

轻质超高性能混凝土表面粗糙化特性及组合式构件层间抗剪性能

付 军^{1,2}, 遆彦池¹, 秦宁辰¹, 丁庆军², 李百川¹

(1. 武汉理工大学, 交通与船海工程学部, 武汉 430063; 2. 武汉理工大学, 硅酸盐科学与先进建材全国重点实验室, 武汉 430063)

摘 要: 轻质超高性能混凝土(LUHPC)表面粗糙化对异质铺装材料层间抗剪性能影响非常关键。如何高效地实现粗糙化表面制备, 并考虑钢纤维影响, 进而定量表征宏-微观纹理特性及粗糙度, 关联异质铺装材料层间抗剪性能仍有待深入研究。通过抛丸打毛工艺实现煤矸石集料轻质 UHPC 的表面粗糙化, 使用 3D 手持激光扫描仪获取试件表面的三维纹理数据; 通过 MATLAB 软件采用高斯滤波的方法对点云数据进行滤波处理, 并重构试件表面的三维形貌图, 利用带通滤波器提取轻质 UHPC 的宏-微观纹理剖面数据, 考虑到钢纤维对试件表面粗糙度的影响, 基于铺砂法测量原理提出改进评价指标-扩展构造深度 ETD; 将宏观纹理参数轮廓断面算数平均偏差 R_a 、轮廓断面均方根偏差 R_q 、增强平均构造深度 EMTD、增强平均断面深度 EMPD 和微观纹理参数 C_{MT} 、均方根微观参数 RMS 与 ETD 的相关性进行分析, 结合轻质 UHPC-应力吸收层-高黏高弹改性沥青(SMA)复合试件的抗剪强度, 将 25 °C 和 -10 °C 的抗剪强度与宏-微观指标参数结合, 建立了单指标、多变量指标线性回归方程模型。结果表明: 扩展构造深度 ETD 能够有效表征轻质 UHPC 表面粗糙度; 对比相同温度、不同粗糙度下的抗剪性能, 轻质 UHPC 表面粗糙度越大, ETD 越大, 其抗剪性能也越好, 剪切强度 25 °C 达到 0.95 MPa, -10 °C 达到 5.24 MPa。轻质 UHPC 推荐的扩展构造深度 ETD 为 0.85~1.15 mm。

关键词: 轻质超高性能混凝土; 扩展构造深度; 三维激光扫描; 宏-微观纹理; 表面粗糙度; 抗剪强度

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)08-2273-14

网络出版时间: 2025-01-10



轻质超高性能混凝土(LUHPC), 具有轻质、高强度和低收缩的特点^[1-2], 是重载交通下钢桥面刚性铺装下面层材料的适宜选项。当前钢桥面铺装通常为双层异质铺装, 下面层材料的表面粗糙程度是影响层间抗剪、抗拉拔、防止早期滑移和脱层蛻皮的关键因素之一^[3]。

当前水泥基材料表面粗糙化工艺主要包括抛丸、拉毛及嵌石处理。万晨光等^[4]对混凝土桥面铺装层在拉毛、刻槽、铣刨、植石 4 种工艺下的层间接触系数进行了分析, 得出植石工艺下效果更为显著。抛丸打毛工艺广泛用于路面铺装层、钢铁等材料的表面清理, 通过调节钢丸的抛射速度去除试件表面的杂质, 从而达到所需的粗糙程度, 并增强不同材料间的结合强度^[5]。研究表明, 经过抛丸打毛处理后, 铺装层各面层间的接触面积增加, 层间黏结能力得到显著提升^[6]。杨清林等^[7]研究指出, 抛丸效果受丸料的硬度、密度、粒径规格以及抛丸次数和速度等因素影响, 适当的丸料可以提高处理效率,

同时抛丸机作用时间越长, 其表面粗糙度越稳定。Zeng 等^[8]分析发现, 抛丸程度的增加可以有效提升水泥混凝土路面摩擦系数, 但在选择抛丸程度时应考虑处理后的构造深度。需要指出的是, 由于轻质 UHPC 中的煤矸石轻质多孔集料表面硬度相对较低, 因此抛丸打毛工艺在该材料上的应用具有显著的优势, 相较于其他表面处理方法, 抛丸打毛不仅在机械化效率上表现突出, 且在表面均匀化程度上具有明显优势, 这使其成为表面粗糙化的一个重要工程化选项。然而, 现有研究对轻质 UHPC 表面粗糙化工艺参数、粗糙度表征及宏微观纹理特性的了解仍不够全面, 有待进一步深入探讨。

铺面材料表面宏-微观纹理特性会显著地影响异质材料层间抗剪性能。当前材料表面纹理获取方法有: 数字图像法、激光法、三维测量法。数字图像法主要是通过采集铺装层表面的二维图像进行分析, 激光法直接测量以获取高度数据, 三维测量法能够对铺装层表面进行全面的评估。Jin 等^[9]通过

收稿日期: 2024-08-29。 修订日期: 2024-10-18。

基金项目: 国家自然科学基金(U21A20149)。

第一作者: 付 军(1972—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2024-08-29. Revised date: 2024-10-18.

First author: FU Jun (1972—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: fjgrant@whut.edu.cn

激光扫描对路面表面进行三维重构,采用虚拟砂补试验计算出平均纹理深度(eMTD)。Weng 等^[10]使用 3D 激光扫描仪获取铺装层表面的信息,并基于图像的多尺度特征对路面纹理深度进行了估算。Dan 等^[11]提出了一种基于二维平均纹理深度的三维平均最大高程算法,通过五面体体积方法估算沥青路面的纹理深度。Chen 等^[12]开发了自动近距离摄影测试系统(ACRP 系统),结合 MATLAB 和 Python 重建了沥青路面表面纹理的三维模型,并计算了相关纹理参数,结果表明该方法与 ZGScan 手持式工业激光扫描仪的精度相当。Gao 等^[13]通过人工铺砂法和 CT 扫描法测定沥青路面的纹理深度,分析了其纹理深度特征,并根据 CT 扫描结果修正了铺砂法结果,提出了纹理修正值与孔隙率的数学模型。

现行国家标准《产品几何技术规范(GPS)表面结构轮廓法表面粗糙度参数及其数值》(GB/T 1031—2009)通常采用算术平均粗糙度 R_a 、平均粗糙度深度 R_z 和最大粗糙度高度 R_y 来表征试件表面的粗糙度。庞学慧等^[14]对 R_a 、 R_q 和 R_{sk} 等轮廓相关参数进行分析,通过计算指标参数与纵坐标的原点矩之间的关系,得出 R_a 评价普通精度构件表面的粗糙度较合理, R_q 和 R_{sk} 则适用于表面轮廓分布不对称的构件。战友等^[15–16]采用非接触式三维激光扫描技术获取路面的三维纹理,结合宏微观纹理特征对路面摩擦性能进行研究,得出 MPD、IRI 是路表特性的重要评价指标。Adams 等^[17]采用三维轮廓仪对路面的剖面进行测量,提出指标参数平均轮廓深度 MPD 评估碎石表面纹理。Ding 等^[18]利用 LS-40 扫描仪及数字图像处理获取路面纹理数据,并将摆式摩擦仪测得的摩擦值(BPN)与路面纹理表面积进行了相关性分析。樊双蛟等^[19]采用了多种不同的粗糙度指标参数对构件表面的微观物理特性进行描述,得出单一变量指标不能准确反映整个表面的轮廓分布。宏观纹理参数指标中,MPD 用于计算路面的轮廓形貌,微观纹理参数指标主要取决于材料内的骨料性质^[20]。轻质 UHPC 表面抛丸打毛粗糙化后有大量露头钢纤维随机分布,如简单套用普通混凝土或者沥青混凝土粗糙度评价参数,则无法有效评价。

剪切强度反映材料在剪切力作用下的最大应力

极限,是衡量材料抵抗剪切滑动能力的一个重要参数。艾长发等^[21–22]研究发现,随着接触表面粗糙度的增加,层间抗剪能力得以提升,分析在“接触”和“嵌锁”效应双维度下摩阻效应对层间抗剪强度的影响。汪超等^[3]将温度和界面的粗糙度与层间剪切强度建立联系,得出温度对层间抗剪强度的影响较大,温度越高层间抗剪性能越低。严秋荣等^[23]发现温度相同时,对表面进行拉毛处理的抗剪效果优于抛丸处理,粗糙度相同时,温度越高抗剪性能越低,并采用摩擦系数、构造深度及灰度值指标评价表面粗糙度,其中摩擦系数和构造深度对抗剪性能影响较大。对不同粗糙度下的组合试件层间抗剪性能进行分析,有利于探究粗糙度的变化对其抗剪强度的影响。

鉴于此,通过 3D 手持激光扫描仪测量抛丸打毛后的煤矸石集料轻质 UHPC 试件表面数据,对获得的三维纹理数据进行分析,采用高斯滤波方法对线性插值后的数据进行降噪处理,重构试件三维形貌图,提出一种考虑露头钢纤维的改进型评价指标,进一步分析宏-微观纹理参数指标与改进型评价指标间的相关性,制备了轻质 UHPC-高黏高弹黏结剂-SMA 试件,探求不同抛丸程度、不同温度情况下试件的剪切强度,并对宏-微观纹理参数指标与剪切强度的模型进行线性回归分析。

