

DOI:10.11918/202009053

超高性能轻质混凝土的循环拉伸力学性能

王俊颜,刘非凡,郭君渊

(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)是一种具有高抗压比和拉伸应变强化特性的轻质水泥基材料。为了阐述UHPLC与钢筋在钢筋屈服点之前的协同受拉机制,针对一种密度为 $1\ 789\ \text{kg}/\text{m}^3$ 、抗压强度为 $63.1\ \text{MPa}$ 、极限拉伸应变约为 $2.4 \times 10^{-3} \sim 2.8 \times 10^{-3}$ 、极限抗拉强度约为 $6.9 \sim 7.8\ \text{MPa}$ 的UHPLC,采用自主研发的拉伸测试装置,研究其循环拉伸力学性能,分别考虑了4种加载条件(循环应变分别是 2.0×10^{-4} 、 5.0×10^{-4} 、 1.0×10^{-3} 、 1.5×10^{-3})。试验结果表明:不同加载条件的UHPLC的循环拉伸应力-应变曲线的包络线与单调拉伸应力-应变全曲线具有较高的重合度;循环加载曲线的残余应变、加载刚度、卸载刚度均反映了桥接微裂纹的纤维脱黏状态,残余应变越大,说明纤维的脱黏长度越长,将导致UHPLC的加载、卸载刚度降低;UHPLC在循环加载作用下的累积应变小于其极限拉伸应变时,多次循环加载主要是对已脱黏部分纤维的循环拉伸作用;UHPLC的循环加载刚度退化率与累积残余应变的关系符合幂函数关系,拟合度为0.99。UHPLC的循环拉伸加载刚度本质上由纤维参与受拉的有效长度(脱黏部分)决定,可用累积残余应变来表征。

关键词:超高性能轻质混凝土;循环拉伸加载;力学性能;刚度;应力应变曲线

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)04-0170-07

Cyclic tensile behavior of ultra-high performance lightweight concrete

WANG Junyan, LIU Feifan, GUO Junyuan

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

Abstract: Ultra-high performance lightweight concrete (UHPLC) is a kind of lightweight cement-based material with properties of high tension and compression ratio and tensile strain-hardening. To investigate the collaborative tension mechanism between UHPLC and steel before the yield point of the steel, a self-designed tensile loading system was used to conduct cyclic tensile loading. The adopted UHPLC has a density of $1\ 789\ \text{kg}/\text{m}^3$, compressive strength of $63.1\ \text{MPa}$, ultimate tensile strain of $2.4 \times 10^{-3} \sim 2.8 \times 10^{-3}$, and ultimate tensile strength of $6.9 \sim 7.8\ \text{MPa}$. Four cyclic loading conditions were applied, i. e., tensile strains were 2.0×10^{-4} , 5.0×10^{-4} , 1.0×10^{-3} , and 1.5×10^{-3} , respectively. Test results show that the envelope curves of the cyclic tensile stress-strain curves were in high consistency with the direct tensile stress-strain curves. The residual strain, stiffness of loading, and stiffness of unloading that derived from the cyclic loading test reflected the debonding situation of the fibre at bridged micro-cracks. The larger the residual strain was, the longer the debonding length of the fibre was, which resulted in the reduction of the loading and unloading stiffness. When the cumulated tensile strain under the cyclic tensile loading was smaller than the ultimate tensile strain, the multiple cyclic loading led to a cyclic tensile action on the debonding part of the fibre. The degradation rate of the loading stiffness and the cumulated residual strain followed a power function with a fitting degree of 0.99. The stiffness of the UHPLC under cyclic tensile loading was decided by the effective length of the fibre (the debonding part) under tensile loading, which could be characterized by the cumulated residual strain.

Keywords: ultra-high performance lightweight concrete; cyclic tensile loading; mechanical properties; stiffness; stress-strain curve

超高性能轻质混凝土(ultra-high performance lightweight concrete, UHPLC)^[1-2]是利用超高性能混凝土(UHPC)的低水胶比、纤维增强、无粗骨料等原理制备^[3],并添加轻质细骨料制备而成的新型结构

材料,其轻质细骨料被低水胶比浆体充分包裹而具备高抗渗性能^[4],通过纤维增强可实现拉伸应变强化和多点分布微裂纹,从而具备优异的裂纹宽度控制能力^[5-6]。极限拉伸应变大于 2.0×10^{-3} ^[7-8]的配筋UHPLC结构在正常使用极限状态设计时无需考虑最大裂纹宽度的影响,因此可以充分利用钢筋强度,从而实现充分的优化设计,有望在材料低密度化的基础上进一步制备更轻量化的预制结构,比如

收稿日期: 2020-09-10

基金项目: 浙江省交通运输厅科技计划项目(2019-GCKY-01)

