

火山岩材料在超高性能混凝土中的理化协同增效机理

刘康宁^{1,2}, 范定强², 尹天一¹, 陆建鑫^{2,3}, 余 睿¹, 潘智生²

(1. 武汉理工大学, 硅酸盐科学与先进建材全国重点实验室, 中国 武汉 430070; 2. 香港理工大学土木与环境工程系, 中国 香港 999077; 3. 哈尔滨工业大学(深圳)智能土木与海洋工程学院, 中国 广东 深圳 518000)

摘 要: 香港地表面积约 50% 被火山岩覆盖, 每年地下工程产生大量火山岩废料, 如何综合利用这些火山岩材料是亟待解决的难题。同时, 超高性能混凝土的生产对原材料需求巨大, 因此, 本工作系统探究了火山岩材料在超高性能混凝土(UHPC)中的应用及其理化协同增强机制。通过引入具有棱角形貌特征的火山岩骨料及火山岩粉, 研究了火山岩材料对 UHPC 宏观性能的作用规律。结果表明: 在 UHPC 体系中火山岩骨料不会引起明显的碱-硅反应膨胀; 适当掺入火山岩骨料与火山岩粉能够提高 UHPC 材料的工作性能、湿堆积密度以及力学性能。火山岩骨料掺量不超过 50% 可降低 UHPC 的孔隙率, 并且其棱角结构能够促使钢纤维向水平方向定向排列, 从而显著增强抗折性能。火山岩粉的加入可提升基体的工作性能与抗折强度。火山岩材料的增强效果源于以下 3 个方面: 火山岩自身的强度与标准砂相当, 保证了材料的高力学强度; 棱角颗粒与圆形颗粒形成“点-面滑动接触”, 增加摩擦面积, 降低了基体孔隙率, 提升了力学性能; 火山岩材料的微观粗糙表面与火山灰反应增强了混凝土材料的微观结构与界面特性。研究成果验证了火山岩材料制备优异性能 UHPC 的可行性, 为基于复杂形貌骨料的 UHPC 设计提供了理论基础与实验依据。

关键词: 火山岩; 超高性能混凝土; 颗粒形貌; 火山灰反应

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)10-3638-17

网络出版时间: 2026-05-06



超高性能混凝土(Ultra-high performance concrete, UHPC)凭借其优异的力学性能与耐久性能, 成为现代建筑实现结构轻量化与长寿命化的核心材料^[1, 2]。其优异性能的关键在于通过颗粒级配设计构建的密实堆积体系, 以及界面过渡区(Interfacial transition zone, ITZ)的高致密性。然而, 传统 UHPC 依赖河砂、硅灰等资源型材料, 且现有颗粒堆积理论多基于理想球形颗粒假设, 对天然骨料复杂形貌特征的耦合作用机制缺乏系统性认知^[3]。这一理论局限性促使研究者探索具有非球形特征的替代骨料, 以期突破传统 UHPC 配方设计的瓶颈。

在香港, 隧道工程和岩洞开挖通常会产生大量火山岩废料(例如火山凝灰岩)。这些岩石是当地建筑业的潜在资源。香港超过一半的土地面积为火山岩, 其强度和硬度均高于花岗岩^[4]。这种物理特性

为 UHPC 的性能调控提供了新的材料路径, 通过将火山岩加工为不同尺度的骨料, 可在颗粒堆积体系中实现形貌特征的协同调控。根据香港土木工程拓展署(CEDD)的相关研究报告^[5], 火山岩骨料(Volcanic rock aggregate, VRA)存在潜在的碱-硅反应(Alkali-silica reaction, ASR)活性, 这已成为限制其在混凝土中广泛应用的主要因素之一。但是 UHPC 具有低水胶比与超细孔结构特性, 可形成物理阻隔效应, 从而有效抑制 ASR 膨胀的发生, 这使 UHPC 成为应用火山岩材料的理想场景^[6]。相关研究表明, 低掺量 VRA 可提升混凝土材料的微观致密性, 从而显著提升基体的力学强度^[7]。这是因为与传统骨料相比, VRA 具有独特的棱角形状与化学活性。这些棱角形状能够增强骨料与水泥基体的机械咬合作用, 从而优化骨料-基体界面结构并提升材

收稿日期: 2025-08-27。 修订日期: 2025-10-26。

基金项目: 国家自然科学基金(52308275); 香港建造业议会研究及技术发展基金(K-ZB7X); 香港低碳绿色科研基金(K-ZB5B); 硅酸盐科学与先进建材全国重点实验室开放基金(SYSJJ 2025-09)。

第一作者: 刘康宁(1999—), 男, 博士研究生。

通信作者: 陆建鑫(1988—), 男, 博士, 教授。

余 睿(1986—), 男, 博士, 研究员。

Received date: 2025-08-27. Revised date: 2025-10-26.

First author: LIU Kangning (1999—), male, Doctoral candidate.

E-mail: kang-ning.liu@connect.polyu.hk

Correspondent author: LU Jianxin (1988—), male, Ph.D., Professor.

YU Rui (1986—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: jianxin.lu@polyu.edu.hk; r.yu@whut.edu.cn

料的力学性能和耐久性^[8, 9]。另一方面, 利用火山岩粉作为矿物掺合料, 其中的活性硅组分可通过火山灰反应消耗氢氧化钙晶体, 生成额外的 C-S-H 凝胶并改善 ITZ^[10]。然而, 这种“骨料形貌调控堆积结构”与“粉料活性优化界面微结构”的协同效应, 尚未在现有 UHPC 设计理论中得到充分体现。

此外, 颗粒堆积理论是 UHPC 配合比设计的核心依据, 经典 Modified Andreasen-Andersen 模型(MAA 模型)通过颗粒分布模数 q 值优化颗粒分布, 但此模型假设的“球形颗粒堆积”与 VRA 的实际形貌存在显著差异。现有研究指出骨料的高棱角性会显著改变颗粒间的楔入效应与摩擦阻力, 在颗粒堆积系统中引入过多棱角性骨料可能会影响颗粒的理想紧密堆积状态^[11]。因此, 将火山岩材料纳入 UHPC 颗粒堆积体系的可行性还亟待进一步研究。

鉴于火山岩材料在超高性能混凝土材料应用中潜在的多重优势, 本工作旨在系统探讨其用于制备优异 UHPC 材料的可行性及其所引发的理化协同增效机制。通过采用不同替代率的火山岩骨料(替代标准砂)和火山岩粉(替代水泥)配制系列 UHPC 样品, 系统研究以下 3 个关键科学问题: VRA 棱角性、形状对 UHPC 力学性能与工作性能的阈值效应; VRA 棱角性对 UHPC 体系中骨料-纤维堆积结构的协同增强机制; 火山岩材料的活性组分与颗粒形貌对水化进程的影响规律。基于此, 本工作进一步建立了“骨料形貌特征-堆积结构效率-界面性能”与 UHPC 宏观性能之间的关联模型, 为火山岩资源丰富地区 UHPC 的工程应用提供科学依据和材料设计方法。研究成果不仅有助于拓展 UHPC 原材料的选择范围、降低材料成本, 也为基于复杂形貌骨料的高性能混凝土设计提供了理论依据。

1 实验

1.1 原材料

本工作所用的胶凝材料为香港青洲英坭有限公司生产的 P·O 52.5 普通硅酸盐水泥, 比表面积为 $346\text{ m}^2/\text{kg}$, 密度为 $3150\text{ kg}/\text{m}^3$, 其粒径分布如图 1 所示, 中位粒径为 $9.3\text{ }\mu\text{m}$ 。并使用了埃肯公司生产的硅灰(Silica fume, SF)作为矿物掺合料。本工作所用的砂料是 ISO 标准砂(Standard sand, SS)。为了保证工作性能, 采用江苏苏博特新材料有限公司生产的聚羧酸高效减水剂。火山岩来自香港华富北地区开采的岩石, 经香港土木工程拓展署破碎得到火山岩骨料(VRA)替代标准砂, 通过筛分确保 VRA 的

级配分布与 SS 的级配分布保持一致。将 VRA 磨细可得到火山岩粉末(VRP)。所用粉料的粒度分布如图 1 所示, 原材料化学组成如表 1 所示。为了比较所用粉料的活性, 使用了 Modified Chapelle test 的方法对 VRP 的活性参数进行了测量^[12], 并与本工作使用的硅灰以及文献中的矿物掺合料如废弃玻璃粉(Waste glass powder, WGP)、粉煤灰(Fly ash, FA)进行了对比^[12], 结果如表 2 所示。VRP 的活性较低, 其火山灰活性远低于硅灰、粉煤灰、废弃玻璃粉。

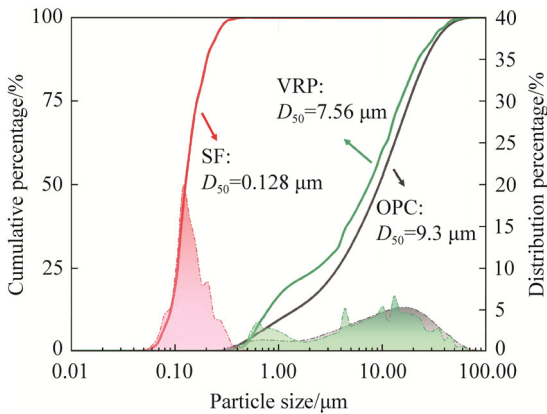


图 1 粉料的粒径分布
Fig. 1 Particle size distribution of powders

表 1 原材料化学组成
Table 1 Chemical composition of the raw materials w/%

Raw materials	Cement	Volcanic rock	Silica fume
CaO	65.30	2.22	0.36
SiO ₂	21.00	64.90	94.65
K ₂ O	0.38	7.21	0.84
Na ₂ O	0.11	6.08	0.13
MgO	2.13	0.50	0.47
SO ₃	4.66	0.05	0.69
Al ₂ O ₃	4.38	14.40	0.25
Others	2.04	4.64	2.61

w is mass fraction.

表 2 辅助胶凝材料活性对比
Table 2 Comparison of CH activity between SCMs

mg · g ⁻¹ SCM			
VRP	SF	FA	WGP
258.8	916.7	548.0	511.0

1.2 配合比设计

根据所用原材料的粒径分布以及参考 Yu 等^[13]的 UHPC 配合比设计方法, 得到了初始配合比 VRP0A0, 通过使用 VRA 取代标准砂、VRP 取代水泥, VRA 的质量替代率设为 0%、25%、50%、75%、100%; 预实验显示, VRP 取代水泥超过

30%会显著影响样品早期强度,因此 VRP 质量替代率设为 0%~30%。表 3 列出了不同实验组的 UHPC 配合比。

1.3 火山岩材料特征

所采用的火山岩骨料具有高强优势:微观弹性模量为 68.8 GPa,与标准砂弹性模量接近(67.9 GPa),显著高于玄武岩与花岗岩等常用碎石骨料(玄武岩约 50 GPa^[14],花岗岩约 40 GPa^[15])。图 2a 为使用扫描电子显微镜(SEM)和全岩矿物自动定量分析系统(TIMAs)分析得到的火山岩的矿物相组成。火山岩的矿物相主要包括正长石(KAlSi₃O₈)、石英(SiO₂)和斜长石(NaAlSi₃O₈、CaAl₂Si₂O₈)。图 2b 为对火山

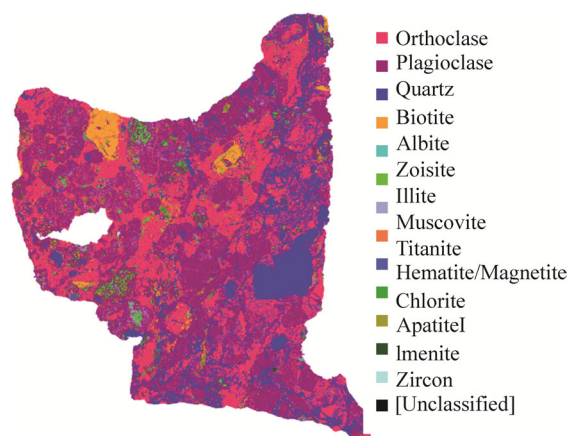
岩定量 X 射线衍射分析的结果,主要物相组成的结果与 TIMA 分析得到的结果类似。值得注意的是,火山岩中含有 23.28%的无定形物相。根据 CEDD 的报告^[5],火山岩快速冷却的成岩历史导致其中的二氧化硅以化学性质活泼的非晶质或微晶质形式存在,这些无定形硅在混凝土环境中具有较高的活性。它容易在高 pH 值的孔隙溶液中溶解,与碱离子发生反应,形成碱-硅凝胶。这种凝胶会吸水膨胀,并导致混凝土膨胀、开裂和耐久性下降,即碱-硅反应。使用火山岩骨料制成的混凝土在测定的 52 周内膨胀率可达 0.11%,远超安全限制,给混凝土结构长期服役带来隐患^[5]。