1 实验

1.1 制备

轻质 UHPC 选取水泥、粉煤灰微珠和硅灰作为胶凝材料,固废煤矸石作为细集料,推荐配合比见表 1。粉煤灰微珠有良好的球形度,在轻质 UHPC 的制备中起到微填充的效果。硅灰在水化早期可以表现出较好的火山灰效应,优化轻质 UHPC 的内部微结构。煤矸石集料主要化学成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 ,堆积密度 1090 kg/m^3 、表观密度 2190 kg/m^3 、吸水率 11%、筒压强度为 15.5 MPa。其轻质、多孔的特点可以降低 UHPC 自重、减小 UHPC 的早期收缩,提升 UHPC 的力学性能。煤矸石内部孔隙较多,能够起到内养护作用,改善 UHPC 的水化进程,有效减少 UHPC 内部孔径和孔隙率,使得内部结构更加密实。

表 1 LUHPC 推荐配合比
Table 1 Material mix proportion

							kg/m ³
Cement	Microsphere	Silica fume	Coal gangue	Steel fiber	Expansion agent	Water	Water reducer
710	150	180	903	132	75	187	23

轻质 UHPC 的制备流程如图 1 所示。首先, 提前将煤矸石集料浸泡并晾至表面干燥, 然后将胶凝材料和集料进行干拌; 接着向得到的拌合物中加入外加剂和水进行拌合, 搅拌均匀后再加入钢纤维、

剩余的外加剂和水, 继续搅拌直至钢纤维均匀分散。将混合物倒入规格为 200 mm×200 mm×5 mm 的模具中, 表面覆盖一层塑料保鲜膜, 置于养护室中直至 28 d 养护结束, 其基本性能如表 2 所示。

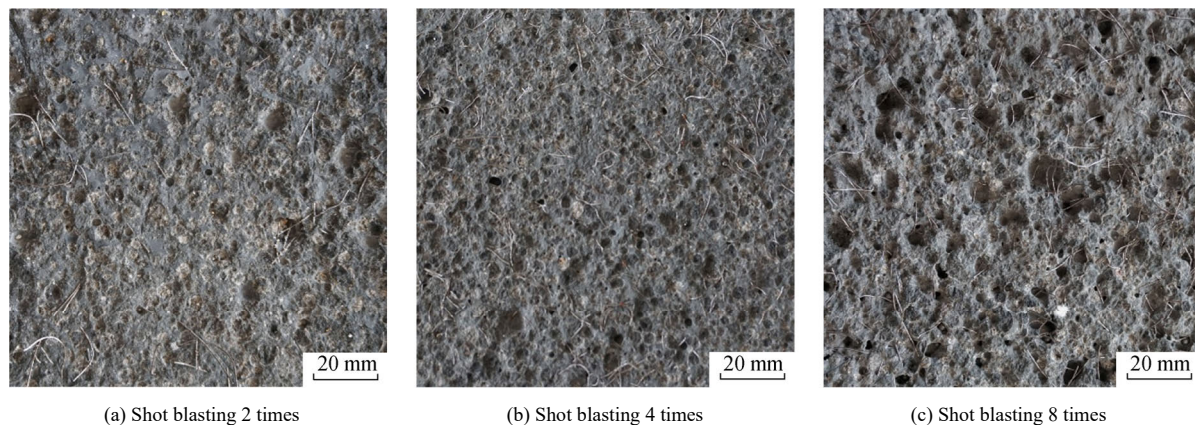


图 1 抛丸后试件表面状况

Fig. 1 Surface condition of specimen after shot blasting

表 2 固废煤矸石集料 LUHPC 基本性能

Table 2 Solid waste gangue aggregate LUHPC basic properties

Apparent density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	28 d compressive strength/MPa	28 d flexural strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Flexural toughness index I20	Shrinkage (180 d)
2050	130.5	20.3	39.8	21.5	$\leq 300\times 10^{-6}$

1.2 3D 激光扫描获取表面纹理

3D 激光扫描仪具备自动配准标志点相对位置的功能, 适用于小型试件的高效便捷测量。使用者仅需手持设备对目标试件表面进行扫描, 即可获取基于扫描数据的 XYZ 三维坐标, 进而进行试件表面的精确三维建模和快速数据分析处理。

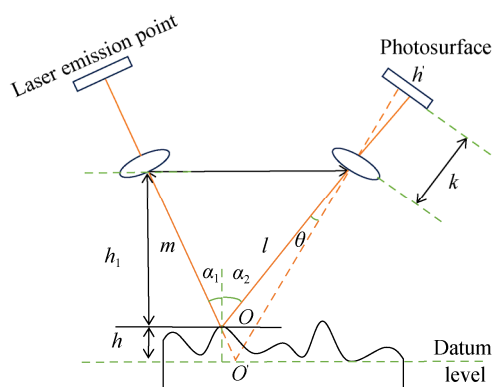


图 2 三维激光扫描仪三角测距原理图

Fig. 2 Triangulation principle diagram of three-dimensional laser scanner

激光扫描仪依据测量原理主要分为相位式、脉冲式、三角测距式、脉冲-相位结合式 4 种类型^[24]。

选用 ZGScan 型手持扫描仪, 基于三角测距法原理对目标试件进行测量。三维激光扫描仪的三角测距原理图中, 激光器、视觉传感器 CCD 与被测物体形成三角位置关系。光束由激光器发出, 照射在待测物体表面, 与待测物基准面的法线形成夹角 α_1 ; 视觉传感器 CCD 位于法线另一侧, 与待测物基准面成夹角 α_2 , 接收待测物体反射光线。

测点到基准面的垂直高度 h 可按下式计算:

$$h = \frac{l^2 h'}{f(\sqrt{m^2 - h_1^2} + \sqrt{l^2 - h_1^2})} \quad (1)$$

式中: h 为测点到基准面垂直高度(mm); h_1 为激光发射点透镜中心到测点的垂直高度(mm); h' 为在 CCD 感光面的投影长度(mm); l 为测点到 CCD 感光面透镜之间的直线距离(mm); f 为相机的焦距(mm); m 为发射透镜与测点之间的距离(mm)。

制备的煤矸石固废集料轻质 UHPC, 经抛丸打毛后钢纤维大量暴露于表面, 长度为 3~6 mm, 且轻质 UHPC 表面打毛后负纹理微孔隙居多, 现有 3D 扫描仪器测试技术及配套的数据分析已不完全适用。结合材料表面特点及试验要求多方面考虑, 最终选择 ZGScan 717 型手持式 3D 激光扫描仪, 扫描精度为 0.03 mm, 体积精度(0.02±0.06) mm/m。

实际扫描过程如图 3 所示。首先通过校板进行自动校准以确保测量精度；随后在试件周围贴定位标点，对试件表面进行扫描，完成扫描后直接导出试件的点云数据，为后续分析试件的三维纹理做准备。

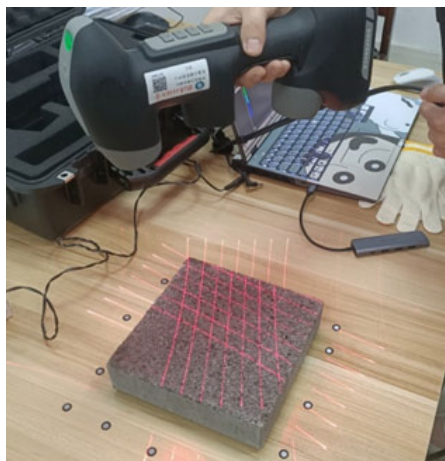


图 3 3D 激光扫描仪实际操作图

Fig. 3 Actual operation diagram of 3D laser scanner

2 轻质 UHPC 表面纹理特征分析

2.1 轻质 UHPC 表面三维形貌重构

基于 ZGScan 型手持扫描仪获取的试件表面点云数据，通过 MATLAB 软件进行绘图，以还原试件的表面形貌，为全面分析提供便利。在测量过程中，手持 3D 激光扫描仪的入射光线与试件特定位置的法向量不一致，因此首先进行坐标变换处理测

量数据。通过 MATLAB，调整所定义曲面各点的法向量，确保其相对于 Z 轴的位置一致，从而与 XOY 平面对齐，以获取更准确的测量结果。分析显示，测得的数据在 X 轴方向分布不均匀，可能导致在相同 X 值时无法生成对应的 Y、Z 坐标剖面轮廓图。为呈现更精确的三维重构效果，我们对原始数据进行了线性插值处理。此外，测得的 Z 坐标值需校正为以 X=0、Y=0 为基准点的平面坐标。经过上述坐标变换和校正，建立了抛丸打毛处理后试件的三维纹理图。

采用三角测量法对试件表面进行测量时，激光扫描仪可能接收到相邻表面的激光信号。为减小由于数据缺失、边缘平整度不佳以及操作引起的误差，我们选取轻质 UHPC 试件表面上 4 个 40 mm×40 mm 区域进行数据分析。

在扫描试件表面时，手持 3D 激光扫描仪会受到不规则凹凸面的影响，改变激光的反射路径，从而影响测量精度。轻质 UHPC 试件经抛丸打毛处理后，露出的钢纤维会影响激光的反射、色散和入射角度，进而引起信号噪声。为解决这些误差，消除由噪音或其他因素引起的不规则波动，对原始三维纹理模型进行了滤波处理。