作者简介: 王俊颜(1982—),男,特聘研究员,博士生导师

通信作者: 王俊颜,14529@tongji.edu.cn

大尺寸外挂墙板、轻量化预制楼梯、预制梁、浮岛式平台等。由于UHPLC需要与钢筋在高应力状态下协同工作(譬如钢筋达到200 MPa时,应变约为 1.0×10^{-3})^[9],所以需要UHPLC与钢筋的协同受拉力学性能进行研究。目前关于配筋UHPC拉伸试验不多^[10-11],关于循环加载的更少。本文针对UHPLC在4种加载条件下(循环应变分别是 2.0×10^{-4} 、 5.0×10^{-4} 、 1.0×10^{-3} 、 1.5×10^{-3})的力学性能开展系统研究,并深入分析其残余应变、加载卸载刚度等力学性能参数随循环加载次数的影响,并分析其刚度退化机理和模型,目标是为轻量化的配筋UHPLC结构设计提供基础理论依据。

1 试验概况

1.1 试验原材料及配合比

本文中采用的UHPLC的设计密度为 $1\ 800\text{ kg/m}^3$,水胶比为0.23,纤维掺量为2.25%。配合比见表1,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 $0.10 \sim 0.15\ \mu\text{m}$,比表面积为 $22\ 000\ \text{m}^2/\text{kg}$, SiO_2 质量分数为94.48%;轻质填料用粒径范围在 $0.15 \sim 0.3\ \text{mm}$ 和 $0.3 \sim 1\ \text{mm}$ 的两种轻质材料进行复配,堆积密度为 $200\ \text{kg/m}^3$;减水剂采用粉末状聚羧酸系高效减水剂,减水率为25%;引气剂为粉状的茶皂素基引气剂;纤维采用平直形镀铜钢纤维,相关性能参数见表2。

表1 UHPLC配合比

Tab. 1 Mix proportion of UHPLC kg/m^3

| 水 | 水泥 | 硅灰 | 一级粉煤灰 | 轻质填料 | 引气剂 | 减水剂 | 纤维 |
|-----|-----|-----|-------|------|------|------|-------|
| 265 | 886 | 130 | 138 | 200 | 0.24 | 5.26 | 175.5 |

表2 纤维的力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of fibre

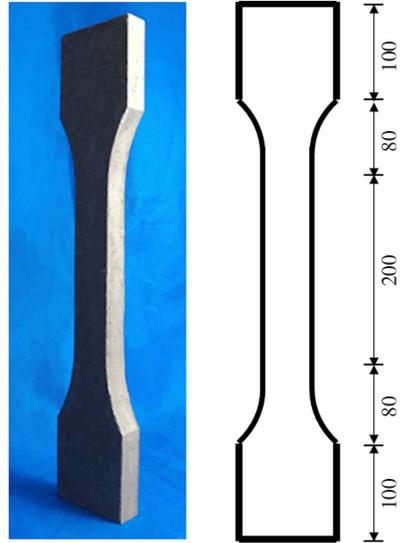
| 直径/mm | 长度/mm | 长细比 | 抗拉强度/MPa | 弹性模量/GPa |
|-------|-------|-----|----------|----------|
| 0.2 | 16 | 80 | 2 500 | 200 |

1.2 试件制备及养护方法

UHPLC采用如下搅拌程序:启动搅拌机→投入粉料(含外加剂)→干拌3 min→加水→搅拌3~5 min(物料达到流态)→投入纤维→继续搅拌2 min以上→出料成型试件。将搅拌物浇筑在钢模中,经抹面后加盖塑料膜,以防止水分的快速散失,室温下静置24 h后拆模。脱模后的试件进行标准养护,温度为 $20 \pm 3\ ^\circ\text{C}$,相对湿度90%以上。

试件分为5组,均为相同配合比,包括1组单调拉伸加载试件以及4组不同等幅变形循环拉伸加载

试件(循环应变分别是 2.0×10^{-4} 、 5.0×10^{-4} 、 1.0×10^{-3} 、 1.5×10^{-3})。每组试件均包含3个狗骨头拉伸试件(图1)。同时根据GB/T 17671—1999成型 $40\ \text{mm} \times 40\ \text{mm} \times 160\ \text{mm}$ 的棱柱试件测试28 d强度,测试强度前用排水法测试试件的硬化密度。



中间变截面宽度为50,厚度为30

图1 狗骨头拉伸试件(mm)

Fig. 1 Dog-bone-shaped tensile specimen (mm)

1.3 加载装置及试验方法

在10 t的电子伺服万能试验机上进行UHPLC的拉伸试验,试验机的试验力和变形的示值准确度均为 $\pm 0.5\%$ 。本文为避免拉伸加载偏心,使用了一套专用夹具,见图2。



图2 拉伸试验装置

Fig. 2 Tensile test setup

狗骨头拉伸试件由上下夹具固定,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 $0.000\ 1\ \text{mm}$ 的两个线性可变位移计,以测量轴向拉伸变形,并转化为试件的应变值 ε