表 3 实验组配合比
Table 3 Mix proportions of the test group

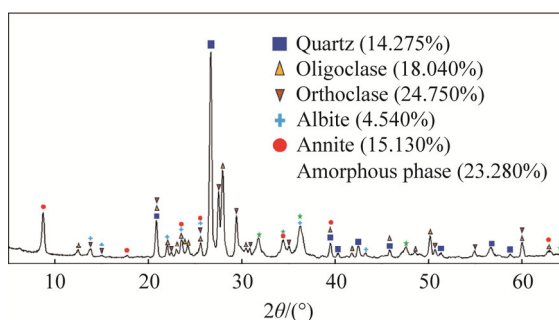
kg/m³

Number	Group	C	SF	VRP	SS	VRA	SP	W	Steel fiber
1	VRP0A0	950	144	0	990.0	0	30	179	156
2	VRP0A25	950	144	0	742.5	247.5	30	179	156
3	VRP0A50	950	144	0	495.0	495.0	30	179	156
4	VRP0A75	950	144	0	247.5	742.5	30	179	156
5	VRP0A100	950	144	0	0	990.0	30	179	156
6	VRP10A50	855	144	95	495.0	495.0	30	179	156
7	VRP20A50	760	144	190	495.0	495.0	30	179	156
8	VRP30A50	665	144	285	495.0	495.0	30	179	156

C is cement; SF represents silica fume; VRP is the volcanic rock powder; SS is the ISO standard sand; VRA is volcanic rock aggregate; SP is superplasticizer; W is water.



(a) Phase analysis of VRA by SEM-TIMA



(b) Q-XRD results of VRA

图 2 火山岩的矿物相组成

Fig. 2 Mineral phases composition of volcanic rocks

此外,通过集料图像测量系统(AIMS)以及激光共聚焦显微镜对 VRA 的宏观形貌 2D 形状与棱角性进行了表征。二维形状值(Form 2D)反映了骨料颗粒的 2 维形状与标准圆的接近程度,数值越大表示颗粒形状越不规则、越偏离圆形。而棱角性(GA)反映了骨料颗粒的边缘锐度,其计算方法如式(1)和式(2)

所示:

$$\text{Form 2D} = \sum_{\theta=0^{\circ}}^{\theta=360^{\circ}-\Delta\theta} \left(\frac{|R_{\theta+\Delta\theta} - R_{\theta}|}{R_{\theta}} \right) \quad (1)$$

$$\text{GA} = 1 / \left(\frac{n}{3} - 1 \right) \sum_{i=1}^{n-3} |\theta_i - \theta_{i+3}| \quad (2)$$

式中: θ 为颗粒边缘的取向角, R_{θ} 为 θ 处的颗粒半

径, $\Delta\theta$ 为 θ 的增量; n 为总的取点数, i 表示颗粒边缘上的点。低棱角性($GA < 2100$): 颗粒外形接近圆形, 颗粒间以点接触为主, 堆积结构稳定性较低; 中等棱角性($2100 \leq GA < 4000$): 颗粒具有适度棱角, 能形成部分机械咬合, 提高堆积稳定性; 高棱角性($4000 \leq GA < 5400$): 颗粒边缘较为锐利, 颗粒间易形成“棱角-棱角”锁定; 极高棱角性($GA \geq 5400$): 颗粒边缘极为锐利, 颗粒间锁定作用强, 但过多锐角会增加空隙。图 3 展示了不同粒径的 VRA 的二维形状分布和棱角性分布的对比。如图 3a 所示, 粗 VRA 的 Form 2D 值整体上小于细 VRA, 说明粗 VRA 的二维投影更接近圆形, 细 VRA 的二维投影则更加偏离圆形。相比起 SS 的 Form 2D 分布, 相同粒径范围的细 VRA 的 Form 2D 值更大一些。有约 10% 的细 VRA 的二维形状值达到了“极高”范围, 而 SS 的二维形状值则均在 10 以下, 这也直接印证了 SS 的二维形状相比起细 VRA 更接近圆形。而根据图 3b 可见, 在相同的粒径范围内, VRA 比 SS 的棱角性分布更大, 有部分骨料进入了高棱角性范围, 说明在 2D 投影下二者颗粒的边缘锐度不同, VRA 的边缘会存在更多的棱角。

图 4 和图 5 为利用 LSM 800 激光扫描共聚焦显微镜表征的两种骨料的微观表面形貌和粗糙度分布。图 4 为 SS 与 VRA 的微观三维形貌, 虽然在宏观层面上呈现出不同的形状, 但从光学图像和激光图像可以看出, VRA 相较于 SS, 其表面拥有更多的起伏与纹理。图 5 为经过对激光图像进行水平校准和三维重建后不同粒径 SS 与 VRA 的微观粗糙度分布。从图 5a 和图 5c 可以看出, 1.25~2.36 mm 的 SS 与 1.25~2.36 mm 的 VRA 的表面粗糙度都呈现随着表面高度的增加而变大, 呈占比不断上升的趋势, SS 的最大粗糙度为 523 μm , VRA 的最大粗糙度为 664 μm 。由此可得 1.25~2.36 mm 的 VRA 的表面粗糙度高于相同粒径范围的 SS。从图 5b 可以看出, 随着粒径的减小, 0.60~1.25 mm 的 SS 的微观表面仅存在少量凸起(高度小于 20 μm 的区域占比大于 50%), 表面较为光滑, 最大凸起区域的高度为 178 μm 。从图 5d 可以看出, 0.60~1.25 mm 的 VRA 的微观表面粗糙度分布在 0~188 μm 范围内, 随着粗糙度的提高, 其表面粗糙度占比呈现先增高后降低的变化趋势, 峰值占比出现在 85~94 μm 的区域, 粗糙程度高于同等粒径的 SS。综上所述, 随着粒径的减小, VRA 和 SS 的微观表面都呈现出更加光滑平坦的趋势。VRA 同时具有更不规则的宏观

形状和粗糙的微观表面, 与 SS 的规则宏观形状和光滑微观形貌形成了显著差异。

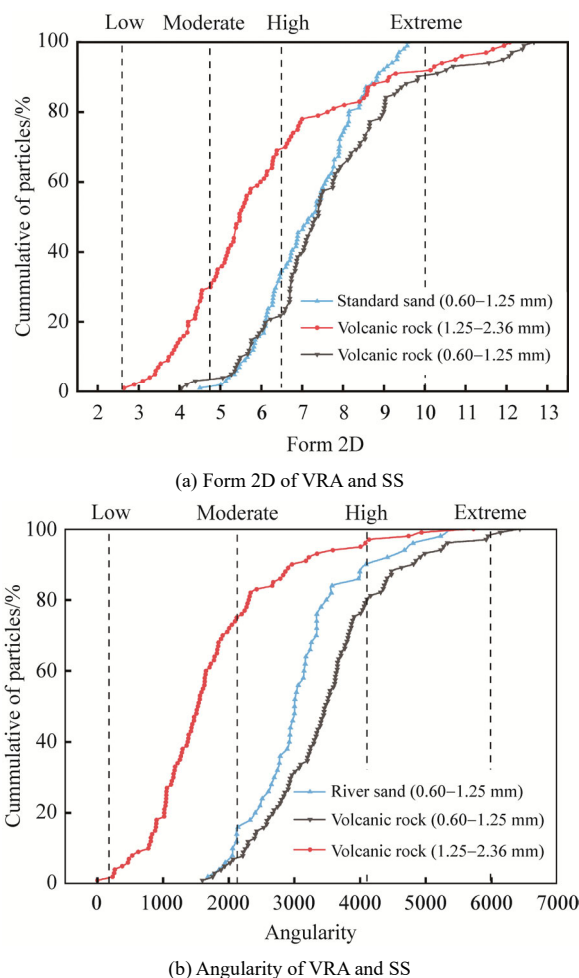


图 3 火山岩骨料和标准砂的形貌特征参数

Fig. 3 Morphological parameters of volcanic rock aggregate and standard sand

1.4 制备过程

采取常用的 UHPC 制备方法^[16], 将新拌 UHPC 制成 40 mm × 40 mm × 160 mm 的棱柱体试块和 40 mm × 40 mm × 40 mm 的立方体试块, 并放置在标准养护条件[(20±2) °C, 相对湿度≥95%]中养护至标准龄期。

1.5 测试方法

1) 工作性能 根据《砌筑砂浆试验方法 第 3 部分: 新拌砂浆稠度的测定(跳桌法)》(EN 1015-3:1999)对新拌 UHPC 的流动度进行了测试^[17]。此外, 采用了湿堆积密度测试对新拌 UHPC 的颗粒堆积结构进行了评估, 具体公式如式(3)所示:

$$\varphi = \frac{M_{\max} / V}{\rho_w R_w + \sum_{i \in C} \rho_i R_i + \sum_{j \in A} \rho_j R_j} \quad (3)$$

式中: φ 表示新拌 UHPC 的湿堆积密度; $M_{\max}$ 表

示实测的不同水胶比下的最大质量(取 3 个容器中新拌 UHPC 净重的平均值, g); V 表示容器体积(取 220 mL); ρ_w 、 ρ_i 和 ρ_j 分别表示水、粉料和骨料的密度(kg/m^3); 而 R_w 、 R_i 和 R_j 则分别表示各原料的体积占比。

2) 力学性能测试 通过测量 UHPC 试块的抗压强度研究了 UHPC 样品的力学性能。力学性能的测试按照《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—2021)进行^[18]。在进行抗压强度测试时, UHPC 试块尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 立方体, 压机的加载速度为 2.4 kN/s 。在进行抗折强度测试时, UHPC 试块尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ 长方体, 压机的加载速度为 50 N/s 。

3) 活性骨料碱-硅反应抑制措施有效性试验(砂浆棒法) 为了验证 VRA 的加入是否会导致 UHPC 材料出现 ASR 膨胀, 本工作根据《水工混凝土试验规程》(SL/T 352—2020), 通过快速砂浆棒法测试了试件 0~28 d 的 ASR 膨胀^[19]。试件尺寸为 $25.4\text{ mm} \times 25.4\text{ mm} \times 285.0\text{ mm}$ 。在测试完试件初始长度后, 将砂浆棒放入 1 mol/L 的 NaOH 溶液中, 密封好养护筒盖子, 养护筒放入 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 的恒温水浴箱中。在浸泡 1、3、7、10、14 d 以及 28 d 时取出试件测长。

4) 孔结构 为完整表征样品的宏微观孔隙结构, 采用了 X 射线计算机断层扫描(XCT)技术对上述 8 组样品的孔隙结构进行表征。测试的具体仪器型号为 Nikon X-Tek Systems 公司生产的 XT H 225