高斯滤波根据像素之间的距离加权平均，呈现的平滑效果由方差控制，能有效平滑图像同时保留细节，去除高频噪声表现出色。因此，选择高斯滤波方法处理原始三维纹理图像数据，裁剪区域滤波处理后的表面纹理三维形貌图如图 4 所示。

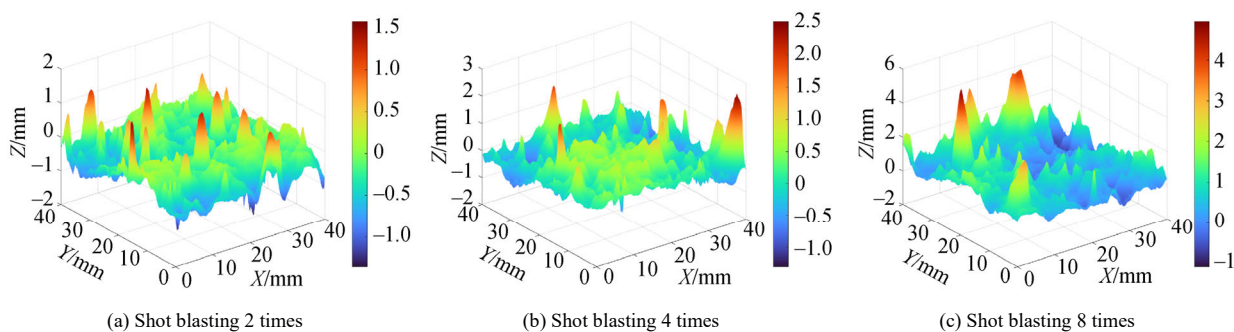


图 4 裁剪区域滤波处理后表面纹理三维形貌图

Fig. 4 Three-dimensional topography of surface texture after filtering processing

由图 4 可见，经过抛丸处理后，三维形貌图中各剖面极差变大，试件表面呈现出明显的凹凸曲面，表面粗糙度有所提高。随着抛丸次数的增加，打磨深度持续加深，试件表面的极差和平均高度逐渐上升。抛丸程度越高，表面峰值的数量逐渐减少。这些峰值由钢纤维的存在引起，随着抛丸次数的增加，

非钢纤维部分的表面深度趋于稳定，峰值数量逐渐减少。

2.2 宏微观纹理数据分离

基于裁剪区域进行滤波处理后的数据，导出间隔为 0.1 mm 的点云网格，从而得到轻质 UHPC 表面的三维点云网格 XYZ 坐标，每个 40 mm×40 mm

的裁剪区域都会得到 16 万个坐标点。每个确定的 X 值都有与之对应的 YZ 剖面数据。对其进行纹理分析, 所采用的间隔是 0.01 mm , 该时域的采样频率是其采样间隔的倒数, 即 100 Hz 。裁剪区域如图 5 所示, 以抛丸 2 遍试件 a 区域滤波后的数据为例, 选取 $X=1\text{ mm}$ 时的 YZ 剖面图, 对原始三维数据进行了时域序列的分析, 横坐标为时间, 纵坐标为信号值, 很好地反映了 3D 手持激光扫描仪下确定的 X 值所对应 YZ 剖面的纹理状况。

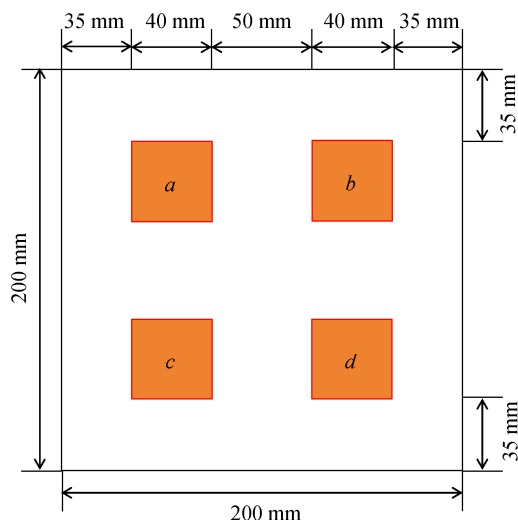


图 5 裁剪区域
Fig. 5 Clipping region

常见傅里叶变换频域滤波方法有低通滤波器、高通滤波器和带通滤波器等。带通滤波器通过设置上限和下限频率, 截取在设定区间内的频率进行滤波提取。频域滤波按照下式进行计算:

$$R_s(f) = H(f)E_s(f) \quad (2)$$

式中: $R_s(f)$ 为输出信号的频域序列; $H(f)$ 为滤波器频率响应函数; $E_s(f)$ 为输入信号的频域序列。

材料科学中, 宏观特征是外形、成分、结构、状态等肉眼可见的特征, 微观特征则是材料的晶体结构、晶界、位错等需要借助放大或显微设备才能观察到的特征。在本工作中, 宏观与微观仍然是根据尺度来划分的, 但由于铺装层中侧重关注铺装层表面的粗糙程度、层间的抗剪性能等指标, 对材料的晶格排列并没有很高的要求, 因此与材料科学中详细定义有所不同。

经抛丸打毛的轻质 UHPC 波长是剖面内周期性分布的最小距离, 世界道路协会根据材料断面轮廓线的波长进行划分^[25], 规定集料的微观纹理波长范围为 $0.05\sim 0.50\text{ mm}$, 宏观纹理波长范围为 $0.5\sim$

50.0 mm 。根据激光扫描获得的数据, 取 x 为定值下的剖面图, 利用 MATLAB 软件对剖面峰值进行标定, 分析总剖面个数的 20% 测定宏观纹理和微观纹理的波长。经测定及分析得出本材料的微观纹理波长为 $0.05\sim 0.50\text{ mm}$, 频域内截取频率为 $2\sim 20\text{ Hz}$, 宏观纹理波长为 $0.5\sim 20.0\text{ mm}$, 频域内截取频率为 $0.05\sim 2.00\text{ Hz}$ 。

将滤波后的剪切区域进行快速 Fourier 变换和 Fourier 逆变换方法, 将时域转换成频域再将频域转换成时域, 通过设置带通滤波器对其宏观和微观纹理数据进行提取, 以 $X=1\text{ mm}$ 时部分剖面的宏微观纹理高度数据为例, 如表 3。

表 3 $X=1\text{ mm}$ 时部分剖面的宏微观纹理高度
Table 3 Macro and micro texture height of $X=1\text{ mm}$ section

Y axis coordinates/mm	Macro-texture height Z_1/mm	Micro-texture height Z_2/mm
1.00	-0.079 4	-0.019 4
2.00	-0.141 2	-0.006 3
3.00	-0.162 5	-0.000 3
4.00	-0.213 2	-0.005 7
5.00	-0.208 2	-0.002 6
6.00	-0.028 4	-0.001 6
7.00	-0.117 3	-0.000 9
8.00	-0.058 7	-0.027 5
9.00	-0.021 1	-0.005 4
10.00	0.115 5	0.007 9

分离后的宏-微观纹理剖面及剖面轮廓线如图 6 所示, 可知微观纹理剖面高度整体低于宏观纹理的剖面高度, 宏观纹理和微观纹理的高度小于整体剖面的轮廓线高度。

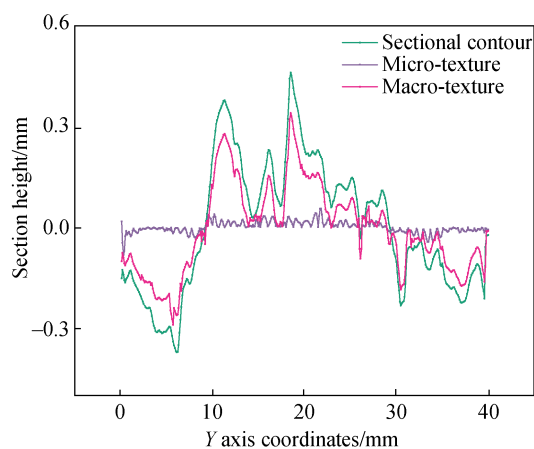


图 6 宏微观纹理和剖面在 $X=1\text{ mm}$ 时对应的轮廓线
Fig. 6 Corresponding contour lines of macro and micro textures and profiles at $X=1\text{ mm}$

3 扩展构造深度评价指标

3.1 评价指标提出与分析

轻质 UHPC 作为钢桥面铺装下面层材料, 经过抛丸打毛工艺后, 上表面的粗糙化对于提高层间黏结性能起着很大的作用, 随着抛丸打毛程度的不同, 其呈现的纹理构造也随之发生变化。

采用摆式摩擦仪法测定摩擦系数时, 根据摆锤自水平位置落下后在试件表面所受的摩擦力所做的功等于摆锤摆动 1 次的高度位能, 测量过程中的高度差被定义为摆值 BPN。摆值的大小与试件表面的构造直接相关, 表面粗糙度越大, 测得的摆值也相应增加。经抛丸打毛处理后, 钢纤维露出的高度远大于非钢纤维部分的构造深度。采用摆式摩擦仪测量 BPN 时, 表面翘起的钢纤维使得摆锤能够直接停留在试件表面上, 表明钢纤维对于试件表面的粗糙性能有增强作用。