($\varepsilon = (\Delta l_1 + \Delta l_2) / 2L \times 100\%$, Δl_1 和 Δl_2 为两个位移计变形值), 最终与电脑采集的拉伸应力值形成拉伸应力 - 应变曲线。试验加载速度设置为 0.3 mm/min (试验机横梁加载速度)。

UHPLC 的单调拉伸加载在拉伸应力小于峰值应力的 80% 时结束试验。UHPLC 循环拉伸试验的每次循环由预加载、正式加载和卸载三部分组成, 试验全程采用等位移加载控制, 预加载的速度为 1 mm/min , 正式加载及卸载的速度均为 0.3 mm/min 。当荷载超过 0.5 kN 时, 试验进入正式加载阶段; 当加载至目标拉伸应变时, 试验进入卸载阶段; 当荷载降至 0.5 kN 时, 单次循环加载结束。

2 结果与分析

2.1 UHPLC 的拉伸应力 - 应变曲线

UHPLC 的 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ 棱柱试件抗压强度为 63.1 MPa , 硬化密度为 1789 kg/m^3 , 相对传统 UHPC 的密度降低了 28% 。图 3 给出了 3 根 UHPLC 的拉伸应力 - 应变曲线, UHPLC 的拉伸应力 - 应变曲线呈现出明显的 3 个阶段, 即弹性段、应变强化段和应变软化段。UHPLC 的弹性极限强度较低, 约为 $3 \sim 4 \text{ MPa}$, 随后迅速转入应变强化段 (转折点不明显, 大约在应变为 1.6×10^{-4} 处发生转折), 极限拉伸应变约为 $2.4 \times 10^{-3} \sim 2.8 \times 10^{-3}$, 极限抗拉强度约为 $6.9 \sim 7.8 \text{ MPa}$, 与弹性极限强度的

比值范围是 $1.8 \sim 2$ 。试验过程中发现, 在应变强化阶段, UHPLC 展示出很强的裂纹宽度控制能力, 裂纹宽度不可见或小于 0.05 mm 。UHPLC 展示出较低的弹性极限强度、较高的应变强化性能和裂纹控制能力, 这是由于 UHPLC 采用了粒径比水泥粗并且强度较低的轻质填料, 降低了 UHPLC 基体的断裂韧性, 但纤维仍保持与 UHPLC 基体较高的黏结强度, 从而实现不可见的多点分布微裂纹开展模式。这种特性可让 UHPLC 与普通钢筋 (如 HRB400) 在钢筋屈服之前保持良好的协同受拉作用, 以及配筋 UHPLC 结构优异的裂纹宽度控制能力。

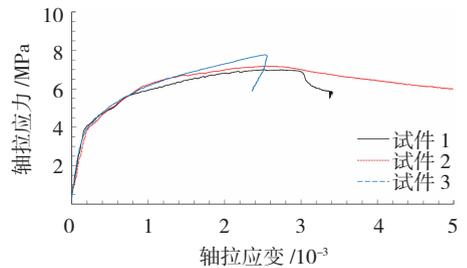


图 3 UHPLC 的拉伸应力 - 应变曲线

Fig. 3 Tensile stress-strain curves of UHPLC

2.2 循环拉伸加载条件下 UHPLC 的应力 - 应变曲线

4 组拉伸试件的循环加载次数为 $8 \sim 11$ 次不等, 并且一般在第四次循环之后, 加载卸载曲线会趋于稳定。为方便分析, 本文取了 8 次循环曲线进行深入分析, 见图 4。

