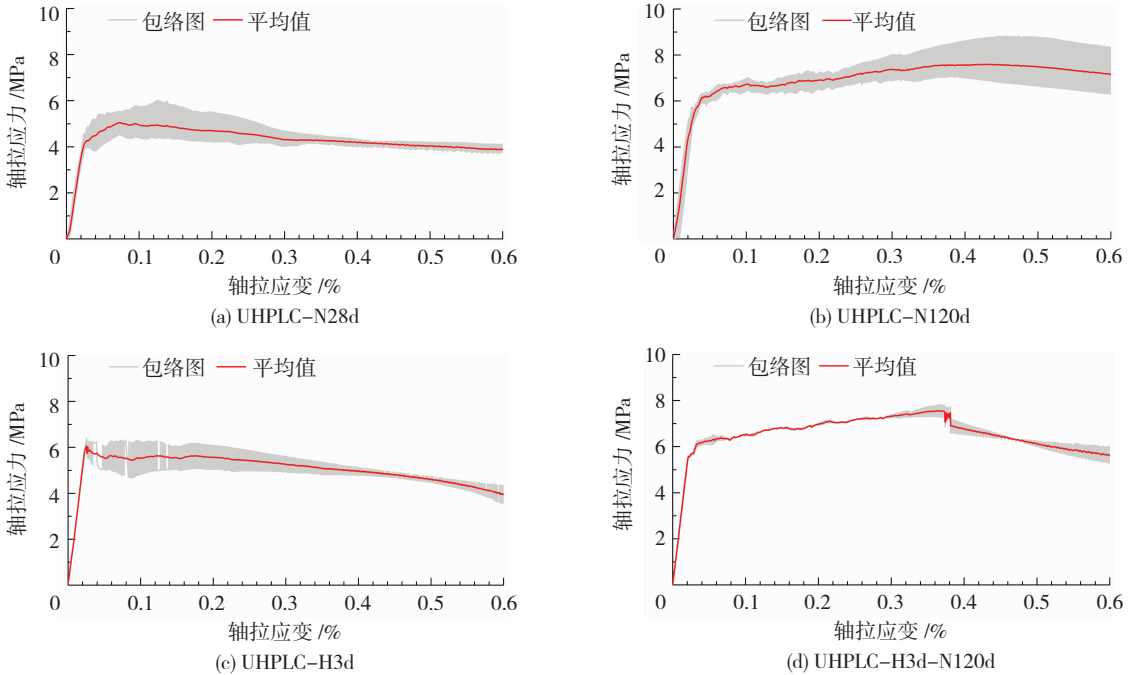


图5 平均应力-应变曲线及包络图

Fig. 5 Average stress-strain curve and envelope diagram

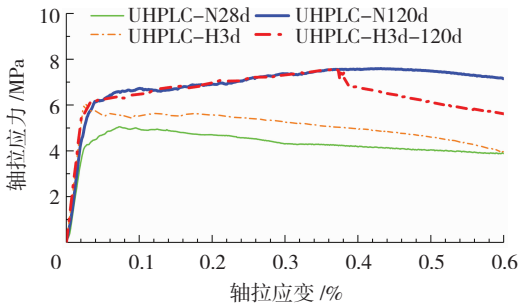


图6 平均应力-应变曲线汇总

Fig. 6 Summary of average stress-strain curves

表5 轴拉性能特征参数

Tab. 5 Characteristic parameters of tensile performance

编号	f_{Ute} /MPa	f_{Utu} /MPa	ϵ_{Utu} /%	极限应变等级
UHPLC-N28d	4.10	5.05	0.072	UO
UHPLC-N120d	5.72	7.60	0.431	UB
UHPLC-H3d	5.91	—	—	UO
UHPLC-H3d-N120d	5.65	7.55	0.364	UB

注:根据瑞士SIA 2052规范^[9],弹性极限抗拉强度 f_{Ute} (elastic tensile strength)为弹性段峰值强度,极限抗拉强度 f_{Utu} (tensile strength)为塑性段峰值强度,其对应的应变为强化极限应变 ϵ_{Utu} .本文根据极限应变将UHPLC对应为瑞士SIA 2052规范^[9]的UO(应变软化)、UA(强化极限应变>0.15%)和UB(强化极限应变>0.2%)3种等级的高性能混凝土.