构造深度 TD 通过铺砂法测取, 传统铺砂法采用粒径为 0.15~0.30 mm 的细砂, 从试件中心倒入, 沿着四周均匀铺摊成圆形, TD^[26]按照下式进行计算:

$$TD = \frac{V}{S} = \frac{V}{\pi d^2} = \frac{4V}{\pi d^2} \quad (3)$$

式中: TD 为表面的构造深度, mm; V 为量筒中铺砂所用的体积, mm³; S 为铺砂面积, mm²; d 为测量的铺砂直径, mm。

传统的手工铺砂法测量中, 细砂不能完全覆盖钢纤维, 根据等体积原理, 考虑将试件表面分为钢纤维未露出和露出 2 部分来考虑。对于抛丸打毛后钢纤维未露出的试件表面部分, 采用手工铺砂法测量其构造深度。

基于三维形貌重构之后的点云数据, 根据手工铺砂测得的数据进行换算, 通过 MATLAB 软件设定基准面, 计算基准面与三维形貌图所围成体积, 按照下式进行换算:

$$V_1 = \frac{4V}{\pi d^2} S_1 \quad (4)$$

式中: V_1 为所求三维形貌与基准面围成的体积 (mm³); S_1 为裁剪区域的面积 (mm²)。

通过裁剪区域为 40 mm×40 mm 的铺砂法测量, 得出单位面积下的铺砂体积, 并将其与基准面下围成的体积进行对比, 从而推导出理论体积与计算体积相等的平面高度, 如图 7 所示。对 9 组试件进行 3 次测量, 详见表 4, 可得抛丸 2 遍的构造深度均值为 0.37 mm, 抛丸 4 遍的构造深度均值为 0.60 mm,

抛丸 8 遍的构造深度均值为 0.80 mm。

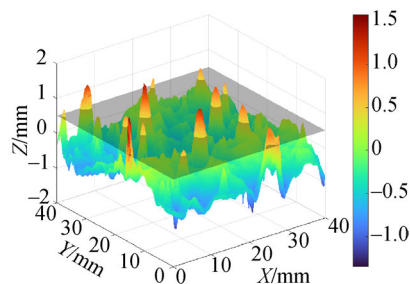


图 7 基准面与三维纹理所围体积图

Fig. 7 Volume map surrounded by datum plane and three-dimensional texture

表 4 未考虑钢纤维影响的试件抛丸后构造深度 (mm)
Table 4 Structural depth of specimen after shot blasting without steel fiber (mm)

Test piece	Clipping region	First measurement	Second measurement	Third measurement	Mean value
L-1-1	a	0.47	0.33	0.32	0.38
	b	0.45	0.31	0.37	
	c	0.41	0.38	0.28	
	d	0.49	0.35	0.42	
L-1-2	a	0.44	0.42	0.28	0.37
	b	0.31	0.35	0.37	
	c	0.48	0.33	0.33	
	d	0.37	0.41	0.32	
L-1-3	a	0.27	0.42	0.42	0.37
	b	0.39	0.37	0.23	
	c	0.33	0.33	0.37	
	d	0.46	0.48	0.36	
L-2-1	a	0.57	0.71	0.51	0.61
	b	0.53	0.68	0.53	
	c	0.56	0.65	0.66	
	d	0.59	0.63	0.71	
L-2-2	a	0.62	0.61	0.53	0.60
	b	0.52	0.67	0.58	
	c	0.50	0.66	0.61	
	d	0.63	0.72	0.57	
L-2-3	a	0.66	0.52	0.73	0.59
	b	0.52	0.57	0.62	
	c	0.47	0.61	0.58	
	d	0.62	0.69	0.48	
L-3-1	a	0.83	0.77	0.81	0.81
	b	0.87	0.79	0.77	
	c	0.85	0.76	0.73	
	d	0.86	0.81	0.86	
L-3-2	a	0.73	0.88	0.77	0.78
	b	0.81	0.73	0.69	
	c	0.85	0.82	0.76	
	d	0.75	0.79	0.83	
L-3-3	a	0.91	0.82	0.87	0.82
	b	0.83	0.74	0.67	
	c	0.93	0.80	0.84	
	d	0.72	0.88	0.79	

受钢纤维影响的部分，通过概率统计找出中位数的方法，得到钢纤维影响下的构造深度。最后，综合考虑未受钢纤维影响下的构造深度和受到钢纤维分布影响下的构造深度，为了更好地反映钢纤维对材料表面粗糙度的影响，提出考虑钢纤维影响下的扩展构造深度(ETD)，按照下式进行计算：

$$ETD=h+G \tag{5}$$

式中： h 为三维曲面形貌与平面围成体积 V_1 对应的

高度； G 为钢纤维分布影响下的中位数值；根据等体积原理获得高度 h ，在此基础上分析表面钢纤维超出高度 h 的情况，取这些高度值的中位数 G 。

3.2 实例分析与对比

基于抛丸打毛后试件表面的点云数据，以试件 L-2-1 的一个裁剪区域为例(见图 8)，统计其表面的高程数据，可知数据符合正态分布规律，超出平面 h 高度的高程数据，如表 4 所示，其中位数即为 G 。

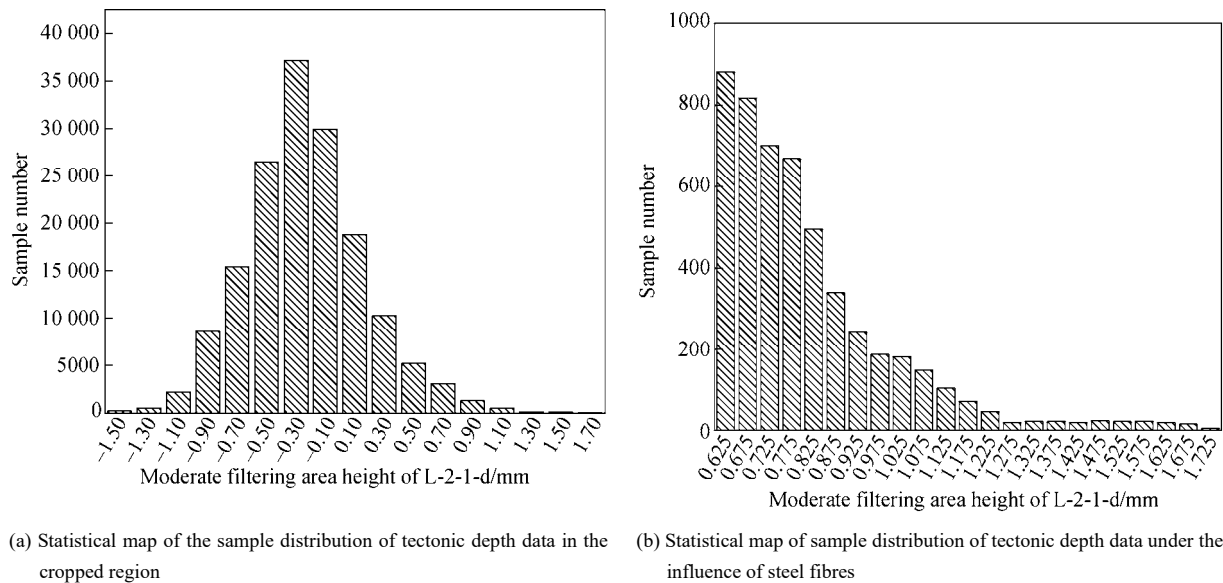


图 8 L-2-1 试件一个裁剪区域内高度样本分布统计图
Fig. 8 Statistical distribution of height samples in a cutting area of L-2-1 specimen

表 5 钢纤维影响下的评价指标
Table 5 Evaluation index under influence of steel fiber

Shot blasting degree	Specimen number	The structural depth of steel fiber is not considered/mm	ETD/mm	Increased percentage/%	Average increased percentage/%
Shot blasting 2 times	L-1-1	0.38	0.656 4	72.74	75.66
	L-1-2	0.37	0.618 3	67.11	
	L-1-3	0.37	0.692 4	87.14	
Shot blasting 4 times	L-2-1	0.61	0.735 0	20.49	24.22
	L-2-2	0.60	0.715 9	19.32	
	L-2-3	0.59	0.783 9	32.86	
Shot blasting 8 times	L-3-1	0.81	1.119 6	38.22	34.44
	L-3-2	0.78	1.010 4	29.54	
	L-3-3	0.82	1.111 7	35.57	

ETD is extended texture depth.