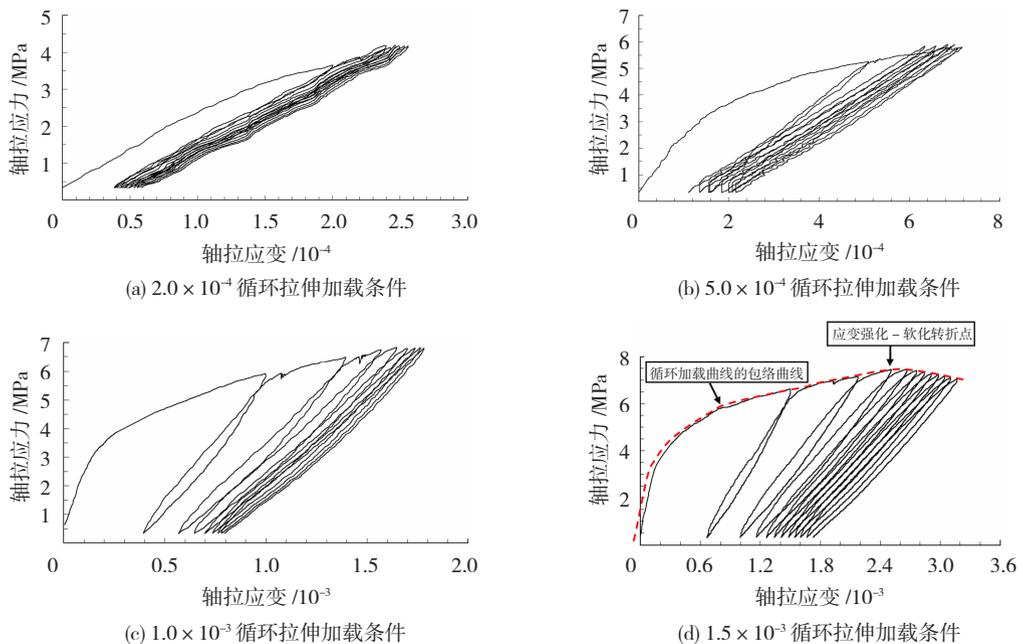


图 4 不同循环加载条件下 UHPLC 的应力 - 应变曲线

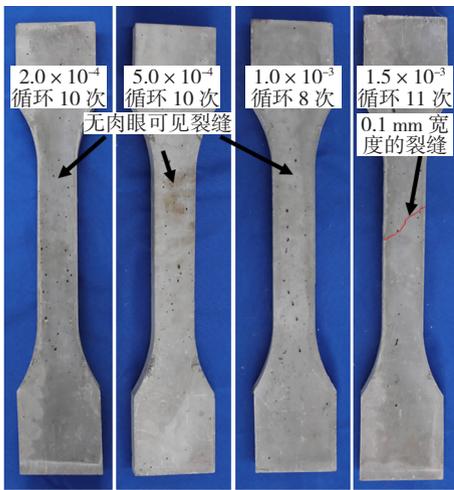
Fig. 4 Stress-strain curves of UHPLC under different cyclic loading conditions

由图 4 可见: 1) 等幅加载变形越小, 循环曲线越密集, 残余应变也越小, 反之, 循环曲线越分散, 残余应变也越大; 2) 4 组循环加载曲线的外包络线与

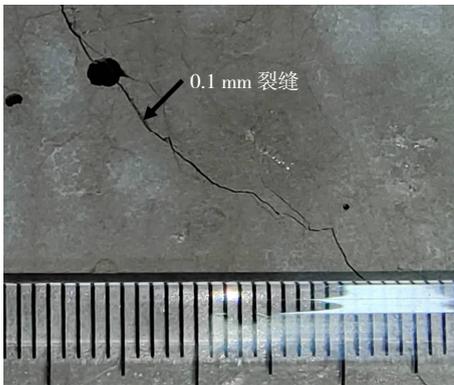
图 3 所示的全曲线基本吻合, 特别是加载变形为 1.5×10^{-3} 时, 其循环曲线的包络线在应变为 2.6×10^{-3} 处进入应变软化段, 较明显地呈现出

UHPLC 拉伸曲线的 3 个阶段;3) 由于在塑性段时 UHPLC 基体已经断裂,主要由纤维桥接贡献承载力,因此循环加载曲线的残余应变、加载刚度、卸载刚度均间接反映了桥接裂纹处纤维的黏结和脱黏状态。可以预见,对于小的等幅变形循环加载条件(如应变分别是 2.0×10^{-4} 和 5.0×10^{-4}),纤维脱黏长度较短,参与拉伸变形的有效长度较小,拉伸试件在单位变形条件下的纤维变形量高,所以纤维拉伸应力较高,表现出的拉伸试件刚度更高。对于大的等幅变形循环加载条件(如应变分别是 1.0×10^{-3} 和 1.5×10^{-3}),纤维脱黏长度增大,参与拉伸变形的有效长度较大,拉伸试件在单位变形条件下的纤维变形量低,因此纤维拉伸应力不高,表现出的拉伸试件刚度变低。

4 种不同循环加载后的试件见图 5,由图 5 可见,加载变形为 1.5×10^{-3} 的试件进行 11 次循环后,由于累积应变大于 UHPLC 的极限应变,已经进入应变软化段,因此有可见裂纹。其余试件由于累积应变小于 UHPLC 的极限应变,处于应变强化段,无可见裂纹,试件保持完整。



(a) 4 种循环加载后的试件



(b) 加载变形为 1.5×10^{-3} 的试件循环 11 次后的最大裂纹

图 5 循环后的轴拉试件

Fig. 5 Tensile specimen after cyclic loading

2.3 循环拉伸加载条件下 UHPLC 的力学性能

循环拉伸加载条件下的 UHPLC 的力学性能参数定义见图 6。参考文献[12-13]中曲线刚度的确定方法,本章在每次轴拉循环曲线的加载段和卸载段的 0%~40% 极限应力段分别拟合直线,其对应斜率即为加载刚度和卸载刚度。图 6 中 E_l 和 E_u 分别表示加载刚度和卸载刚度(括号里表示循环次数序号)。由于 UHPLC 进入应变强化段之后纤维发生了局部脱黏,部分变形无法在卸载后恢复,因此存在残余应变,并且残余应变会进行累积。本文定义的残余应变为每次循环的卸载曲线回到荷载初始值(0.5 kN,对应应力为 0.33 MPa)的应变与加载曲线起始应变值的差值。