从表3和表5可知:在标准养护下,随着龄期从28 d增加至120 d,UHPLC的抗压强度和弹性极限抗拉强度 f_{Ute} 分别从93.5 MPa、4.10 MPa增加到103.1 MPa、5.72 MPa,说明UHPLC基体强度随龄期增长有所增加.同时,结合图6和表5可知:随着龄期增加,UHPLC的极限抗拉强度和极限拉应变分别由5.05 MPa、0.072%增加至7.60 MPa、0.431%,并出现明显的应变强化现象.由于UHPLC的弹性段强度主要由其基体决定,塑性段强度主要由纤维与基体的界面黏结强度所决定,因此说明养护龄期增长对于纤维-UHPLC界面黏结强度也有显著提高作用.

与标准养护28 d的UHPLC-N28d相比,经高温蒸汽养护3 d的UHPLC-H3d的弹性极限抗拉强度由4.10 MPa增加到5.91 MPa,说明高温蒸汽养护可加速基体强度发展.另一方面,其轴拉应力-应变曲线在弹性段之后出现应变软化现象,说明高温蒸汽养护3 d对纤维-UHPLC界面黏结强度的贡献不大,纤维容易脱粘出现软化现象.作为对照,经蒸汽养护3 d再经标准养护养护117 d的UHPLC-H3d-N120d,其轴拉应力-应变曲线与标准养护120 d的UHPLC-N120d的曲线一样出现应变强化现象,且各轴拉性能特征参数基本一致,除了轴拉应

变超过 0.4% 以后的软化段有所差别,见图 6. 这说明当养护龄期较长时,蒸养与非蒸养的 UHPLC 的轴拉力学性能区别较小.

2.3 弯曲试验结果

弯曲试验中,各类型 UHPLC 均含 3 根试件,每根试件的原始试验数据采用插值法筛选出 3 000 个

点,挠度的取值范围为 0 ~ 2 mm,然后绘制出 3 根试件的弯曲强度 - 跨中挠度曲线,再采用绘图软件 Origin9.0 对 3 条弯曲强度 - 跨中挠度曲线进行平均和离散性处理,见图 7,最后将每组试件的平均弯曲强度 - 跨中挠度曲线及包络图汇总于图 8. 各曲线都有明显的挠度硬化段.