由表 5 可知，通过计算得到的轻质 UHPC 表面的扩展构造深度 ETD：抛丸 8 遍>抛丸 4 遍>抛丸 2 遍，说明试件表面抛丸打毛程度越深，受钢纤维影响越大，粗糙度也越大。综合表 4 及表 5 可知，考虑钢纤维时，扩展构造深度 ETD 相较于未考虑钢纤维时的构造深度 TD，在抛丸 2 遍、4 遍、8 遍处

理时，分别增加了 76%、24%、34%。
表征宏观纹理粗糙度的参数有轮廓断面算数平均偏差 R_a 、轮廓断面均方根偏差 R_q 、平均构造深度 MTD、平均断面深度 MPD 等。考虑到钢纤维的影响，将平均构造深度 MTD 命名为增强平均构造深度(EMTD)，平均断面深度 MPD 命名为增强平均断

面深度(EMPD)。

由于钢纤维高度会影响试件表面形貌数据的最大高度, 为了更全面地考虑试件表面的高度变化, 通过提取所在剖面高度的最大值, 然后作差, 取各个剖面的结果平均值, 计算公式如下:

$$\text{EMTD} = \frac{1}{A \times B} \sum_{i=1}^A \sum_{j=1}^B [Z_h(x_i, y_j) - Z(x_i, y_j)] \quad (6)$$

式中: $Z_h(x, y)$ 为所在剖面的高度最大值。

为了更全面的表征剖面的形貌特征, 考虑整体剖面的高度均值及局部的极大值, 将裁剪区域内的剖面平均分为两部分, 取每个部分内的最大高程并计算平均值, 再减去剖面的高度均值, 即为该剖面的平均断面深度, 计算公式如下:

$$\text{EMPD} = \frac{\max(z_1) + \max(z_2)}{2} - z_0 \quad (7)$$

式中: $\max(z_1)$ 为第 1 部分的最大高度值; $\max(z_2)$ 为第 2 部分的最大高度值; z_0 为该剖面整体高度的均值。

表征微观纹理粗糙度的参数有微观纹理系数 C_{MT} 和均方根微观参数 RMS。为了反映微观纹理中的峰谷比, 即水平间距对粗糙度的影响, 基于平均断面深度 MPD 原理提出 C_{MT} ^[27], 计算公式如下:

$$C_{MT} = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta z_i|}{\Delta x} \quad (8)$$

式中: C_{MT} 为微观纹理系数; Δz 为剖面内相邻 2 点的高度差; Δx 为剖面内相邻两点的水平间距; n 为该剖面采样点数。固定剖面内的水平间距, 随着相邻 2 点的高度差增加, C_{MT} 也相应增大, 因此 C_{MT} 越大, 表示这导致试件剖面上的峰值更加尖锐, 试件表面粗糙度越高。

微观均方根参数可以全面反映试件表面的粗糙度, 描述试件表面微观结构的变化, 计算公式如下:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (9)$$

式中: z_i 为剖面的高度值。

由表 6 可知, 随着抛丸处理的遍数增加, 宏观纹理各指标参数的平均值呈现整体上升的趋势。在抛丸处理进行 4 遍与 8 遍之间, 各参数指标的增长比例显著高于进行 2 遍与 4 遍之间的情况。具体而言, R_a 和 C_{MT} 在进行 2 遍和 4 遍抛丸处理时的变化规律不太明显, 而在不同抛丸遍数下, EMTD 与 EMPD 的增长率约为 30%, 且 EMTD 的平均值大致是 EMPD 的 2 倍。

基于 3D 手持激光扫描仪所获得的试件表面纹理数据, 计算出每个试件的宏观纹理指标 R_a 、 R_q 、EMTD、EMPD 及微观纹理系数 C_{MT} 、RMS, 将以上指标与前文提出的新型评价指标—扩展构造深度 ETD 建立相关性分析。

表 6 不同抛丸程度下的宏-微观纹理粗糙度指标参数值

Table 6 Macro-micro roughness index parameter values under different shot blasting degrees

Mean value/mm	R_a	R_q	EMPD	EMTD	C_{MT}	RMS
L-1-1	0.605	0.412	0.471 2	0.784 6	0.132 0	0.031 7
L-1-2	0.596	0.396	0.350 4	0.743 6	0.130 5	0.027 5
L-1-3	0.608	0.400	0.388 4	0.750 3	0.139 6	0.032 2
L-2-1	0.589	0.525	0.508 8	1.086 2	0.129 6	0.041 2
L-2-2	0.669	0.508	0.555 7	0.900 6	0.127 1	0.040 3
L-2-3	0.643	0.509	0.487 2	0.955 8	0.131 1	0.042 2
L-3-1	0.811	0.810	0.648 1	1.430 1	0.187 0	0.056 6
L-3-2	0.796	0.806	0.631 2	1.339 2	0.160 8	0.051 7
L-3-3	0.823	0.839	0.721 4	1.264 3	0.171 6	0.053 9

R_a is arithmetic mean deviation. R_q is root mean square deviation. EMPD is enhancive mean profile depth. EMTD is enhancive mean texture depth. RMS is root mean square.

将不同抛丸程度下的试件宏观参数和扩展构造深度进行均值统计, 如下图 9 所示, 为 ETD 与 R_q 、 R_a 、EMPD、EMTD 的单变量线性回归关系图。线性回归分析如表 7 所示, 结果表明 R_q 、 R_a 、EMPD、EMTD 均与 ETD 成正相关, R^2 均大

于 0.8, 其中 ETD 与 R_q 、 R_a 、EMPD 的相关性 R^2 均大于 0.85, 具有较好的相关性, ETD 与 EMTD 的相关性 R^2 介于 0.60 与 0.85 之间, 相关性一般, 宏观参数中 ETD 与 R_q 的相关性最好, R^2 为 0.961。

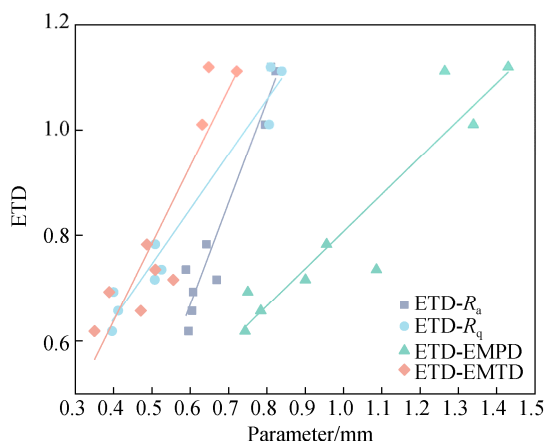


图 9 宏观纹理参数指标与 ETD 相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis between macroscopic texture parameters and ETD

表 7 宏观纹理参数指标与 ETD 相关性分析拟合方程及 R^2
 Table 7 Results of correlation analysis between macro texture parameters and ETD, fitting equation and R^2

Parameter	Fitting equation	R^2
ETD- R_a	$y=1.927x-0.488$	0.931
ETD- R_q	$y=1.040x+0.225$	0.961
ETD-EMPD	$y=0.705x+0.102$	0.881
ETD-EMTD	$y=1.466x+0.051$	0.818

将 ETD 分别与微观纹理参数微观纹理系数 C_{MT} 和均方根参数 RMS 进行单变量线性回归分析, 拟合结果如图 10 所示, 由表 8 可知, ETD 与 C_{MT} 、RMS 相关性一般, R^2 均介于 0.60 到 0.85 之间。

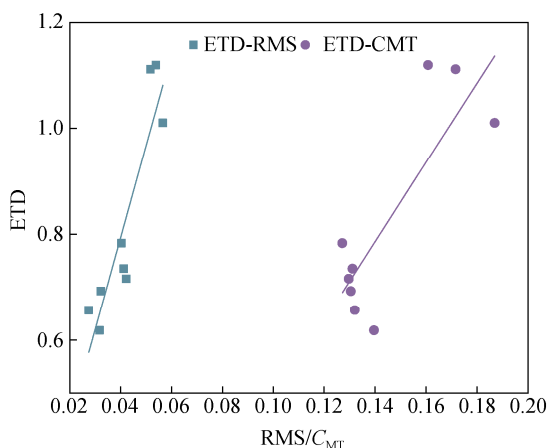


图 10 微观纹理参数指标与 ETD 相关性分析

Fig. 10 Correlation analysis between micro texture parameters and ETD

在表 8 所呈现的数据中, 可以观察到 ETD 与 RMS 之间展现出了良好的正相关性, 其相关系数高达 0.828。随着抛丸遍数的增加, 剖面的高度由于钢丸冲击次数的增加而普遍增大, 相应地, RMS 值

表 8 微观纹理参数指标与 ETD 相关性分析拟合方程及 R^2
 Table 8 Results of correlation analysis between micro texture parameters and ETD, fitting equation and R^2

Parameter	Fitting equation	R^2
ETD-RMS	$y=17.337x+0.128$	0.828
ETD- C_{MT}	$y=7.472x-0.260$	0.690

亦随之上升。相较之下, ETD 与 C_{MT} 的相关性则显得较弱, 相关系数仅为 0.690。 C_{MT} 主要由试件表面的峰峰值决定, 这一参数受钢纤维的高度以及钢丸的冲击程度影响较大。当抛丸处理次数增加时, 试件表面峰值的数量及其构造深度的平均值会发生显著变化, 然而峰峰值的变化却相对较小。因此, C_{MT} 随着 ETD 的变化并不显著, 其变化主要源于试件表面钢纤维分布的改变。因此, 相较于 ETD- C_{MT} , ETD-RMS 相关性较好, 更适用于预测分析。这种相关性强的特性有助于更准确地预测和评估材料表面的处理效果, 从而指导生产工艺的优化。

为了更好表达 ETD 与宏观参数与微观参数间的相关性, 进行多指标线性回归分析, ETD 与 R_a 、 R_q 、EMTD、EMPD 进行线性回归分析, 相关性 R^2 为 0.970, 关系式如下所示:

$$\text{ETD} = 0.112R_a + 1.271R_q - 0.196\text{EMTD} - 0.037\text{EMPD} + 0.238 \quad (10)$$

ETD 与 C_{MT} 、RMS 进行线性回归分析, 相关性 R^2 为 0.994, 关系式如下所示:

$$\text{ETD} = 4.071C_{MT} + 11.226\text{RMS} - 0.235 \quad (11)$$

ETD 与 R_a 、 R_q 、EMTD、EMPD、 C_{MT} 、RMS 进行线性回归分析, 相关性 R^2 为 0.999, 关系式如下所示:

$$\text{ETD} = -0.295R_a + 0.607R_q - 0.241\text{EMTD} - 0.155\text{EMPD} + 11.306\text{RMS} + 3.76C_{MT} - 0.015 \quad (12)$$

