

风积沙与再生复合微粉对超高性能混凝土力学性能的影响

刘超 林鑫 刘化威 胡天峰

Effect of aeolian sand and recycled composite micro-powder on mechanical properties of ultra-high performance concrete

LIU Chao, LIN Xin, LIU Huawei, HU Tianfeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211119.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超高性能混凝土在环境温度变化下的力学性能试验研究

Experiment study on mechanical properties of ultra-high performance concrete under ambient temperature change

复合材料学报. 2021, 38(10): 3495–3503 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201208.001>

再生钢纤维增韧超高性能混凝土的力学性能

Mechanical properties of recycled steel fiber reinforced ultra-high-performance concrete

复合材料学报. 2019, 36(8): 1949–1956 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180921.001>

纤维增强树脂复合材料约束超高性能混凝土轴压性能的细观数值模拟

Meso-scale numerical simulation of axial compression performance of fiber reinforced polymer composite-confined ultra-high performance concrete

复合材料学报. 2020, 37(7): 1629–1638 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190827.001>

钢纤维对超高性能混凝土抗弯力学性能的影响

Effect of steel fibers on the flexural response of ultra-high performance concrete

复合材料学报. 2018, 35(3): 722–731 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170612.005>

玄武岩纤维对喷射混凝土力学性能及微观结构的影响机制

Influence mechanism of basalt fibre on the toughness and microstructure of spray concrete

复合材料学报. 2019, 36(8): 1926–1934 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180929.001>

钢纤维类型对超高性能混凝土高温爆裂性能的影响

Influence of different types of steel fiber on explosive spalling behavior of ultra-high-performance concrete exposed to high temperature

复合材料学报. 2018, 35(6): 1599–1608 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170821.009>

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20211119.003

风积沙与再生复合微粉对超高性能混凝土力学性能的影响



分享本文

刘超^{*1,2}, 林鑫¹, 刘化威², 胡天峰²

(1. 西安建筑科技大学 理学院, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055)

摘要: 以废弃砖和混凝土制成再生复合微粉部分取代水泥作为辅助胶凝材料, 以风积沙部分取代河砂协同制备超高性能混凝土 (Ultra-high performance concrete, UHPC), 采用修正的 Andreasen-Andersen (MAA) 颗粒堆积模型设计配合比。建立了考虑风积沙和再生复合微粉火山灰活性的抗压强度增长预测模型。研究了风积沙和复合微粉对 UHPC 力学性能的影响。结果表明: 风积沙等质量取代河砂的取代率为 30wt%、复合微粉等质量取代水泥的取代率为 10wt% 时, UHPC 力学性能最优。颗粒材料的粒径分布最佳, 形成了较高密实度的基体。同时, 风积沙和复合微粉活性成分的水化贡献改善了 UHPC 的微观结构, 进而提高其力学性能。

关键词: 超高性能混凝土; 风积沙; 再生复合微粉; 力学性能; 微观结构

中图分类号: TU528.041 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2022)11-5415-08

Effect of aeolian sand and recycled composite micro-powder on mechanical properties of ultra-high performance concrete

LIU Chao^{*1,2}, LIN Xin¹, LIU Huawei², HU Tianfeng²

(1. School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Ultra-high performance concrete (UHPC) was prepared by partially replacing cement with recycled composite micronized powder. The waste bricks and concrete were used as an auxiliary cementitious material. The river sand was partially replaced with anthracitic sand. The modified Andreasen-Andersen (MAA) particle accumulation model was used to design the proportions. A concrete strength growth prediction model considering the pozzolanic activity of aeolian sands and composite micro-powder was built. The effect mechanism of composite micro-powder and aeolian sand on the mechanical property of UHPC was studied. The results show that the mechanical properties of UHPC are optimal when the replacement rate of river sand by the equivalent mass of aeolian sand is 30wt% and the replacement rate of cement by the equivalent mass of composite micro-powder is 10wt%. The particle size distribution of granular materials is the best, forming a matrix with high compactness. At the same time, the hydration contribution of aeolian sand and composite micro-powder active components improves the microstructure and mechanical properties of UHPC.