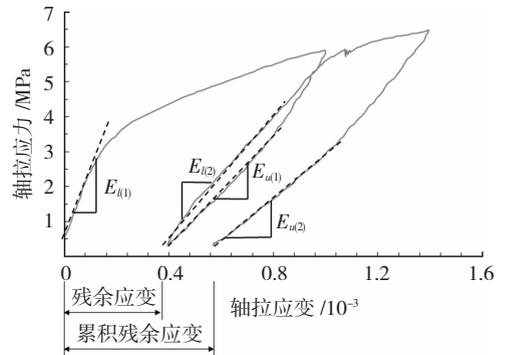


图 6 循环拉伸加载下 UHPLC 的力学性能表征

Fig. 6 Characterization of mechanical properties of UHPLC under cyclic tensile loading

表 3 列出了不同循环拉伸加载条件下 UHPLC 的力学性能,并且在图 7~10 分别给出了残余应变、峰值应力、加载刚度、卸载刚度随循环次数的变化规律。

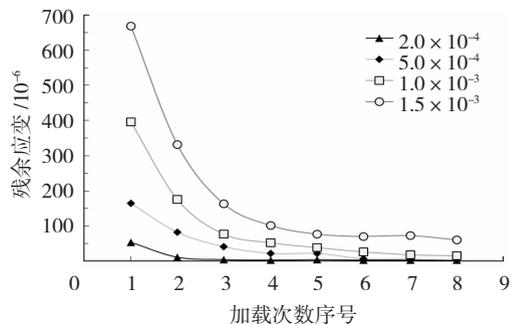


图 7 轴拉循环荷载下 UHPLC 的残余应变随加载次数的变化

Fig. 7 Effect of the number of tensile cycles on residual strain of UHPLC

2.3.1 残余应变

由图 7 可见,不同循环拉伸加载条件下 UHPLC 的残余应变均在第三次循环之后趋于稳定。从微观角度看,这是由于 UHPLC 在循环拉伸加载条件下的损伤主要表现为基体的开裂、以及纤维与基体的逐步脱黏,因此宏观角度表现为卸载后所产生的不可

恢复的残余变形(应变)。对于 2.0×10^{-4} 、 5.0×10^{-4} 和 1.0×10^{-3} 这 3 种应变加载条件,随着循环次数增多,UHPLC 不可恢复的残余变形逐渐降至零,说明此时纤维与基体的继续脱黏现象基本停止,循环加载主要是对已脱黏部分纤维的循环拉伸作用。对于 1.5×10^{-3} 这种应变加载条件,从第四次循环开始,UHPLC 已经进入应变软化段,此时某截面处的纤维已部分处于拔出状态,因此后续的残余应变仍比较高,第八次循环加载后的残余应变仍高达 6.0×10^{-5} 。

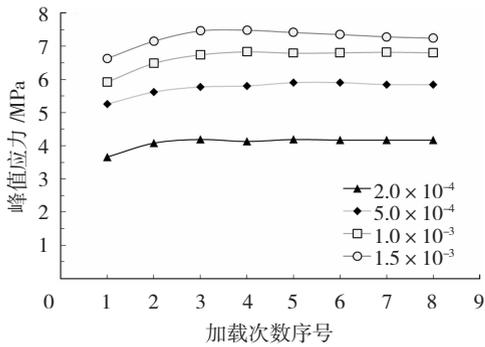


图 8 轴拉循环荷载下 UHPLC 的峰值应力随加载次数的变化

Fig. 8 Effect of the number of tensile cycles on ultimate tensile stress of UHPLC