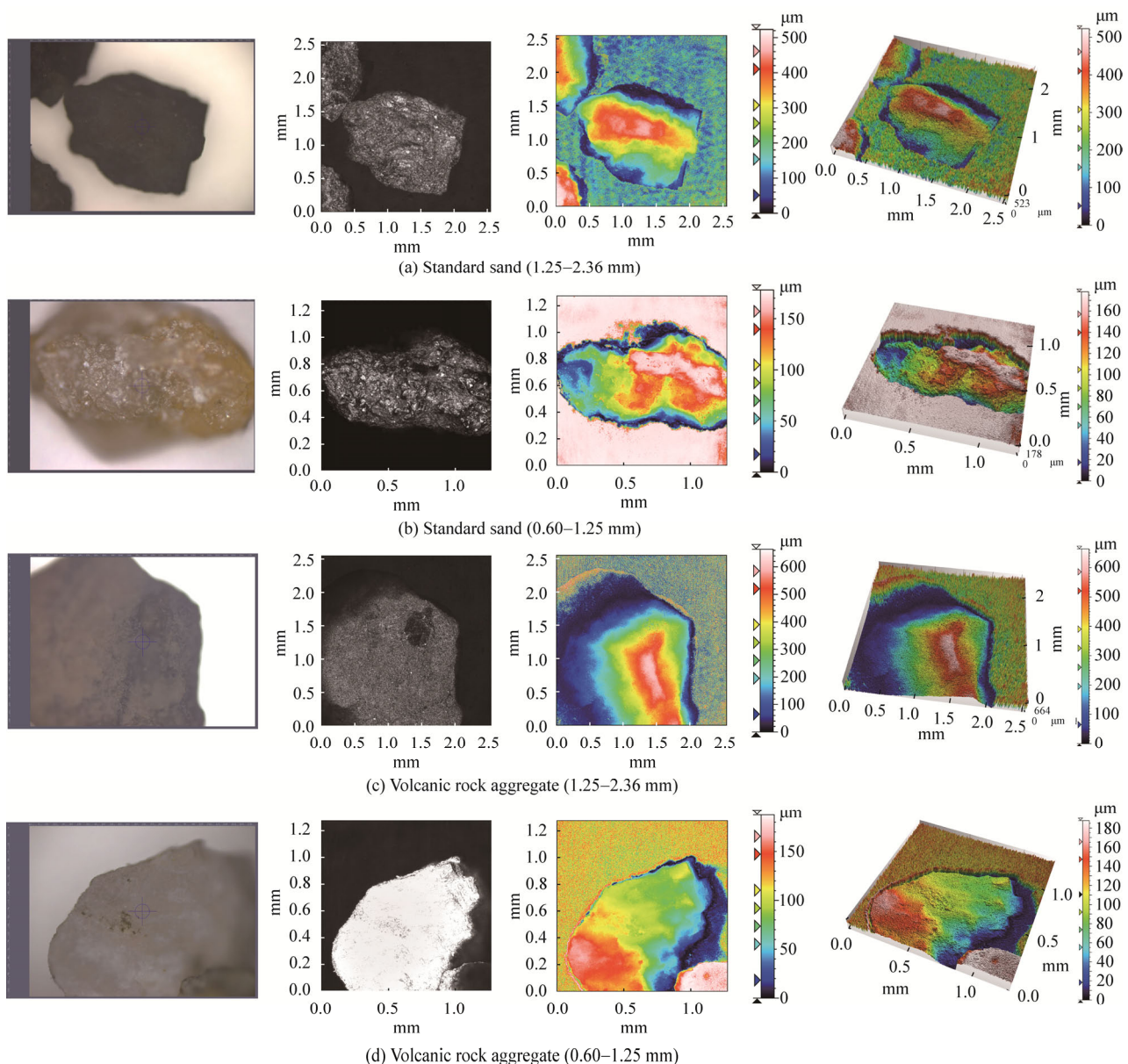


图 4 标准砂与火山岩骨料微观形貌

Fig. 4 Micro morphology of SS and VRA

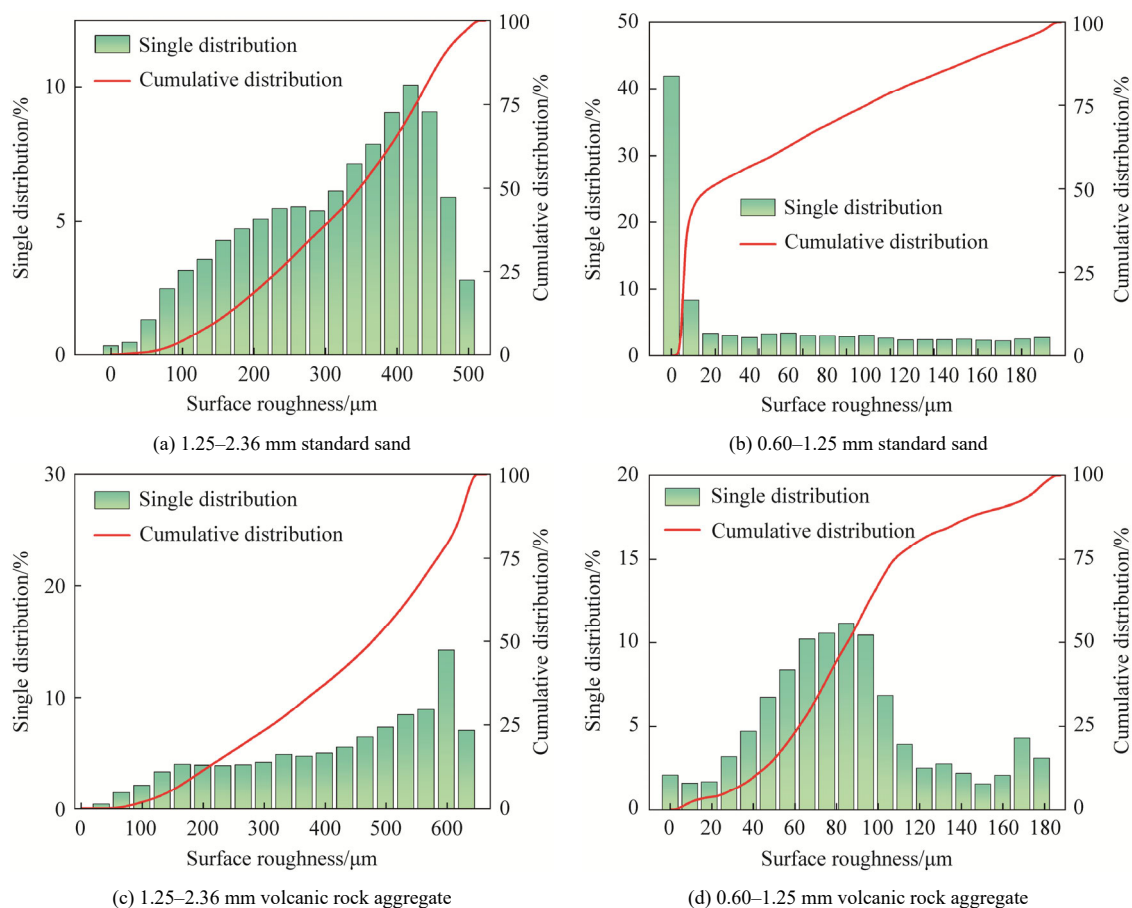


图 5 微观表面粗糙度分布

Fig. 5 Microscopic surface roughness distribution

ST 型 X 射线 CT, 并通过 Avizo 3D 进行孔隙与纤维重构与统计。

5) 界面性能 使用布鲁克 Hysitron TI Premier 纳米压痕仪, 评估样品的微观弹性模量。测试前, 先将水化样品用高流动的环氧树脂固化, 再用 Buehler AutoMet 300 抛光机对样品进行抛光, 使其表面光滑平整, 以便进行精确测量。

6) UHPC 水化热 使用 Calmetrix 公司的 I-Cal 4000 测量新拌 UHPC 的水化热。整个实验过程在 20 °C 的固定温度下持续记录热流和总放热量。测量总共持续 72 h, 以捕捉水化过程的早期热释放。

7) 微观形貌 使用扫描电子显微镜(Tescan VEGA 3 型)获取样品的背散射电子图像(Backscattered electron image, BSE), 加速电压设为 20 kV。为了进行成像, 在测试开始前, 将打磨好的块状样品放置在碳导电胶带上, 并喷涂上金。

2 结果与讨论

2.1 工作性能

图 6 为新拌 UHPC 流动度与湿堆积密实度随

VRA 替代率变化的关系曲线。为探究火山岩材料的加入对 UHPC 工作性能的影响, 本节分析了流动度和湿堆积密实度的变化规律。如图 6 所示, 新拌 UHPC 的流动度与湿堆积密实度随 VRA 替代率的变化呈现先增后降的趋势, 而火山岩粉替代率对流动度的影响则表现为单调递增趋势。当 VRA 替代率在 0%~100% 区间时, UHPC 的流动度由 122.0 mm 增至峰值 133.5 mm 后回落至 128.5 mm, 湿堆积密实度则从 0.803 提升至 0.819 后下降至 0.808; 随着火山岩粉替代率从 0% 增至 30%, 流动度由 133.5 mm 持续增至 152.5 mm, 湿堆积密实度在 10% 替代率时达到 0.822 的峰值后降至 0.815。火山岩基材料的适度掺入可有效改善 UHPC 的工作性能。

上述现象可从颗粒堆积理论与表面物理化学效应进行解释。VRA 取代 SS 的过程中, 低替代率 ($\leq 50\%$) 的流动度提升与密实度增长, 源于混合骨料中“棱角-圆形”颗粒形成非连续摩擦网络, 棱角颗粒作为分散相嵌入圆形颗粒中, VRA 的棱角与 SS 的光滑表面形成“点-面滑动接触”。根据 Mora

和 Kwan 的数字图像分析^[11], 此类接触模式可使颗粒间摩擦系数降低, 从而提升流动度。当棱角颗粒占比 > 50% 时, 颗粒间形成“棱角-棱角”啮合点的概率大幅提升, 此时有效摩擦面积增加, 由于 VRA 的表面粗糙度相较 SS 更高, 使得流动度回落^[20]。

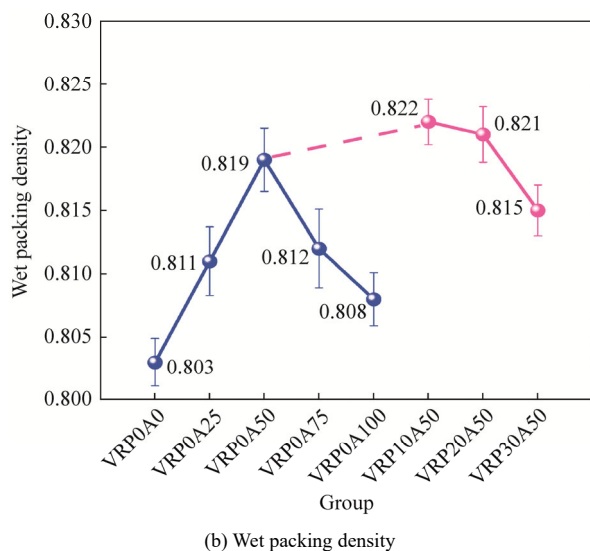
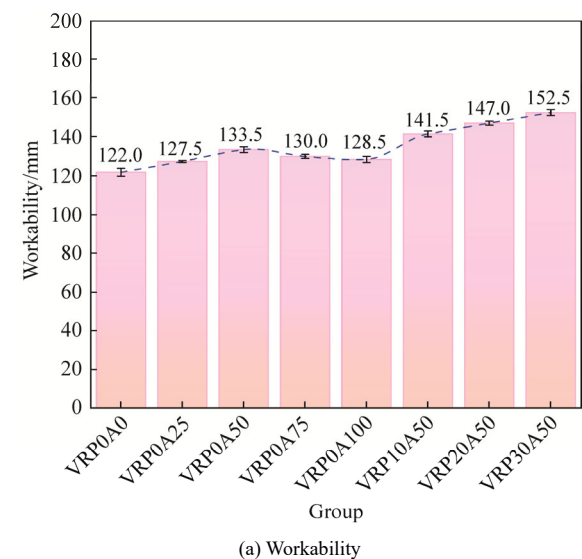


图6 UHPC 新拌性能
Fig. 6 Fresh properties of UHPC

对于 VRP (中位粒径 $7.560\ \mu\text{m}$, 介于水泥 $9.300\ \mu\text{m}$ 与硅灰 $0.128\ \mu\text{m}$ 之间) 替代水泥的工况, 湿堆积密实度出现了先增后降的变化趋势。在 VRP 替代率为 10% 时, VRP 的加入填充了水泥与硅灰之间 $1\sim 10\ \mu\text{m}$ 的粒径分布空间, 使湿堆积密实度数值上升; 超过该掺量后, 由于 VRP 的密度低于水泥, 在等质量取代的情况下 VRP 的加入会使得湿密度下降, 从而导致砂浆湿堆积密实度降低^[21]。