Keywords: ultra-high performance concrete; aeolian sand; recycled composite micro-powder; mechanical property; microstructure

超高性能混凝土 (Ultra-high performance concrete, UHPC) 在制备过程中会使用大量的水泥 (900~1 100 kg/m³) 及天然砂、石英砂 (800~1 200 kg/m³) 等骨料资源, 给生态环境保护带来巨大的压力, 生产成本相对较高^[1], 亟待寻找更加绿色的 UHPC 生产方法。相关研究表明: 风积沙可以优化骨料

收稿日期: 2021-09-28; 修回日期: 2021-11-02; 录用日期: 2021-11-16; 网络首发时间: 2021-11-20 11:47:59
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211119.003>
基金项目: 国家自然科学基金 (52178251; 51878546); 陕西省杰出青年科学基金 (2020JC-46); 陕西省重点研发计划项目 (2018ZDCXL-SF-03-03-02; 2020SF-367); 陕西省科技创新基地 (2017KTPT-19)
通信作者: 刘超, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为建筑固废资源化与智能建造技术 E-mail: chaoliu@xauat.edu.cn
引用格式: 刘超, 林鑫, 刘化威, 等. 风积沙与再生复合微粉对超高性能混凝土力学性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5415-5422.
LIU Chao, LIN Xin, LIU Huwei, et al. Effect of aeolian sand and recycled composite micro-powder on mechanical properties of ultra-high performance concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(11): 5415-5422(in Chinese).

级配,改善混凝土的孔隙结构,加快水泥水化速度,提高混凝土工作、力学和耐久性能^[2-5];此外,再生复合微粉作为辅助胶凝材料时,可发挥较好的填充效应和反应活性,改善混凝土的微观结构,提高混凝土强度^[6-7]。

目前,采用风积沙制备 UHPC 力学性能的研究主要集中在风积沙取代率对宏观力学性能的影响^[8-9]。关于风积沙部分取代天然河砂,复合微粉作为辅助性胶凝材料制备 UHPC 的相关研究较少,而复掺这两种材料对 UHPC 力学性能影响的微观机制更是鲜有报道。鉴于此,本文探究复掺风积沙、复合微粉制备 UHPC 的可行性。研究风积沙和复合微粉对 UHPC 力学性能影响的微观机制;利用 X 射线衍射仪和扫描电子显微镜对混凝土水化产物和微观结构分析,揭示其水化特性,以期对固体废弃物在 UHPC 中的应用推广提供参考。

1 试验概况

1.1 原材料

胶凝材料:冀东水泥厂生产的 P·O 52.5R 普通硅酸盐水泥;北京正源益清公司生产的硅灰和 I 级超细粉煤灰,需水量比分别为 116wt%、89.4wt%;由陕西建新环保科技有限公司生产的再生砖和再生混凝土粗骨料,经颚式破碎机破碎成粒径在 0.16~5 mm 的再生细骨料,最后用球磨机根据不同时间段研磨成砖粉和混凝土粉,以砖粉:混凝土粉质量比为 6:4 混合成再生复合微粉:需水量比 104wt%,亚甲蓝 MB 值 2.0 g/kg。减水剂:江苏苏博特公司生产的 UHPC 专用减水剂,固含量为 40wt%,减水率大于 30%。细骨料:天然河砂,细度模数 2.67,表观密度 2 651 kg/m³;风积沙采自榆林市榆阳区城郊天然沙漠地表,细度模数 1.3,吸水率 1.5%,含泥量 1.4wt%,表观密度 2 632 kg/m³,氯离子含量和硫酸盐与硫化物质量分数分别为 0.046wt% 和 0.42wt%。钢纤维:苏州史尉克公司生产的平直镀铜钢纤维,直径 0.22 mm,长度 13.0 mm。胶凝材料粒度分布如图 1 所示,C 为水泥;CP 为再生混凝土粉,BP 为再生砖粉,CMP 为复合微粉;SF 为硅灰;UFA 为超细粉煤灰;RS 为河砂;AS 为风积沙。