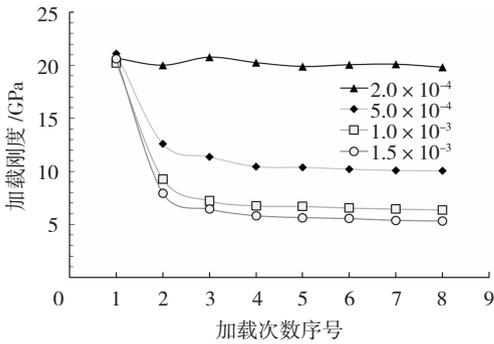


图 9 轴拉循环荷载下 UHPLC 的加载刚度随加载次数的变化

Fig. 9 Effect of the number of tensile cycles on loading stiffness of UHPLC

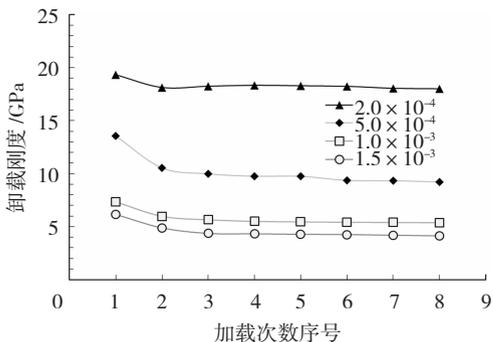


图 10 轴拉循环荷载下 UHPLC 的卸载刚度随加载次数的变化

Fig. 10 Effect of the number of tensile cycles on unloading stiffness of UHPLC

2.3.2 峰值应力

由图 8 可见,4 种循环加载条件下的 UHPLC 在前 3 次循环中的峰值应力均有小幅提高,但第四次循环之后,在 1.5×10^{-3} 的应变加载条件下,UHPLC 的峰值应力有所降低,而其他 3 种加载条件下的 UHPLC 的峰值应力则基本保持一致。这同样是由于在 1.5×10^{-3} 的应变加载条件下,UHPLC 第四次加载的累积应变已经达到 2.6×10^{-3} ,UHPLC 已进入应变软化段的原因。

表 3 不同循环拉伸加载条件下 UHPLC 的力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of UHPLC under different cyclic tensile loading conditions

| 循环应 变幅度 | 序 号 | 加载刚 度/GPa | 卸载刚 度/GPa | 峰值应 力/MPa | 残余应 变/ 10^{-6} | 累积残余 应变/ 10^{-6} |
|----------------------|--------|--------------|--------------|--------------|---------------------|-----------------------|
| 2.0×10^{-4} | 1 | 20.7 | 19.3 | 3.7 | 53.4 | 53.4 |
| | 2 | 20.0 | 18.1 | 4.1 | 11.1 | 64.6 |
| | 3 | 20.8 | 18.2 | 4.2 | 4.8 | 69.3 |
| | 4 | 20.3 | 18.3 | 4.1 | 3.2 | 72.5 |
| | 5 | 19.9 | 18.3 | 4.2 | 3.7 | 76.2 |
| | 6 | 20.1 | 18.2 | 4.2 | 3.2 | 79.4 |
| | 7 | 20.1 | 18.0 | 4.2 | 2.7 | 82.0 |
| | 8 | 19.8 | 18.0 | 4.2 | 2.7 | 84.7 |
| 5.0×10^{-4} | 1 | 21.1 | 13.5 | 5.3 | 164.3 | 164.3 |
| | 2 | 12.6 | 10.5 | 5.6 | 82.6 | 246.8 |
| | 3 | 11.4 | 10.0 | 5.8 | 41.7 | 288.6 |
| | 4 | 10.5 | 9.7 | 5.8 | 21.7 | 310.3 |
| | 5 | 10.4 | 9.7 | 5.9 | 21.7 | 332.0 |
| | 6 | 10.2 | 9.3 | 5.9 | 6.6 | 338.5 |
| | 7 | 10.1 | 9.3 | 5.8 | 6.3 | 344.8 |
| | 8 | 10.1 | 9.2 | 5.8 | 4.6 | 349.4 |
| 1.0×10^{-3} | 1 | 20.2 | 7.3 | 5.9 | 395.2 | 395.2 |
| | 2 | 9.3 | 6.0 | 6.5 | 174.9 | 570.1 |
| | 3 | 7.2 | 5.7 | 6.7 | 76.8 | 646.9 |
| | 4 | 6.8 | 5.5 | 6.8 | 52.3 | 699.2 |
| | 5 | 6.7 | 5.5 | 6.8 | 37.9 | 737.1 |
| | 6 | 6.6 | 5.4 | 6.8 | 26.6 | 763.6 |
| | 7 | 6.5 | 5.4 | 6.8 | 18.6 | 782.2 |
| | 8 | 6.4 | 5.4 | 6.8 | 15.5 | 797.8 |
| 1.5×10^{-3} | 1 | 20.6 | 6.1 | 6.6 | 668.1 | 668.1 |
| | 2 | 7.9 | 4.9 | 7.2 | 331.1 | 999.2 |
| | 3 | 6.4 | 4.3 | 7.5 | 162.7 | 1 161.9 |
| | 4 | 5.8 | 4.3 | 7.5 | 101.4 | 1 263.3 |
| | 5 | 5.6 | 4.3 | 7.4 | 77.4 | 1 340.7 |
| | 6 | 5.5 | 4.2 | 7.4 | 70.3 | 1 411.0 |
| | 7 | 5.4 | 4.2 | 7.3 | 72.6 | 1 483.6 |
| | 8 | 5.3 | 4.1 | 7.2 | 59.9 | 1 543.5 |