2.2 力学性能

图 7 为用不同 VRA 与火山岩粉的 UHPC 样品的 3、7 d 以及 28 d 抗压强度与抗折强度变化规律。从图中可以看出, 在所有龄期, 随着 VRA 替代 SS 的比例增加, 抗压强度都呈现出先上升后下降的趋势, 最大值出现在 VRP0A50 的 28 d 抗压强度, 为 $158.69\ \text{MPa}$, 相比 VRP0A0 的 28 d 抗压强度 ($144.63\ \text{MPa}$) 提升了 9.7%。这说明 VRA 和 SS 复合使用能够使得 UHPC 取得更高的抗压强度。在相同的 VRA 掺量情况下, 使用 VRP 替代水泥量上升, UHPC 样品的早期 (3 d 与 7 d) 抗压强度会出现下降趋势, 而在 28 d 抗压强度则会出现先上升后下降的趋势, 最大值出现在 VRP20A50, 为 $160.86\ \text{MPa}$ 。在 VRP 替代量为 30% 时抗压强度达到最低, 相比 VRP20A50 降低了 17.4%。因此, 适量的 VRP 加入替代水泥可以增强 UHPC 的抗压强度, 但是替代量过大则会造成不利影响。

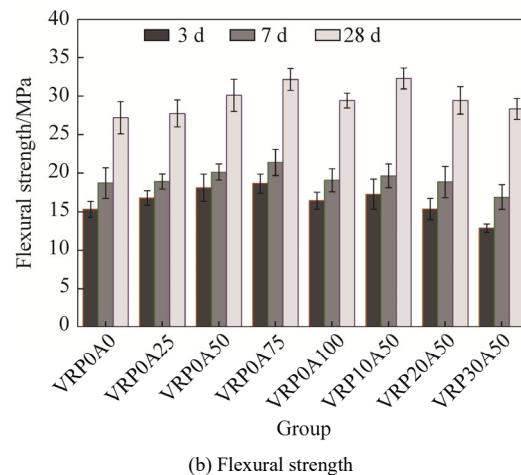
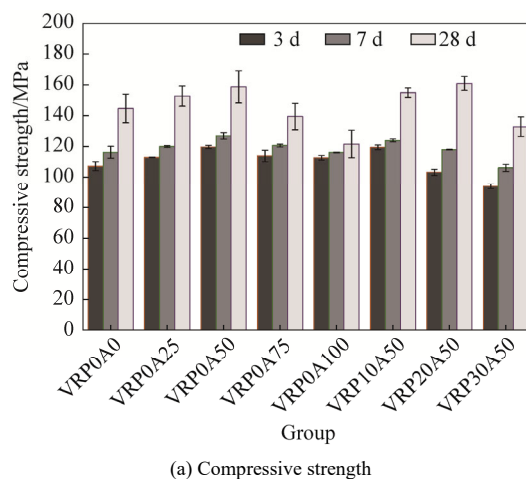


图7 UHPC 抗压强度与抗折强度
Fig. 7 Compressive strength and flexural strength of UHPC

在抗折强度方面, 随着 VRA 替代 SS 比例的提

高,所有龄期的抗折强度都出现了先上升后下降的趋势,最大值出现在 VRP0A75 组,其 28 d 抗折强度为 32.16 MPa。而随着火山岩粉替代水泥量从 0% 提升到 30%,28 d 抗折强度出现了先上升后下降的趋势,最大值出现在火山岩粉替代量为 10% 的组别中,为 32.3 MPa。因此,可以判断适量的 VRA 替代 SS 有利于混凝土的力学性能,而过量的 VRA 替代 SS 则会降低混凝土的强度。而在 VRP 替代水泥的结果中,VRP 的加入在早期会使混凝土的力学性能下降,但是在后期(28 d),10% 的火山岩粉替代水泥可以提高混凝土的抗折强度,然而进一步使用 VRP 替代水泥,抗折强度会出现降低。具体关于 VRA 和 VRP 对 UHPC 力学性能的影响机制将在 2.4 节~2.7 节详细讨论。

2.3 加速碱-硅反应膨胀

由于 VRA 是一种活性骨料,为了测试其在 UHPC 中是否会导致碱-硅反应膨胀,本节对所制备的 UHPC 进行了加速 ASR 膨胀测试,结果如图 8 所示。随着 VRA 替代 SS 的掺量提高,14 d ASR 膨胀值出现了先升高后降低的趋势,在 75% 取代量时达到了最大值;而随着 VRP 取代水泥的掺量提高,14 d 膨胀值出现了持续下降的趋势。可以注意到在 VRA 掺量为 0 时,UHPC 出现了小幅收缩的现象,这是因为 SS 不存在活性物质,而 UHPC 的胶凝材料含量较高,在水化后产物的体积相较于反应物降低,因此 VRP0A0 出现了自收缩现象。随着 VRA 的掺量提高,VRA 中的活性物质会与水泥水化释放的碱性物质反应,同时加速 ASR 膨胀实验,所浸泡的 NaOH 溶液中的碱性物质也会与 VRA 反应,生成膨胀性的物质。然而,由于 UHPC 孔隙率较低,外部和内部释放的碱性物质难以通过渗透作用在混凝土内部迁移与活性骨料反应,因此 ASR 的膨胀值比较低($<0.02\%$)。另一方面,由于添加了钢纤维,这些纤维网络提高了 UHPC 材料的体积稳定性,从而使得试件的 ASR 膨胀被限制。根据《水工混凝土试验规程》(SL/T 352—2020),试件在 28 d 时膨胀率小于 0.10%,则其对骨料碱-硅反应活性的抑制效果评定为有效。28 d 龄期的 ASR 膨胀最大值出现在 VRP0A75 组,为 0.017%,远低于规范中 0.10% 的阈值^[19]。因此,活性骨料 VRA 在 UHPC 中出现轻微 ASR 膨胀可视为没有危害。

2.4 三维结构分析

如图 9 所示是不同 VRA 与火山岩粉掺量对 UHPC 的宏观孔隙结构以及纤维分布的影响。在

图 9a~图 9b 中,在孔隙体积较小的范围内($10^4\sim10^5\ \mu\text{m}^3$),VRP0A50 相对其他组保持着更高的孔隙数量分布。而在孔隙体积相对较大的范围内($10^7\sim10^8\ \mu\text{m}^3$),孔隙数量随着 VRA 的掺量增加出现下降的趋势,最低组出现在 VRP0A100。而在火山岩粉掺量不同的组中,孔体积分布的结果表明小孔范围的孔体积会随着 VRP 的掺量增加出现先减小后增大的趋势,而大孔范围内的孔体积则随着 VRP 掺量的增加呈现先增大后减小的趋势。

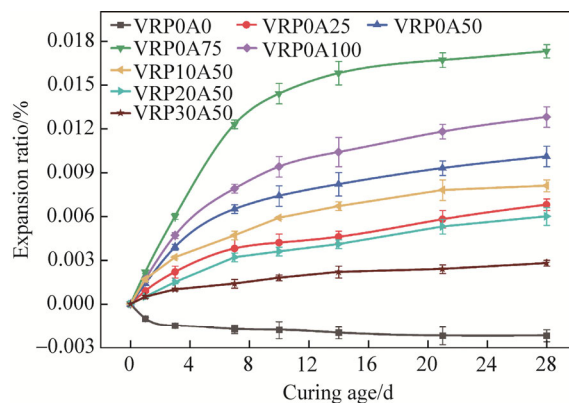


图 8 UHPC 的 28 d 碱-硅反应膨胀结果

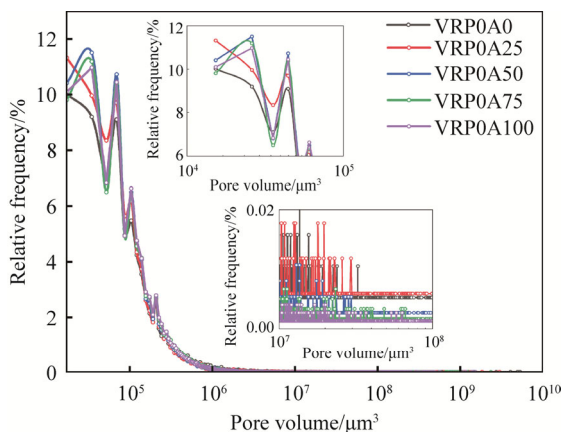
Fig. 8 28 d ASR expansion results of UHPC

图 9c~图 9d 展示了 UHPC 样品中的钢纤维取向分布。以垂直于浇筑面的纤维取向角度为 90° ,平行于浇筑面的纤维取向角度为 0° 。除了 VRP0A0 是在每个角度几乎平均分布外,加入了 VRA 的组别都表现出在纤维取向角度低于 30° 的区域出现强烈的聚集。这表明 VRA 对改变钢纤维在 UHPC 内部的取向有明显效果。图 9e 展示了不同样品的孔隙率分布,随着 VRA 对 SS 替代量的上升,各实验组的宏观孔隙率出现了先下降后上升的趋势,孔隙率最低的组出现在 VRP0A50。而随着火山岩粉替代量的上升,实验组的孔隙率出现了先下降后上升的趋势,孔隙率最低的组出现在 VRP20A50。图 9f 展示了不同组别的纤维与孔隙三维结构,选择了浇筑面作为 X-CT 扫描的顶面,随着 VRA 对 SS 替代量的提高,纤维的分布也逐渐从垂直于浇筑面方向朝着平行于浇筑面方向排列。

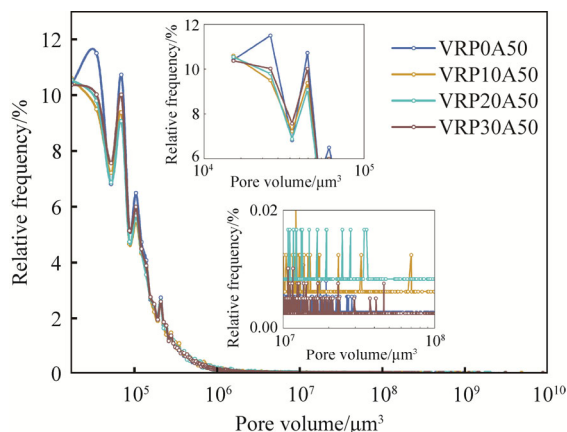
孔隙率随 VRA 替代率呈“先降后升”的变化趋势,在 VRP0A50 组达到最低值。这一阈值效应由两种竞争机制主导。骨料的表面与形状会影响界面与流动。在小孔范围($10^4\sim10^5\ \mu\text{m}^3$)内,VRP0A50 组孔隙数量密度高于其他组别,这归因于 VRA 高棱角度形成的嵌锁能力,显著提升骨料-基体界面

的黏结强度。例如, 先前的研究表明, 相较于单纯圆形颗粒和棱角颗粒的堆积体系, 棱角-圆形混合

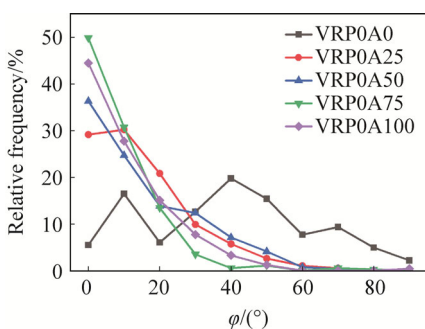
颗粒体系的颗粒间填充效应更高, 二级粒径的骨料会更好填充到上级骨料之间的间隙中, 使孔隙



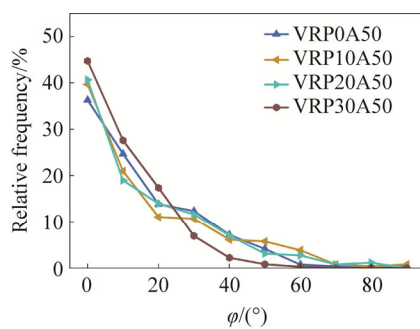
(a) Pore volume distribution of UHPC with different volcanic rock aggregate content



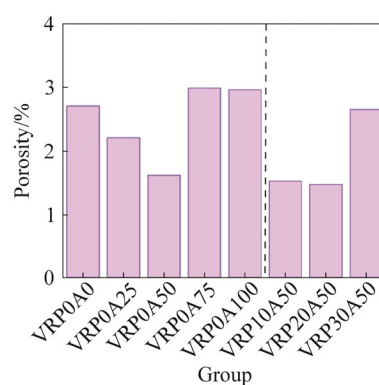
(b) Pore volume distribution of UHPC with different volcanic rock powder content