1.2 配合比设计

采用修正的 Andreasen-Andersen 颗粒堆积模型^[10]得到混凝土的基本配合比,分析混合物中所用颗粒材料的最佳粒径分布,从而实现最紧密堆

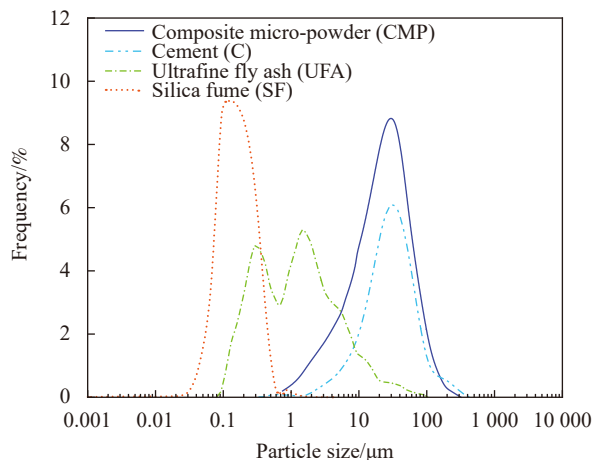


图 1 粉体材料的频率分布

Fig. 1 Frequency distribution of powder materials

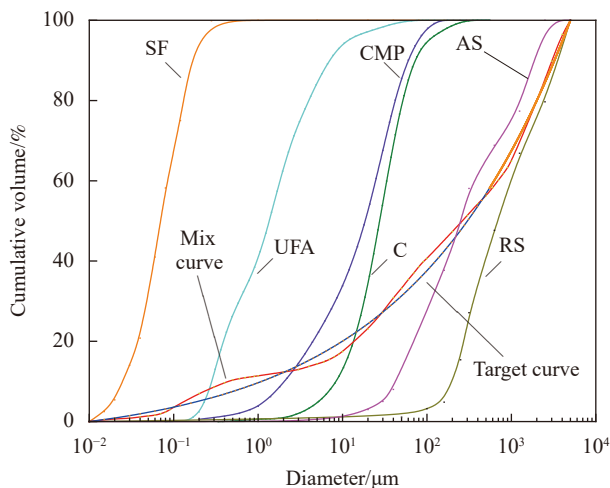
积体系,如下式:

$$P(D_i) = \frac{D_i^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q} \quad (1)$$

式中: $P(D_i)$ 是混合体系符合紧密堆积时的粒径分布; D_i 是粒径 (μm); $D_{\max}$ 是体系中的最大粒径; $D_{\min}$ 是最小粒径; q 是分布模量(取 0.23)。利用 MATLAB 对上式进行建模,采用最小二乘法要求目标堆积曲线 $P(D_i)$ 和实际堆积曲线 $U(D_i)$ 的均方差和 (S_{RS}) 最小来实现,即

$$S_{RS} = \sum_{i=1}^n [P(D_i) - U(D_i)]^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

图 2 为优化求解结果的曲线拟合图,依程序可得优化基本配合比为 SF : CMP : UFA : C : RS :



AS—Aeolian sand; RS—River sand

图 2 曲线拟合

Fig. 2 Curve fitting

AS=0.11∶0.16∶0.11∶0.62∶0.69∶0.26 (胶凝材料总质量为 1)。AS 等质量取代 RS 的最佳取代率为 26wt%；CMP 等质量取代水泥的最佳取代率为

16wt%。设计 UHPC 配合比如表 1 所示。CMP0AS0 表示 CMP 掺量为 0wt%、AS 掺量为 0wt% 的对照组试件，其他为试验组。

表 1 超高性能混凝土 (UHPC) 配合比
Table 1 Mix proportions of ultra-high performance concrete (UHPC)