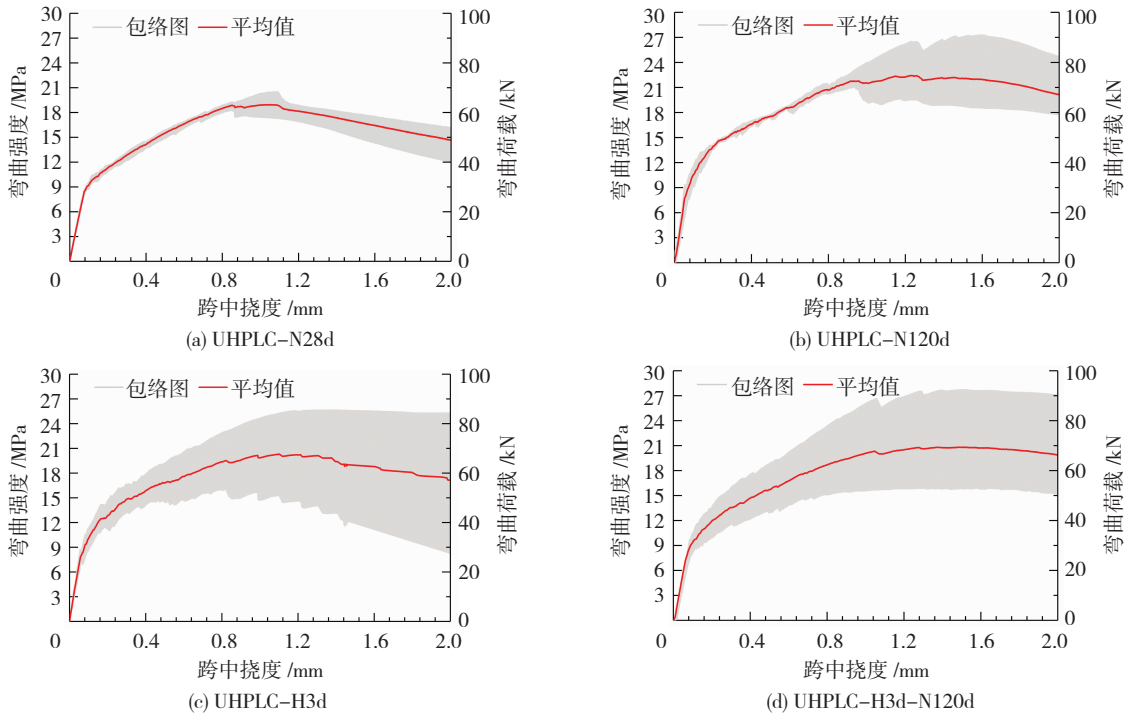


图 7 平均弯曲强度 - 跨中挠度曲线及包络图

Fig. 7 Average load-deflection curve and envelope diagram

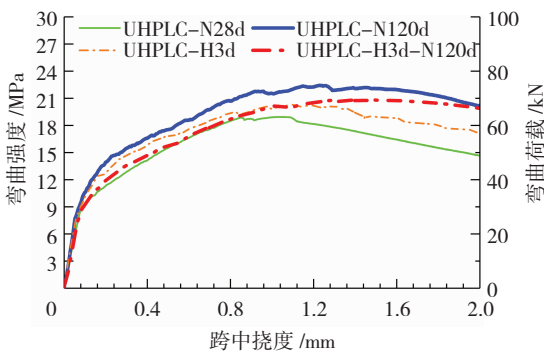


图 8 平均弯曲强度 - 跨中挠度曲线汇总

Fig. 8 Summary of average load-deflection curves

根据 ASTM C1609^[8] 计算得到的不同类型 UHPLC 的弯曲性能参数汇总于表 6. 由表 6 可知:标准养护条件下,随着龄期从 28 d 增加至 120 d, UHPLC 的弯曲峰值强度从 18.93 MPa 增加到 22.43 MPa,弯曲韧性 T_{100}^{50} 从 145.53 J 增加到 181.93 J,说明随着养护时间的增长, UHPLC 的弯曲性能进一步提升,与 UHPLC 轴拉试验结果表现出的力学性能一致.

与标准养护 28 d 的 UHPLC - N28d 相比,经高温蒸汽养护 3 d 的 UHPLC - H3d 的弯曲峰值强度从 18.93 MPa 增加到 20.30 MPa,弯曲韧性 T_{100}^{50} 从 145.53 J 增加到 166.78 J,说明高温蒸汽养护 3 d 可促进 UHPLC 的弯曲性能迅速达到标准养护 28 d 时的水平. 经高温蒸汽养护 3 d 后再经标准养护 117 d 的 UHPLC - H3d - N120d,其各弯曲性能参数均略低于标准养护 UHPLC - N120d 的参数,说明高温蒸汽养护对 UHPLC 早期弯曲性能发展有利,对 UHPLC 后期弯曲性能发展稍有不. 同时从图 7 (c)、(d) 可看出高温蒸养后的 UHPLC 的弯曲强度 - 跨中挠度曲线离散性大,这可能是蒸汽养护过程中材料受热不均,导致材料性能不稳定.

4 种类型中, UHPLC - N28d 的弯曲峰值强度最小,为 18.9 MPa,已达到了 RPC140 的抗折强度要求^[10]; UHPLC - N120d 的峰值强度最大,为 22.43 MPa,已达到了 RPC160 的抗折强度要求,并且其比抗弯强度(抗弯峰值强度与密度的比值)为 $12.36 (N/m^2)/(kg/m^3)$,表现出良好的抗弯性能.