分析对比可知, ETD 与宏观纹理粗糙度参数 R_a 、 R_q 、EMTD、EMPD, 微观纹理粗糙度参数 C_{MT} 、RMS 线性拟合相关性均较好, 其中由宏观纹理参数和微观纹理参数共同表征的相关性最好。

综合表 5 扩展构造深度 ETD 和表 6 宏观纹理粗糙度指标参数的变化趋势, 初步提出轻质 UHPC 表面扩展构造深度 ETD 在 0.60~0.70 mm 区间为轻度抛丸影响, 0.70~0.85 mm 区间为中度抛丸影响, 0.85~1.15 mm 区间为重度抛丸影响。

4 不同粗糙度下铺装层层间剪切性能

钢桥面铺装的异质材料层间抗剪性能不足, 是引起层间推移病害的主要原因^[28], 因此, 上下层之

间的良好黏结是确保铺装结构整体性及强度的关键。研究表明,黏结剂的黏结破坏被认为是层间推移的主要原因^[29]。抛丸打毛处理对轻质 UHPC 表面粗糙度的影响及其与黏结剂性能的协同作用至关重要。因此,本研究对表面粗糙度不同的试件在高黏乳化沥青和高黏高弹沥青 SMA 共同作用下进行了剪切实验,以探究轻质 UHPC–应力吸收层–SMA 结构组合的抗剪性能。为研究抛丸打毛工艺对轻质 UHPC 表面不同粗糙度的抗剪性能的影响,选择了两个典型温度–10 ℃和 25 ℃进行剪切试验。旨在揭示不同构造深度对抗剪性能的影响,为提升钢桥面铺装的性能提供理论依据和实践指导。

4.1 轻质 UHPC–SMA 剪切试验

制备了 18 块规格为 90 mm×90 mm×50 mm 的轻质 UHPC 试件,分为 2 组分别进行 25 ℃和–10 ℃的抗剪试验,每组含轻度抛丸、中度抛丸、重度抛丸试件各 3 块。

对养护完成后的轻质 UHPC 试件进行抛丸打毛处理,随后在涂刷 0.45 kg/m² 的高黏乳化沥青,使用沥青拌合机准备沥青碎石,按 360 g/块用量选取粒径为 5~10 mm 的碎石,在烘箱中对高黏高弹改性沥青进行 185 ℃加热 5 h,然后将热拌沥青以 126 g/块铺在试件上并立即撒布沥青碎石。随后,在 185 ℃下加热沥青、石料和矿粉,在 180 ℃将其与纤维混合搅拌 90 s 后,放入模具中,采用轮碾法铺设 5 cm 厚的 SMA,成型完成后放置 24 h。

结合层层间的抗剪试验方法按照《公路钢桥面铺装设计与施工技术规范》(JTG/T 3364-02—2019)^[30]附录 C 进行,使用 WDW 试验机。对轻质 UHPC–应力吸收层–SMA 进行层间剪切试验。试验前将待测试

件分别放入恒温箱中保温 5 h,确保待测试件在进行剪切试验时已达到稳定状态,将保温后的试件放置于模具中,剪切加载速率为 10 mm/min,实验目的是测试试件在剪切破坏时的最大剪切应力值,在破坏位移达到剪应力峰值的 80%时,结束实验。

层间剪切强度公式如下所示:

$$\tau = \frac{F \times \sin \alpha}{A} \quad (13)$$

式中: τ 为层间剪切强度,MPa; F 为剪切破坏的最大压力值,N; α 为剪切角度 45°; A 为试件的接触面积,mm²。

4.2 轻质 UHPC 表面粗糙度对剪切强度的影响

试验过程中观察到,不同抛丸程度下的剪切破坏均发生在粘结层间,轻度抛丸下的破坏发生在轻质 UHPC 上表面和黏结剂的层间破坏,中度和重度抛丸下的破坏发生在 SMA 下表面与碎石间的滑移破坏。

探究轻质 UHPC–SMA 复合试件在 25 ℃和–10 ℃下的剪切试验数据,如表 9 所示,结果显示,在相同温度下,不同扩展构造深度下的轻质 UHPC–高黏高弹沥青–SMA 的复合试件抗剪强度,随着构造深度增大而增大。结合本次的试验现象,不同抛丸程度下的剪切破坏均未出现混合料的破坏,破坏主要发生在黏结剂的不同面层间,进一步说明同一温度下,抛丸打毛程度越高,轻质 UHPC 表面的构造深度越大,扩展构造深度越大,组合试件的抗剪强度也更大。

在扩展构造深度相同的情况下,–10 ℃的抗剪强度是 25 ℃对应抗剪强度的 5~7 倍,其中–10 ℃下最大的剪切应力为重度抛丸下的 5.24 MPa,25 ℃的最大剪切应力为重度抛丸下的 0.95 MPa。

表 9 不同温度及扩展构造深度下的复合试件层间抗剪性能

Table 9 Interlayer shear performance at different temperatures and different extended structural depths

Slight shot blasting ETD/mm	25 ℃ shear strength/MPa	–10 ℃ shear strength/MPa	Moderate shot blasting ETD/mm	25 ℃ shear strength/MPa	–10 ℃ shear strength/MPa	Severe shot blasting ETD/mm	25 ℃ shear strength/MPa	–10 ℃ shear strength/MPa
0.66	0.58	3.5	0.74	0.78	4.81	1.12	0.94	5.15
0.62	0.54	3.34	0.72	0.72	4.63	1.01	0.9	4.9
0.69	0.62	3.57	0.78	0.81	5.04	1.11	0.95	5.24

如图 11 所示,在–10 ℃轻度抛丸的抗剪强度数据中,力–位移曲线显示,在荷载达到试件最大值之前,曲线近似线性,说明在这一阶段卸载后,组合试件能够恢复到原始位置。比较不同抛丸程度下的力–位移曲线发现,增加扩展构造深度能够提升试件的抗剪性能。

图 12 为 25 ℃和–10 ℃下不同抛丸程度的抗剪强度。在 25 ℃时,最大试验力为扩展构造深度 0.95 mm 下的 14 820 N;在–10 ℃时,最大试验力为扩展构造深度 1.11 mm 下的 81 744 N,均发生在重度抛丸打毛的情况下。这表明,随着扩展构造深度的增加,试件的抗剪强度也相应提高,验证了抛丸

打毛程度越高, 扩展构造深度越高, 组合试件的抗剪强度也更大。

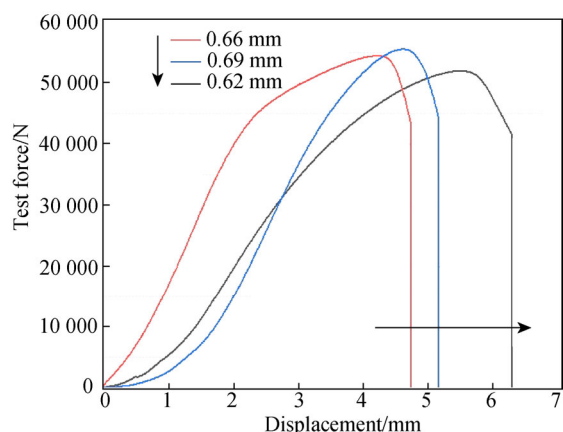


图 11 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时轻度抛丸下对应的抗剪强度

Fig. 11 Corresponding shear strength under mild shot blasting at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

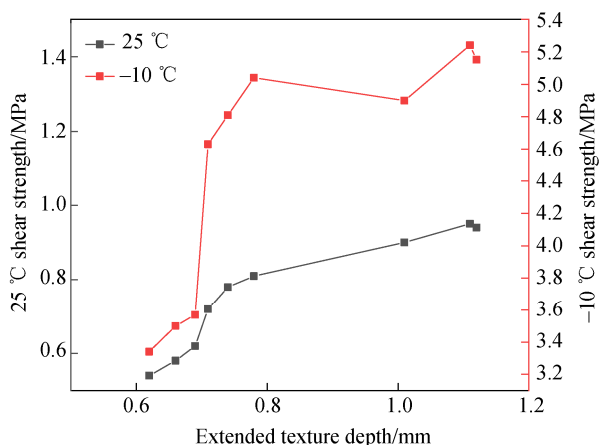


图 12 不同抛丸程度及不同温度时试件的抗剪强度

Fig. 12 Shear strength of specimens at different shot blasting degrees and different temperatures

4.3 轻质 UHPC 表面粗糙度与剪切强度相关性分析

将宏-微观纹理参数指标(ETD、EMPD、EMTD、 R_a 、 R_q 、RMS、 C_{MT})与轻质 UHPC-高黏高弹沥青黏结剂-SMA 组合试件的剪切强度进行相关性分析。由 3.2 节中 ETD 与宏-微观纹理参数指标的单指标及多指标相关性分析可知, 宏观纹理参数和微观纹理参数共同表征 ETD 的相关性最好。

宏-微观纹理参数指标与抗剪强度进行单变量指标相关性分析, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下宏观纹理参数 R_q 、微观纹理参数 RMS 与剪切强度具有较好的相关性, R^2 均大于 0.85, 其余指标与剪切强度相关性较差。为了更好的表征结果, 将宏-微观纹理参数与抗剪强度进行双变量指标相关性分析, 双变量分别选取宏观纹