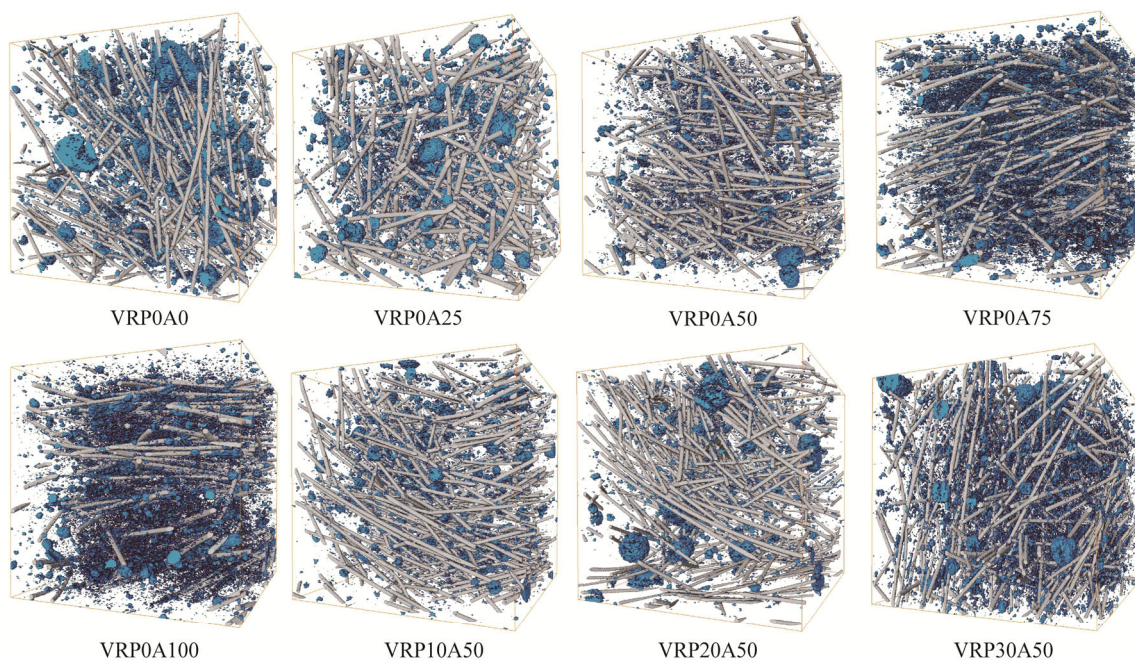
(c) Internal fiber orientation distribution of UHPC with different volcanic rock aggregate content



(d) Internal fiber orientation distribution of UHPC with different volcanic rock powder content



(e) Porosity of different groups



(f) Internal 3D model of internal structure of different groups

图9 UHPC 内部结构分析

Fig. 9 Internal structure analysis of UHPC

率更低^[22]。因此,在 VRP0A50 组,添加有棱角性的 VRA 会使孔隙率降低,UHPC 的抗压强度提升。然而,随着 VRA 掺量的进一步提高,由于棱角性骨料的堆积效率不如棱角-圆形混合系统的堆积效率^[9],湿堆积密度下降,孔隙率升高,UHPC 的抗压强度出现下降。

对于 VRP,孔隙率随掺量呈先降后升的趋势,最低值出现在 VRP20A50 组,反映了火山灰反应填充微孔与水泥稀释减少水化产物量的动态平衡。30%掺量的 VRP 取代水泥会大幅提升孔隙率。具体到不同孔隙范围来说,火山岩粉对孔隙结构的影响呈现双重性:小孔体积随 VRP 掺量增加先减少后增加,大孔则相反。这与 VRP 的火山灰活性及颗粒形貌密切相关:低掺量($\leq 20\%$)时,火山岩中的活性成分通过火山灰反应生成二次水化产物填充孔隙^[23];高掺量($>20\%$)时,由于 VRP 的活性低于水泥,使用 VRP 替代水泥会导致水化产物减少,使填充微观孔隙的物质变少,这会引起孔隙率的上升以及抗压强度的下降。

XCT 纤维分布取向分析表明,含 VRA 的组别均呈现低角度区域($0^\circ\sim 30^\circ$)纤维聚集现象,而 VRP0A0 组纤维取向均匀分布。这一差异源于 VRA 棱角形状的机械锚固作用,VRA 的棱角阻碍钢纤维在新拌 UHPC 中的随机运动,迫使其沿流动方向定向排列。在 UHPC 中,水平排列的纤维(垂直于抗折测试的受力方向, 0°)能够为混凝土提供更有效的抗折增强作用,从而提升整体力学性能^[24, 25]。因此,拥有更高 0° 取向纤维占比的 VRP0A75 和 VRP30A50 组相比其他组拥着更加优异的力学性能。

研究表明^[26],骨料的形状和表面特性会影响纤维在 UHPC 中的分布与取向,纤维的倾斜角度对其拔出荷载有显著增强影响,垂直于受力方向的纤维取向更有利于增强混凝土的抗弯与抗折强度。VRA 的棱角形状通过改变纤维取向到低角度,使有更多的纤维分布在垂直于受力方向的取向,从而提高 UHPC 在受力时抵抗破坏的能力,因此随着 VRA 取代 SS 的比例提高,UHPC 的抗折强度会提升。当 VRA100%替代 SS 时,摩擦力会增大,颗粒-纤维碰撞可能会导致局部团聚,降低纤维的取向效率,因此 UHPC 的抗折强度会出现下降。随着 VRP 替代水泥量增加, 0° 纤维占比逐渐增加,这与 VRP 增加流动度,提升纤维的顺浇筑方向流动相关,高流动度为纤维定向流动提供更强的引导作用。当

10%VRP 替代时,UHPC 的抗折强度比 VRP0A50 更高。然而,随着 VRP 进一步替代水泥,UHPC 材料的抗折强度出现了下降,这与基体强度的下降有关。

2.5 纳米压痕

上述火山岩材料对 UHPC 微观结构的优化,在本节进一步通过纳米压痕验证了其对界面性能的提升效果。如图 10a~图 10b 所示是样品 VRP0A0 与 VRP0A100 的不同骨料界面过渡区图像。图 10c~图 10d 是纳米压痕的 K 均值聚类结果及其 95%置信椭圆。纳米压痕点分为 3 个聚类(Cluster 1, 2, 3),分别代表界面过渡区、基体、骨料。弹性模量分布在 $0\sim 40$ GPa 之间的聚类对应混凝土中的多孔区域以及低密度的 C-S-H 凝胶。较低的力学性能反映了这些物相的疏松结构特征,其中孔隙和微裂纹的存在显著降低了此区域的微观力学性能。对应弹性模量为 $30\sim 60$ GPa 的聚类主要代表高密度 C-S-H 凝胶和其他水化产物,是混凝土基体的主要承载相。弹性模量为 $50\sim 90$ GPa 的聚类对应未水化的水泥颗粒(如 C_3S 、 C_2S)和细骨料相。这些相的高硬度值反映了其固有的晶体结构特征,在混凝土微观结构中起到骨架作用。SS 与基体界面处的纳米压痕结果显示,3 个聚类中心点对应的弹性模量分别为 14.5 GPa (Cluster 1)、40.1 GPa (Cluster 2)、67.9 GPa (Cluster 3)。而 VRA 与基体界面处的纳米压痕结果显示,3 个聚类中心点对应的弹性模量分别为 21.7 GPa (Cluster 1)、51.4 GPa (Cluster 2)、68.8 GPa (Cluster 3)。对比分析表明,VRA 的 ITZ 各聚类的弹性模量均显著高于 SS 的 ITZ。特别是在力学性能较低的聚类(Cluster 1)中,VRA 界面的弹性模量(21.7 GPa)比 SS 界面(14.5 GPa)提升了 49.7%。

VRA 表面的不规则棱角结构显著增强了骨料与水泥基体的机械咬合作用。有研究表明^[27, 28],骨料表面的粗糙度和棱角性,能够提供更多的机械咬合点,在受压时能减少界面微裂缝的产生和扩展。另一方面,VRA 表面富含活性二氧化硅^[5],能够与水泥水化产物发生火山灰反应。这种火山灰反应虽然缓慢,但是会逐渐生成二次水化产物填充孔隙并优化 ITZ,增强 ITZ 力学性能。因此,VRA 与水泥基体的界面相比 SS 与水泥基体的界面有更高的微观力学性能。在 Cluster 2 中,VRA 样品的水泥浆体弹性模量(51.4 GPa)相比 SS 样品的水泥浆体弹性模量(40.1 GPa)提升了 28.2%,表明 VRA 的 ITZ 的水化产物密度更高,结构更加致密^[29-31]。2 个样品

在 Cluster 3 的弹性模量差异相对较小,这是因为该聚类主要由未水化颗粒和骨料组成,受界面效应影响较小。VRA 的加入会对 UHPC 材料的微观力学

性能进行改善,这种改善会反映在宏观力学性能上,因此在适当替代范围内,随着 VRA 对 SS 取代量的提高,UHPC 材料的抗压强度提高。

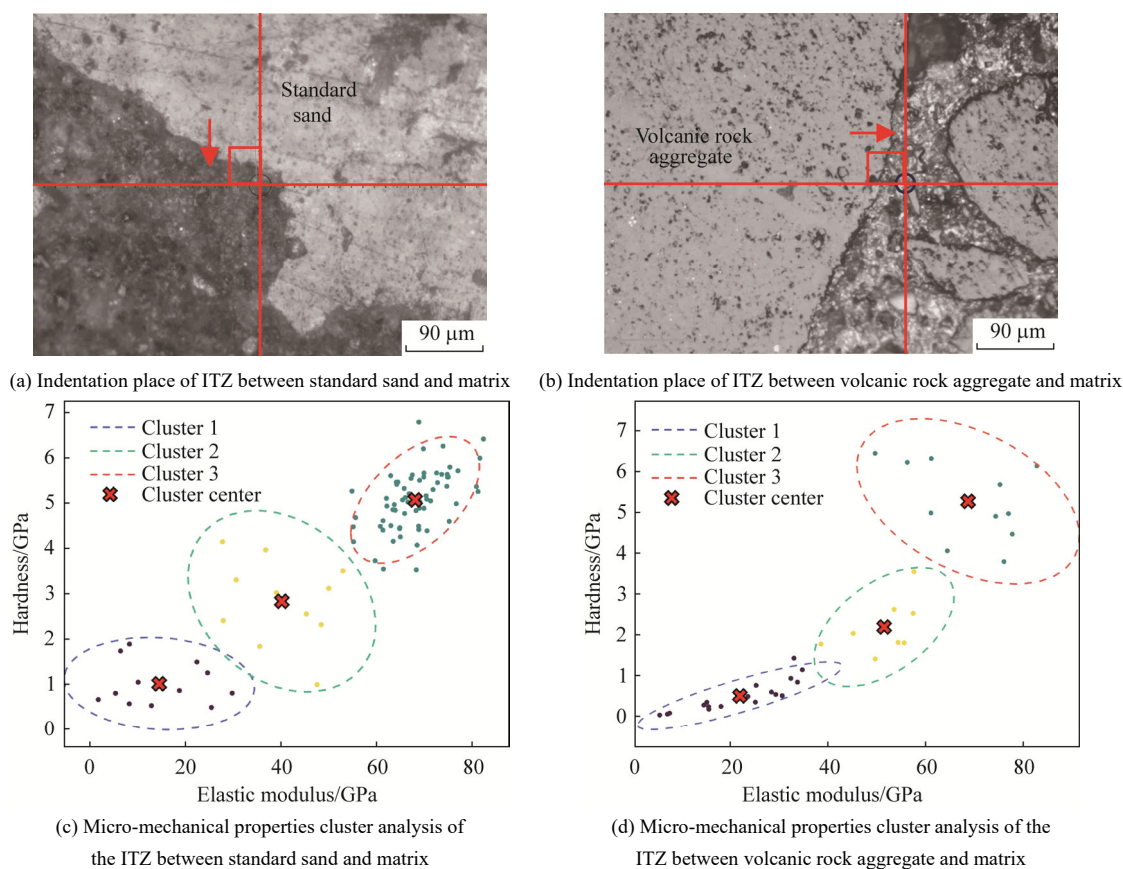


图 10 UHPC 纳米压痕分析
Fig. 10 Nanoindentation analysis of UHPC

2.6 水化热

从图 11 中可以看到,随着水化时间的延长,各组的 3 d 水化放热总量发生了改变。具体来说,VRP0A100 出现了最大的 3 d 累积放热量,而最低值出现在 VRP0A0 组。随着 VRP 对水泥的替代量提高,3 d 累计放热量呈现先增后降趋势,最高值出现在 VRP20A50 组,而 VRP0A50 与 VRP30A50 组则显示最低值。其次,在水化热放热功率的结果中,随着 VRA 掺量的降低,水化热放热峰值出现的时间被推迟,同时最高放热功率也随着 VRA 的替代量降低而下降。在火山岩粉替代水泥的实验组中,随着火山岩粉替代水泥量的提高,最大放热峰出现的时间被延迟,并且最大放热量也逐步降低。