表 6 ASTM C1609 弯曲性能参数

Tab. 6 Flexural parameters according to ASTM C1609

试件编号	f_p /MPa	δ_p /mm	P_p /kN	f_{600}^{100} /MPa	f_{150}^{100} /MPa	T_{150}^{100} /J
UHPLC - N28d	18.93	1.03	63.12	15.51	14.66	145.53
UHPLC - N120d	22.43	1.23	74.77	17.53	20.12	181.93
UHPLC - H3d	20.30	1.10	67.65	16.81	17.13	166.78
UHPLC - H3d - N120d	20.81	1.49	69.37	15.71	19.86	176.20

注: f_p 为峰值强度; δ_p 为峰值挠度(峰值强度所对应的挠度值); P_p 为峰值荷载(峰值强度所对应的荷载值); f_{600}^{100} 、 f_{150}^{100} 分别为 0.5 mm、2 mm 挠度下的残余强度; T_{150}^{100} 为挠度 2 mm 时,弯曲强度-跨中挠度曲线与坐标轴围成的面积。

3 微观结构

为观察 UHPLC 的内部微观结构,将 UHPLC - N28d、UHPLC - N120d、UHPLC - H3d、UHPLC - H3d - N120d 分别取样,利用扫描电镜(scanning electron microscope,简称 SEM)进行测试。

图 9 是 UHPLC - N28d 基体放大 1 500 倍后的 SEM 图。基体比较密实,漂珠周围存在原始孔洞,其内壁光滑,未见到反应产物,说明漂珠在标准养护 28 d 后仍比较稳定,其含有的无定型 SiO_2 未与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生火山灰反应。

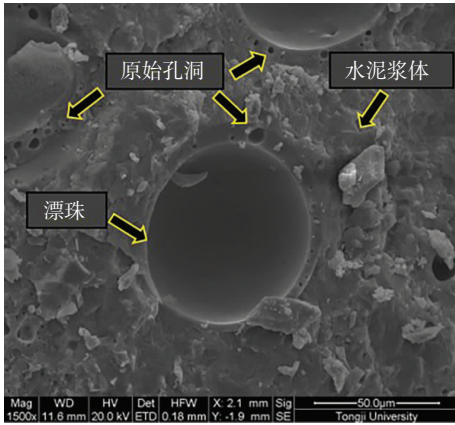


图 9 UHPLC - N28 试件 SEM 图像

Fig. 9 SEM image of the UHPLC-N28d

图 10(a)、(b) 分别是 UHPLC - N120d 基体放大 1 000 倍与 5 000 倍的 SEM 图。从图 10(a) 中可以看出,漂珠与水泥浆体的界面黏结较好。部分漂珠内壁形成了须状的水化产物,见 10(b),其长度约为 10 μm 。

图 11 是 UHPLC - H3d 基体放大 1 200 倍的 SEM 图。UHPLC - H3d 漂珠周围存在多处原始孔洞,但无明显反应产物出现。

图 12(a)、(b) 分别是 UHPLC - H3d - N120d 基体放大 1 000 倍与 15 000 倍的 SEM 图。从图 12(a) 中可看出, UHPLC - H3d - N120d 漂珠内壁同样出现显著的多处孔洞。与 UHPLC - H3d 不同,其漂珠内壁产生了纵横交错的层片状水化产物,这与作者之前关于漂珠在轻质水泥基材料中的碱骨料反应研

究^[6]中发现的水化产物铝钙矾石(aluminum tobermorite, $\text{Ca}_5\text{Si}_5\text{Al}(\text{OH})\text{O}_{17} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 相似。