理参数指标 ETD、EMPD、EMTD、 R_a 、 R_q , 可得 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下 R^2 均大于 0.85, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下 R^2 介于 0.60 到 0.85 之间。双变量为微观纹理参数指标 RMS、 C_{MT} 时, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下相关性较好, R^2 均大于 0.85。并且进行了 3 变量指标、4 变量指标相关性分析, 结果显示, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下变量指标越多, 得到的相关性越好。最后, 建立宏-微观纹理联合参数指标与剪切强度的线性回归方程。

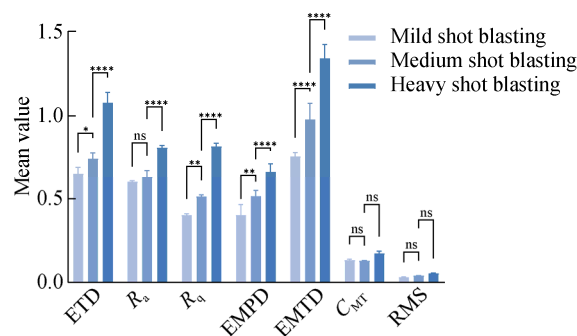
$25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 宏-微观纹理指标与剪切强度模型 R^2 为 0.982, 公式如下:

$$\tau = 2.477\text{ETD} - 1.860R_a + 7.637R_q + 13.102\text{EMTD} - 18.507\text{EMPD} - 24.016C_{MT} + 106.190\text{RMS} - 3.649 \quad (14)$$

$-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 宏-微观纹理指标与剪切强度模型 R^2 为 0.999, 公式如下:

$$\tau = 0.422\text{ETD} - 0.454R_a + 0.988R_q + 1.557\text{EMTD} - 2.184\text{EMPD} - 1.916C_{MT} + 15.794\text{RMS} - 0.548 \quad (15)$$

上述两式可以有效表达轻质 UHPC 表面粗糙度指标参数与其抗剪强度之间的关系。



* in the figure indicates the degree of significant difference, the higher the number of * the more significant the difference, ns indicates that the difference is not significant ($P > 0.05$).

图 13 宏-微观纹理指标随抛丸程度变化显著性分析

Fig. 13 Significance analysis of macro-micro texture index changing with shot blasting degree

由图 13 宏-微观纹理指标随抛丸程度变化显著性分析可见, 随着抛丸程度的增大, ETD、 R_q 、EMTD、EMPD 变化显著, 而 C_{MT} 、RMS 变化不显著, C_{MT} 主要衡量试件表面的峰峰值, 抛丸次数的增加并不会对该指标产生较大影响, RMS 表示算术平方根, 因此仅在变化趋势上相同, 数值的变化并不明显。

EMTD 在 3 组对比中虽然都表现出良好的差异性, 但是在后 2 组比较中, 该指标的上 4 分位数高于平均值较多, 因此作为预测指标, 虽然在预测趋

势上符合,但准确性较差;剩余3个指标中,综合考虑相关性分析结果及预测的准确性,选择组间差异明显且方差较小的 R_q ,与均值变化明显、离散度适中的ETD作为推荐指标。

5 结论

基于抛丸打毛后轻质UHPC试件表面的三维点云数据,通过MATLAB软件进行三维形貌重构,深入分析了试件的宏观纹理参数和微观纹理参数,考虑到钢纤维的影响,提出一种新型评价指标:扩展构造深度ETD,以期构建一个更加精准表征轻质UHPC表面宏-微观纹理特性的体系。

1) 抛丸打毛是轻质UHPC表面粗糙化的有效方法。鉴于钢纤维对抛丸处理后试件表面纹理的影响,采用EMTD和EMPD替代MTD和MPD,以更有效地表征材料的宏观纹理特性;考虑钢纤维影响,扩展构造深度ETD可以更有效地反映轻质UHPC的表面粗糙度。

2) 将扩展构造深度ETD与宏观纹理参数(R_a 、 R_q 、EMTD、EMPD)和微观纹理参数(C_{MT} 、RMS)进行多变量线性回归分析,结果表明ETD与宏-微观纹理参数的相关性较强。根据不同抛丸打毛程度下各指标参数综合考虑,规定轻质UHPC表面扩展构造深度ETD在0.60~0.70 mm区间为轻度抛丸影响,0.70~0.85 mm区间为中度抛丸影响,0.85~1.15 mm区间为重度抛丸影响。

3) 基于轻质UHPC-高黏高弹沥青黏结剂-SMA复合抗剪试验,结果显示在-10℃和25℃,抗剪强度与宏观纹理参数(ETD、EMPD、EMTD、 R_a 、 R_q)以及微观纹理参数(C_{MT} 和RMS)的单变量及多变量的联合线性回归分析表明:相同温度下,扩展构造深度越大,抗剪性能也越好;随着变量数的增加,与抗剪强度的相关性逐渐增强;全变量指标与抗剪强度的相关性最好达到0.999。对比不同抛丸程度下的实验结果,得出轻质UHPC表面的扩展构造深度与抗剪强度呈正相关趋势,因此推荐扩展构造深度ETD为0.85~1.15 mm。

4) 目前只考虑了在S330规格钢丸和固定抛丸作用遍数下的影响效果,未来的研究可以深入探讨不同抛丸处理下的表面损伤情况,以及不同黏结层材料下的层间抗剪效果。

5) 轻质UHPC-高黏高弹沥青黏结剂-SMA在不同温度下发生剪切破坏后,层间连接和劣化的微观结构有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 丁庆军, 胡俊, 刘勇强, 等. 轻质超高性能混凝土的设计与研究[J]. 混凝土, 2019(9): 1–5.
DING Qingjun, HU Jun, LIU Yongqiang, et al. Concrete, 2019(9): 1–5.
- [2] 付军, 徐梦豪, 王哲世, 等. 低收缩LUHPC钢桥面铺装组合基本性能试验研究[J]. 公路交通科技, 2023, 40(8): 89–95.
FU Jun, XU Meng-hao, WANG Zhe-shi, et al. J Highw Transp Res Dev, 2023, 40(8): 89–95.
- [3] 汪超, 朱文娟, 陈浩. 基于室内试验的桥面防水黏结层应用探讨[J]. 上海公路, 2016(2): 69–72+75+12.
WANG Chao, ZHU Wenjuan, CHEN Hao. SH Highw, 2016(2): 69–72+75+12.
- [4] 万晨光, 申爱琴, 薛翠真, 等. 层间接触状态对桥面铺装结构力学响应的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(9): 113–119.
WAN Chenguang, SHEN Aiqin, XUE Cuizhen, et al. J Hunan Univ Nat Sci, 2016, 43(9): 113–119.
- [5] 严秋荣, 孙瑞, 孔令云, 等. 基于现场数据混凝土桥面粗糙度与层间粘结强度相关性分析[J]. 中外公路, 2016, 36(6): 63–65.
Yan Qiurong, Sun Rui, Kong Lingyun, et al. J Chin Forei Highw, 2016, 36(6): 63–65.
- [6] 易量. 基于层间粘结强度的桥面抛丸评价指标研究[J]. 国防交通工程与技术, 2019, 17(4): 10–13.
YI Liang. Traffic Eng Technol Natl Def, 2019, 17(4): 10–13.
- [7] 杨清林, 武炳煊, 刘永安. 钢丸粒度对铸件抛丸清理效率和表面粗糙度的影响[J]. 中国铸造装备与技术, 2002(6): 10–13.
YANG Qinglin, WU Binghuan, LIU Yongan. China Foundry Mach Technol, 2002(6): 10–13.
- [8] ZENG Y, QIU Z, YANG C C, et al. Fatigue experimental study on full-scale large sectional model of orthotropic steel deck of urban rail bridge[J]. Adv Mech Eng, 2023, 15(3): 168781322311552.
- [9] JIN C, XING S N, GE D D, et al. A digital measurement method for mean texture depth of asphalt pavement by virtual sand patch test[J]. Constr Build Mater, 2024, 438: 137308.
- [10] WENG Z H, XIANG H, LIN Y C, et al. Pavement texture depth estimation using image-based multiscale features[J]. Autom Constr, 2022, 141: 104404.
- [11] DAN H C, BAI G W, ZHU Z H, et al. An improved computation method for asphalt pavement texture depth based on multiocular vision 3D reconstruction technology[J]. Constr Build Mater, 2022, 321: 126427.
- [12] CHEN J Y, HUANG X M, ZHENG B S, et al. Real-time identification system of asphalt pavement texture based on the close-range photogrammetry[J]. Constr Build Mater, 2019, 226: 910–919.
- [13] GAO L, LIU M X, WANG Z Q, et al. Correction of texture depth of porous asphalt pavement based on CT scanning technique[J]. Constr Build Mater, 2019, 200: 514–520.
- [14] 庞学慧, 张晓艳, 秦慧斌, 等. 轮廓法表面粗糙度幅度参数分析及其应用研究[J]. 工具技术, 2024, 58(1): 137–142.
PANG Xuehui, ZHANG Xiaoyan, QIN Huibin, et al. Tool Eng, 2024, 58(1): 137–142.
- [15] 战友, 邓强胜, 罗志伟, 等. 基于GBDT的沥青路面抗滑性能感知模型研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(2): 121–132.
ZHAN You, DENG Qiangsheng, LUO Zhiwei, et al. China Civ Eng J, 2023, 56(2): 121–132.
- [16] 战友, 李强, 马啸天, 等. 基于宏微观纹理特征融合的路面摩擦性能预测[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(4): 684–694.
Zhan You, LI Qiang, MA Xiao-tian, et al. Journal of Zhejiang