Mix	Binder compositions/(kg·m ⁻³)					Water/ (kg·m ⁻³)	Superplasticizer/ (kg·m ⁻³)	Steel fiber/%	RS/ (kg·m ⁻³)	AS/ (kg·m ⁻³)
	C	Brick powder (BP)	Concrete powder (CP)	SF	UFA					
CMP0AS0	595	0	0	85	170	136	21.25	2.5	850.0	0.0
CMP10AS0	510	51	34	85	170				850.0	0.0
CMP20AS0	425	102	68	85	170				850.0	0.0
CMP0AS15	595	0	0	85	170				722.5	127.5
CMP10AS15	510	51	34	85	170				722.5	127.5
CMP20AS15	425	102	68	85	170				722.5	127.5
CMP0AS30	595	0	0	85	170				590.0	225.0
CMP10AS30	510	51	34	85	170				590.0	225.0
CMP20AS30	425	102	68	85	170				590.0	225.0
CMP0AS45	595	0	0	85	170				467.5	382.5
CMP10AS45	510	51	34	85	170				467.5	382.5
CMP20AS45	425	102	68	85	170				467.5	382.5

1.3 试验方法

工作性能通过测量新拌 UHPC 的坍落度来表征，该性能根据 GB/T 50080—2016^[11] 执行。根据 GB/T 31387—2015^[12] 规定，进行力学性能试验，采用 RP 类活性粉末混凝土的养护方式 1 进行养护。根据 GB/T 14684—2001^[13] 规定，测试并计算细骨料空隙率。

2 试验结果与分析

2.1 UHPC 工作性能

AS 和 CMP 掺量对新拌混凝土工作性能影响的试验结果见图 3。随着 AS 取代率的增大，坍落度呈现先增大后减小的趋势；随着 CMP 取代率的增大，坍落度逐渐降低。CMP0AS0、CMP0AS30、CMP20AS45 三组新拌混凝土的坍落度值分别为 247 mm、266 mm 和 233 mm。与 CMP0AS0 组相比，CMP0AS30 组坍落度提升了 7.69%；CMP20AS45 组坍落度降低了 5.67%。AS 磨圆度更高、表面较光滑，减少了颗粒之间的摩擦，有助于提升混合物的流动性^[8]。随着掺量增加，AS 的填充效应达到阈值，加之比表面积较大，吸水率较高，导致剩余无法填充孔隙的细颗粒在其表面吸水，系统内自由水含量降低，混凝土流动性降低，坍落度减小。CMP 掺量较低时，UHPC 工作性能变化不大，随着掺量增加，浆体流动过程中增加了颗粒间的内摩擦阻力，进而降低混凝土的流动性^[7]。

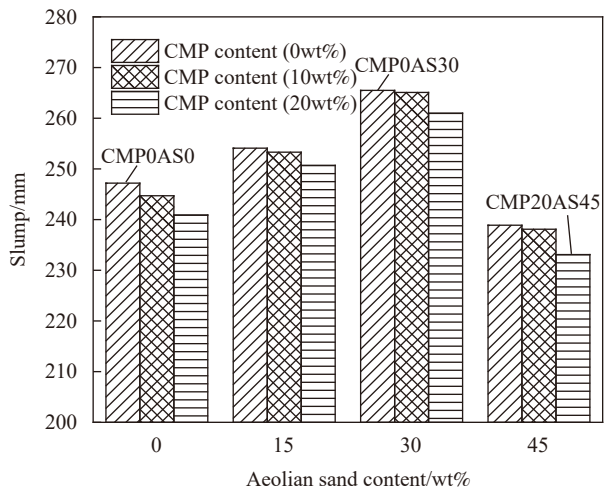


图 3 AS 和 CMP 掺量对 UHPC 工作性能的影响
Fig. 3 Effect of AS and CMP replacement ratios on UHPC workability

2.2 UHPC 抗压强度

UHPC 抗压强度发展因 AS 和 CMP 掺量的不同存在一定差异。由图 4 可知，随着 AS 取代率的增大，抗压强度呈现先增大后减小的趋势。试验组中 CMP10AS30 组强度提升最高，与对照组相比，提高 7.06%。由优化基本配合比可得，AS 取代率合理范围为 0wt%~26wt%，再生 CMP 取代率合理范围为 0wt%~16wt%。CMP10AS30 组 AS 取代率与最佳取代率 26wt% 吻合较好，再生 CMP 取代率在合理范围内。此时，AS 和 CMP 改善了混合物的颗粒级配，颗粒材料处于紧密堆积状态，形成了