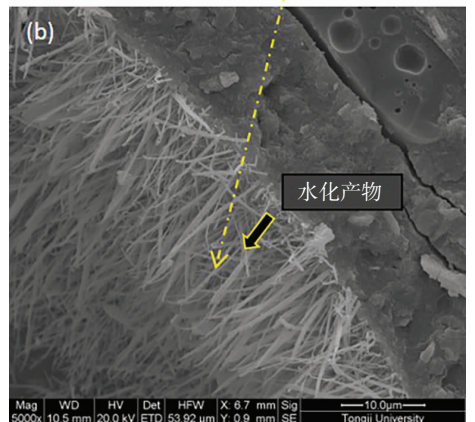
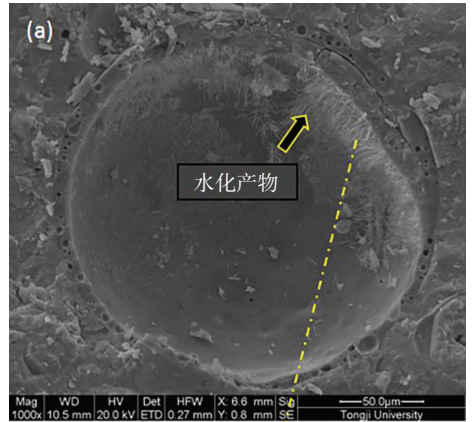


图 10 UHPLC - N120d 试件 SEM 图像

Fig. 10 SEM images of the UHPLC-N120d

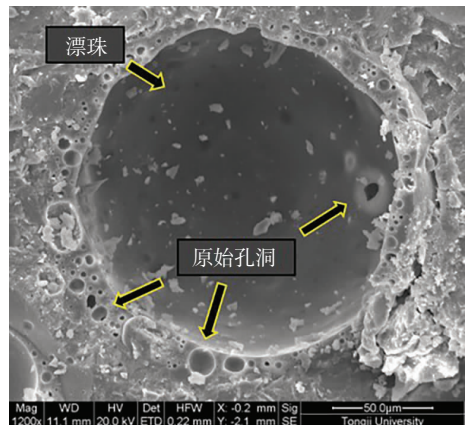


图 11 UHPLC - H3d 试件 SEM 图像

Fig. 11 SEM image of the UHPLC-H3d

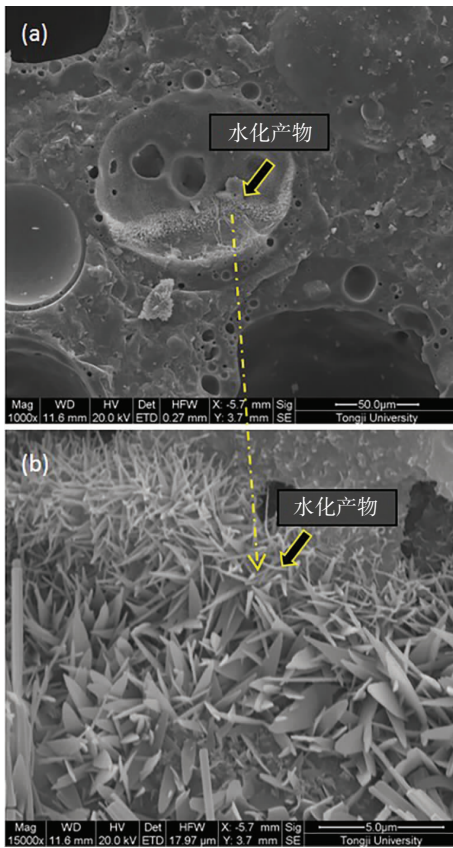


图 12 UHPLC-H3d-N120d 试件 SEM 图像

Fig. 12 SEM images of the UHPLC-H3d-N120d

4 结 论

1) 标准养护条件下,随着龄期增加,UHPLC 的抗压强度增加,轴拉和弯曲性能显著提高,并出现明显的应变强化现象,说明养护龄期对 UHPLC 基体强度和纤维-基体的界面黏结强度均有提高作用。