- University(Engineering Science), 2021, 55(4): 684–694.
- [17] ADAMS J M, RICHARD KIM Y. Mean profile depth analysis of field and laboratory traffic-loaded chip seal surface treatments[J]. *Int J Pavement Eng*, 2014, 15(7): 645–656.
- [18] DING S H, WANG K C P, YANG E H, et al. Influence of effective texture depth on pavement friction based on 3D texture area[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 287: 123002.
- [19] 樊双蛟, 王葱葱, 陈稳旭, 等. 电化学机械复合光整加工不锈钢管件表面局部深沟的粗糙度综合评价[C]. 中国机械工程学会特种加工分会, 2019: 1.
- [20] KOUCHAKI S, ROSHANI H, PROZZI J A, et al. Evaluation of aggregates surface micro-texture using spectral analysis[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 156: 944–955.
- [21] 艾长发, 刘一鸣, 任东亚. 基于压-直剪试验方法的沥青路面层间污染特性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(5): 21–29.
AI Changfa, LIU Yiming, REN Dongya. *J Chang'an Univ Nat Sci Ed*, 2023, 43(5): 21–29.
- [22] 艾长发, 李林育, 黄恒伟, 等. 沥青路面层间界面摩擦效应及其对层间抗剪强度影响机理[J]. 中国公路学报, 2023, 36(12): 47–63.
AI Changfa, LI Linyu, HUANG Hengwei, et al. *China J Highw Transp*, 2023, 36(12): 47–63.
- [23] 严秋荣, 许磊, 代笠, 等. 温度和粗糙度对混凝土桥面铺装层间剪切强度的影响研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(3): 328–334.
YAN Qiurong, XU Lei, DAI Li, et al. *J Xi'an Univ Archit Technol Nat Sci Ed*, 2020, 52(3): 328–334.
- [24] 田柳. 手持激光扫描仪测量精度评定方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2021.
Tian Liu, Research on evaluation method of measurement accuracy of hand-held laser scanner[D]. Wuhan: Wuhan University, 2021.
- [25] 高博. 钢桥面典型铺装方案及其病害和维修方法[J]. 公路, 2012(7): 29–34.
GAO Bo. *Highway*, 2012(7): 29–34.
- [26] 中航生产力促进中心、中国航空综合技术研究所、郑州大学、华中科技大学、西安. GB/Z 24637.1—2009 产品几何技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [27] 李冬梅. 沥青路面抗滑集料微观纹理系数计算及试验: 基于扫描电镜法[J]. 福建工程学院学报, 2009, 7(3): 241–243.
LI Dongmei. *J Fujian Univ Technol*, 2009, 7(3): 241–243.
- [28] 董仕豪, 韩森, 宿金菲, 等. 沥青路面表面纹理三维评价方法及其计算边界条件分析[J/OL]. 中国公路学报, 2024–10–23.
Dong Shiha, Han Sen, Su Jinfei, et al. *China J Highw Transp*, 2024–10–23.
- [29] 张占军, 王虎, 胡长顺, 等. 水泥混凝土桥面沥青铺装及防水层荷载弯曲应力分析[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 37–40.
ZHANG Zhanjun, WANG Hu, HU Changshun, et al. *China J Highw Transp*, 2004, 17(4): 37–40.
- [30] 招商局重庆交通科研设计院有限公司等. JTG/T 3364-02—2019 公路钢桥面铺装设计与施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.

Surface Roughening Characteristics of Lightweight Ultra-High Performance Concrete and Interlayer Shear Performance of Modular Members

FU Jun^{1,2}, TI Yanchi¹, QIN Ningchen¹, DING Qingjun², LI Baichuan¹

(1. School of Transportation & Shipping, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. National Key Laboratory of Ceramics Science and Advanced Building Materials, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Extended Abstract

Introduction Lightweight Ultra High Performance Concrete (LUHPC) exhibits attributes such as reduced weight, high strength, and minimal shrinkage. As a substrate for paving layers, the surface roughness of LUHPC is a critical determinant of interlayer shear resistance, tensile pullout resistance, and the prevention of early slippage and delamination. Notably, the lower surface hardness of gangue porous aggregates contributes significantly to the textural enhancement of LUHPC surfaces. The incorporation of steel fibers not only strengthens the internal bonding within the concrete but also influences the surface texture of LUHPC after roughening treatments. Despite existing research on the textural properties of pavement surfaces, there remains a gap in understanding the preparation of roughened interfaces for efficient application and the quantitative characterization of macro-micro texture characteristics and roughness influenced by steel fibers, which correlates with interlayer shear performance. While existing research has investigated the texture characteristics of pavement surfaces, there remains a critical need for further exploration into the development of roughened interfaces that facilitate effective implementation, a more detailed quantitative characterization of macro-micro texture and roughness, particularly under the influence of steel fibers, is necessary. Such investigations are crucial for establishing a robust correlation with the interlayer shear performance of heterogeneous paving materials. Additionally, Lightweight UHPC-high viscosity high elasticity binder-SMA specimens were fabricated to assess shear strength across different shot blasting intensities and temperatures. Linear regression analyses were conducted to model the relationships between macro-micro texture parameters and shear strength.

Methods The surface roughness of gangue aggregate LUHPC was achieved through a shot blasting process, with three-dimensional texture data acquired via a handheld laser scanner. The point cloud data was processed using Gaussian filtering in MATLAB software to reconstruct the specimen's surface topography. Subsequently, both macroscopic and microscopic texture profiles of LUHPC were extracted utilizing a band-pass filter. The influence of steel fibers on the surface roughness of the specimen was assessed. An enhanced evaluation index, the Extended Tectonic Depth (ETD), was proposed, drawing upon the sand laying method's measurement

principles. The correlations between macro-texture parameters (R_a , R_q , EMTD, EMPD) and micro-texture parameters (C_{MT} , RMS) with ETD were analyzed. Furthermore, the relationship between shear strengths of the LUHPC-stress absorbing layer-SMA composite specimen and both macro- and micro-texture parameters was examined.

Results and discussion As the degree of shot blasting increased, the surface of LUHPC became rougher, the ETD grew larger, and the shear performance of LUHPC-high viscosity high elasticity binder-SMA improved at different temperatures. Under the influence of steel fiber, increasing the degree of shot blasting effectively enhanced the overall shear strength. With more shot blasting, the coverage of steel shot on the specimen's surface gradually increased, the depth of sanding continued to grow, the height of the steel fiber protrusions increased, and the peak of the specimen profile became larger, while the surface depth of the non-steel fiber portion tended to be homogeneous. The correlation of the ETD with R_a , R_q , EMPD, and RMS was better, and the correlation with EMTD and C_{MT} was average. The damage in LUHPC-SMA composite specimens primarily occurred in different surface layers of the bond layer, with no damage to the mixture. The correlation of the shear strength at 25 °C with R_q and RMS was good, with an R^2 greater than 0.85. The multivariate analysis of shear strength and macro-micro texture parameters showed that for bivariate macro texture parameters ETD, EMPD, EMTD, R_a , R_q , the R^2 was greater than 0.85 at 25 °C, and ranged from 0.6 to 0.85 at −10 °C. When the bivariate consisted of micro texture parameters RMS and C_{MT} , the correlation for both 25 °C and −10 °C was better, with an R^2 greater than 0.85. The correlation between shear strength and macro-micro texture parameters improved as the number of variables increased.

Conclusions In view of the influence of steel fibres on the surface texture of the specimens after shot blasting, EMTD and EMPD were used to replace MTD and MPD to characterize the macroscopic texture properties of the materials more effectively; Based on the measurement principle of the sand laying method, the extended tectonic depth (ETD) was proposed as a new evaluation index. Multivariate linear regression analyses of ETD with macro texture parameters (R_a , R_q , EMTD, EMPD) and micro texture parameters (C_{MT} , RMS) were carried out, and the results showed that the correlation between ETD and macro-micro texture parameters was strong. According to the comprehensive consideration of each index parameter under different degrees of shot blasting, it was stipulated that the ETD of the extended construction depth of the lightweight UHPC surface in the interval of 0.60–0.70 mm was considered as a light shot blasting effect, the interval of 0.70–0.85 mm was considered as a moderate shot blasting effect, and the interval of 0.85–1.15 mm was considered as a heavy shot blasting effect. The correlation analysis of the shear strength of the composite specimens at −10 °C and 25 °C with the macroscopic texture parameters (ETD, EMPD, EMTD, R_a , R_q) and the microscopic texture parameters (C_{MT} and RMS) showed that: The larger the depth of the extended structure, the better the shear performance at the same temperature; The correlation with the shear strength was gradually strengthened with the increase of the number of variables; and the correlation of the all-variable indexes and shear strength was the best at 0.999. The correlation between all variables and shear strength reached 0.999. Comparing the experimental results under different levels of shot blasting, it was concluded that the extended structural depth of lightweight UHPC surfaces had a positive correlation with the shear strength, and therefore the extended structural depth of ETD was recommended to be 0.85–1.15 mm in this paper.

Keywords lightweight ultra-high performance concrete; extended structure depth; three-dimensional laser scanning; macro-micro texture; surface roughness; shear strength