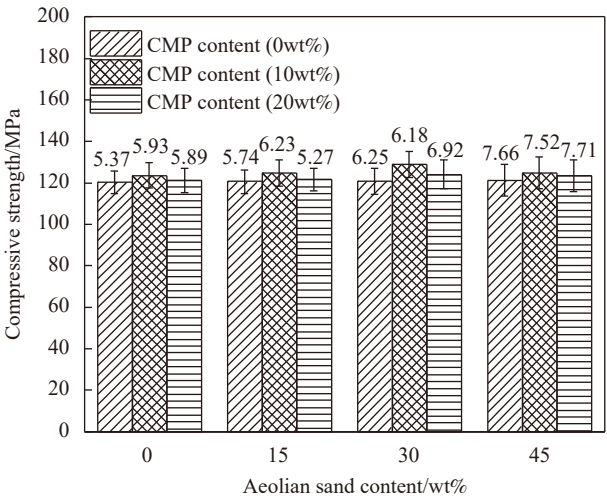


图 4 AS 和 CMP 掺量对 UHPC 抗压强度的影响
Fig. 4 Effect of AS and CMP replacement ratios on the compressive strength of UHPC

较高密实度的基体，这是 UHPC 抗压强度提升的主要原因。AS 掺量对细骨料空隙率的影响如图 5 所示，随 AS 取代率增大，细骨料空隙率呈现先降低后增加的趋势，AS 取代率为 30wt% 时，细骨料空隙率最低，这可能是由于 AS 颗粒粒径较小，较好地填充了较大河砂颗粒产生的孔隙，细骨料堆积密度增大，空隙率降低；取代率为 45wt% 时，AS 将变成主要细骨料，造成骨料级配缺失，过度填充导致较大河砂颗粒被挤出形成孔隙^[14]，空隙率增加。

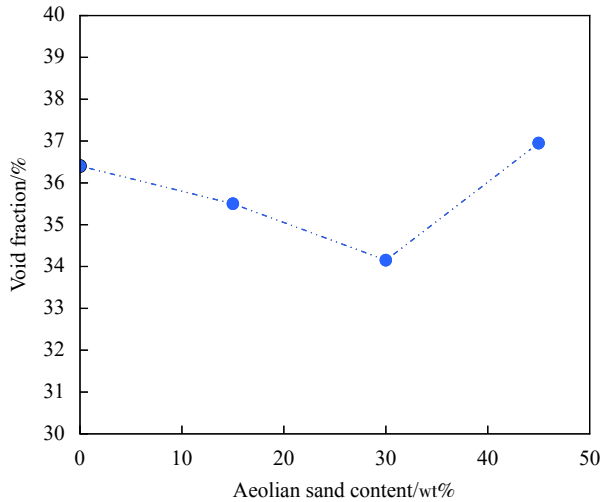


图 5 UHPC 细骨料空隙率
Fig. 5 Fine aggregate void fraction of UHPC

2.3 UHPC 劈裂抗拉强度

由图 6 可知，随着 AS 取代率的增加，劈裂抗

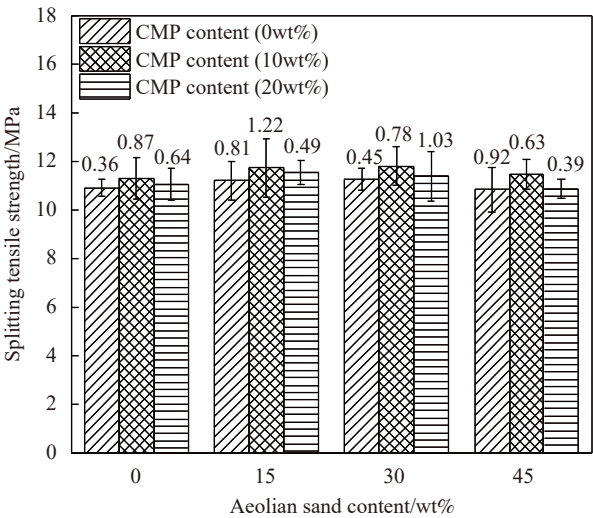


图 6 AS 和 CMP 掺量对 UHPC 劈裂抗拉强度的影响
Fig. 6 Effect of AS and CMP replacement ratios on the splitting tensile strength of UHPC