2) 高温蒸汽养护 3 d 可促进 UHPLC 的抗压强度和弯曲性能迅速达到标准养护 28 d 时的水平,显著缩短养护龄期,然而其轴拉应力-应变曲线在弹性段之后出现应变软化现象,说明高温蒸汽养护 3 d 对于纤维-UHPLC 界面黏结强度的增长贡献不大。

3) 经高温蒸汽养护 3 d 后再经标准养护 117 d 的 UHPLC 的抗压强度、弯曲峰值强度均低于标准养护 120 d 的 UHPLC 的强度,说明高温蒸汽养护 3 d 不利于 UHPLC 基体后期强度发展,但是其轴拉性能特征参数基本一致,说明纤维-UHPLC 界面黏结强度主要受龄期影响。

4) 标准养护 120 d 后漂珠内壁出现须状水化产物。经高温蒸汽 3 d 后再经标准养护 117 d 的漂珠内壁出现纵横交错的层片状水化产物。

5) 标准养护 120 d 的 UHPLC 设计密度为 1800 kg/m^3 ,实测密度为 1815.2 kg/m^3 ,水胶比为 0.22,100 mm 立方体抗压强度为 103.1 MPa,极限抗拉强度为 7.60 MPa,极限拉应变为 0.431%,出现

明显的应变强化现象。同时,弯曲峰值强度达 22.43 MPa,弯曲韧性 T_{150}^{100} 为 181.93 J,达到了 RPC160 的抗折强度要求。

参考文献

- [1] CHARRON J P, DENARIE E, BRUHWILER E. Transport properties of water and glycol in an ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPRC) under high tensile deformation[J]. *Cement & Concrete Research*, 2008, 38(5): 689
- [2] 王俊颜,耿莉萍,郭君渊,等. UHPC 的轴拉性能与裂缝宽度控制能力研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(12): 165
WANG Junyan, GENG Liping, GUO Junyuan, et al. Experimental study on crack width control ability of ultra-high performance concrete[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(12): 165
- [3] 丁庆军,王小磊,胡曙光. 钢箱梁桥面轻集料混凝土的性能研究[J]. *公路*, 2009(4): 60
DING Qingjun, WANG Xiaolei, HU Shuguang. A study on properties of lightweight aggregate concrete of steel box girder bridge pavement [J]. *Highway*, 2009(4): 60
- [4] 黄绍龙,谢学钦,丁庆军. 基于高韧性轻质混凝土的新型钢箱梁桥面的铺装方案[C]//2013 年二省二区桥梁新技术交流会论文集. 广州: [s. n.], 2013: 21
HUANG Shaolong, XIE Xueqin, DING Qingjun. Pavement scheme of new steel box girder bridge deck based on high toughness lightweight concrete [C]//Proceedings of Bridge New Technology Exchange Conference of the Second District in 2013. Guangzhou: [s. n.], 2013: 21
- [5] IQBAL S, ALI A, HOLSCHMACHER K, et al. Mechanical properties of steel fiber reinforced high strength lightweight self-compacting concrete (SHLSCC) [J]. *Construction & Building Materials*, 2015, 98: 325
- [6] WANG Junyan, ZHANG Minhong, LI Wei, et al. Stability of cenospheres in lightweight cement composites in terms of alkali-silica reaction[J]. *Cement & Concrete Research*, 2012, 42(5): 721
- [7] WANG Junyan, CHIA K S, LIEW J Y R, et al. Flexural performance of fiber-reinforced ultra lightweight cement composites with low fiber content[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2013, 43(10): 39
- [8] BANTHIA N, ISLAM S T. Loading rate concerns in ASTM C1609 [J]. *Journal of Testing & Evaluation*, 2013, 41(6): 20120192
- [9] MCS-EPFL. Ultra-high performance fibre reinforced cement based composites (UHPRC): construction material, dimensioning and application[S]. Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 2016: 12
- [10] 全国混凝土标准化技术委员会. 活性粉末混凝土: GB/T 31387—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 2
National Standardization Technical Committee for Concrete. Reactive powder concrete: GB/T 31387—2015[S]. Beijing: China Standard Press, 2015: 2

(编辑 赵丽莹)