2.3.3 加载刚度和卸载刚度

由图9可见,在 2.0×10^{-4} 的应变加载条件下,UHPLC的加载刚度变化幅度很小,这是由于其加载变形幅度较小,略大于弹性段和应变强化段的转折点(应变为 1.6×10^{-4})。其余3种循环加载条件下UHPLC的加载刚度均有较大的衰减,并且循环加载变形幅度越大,衰减幅度越大。这是由于循环加载变形幅度的增大会导致UHPLC的纤维脱黏长度增大,即参与拉伸变形的有效长度变长,拉伸试件在单位变形条件下的应力水平更低,表现出的拉伸试件刚度变低。

由图10可见,UHPLC在不同循环加载条件下的第一次卸载刚度随加载变形幅度的增大而降低,这同样是因为循环加载变形幅度的增大导致UHPLC纤维脱黏长度增大的原因。综合图9、图10可见,UHPLC的加载刚度和卸载刚度在第三次加载-卸载后逐渐趋于稳定。结合图7可发现,UHPLC的加载刚度和卸载刚度随循环加载次数的变化趋势与残余应变的变化趋势基本一致。这说明UHPLC的加载、卸载刚度与材料的残余应变相关。

3 循环拉伸加载条件下UHPLC的刚度退化机理

为进一步了解UHPLC在循环荷载下的加载刚度退化率与材料残余应变之间的关系,图11绘制了UHPLC的加载刚度退化率($E_{l(n)}/E_{l(1)}$)与前一次循环达到的累积残余应变的关系,退化率越低说明材料刚度退化现象越严重。由图可见,UHPLC的加

载刚度退化率随累积残余应变的增加而降低,其衰减规律符合式(1)的幂函数,拟合度为0.99。

$$y = 6.223x^{-0.441} \quad (1)$$

式中 y 为加载刚度的退化率($E_{l(n)}/E_{l(1)}$), x 为累积残余应变。

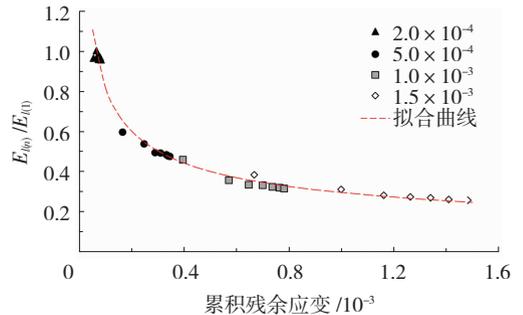


图11 累积残余应变与加载刚度退化率的关系

Fig. 11 Effect of cumulated residual strain on degradation rate of loading stiffness

图12描述了应变强化段的纤维-基体相互作用示意图。由图12可见,UHPLC基体开裂后,开裂处的荷载由两端处于锚固状态的纤维承担。随着外荷载的增加,纤维受到的拉应力大于开裂处纤维-基体界面黏结强度,纤维逐渐脱黏,导致参与变形的纤维有效拉伸长度变大,即UHPLC的不可恢复变形增加,其宏观表现为累积残余应变的增加。纤维有效拉伸长度的提高,降低了拉伸试件在单位变形条件下的拉伸应力,表现出UHPLC刚度变低。综上所述,UHPLC在循环拉伸加载条件下的刚度本质上由纤维的有效拉伸长度决定,并且其纤维有效拉伸长度可由累积残余应变来表征。

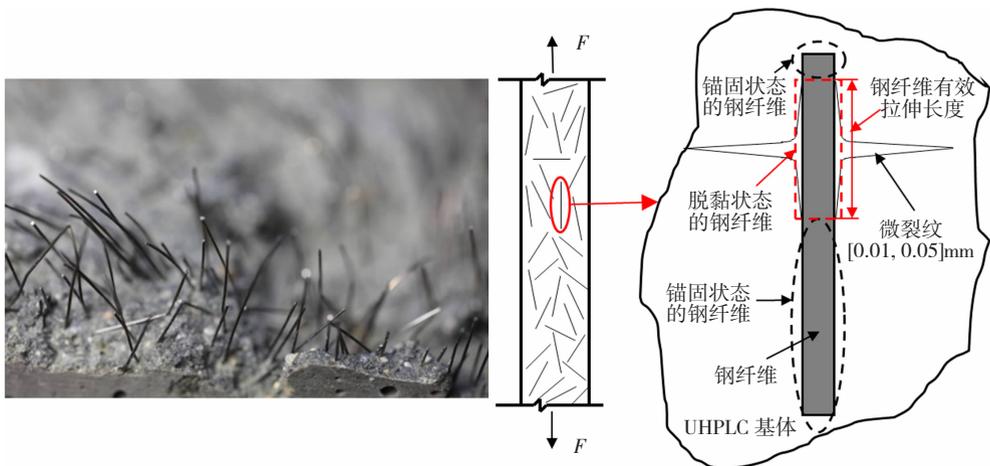


图12 应变强化段的纤维-基体相互作用示意图

Fig. 12 Interaction between fibre and matrix at strain-hardening state

4 结论

1)UHPLC 极限抗拉强度约为 6.9 ~ 7.8 MPa,与弹性极限强度的比值范围是 1.8 ~ 2,具有较强的

应变强化特性。同时其极限拉伸应变约为 $2.4 \times 10^{-3} \sim 2.8 \times 10^{-3}$,在应变强化段的裂纹宽度不可见或小于 0.05 mm,具有较强的变形能力和微裂纹宽度控制能力。