VRA 替代 SS 时,骨料的粗糙界面增加了其与水泥基体的接触面积,其次,UHPC 微观结构的发展与骨料-基质界面区(ITZ)的形成过程有关。对于

微观表面相对粗糙的骨料,水化产物更容易在骨料-基质界面处析出和黏附,这种现象常见于纤维、骨料和修补材料等具有丰富表面和界面特性的原材料中。水化产物似乎更难在光滑的微观表面上填充 ITZ。此外,宏观的多角特性可能会给硬化过程带来更多的局部颗粒堆积缺陷。这些缺陷不会对砂浆的流变性能产生反馈,但往往会对长期性能产生不利影响。另一方面,VRA 表面具有活性物质,这些活性物质会与水泥反应生成二次水化产物,该过程会产生额外放热,导致高 VRA 掺量的 UHPC 的放热功率与累积放热量高于 SS 组。

研究表明^[32],火山岩粉可通过二次水化反应增强水泥水化,但高掺量时由于 VRP 的活性较低,抑制了水泥水化的进行。另一方面,火山岩粉的火山灰反应发生时间相较于水泥水化反应更加延迟一些,因此早期 VRP0A50 的放热功率峰值最高。随着火山岩粉的二次水化反应进行,掺入火山岩粉

的组别累积放热量逐渐增加, 在 3 d 时 VRP10A50 和 VRP20A50 的累积放热量超过了 VRP0A50。因此, 虽然加入火山岩粉进行取代减少了 UHPC 中水

泥的用量, 但是在低掺量时其对 UHPC 材料的早期力学性能只有小幅削弱, 并且在后期力学性能会出现持平。

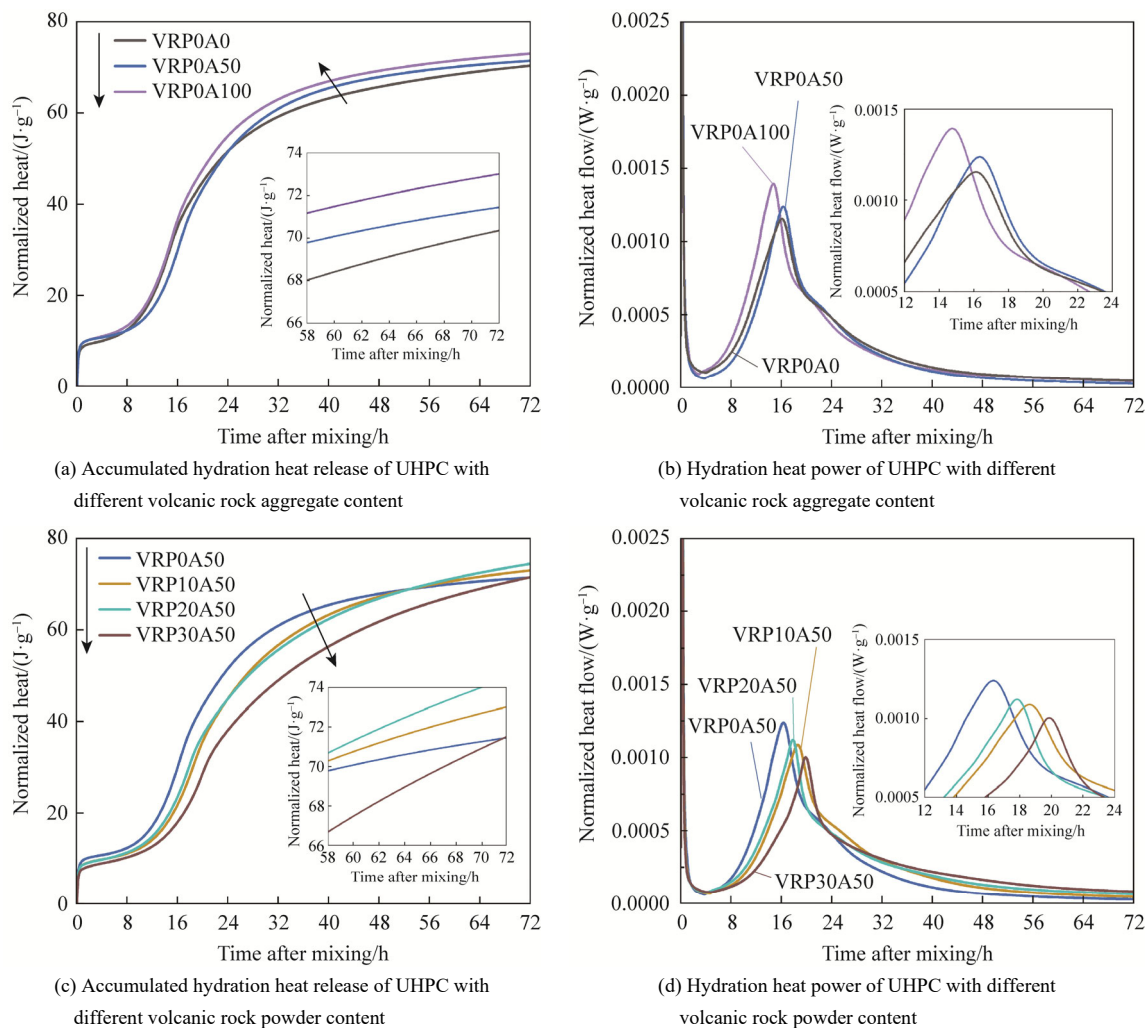


图 11 UHPC 水化热分析
Fig. 11 Hydration heat analysis of UHPC

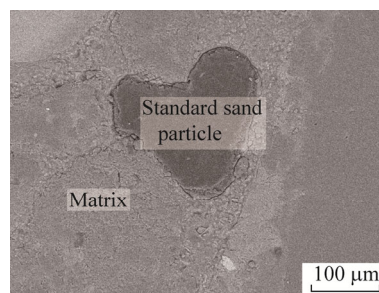
2.7 火山岩协同增强机制分析

基于 2.1~2.6 节的实验数据, 本节从物理和化学角度分析协同增强机制。骨料的特征和形貌会显著影响混凝土的性能和微观结构。火山岩作为火山喷发后留下的自然岩石, 其成分和理化性质比常用的 SS 更为复杂。骨料的形貌对骨料堆积及力学性能有一定影响。图 12 为掺入了 SS 和 VRA 的 UHPC 的 BSE 图片。SS 边缘与基体之间出现了一些界面结合不紧密的地方, 存在一些裂纹。而 VRA 得益于其棱角状的结构, 与基体材料结合更加紧密。棱角性表面和粗糙纹理与水泥基体形成三维机械咬合结构。SS 因表面光滑且棱角性较低, 与基体的接触以“点接触”为主, 缺乏有效的机械锚固点, 界面黏结表现不如 VRA。研究表明, 粗糙表面骨料通

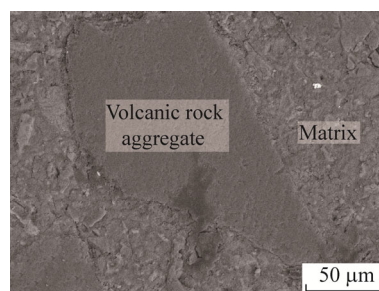
过在其表面凹凸不平处沉积水泥水化产物, 增强了与水泥浆体之间的机械咬合作用^[33]。这种增强效应源于棱角性表面增加了实际接触面积, 形成了有效的机械锚固点, 而光滑骨料的点接触模式限制了界面黏结强度的发挥^[34]。

为定量揭示骨料形貌参数对 UHPC 性能的阈值效应, 本工作建立了二次回归模型, 如图 13a~图 13c 所示, Form 2D 和 GA 与 UHPC 的抗压强度以及工作性能均呈现显著的二次关系($R^2 = 0.773 \sim 0.910$)。表面粗糙度与 UHPC 抗压强度及流动度也呈现二次回归关系, 但是模型拟合度($R^2 \approx 0.682$)低于宏观形貌参数(GA, Form 2D)的模型。GA 和 Form 2D 作为宏观形貌参数, 可以直接对 UHPC 材料的宏观性能进行影响。而表面粗糙度作为微观形貌参

数,其影响机制是通过增强机械咬合以优化界面过渡区,以及增加颗粒间摩擦以调控流变行为,来实现对抗压强度与流动度的间接影响。计算得出的最优形貌区间(表面粗糙度为 224~244 μm , Form 2D $\approx$ 6.63, GA=3167~3286)表明,骨料的形貌参数存在明确的优化范围,在 VRA 与 SS 配合使用的时候可以更好的性能,过度追求高棱角性或粗糙度反而会使 UHPC 的性能出现下降。另一方面,本工作建立了棱角性与纤维取向的回归模型,如图 13d 所示,为骨料-纤维协同增强机制提供了直接证据。当新拌混凝土流动时,VRA 这种高棱角性骨料颗粒会受到流体剪切力的作用而发生转动和重新定向,VRA 的替代通过指数关系显著降低纤维角度。在初始加入 VRA 替代 SS 时,排列的 VRA 形成了纤维的排列通道,限制纤维在垂直方向的运动空间,使得纤维角度出现急剧下降,促使纤维向水平方向定向排列。随着更高比例 VRA 的加入,纤维已经排列为水平朝向分布,VRA 的进一步替代使得纤维角度出现小幅下降。



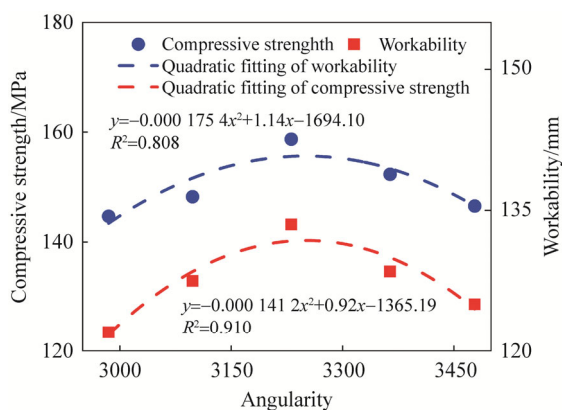
(a) Standard sand



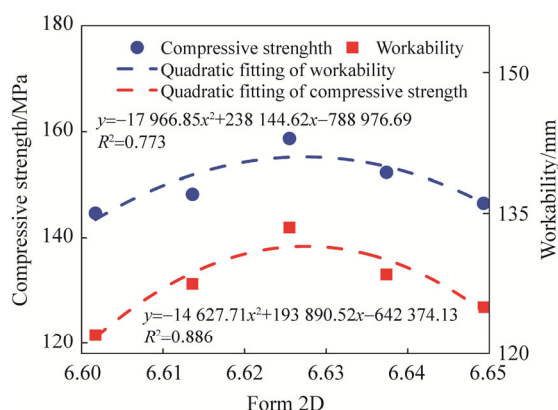
(b) Volcanic rock aggregate

图 12 UHPC 材料微观形貌分析

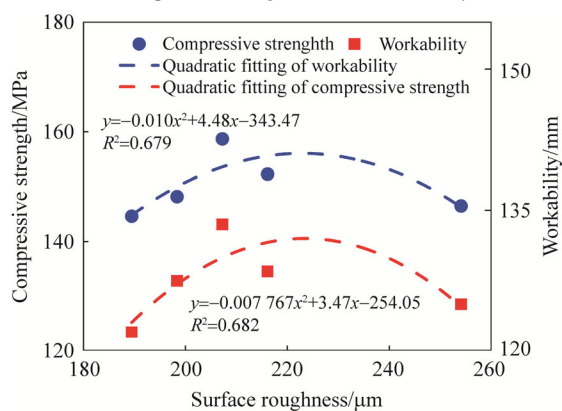
Fig. 12 Microscopic morphology of UHPC materials