拉强度呈现先增大后减小的趋势。试验组中 CMP10AS30 组强度提升最高，与对照组相比，提高 8.25%。

牛旭婧等^[15]研究表明，混凝土的抗拉强度对裂纹和孔隙十分敏感。AS 取代率较低时，因其填充效应及较强的吸水率降低了混凝土内部孔隙率，提升保水性，开裂敏感性降低^[16]，UHPC 劈裂抗拉强度提高。AS 取代率为 45wt%，CMP 取代率为 20wt% 时，基体中出现一定量的微裂缝，UHPC 宏观劈裂抗拉强度降低。此外，随着 CMP 掺量增加，水泥用量减少导致 Ca²⁺浓度的降低，减少了水化硅酸钙 (C-S-H) 等凝胶体的生成，使劈裂抗拉强度降低。

2.4 活性成分对 UHPC 抗压强度的影响

研究表明：粒径 < 175 μm 的风积沙超细颗粒 (Aeoliansand very fine particles, VFP)^[4] 与 CMP^[17-19] 具有一定的火山灰活性，为探究颗粒活性对抗压强度的影响，量化其火山灰活性对强度提升的积极作用，认为 VFP 和 CMP 火山灰活性所引起的强度增长 (Δf) 是由 VFP 积极作用引起的强度增长 (Δf_{as}) 和 CMP 积极作用引起的强度增长 (Δf_{cmp}) 叠加而成，如下式：

$$\Delta f = \Delta f_{as} + \Delta f_{cmp} \tag{3}$$

VFP 中绝大多数颗粒的粒径远远大于粉煤灰和硅灰，因此只考虑 VFP 与水泥之间的相互作用；而 CMP 中存在一定数量与粉煤灰和硅灰颗粒粒径相当的细小颗粒，因此必须考虑其与其他胶凝材

料之间的相互作用。参考文献 [20-23] 建立的经验模型如下式：

$$\Delta f_{as} = \frac{a_1}{1 + \left(\frac{b}{S_{eff1}}\right)^c} \quad \Delta f_{cmp} = \frac{a_2}{1 + \left(\frac{b}{S_{eff2}}\right)^c} \quad (4)$$

式中： a_1 表示 VFP 与水泥之间的相互关系， a_1 与 AS 掺量 S 和水泥用量 C 的比例 S/C 有关^[4]，由文献 [24] 所提公式拓展得到 a_1 与 S/C 的关系： $a_1=1.8187(S/C)+0.7008$ ； a_2 为 CMP 与水泥之间的相互作用， $a_2=1.8187(C_c/C_0)+0.7008$ ， C_c 为 CMP 质量掺量， C_0 为胶凝材料总量； b 为水泥的比表面积； c 等于 1； S_{eff} 为有效面积，定义如下：

$$S_{eff} = S_s \left[\frac{P}{1-P} \xi(P) \right] \quad (5)$$

式中： S_s 分为 S_{s1} 和 S_{s2} ， S_{s1} 取为 7 077^[4]， S_{s2} 取为 424； $\xi(P)$ 为效率函数，定义如下：

$$\xi(P) = \left[\frac{1 + \cos(\pi P)}{2} \right]^k \left[1 + \left(\frac{P}{m} \right)^n \right]^{-1} \quad (6)$$