2)不同加载条件的UHPLC的循环拉伸应力-应变曲线的包络线与单调拉伸应力-应变全曲线具有较高的重合度。

3)循环加载曲线的残余应变、加载刚度、卸载刚度均间接反映了桥接裂纹处纤维的黏结和脱黏状态。残余应变越大,说明纤维的脱黏长度越长,会导致UHPLC的加载、卸载刚度降低。

4)对于 2.0×10^{-4} 、 5.0×10^{-4} 、 1.0×10^{-3} 这三种应变加载条件,随着循环次数增多,UHPLC的纤维与基体的继续脱黏现象基本停止,循环加载主要是对已脱黏部分纤维的循环拉伸作用。对于 1.5×10^{-3} 这种应变加载条件,从第四次循环开始,UHPLC已经进入应变软化段,此时其纤维已部分处于拔出状态,因此后续循环的残余应变仍比较高。

5)UHPLC在循环荷载下加载刚度的退化率与累积残余应变具有较高的相关性,两者关系符合幂函数关系,拟合度为0.99。UHPLC的循环拉伸加载刚度本质上由纤维脱黏部分参与受拉的有效长度决定,可由累积残余应变来表征。

参考文献

[1] 王俊颜,闫珠华,耿莉萍.超高性能轻质混凝土的力学性能及微观结构[J].哈尔滨工业大学学报,2019,51(6):18
WANG Junyan, YAN Zhuhua, GENG Liping. The mechanical property and microstructure of ultra-high performance lightweight concrete[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(6): 18. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201808105

[2] 王俊颜,耿莉萍.超高性能轻质混凝土的弯曲性能研究[J].粉煤灰综合利用,2017(5):9
WANG Junyan, GENG Liping. Flexural performance of ultra high performance light-weight concrete [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2017 (5): 9. DOI: 10.3969/j.issn.1005-8249.2017.05.002

[3] YOO D Y, BANITHIA N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review[J]. Cement & Concrete Composites, 2016, 73:267. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2016.08.001

[4] 杲晓龙,王俊颜.超轻质水泥基复合材料基本力学性能[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(12):67
GAO Xiaolong, WANG Junyan. Basic mechanical properties of ultra lightweight cement composite[J]. Journal of Harbin Institute

of Technology, 2018, 50 (12): 67. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201803061

[5] WANG Junyan, GUO Junyuan. Damage investigation of ultra high performance concrete under direct tensile test using acoustic emission techniques[J]. Cement & Concrete Composites, 2018, 88:17. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.01.007

[6] CHARRON J P, DENARIÉ E, BRÜHWILER E. Permeability of ultra high performance fiber reinforced concretes (UHPRFC) under high stresses[J]. Material and Structures, 2007, 40(3):269. DOI: 10.1617/s11527-006-9105-0

[7] 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. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201705148

[8] 王俊颜,郭君渊,肖汝诚,等.高应变强化超高性能混凝土的裂缝控制机理和研究[J].土木工程学报,2017,50(11):10
WANG Junyan, GUO Junyuan, XIAO Rucheng, et al. Study on crack control mechanism of strain-hardening ultra-high performance concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(11):10

[9] BIAN Chen, WANG Junyan. Mechanical and damage mechanisms of reinforced ultra high performance concrete under tensile loading[J]. Construction and Building Materials, 2019, 226: 259. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.162

[10] JUNGWIRTH J, MUTTONI A. Structural behavior of tension members in UHPC[C]//Proceedings of International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel: International Symposium on Ultra High Performance Concrete, 2004: 533

[11] MAKITA T, BRÜHWILER E. Tensile fatigue behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete combined with steel rebars (R-UHPRFC) [J]. International Journal of Fatigue, 2014, 59: 145. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.09.004

[12] MCS-EPFL. Ultra-high performance fibre reinforced cement-based composites (UHPRFC): Construction material, dimensioning and application: SIA 2052 [S]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 2016:14

[13] PARK S H, KIM D J, RYU G S, et al. Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete [J]. Cement & Concrete Composites, 2012, 34(2):176. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2011.09.009

(编辑 赵丽莹)