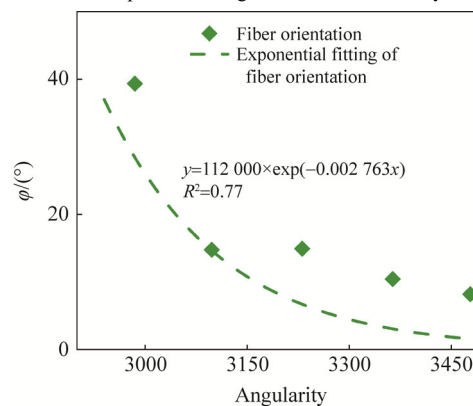
(a) Correlation analysis between angularity and compressive strength as well as workability



(b) Correlation analysis between Form 2D and compressive strength as well as workability



(c) Correlation analysis between surface roughness and compressive strength as well as workability



(d) Correlation analysis between angularity and fiber orientation (φ)

图 13 骨料形貌特征参数与 UHPC 材料各项性能的相关性分析

Fig. 13 Correlation analysis between aggregate morphology and various properties of UHPC materials

VRA 与基体的紧密结合机制可从其物理化学特性的协同作用展开分析,如图 14 所示。首先,VRA 的力学性能与标准砂差距较小,在替代标准砂生成 UHPC 时不会因为自身强度不足而导致力学性能下降。其次,颗粒形状对材料的力学行为具有重要影响。颗粒间的相互作用主要通过接触力实现,而接触力的大小和方向取决于颗粒的形状特征和接触几何。掺入 SS 的 UHPC 基体的湿堆积密度较低,导致内部孔隙率较高,形成疏松的 ITZ。这种薄弱界面在受力时易成为裂缝扩展的通道。这些差异的本质在于骨料表面特性对界面微结构的调控作用。最后,VRA 的棱角性与粗糙表面使得其会在颗粒之间形成三维机械咬合结构,与水泥基体的真实接触面积显著增加,这一现象在界面力学研究中被称为“机械锚固效应”。这种结构特征通过增加骨料与基体的机械嵌锁

点,有效提升了界面强度^[34]。研究表明,水化产物更难在光滑的微观表面上填充 ITZ,而 VRA 的粗糙微观表面则更有利于水化产物的附着^[21]。因此,水化热结果中 VRP0A100 的累计放热量大于 VRP0A50 与 VRP0A0,而纳米压痕结果中 VRA 界面的力学性能也优于 SS 界面的力学性能。火山岩的棱角性通过机械锚固与活性成分二次水化反应的双重机制,提升了界面性能;而 SS 的光滑表面和低粗糙度却不能促进界面力学性能的发展,导致 VRP0A0 的力学性能与界面力学性能较低。然而,VRA 的过量掺入也不利于 UHPC 的性能表现。宏观的多角特性可能会给硬化过程带来更多的颗粒堆积缺陷。此外,棱角性骨料在受压时会因为机械啮合加剧颗粒间的变形不协调,导致应力集中,从而增加失效风险^[35]。因此,在使用 VRA 时,需要考虑和圆形骨料配合使用。

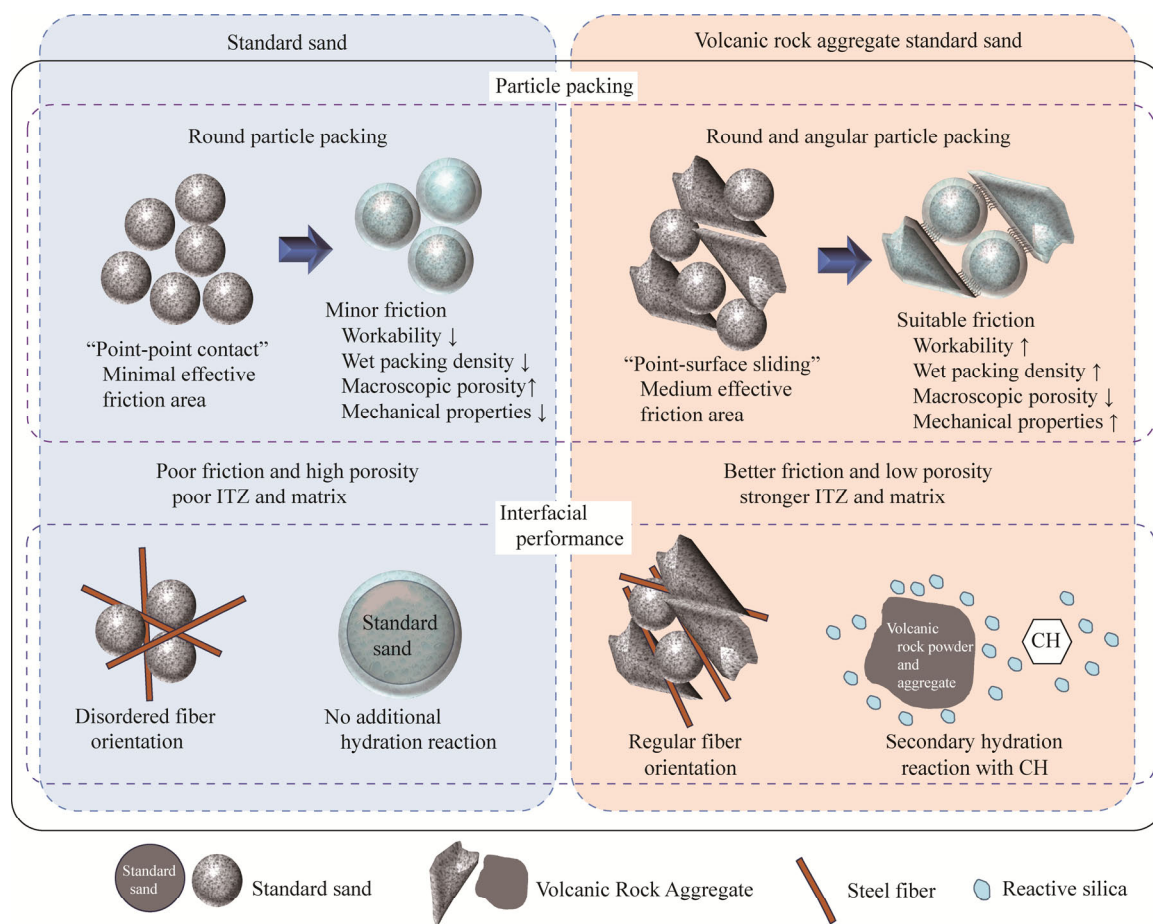


图 14 火山岩材料在 UHPC 中的增强作用

Fig. 14 Enhancement effect of volcanic rock on UHPC

另一方面,当新拌混凝土流动时,棱角性骨料颗粒会受到流体剪切力的作用而发生转动和重新定向。由于棱角性颗粒具有不对称的几何形状,在

流动中骨料的长轴方向会趋向于沿着流动方向排列,以减少流动阻力^[36]。棱角性骨料的取向排列会进一步影响纤维的分布:当骨料颗粒沿流动方向排

列时, 它们的长轴方向与流动方向一致, 这样的排列方式为纤维提供了更明确的引导通道, 使纤维更容易沿着骨料排列的方向(即流动方向)定向^[37]。同时, 已排列的棱角性骨料形成的通道减少了纤维在垂直方向的运动空间, 促进了纤维的水平取向。这种纤维取向的优化使得更多纤维能够垂直于主要受力方向, 从而在抗弯荷载作用下发挥更有效的增强作用, 提升 UHPC 的抗折性能^[38]。

火山岩中占比较高的钠长石、钙长石等矿物相是具有反应活性的, 在碱性环境下能够发生反应生成凝胶类物质^[39]。在本文的水化热结果中, 加入火山岩粉末的 VRP10A50 与 VRP20A50 的累计放热量大于 VRP0A50, 证明了火山岩粉末二次水化反应的存在。这种二次水化反应的产物能够填充孔隙, X-CT 的测试结果显示, 火山岩粉末的加入使得 VRP10A50 与 VRP20A50 的孔隙率降低, 在水泥用量减少的情况下, 二者抗压强度与 VRP0A50 基本持平。这种二次反应不仅使材料的力学性能持平于原有的性能, 还实现了绿色建材的可持续发展目标。

3 结论

1) VRA 替代 SS 时, UHPC 的流动度与湿堆积密度呈现先增后减的变化趋势, 在中等替代率时达到最优值; 火山岩粉替代水泥时, 低掺量优化湿堆积密度, 高掺量提升流动性。这种现象与 VRA 以及 SS 的宏观形貌与微观粗糙度导致的摩擦效应有关。

2) VRA 的加入在 UHPC 中不会引起明显的 ASR 膨胀。VRA 与 SS 的混合系统能显著降低 UHPC 孔隙率, 减少大尺寸孔隙数量, 其棱角结构促使钢纤维向水平方向定向排列, 增强抗压与抗折性能; 火山岩粉通过火山灰反应填充微观孔隙, 在适当替代量时优化孔隙分布结构。这种协同效应源于 VRA 棱角表面的机械锚固作用与火山岩粉的二次水化反应, 共同优化了材料内部结构。

3) VRA 因其表面活性物质与粗糙界面, 促进水泥早期水化, 提高水化热释放; VRP 则通过火山灰反应优化界面微结构, 但高掺量时因 VRP 活性较低及稀释效应抑制了水泥水化的进行。纳米压痕与聚类分析结果证实, VRA 与基体形成的 ITZ 的力学性能显著高于 SS 的 ITZ, 这归因于微观粗糙表面提供的三维机械咬合结构与活性成分促进了二次水化反应。

4) 本工作测试了基于不同形貌骨料的形貌特征-堆积效率-界面性能, 验证了火山岩材料制备优异性能 UHPC 的可行性, 使用棱角-圆形混合骨料体系可以增强 UHPC 的力学性能。火山岩材料的增强源于自身强度的优异、对颗粒接触的优化及对微观界面的增强。研究成果不仅拓展了 UHPC 原材料来源, 降低了工程成本, 还为火山岩资源富集地区的高性能混凝土设计提供了新的理论框架与实验依据, 对推动建筑材料可持续发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1–24.
CHEN Baochun, JI Tao, HUANG Qingwei, et al. J Archit Civ Eng, 2014, 31(3): 1–24.
- [2] 黄政宇, 阳东翱. 超高性能混凝土基体的组成与微结构关系研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(12): 4104–4111.
HUANG Zhengyu, YANG Dongao. Bull Chin Ceram Soc, 2017, 36(12): 4104–4111.
- [3] 余睿, 范定强, 水中和, 等. 基于颗粒最紧密堆积理论的超高性能混凝土配合比设计[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8): 1145–1154.
YU Rui, FAN Dingqiang, SHUI Zhonghe, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(8): 1145–1154.
- [4] FAN T. Development of high modulus concrete for tall buildings [D]. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology, 2017.
- [5] WONG H D, TAM W S M. Feasibility study on use of supplementary cementitious materials to mitigate alkali-silica reaction in concrete made with volcanic aggregates: GEO Report No. 354[R]. Hong Kong: Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department, The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, 2022.
- [6] ABBAS S, ABBASS W, NEHDI M L, et al. Investigation of alkali-silica reactivity in sustainable ultrahigh performance concrete[J]. Sustainability, 2021, 13(10): 5680.
- [7] SALAIN I. Effect of water/cement and aggregate/cement ratios on consistency and compressive strength of concrete using volcanic stone waste as aggregates[J]. Civ Eng Archit, 2021, 9(6): 1900–1908.
- [8] SINGH S, PATEL S. Development of angular-shaped lightweight coarse aggregate with low calcium fly ash using autoclave curing - Experimental and microstructural study[J]. J Build Eng, 2023, 79: 107860.
- [9] MATIUSHIN E, SIZYAKOV I, SHVETSOVA V, et al. The properties and behavior of ultra-high-performance concrete: The effects of aggregate volume content and particle size[J]. Buildings, 2024, 14(9): 2891.
- [10] KUPWADE-PATIL K, CHIN S, ILAVSKY J, et al. Hydration kinetics and morphology of cement pastes with pozzolanic volcanic ash studied via synchrotron-based techniques[J]. J Mater Sci, 2018, 53(3): 1743–1757.
- [11] MORA C F, KWAN A K H. Sphericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing[J]. Cem Concr Res, 2000, 30(3): 351–358.
- [12] ALI H A, XUAN D X, POON C S. Assessment of long-term reactivity of initially lowly-reactive solid wastes as supplementary cementitious materials (SCMs)[J]. Constr Build Mater, 2020, 232: 117192.

- [13] YU R, SPIESZ P, BROUWERS H J H. Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRC)[J]. *Cem Concr Res*, 2014, 56: 29–39.
- [14] 张俊楷, 乔江妮, 倪祖甲, 等. 基于精确矿物晶体模型的玄武岩宏观力学性质及波速分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2025, 44(2): 442–458.
- ZHANG Junkai, QIAO Jiangmei, NI Zujia, et al. *Chin J Rock Mech Eng*, 2025, 44(2): 442–458.
- [15] VILLENEUVE M C, HEAP M J, KUSHNIR A R L, et al. Estimating *in situ* rock mass strength and elastic modulus of granite from the Soultz-sous-Forêts geothermal reservoir (France)[J]. *Geotherm Energy*, 2018, 6(1): 11.
- [16] LIU K N, YIN T Y, FAN D Q, et al. Multiple effects of particle size distribution modulus (q) and maximum aggregate size (D_{max}) on the characteristics of Ultra-High Performance concrete (UHPC): Experiments and modeling[J]. *Cem Concr Compos*, 2022, 133: 104709.
- [17] DS/EN 1015-3: 1999 Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)[S].
- [18] 国家市场监督管理总局. 水泥胶砂强度检验方法(ISO法): GB/T 17671—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [19] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土试验规程: SL/T 352—2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
- [20] YOUNESS D, YAHIA A, TAGNIT-HAMOU A. Development of viscosity models of concentrated suspensions: Contribution of particle-size and shape indices[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 346: 128335.
- [21] YIN T Y, LIU K N, FAN D Q, et al. Derivation and verification of multilevel particle packing model for Ultra-High Performance Concrete (UHPC): Modelling and experiments[J]. *Cem Concr Compos*, 2023, 136: 104889.
- [22] YANG R, YU R, SHUI Z H, et al. The physical and chemical impact of manufactured sand as a partial replacement material in Ultra-High Performance Concrete (UHPC)[J]. *Cem Concr Compos*, 2019, 99: 203–213.
- [23] SAILLIO M, BAROGHEL-BOUNY V, BERTIN M, et al. Phase assemblage of cement pastes with SCM at different ages[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 224: 144–157.
- [24] 梁兴文, 胡翔翔, 于婧, 等. 钢纤维对超高性能混凝土抗弯力学性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(3): 722–731.
- LIANG Xingwen, HU Aoxiang, YU Jing, et al. *Acta Mater Compos Sin*, 2018, 35(3): 722–731.
- [25] 王强. 钢纤维取向角对超高性能混凝土抗拉强度的影响[J]. *混凝土与水泥制品*, 2019(1): 51–54.
- WANG Qiang. *China Concr Cem Prod*, 2019(1): 51–54.
- [26] CAO Y Y Y, YU Q L. Effect of inclination angle on hooked end steel fiber pullout behavior in ultra-high performance concrete[J]. *Compos Struct*, 2018, 201: 151–160.
- [27] 李良顺, 李化建, 石贺男, 等. 基于弹性模量的高强混凝土抗压强度预测模型[J]. *建筑材料学报*, 2025, 28(7): 620–627.
- LI Liangshun, LI Huajian, SHI Henan, et al. *J Build Mater*, 2025, 28(7): 620–627.
- [28] 杨久俊, 董延玲, 海然, 等. 骨料表面化学预处理对界面区的组分梯度分布和混凝土力学性能的影响I: 骨料化学预处理对其表面特性与界面过渡区结构的影响[J]. *混凝土与水泥制品*, 2003(6): 1–5.
- YANG Jiujun, DONG Yanling, HAI Ran, et al. *China Concr Cem Prod*, 2003(6): 1–5.
- [29] SCRIVENER K L, CRUMBIE A K, LAUGESEN P. The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete[J]. *Interface Sci*, 2004, 12(4): 411–421.
- [30] DIAMOND S, HUANG J D. The ITZ in concrete—a different view based on image analysis and SEM observations[J]. *Cem Concr Compos*, 2001, 23(2–3): 179–188.
- [31] OLLIVIER J P, MASO J C, BOURDETTE B. Interfacial transition zone in concrete[J]. *Adv Cem Based Mater*, 1995, 2(1): 30–38.
- [32] LIU S, WANG Q, LIU Y, et al. Effects of tuff powder on the hydration properties of cement-based materials under different curing temperatures[J]. *Sustainability*, 2022, 14(22): 14691.
- [33] HILAL A A. Effect of aggregate roughness on strength and permeation characteristics of lightweight aggregate concrete[J]. *J Eng*, 2021, 2021: 9505625.
- [34] LEE S J, LEE C H, SHIN M, et al. Influence of coarse aggregate angularity on the mechanical performance of cement-based materials[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 204: 184–192.
- [35] NITKA M, TEJCHMAN J. Comparative DEM calculations of fracture process in concrete considering real angular and artificial spherical aggregates[J]. *Eng Fract Mech*, 2020, 239: 107309.
- [36] 崔智文, 王泽, 蒋新宇, 等. 非球形颗粒两相流的数值模拟研究进展[J]. *力学进展*, 2022, 52(3): 623–672.
- CUI Zhiwen, WANG Ze, JIANG Xinyu, et al. *Adv Mech*, 2022, 52(3): 623–672.
- [37] 黄煌煌, 滕乐, 高小建, 等. 流变与浇筑方式对UHPC纤维分散和取向的影响[J]. *材料导报*, 2024, 38(24): 136–141.
- HUANG Huanghuang, TENG Le, GAO Xiaojian, et al. *Mater Rep*, 2024, 38(24): 136–141.
- [38] 张驰, 边亚东, 陶宏利, 等. 钢纤维高强自密实混凝土物理力学性能研究[J]. *建材技术与应用*, 2023(5): 26–31.
- ZHANG Chi, BIAN Yadong, TAO Hongli, et al. *Res Appl Build Mater*, 2023(5): 26–31.
- [39] 喻乐华, 周双喜, 欧辉, 等. 用作混凝土掺合料的火山岩的组成与火山灰活性[J]. *硅酸盐学报*, 2013, 41(10): 1387–1394.
- YU Lehua, ZHOU Shuangxi, OU Hui, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2013, 41(10): 1387–1394.

作者贡献声明:

刘康宁: 论文构思、设计研究方法和实验方案、调查研究、撰写初稿、绘制图表

范定强: 设计研究方法和实验方案、分析/综合数据并推导结论、验证

尹天一: 软件使用、数据管理、绘制图表

陆建鑫: 论文构思、监督指导、审阅与修订

余睿: 获取资助、提供资源、项目管理、审阅与修订

潘智生: 提供资源、获取资助、监督指导

Physicochemical Synergistic Mechanisms of Volcanic Rock Materials in Ultra-High Performance Concrete

LIU Kangning^{1,2}, FAN Dingqiang², YIN Tianyi¹, LU Jianxin^{2,3}, YU Rui¹, POON Chisun²

(1. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China;

3. School of Intelligent Civil and Ocean Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518000, Guangdong, China)

Extended Abstract

Introduction Ultra-high performance concrete (UHPC) has emerged as a critical material for achieving structural lightweight design and enhanced longevity in civil engineering due to its exceptional mechanical properties and durability. The optimization of UHPC performance relies on particle gradation design for constructing dense packing systems and interfacial transition zone (ITZ) regulation to enhance matrix continuity. However, traditional UHPC formulations depend on resource-intensive materials such as river sand and silica fume, while existing particle packing theories predominantly assume ideal spherical particles, lacking systematic understanding of the coupling mechanisms associated with natural aggregate complex morphological characteristics. Volcanic rock, characterized by rich active substances and irregular angular morphology, offers a novel material pathway for UHPC performance regulation through multi-scale morphological control when processed into aggregates (replacing standard sand) and mineral admixtures (volcanic rock powder replacing cement).

Methods The study systematically investigated the physicochemical synergistic enhancement mechanisms of volcanic rock materials in UHPC through comprehensive experimental analysis. Volcanic rock aggregates (VRA) with varying replacement ratios (0%–100%) of standard sand and volcanic rock powder (VRP) with different substitution levels (0%–30%) of cement were incorporated into UHPC mixtures. The modified Andreasen-Andersen model guided the mix design optimization. Fresh properties were evaluated through flow spread tests and wet packing density measurements according to the established method. Mechanical performance was assessed *via* compressive and flexural strength tests at 3, 7 d, and 28 d. Accelerated ASR expansion was measured using mortar bar method. Three-dimensional structural analysis using X-ray computed tomography (CT) characterized macropore structure and fiber orientation distribution. Hydration processes were monitored using isothermal calorimetry, while microstructural features were examined through scanning electron microscopy (SEM) and nanoindentation testing.

Results and Discussion The workability and wet packing density of fresh UHPC exhibited an initial increase followed by a decrease with increasing VRA replacement ratios, achieving optimal values at 50% replacement. Flow spread increased from 122 mm to 133.5 mm before declining to 128.5 mm, while wet packing density improved from 0.803 to 0.819 before decreasing to 0.808. VRP substitution demonstrated a monotonic increasing trend in flowability, with wet packing density peaking at 10% replacement. This phenomenon was attributed to the friction network regulation mechanism of "angular-rounded" particle interactions and particle gradation optimization by volcanic rock powder.

Mechanical performance analysis revealed that 75% VRA replacement maximized flexural strength across all curing ages, while 20% VRP substitution yielded optimal 28 d compressive strength. X-ray CT analysis demonstrated that 50% VRA replacement minimized total porosity, with large pores (10^7 – 10^8 μm^3) systematically decreasing as VRA content increased. The angular morphology of volcanic rock aggregates promoted preferential horizontal alignment of steel fibers, with significant clustering in low-angle regions (0° – 30°), thereby substantially enhancing UHPC flexural performance. VRP optimized pore distribution structure through pozzolanic reactions filling microscopic pores at appropriate replacement levels, achieving a dynamic balance between secondary hydration benefits and cement dilution effects. Nanoindentation results confirmed that VRA-matrix interfacial transition zones exhibited superior mechanical properties compared to those of standard sand interfaces, with elastic modulus improvements of approximately 49.7%.

Calorimetric analysis revealed that VRA incorporation increased 3 d cumulative heat release compared to standard sand groups, attributed to surface active substances and enhanced interfacial contact promoting early cement hydration. VRP exhibited delayed hydration kinetics with peak heat release occurring at later ages, with 20% replacement achieving the highest 3 d cumulative heat release due to optimized pozzolanic reaction contributions, while higher dosages (30%) inhibited hydration processes due to lower reactivity of VRP and dilution effect.

Conclusions This study established that volcanic rock materials effectively enhance UHPC performance through physicochemical synergistic mechanisms, with optimal performance achieved at 50%–75% VRA replacement and 20% VRP substitution. The angular morphology of volcanic rock aggregates improved fiber orientation distribution and mechanical interlocking with the cement matrix, while volcanic rock powder optimized particle packing efficiency and promoted secondary hydration reactions. The enhancement mechanisms originate from three synergistic factors: superior intrinsic mechanical properties comparable to standard sand, angular particle morphology creating three-dimensional mechanical interlocking structures that optimize packing efficiency, and surface active components promoting pozzolanic reactions that densify interfacial microstructure. These findings provide experimental evidence for extending particle packing theory beyond conventional spherical particle assumptions, establishing critical relationships between "morphological characteristics-packing efficiency-interface performance" and macroscopic UHPC properties for complex-shaped aggregates design.

Keywords volcanic rock; ultra-high performance concrete; particle morphology; pozzolanic reaction