式中： k 、 m 和 n 为常数，分别等于 0.7、36.8 和 3.4^[18]； P 分为 P_1 和 P_2 ， P_1 与 VFP 对水泥的有效取代率有关； P_2 与 CMP 对胶凝材料的有效取代率有关，对文献 [5] 中数据回归可得：

$$P_1 = 103.5(0.097 + 0.14S/C) - 1.354 \quad (7-1)$$

$$P_2 = 103.5(0.097 + 0.14C_c/C_0) - 1.354 \quad (7-2)$$

表 2 给出了每组试件对应的 S/C 值和 C_c/C_0 值。将表 2 中 S/C 和 C_c/C_0 代入式 (3)~(7) 中，可得 Δf 的预测值，并与试验值进行了对比，如图 7 所示，

表 2 不同 UHPC 试件的风积沙与水泥掺量比值 (S/C) 和复合微粉掺量与胶凝材料总量比值 (C_c/C_0)

Table 2 Ratio of aeolian sand content to cement content (S/C) and composite micro-powder content to total cementitious material (C_c/C_0) values of different UHPC specimens

Sample	S/C	C_c/C_0
CMP0AS0	0.00	0.0
CMP10AS0	0.00	0.1
CMP20AS0	0.00	0.2
CMP0AS15	0.21	0.0
CMP10AS15	0.25	0.1
CMP20AS15	0.30	0.2
CMP0AS30	0.38	0.0
CMP10AS30	0.44	0.1
CMP20AS30	0.53	0.2
CMP0AS45	0.63	0.0
CMP10AS45	0.75	0.1
CMP20AS45	0.90	0.2

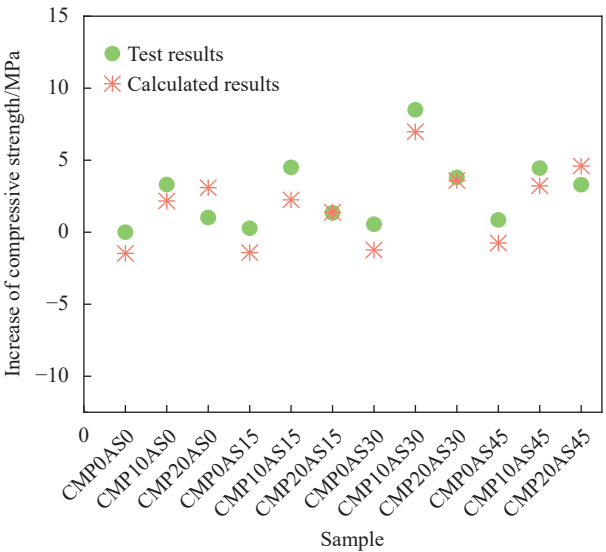


图 7 强度增长值试验结果与采用式 (3) 计算结果的对比

Fig. 7 Comparison of measured and calculated results by equation (3) for strength increase

预测值与试验值的变化趋势吻合较好，这说明 VFP 和 CMP 具有一定的火山灰活性。CMP 中混凝土粉可以为水泥基水化补充 Ca^{2+} ，同时起到一定的晶胚作用；砖粉中的铝酸盐相具有激发水化成核效应，其活性成分二次水化生成额外的 C-S-H 凝胶^[7]。VFP 中惰性颗粒具有非均质形核作用，为水化产物提供形核点，降低了形核能垒；活性二氧化硅发生火山灰反应^[4]，提高了基体密实度。VFP 和 CMP 参与二次水化的反应过程如图 8 所示。这也是 UHPC 抗压强度提升的次要原因。

2.5 AS 和 CMP 对硬化水泥浆微观结构的影响

2.5.1 AS 和 CMP 对水化产物的影响

为分析 AS 和 CMP 对 UHPC 力学性能影响的微观机制，采用日本理学株式会社生产 D/MAX2200 型 XRD 分析水化产物的矿物组成。CMP0AS0、CMP10AS30 及 CMP20AS45 三组 UHPC 水化试样的 XRD 图谱如图 9 所示，各试样主要物相均含有 C_3S 、 β - C_2S 和 SiO_2 。各试样的 XRD 衍射峰位置基本相同，表明 AS 和 CMP 掺量的变化并不会改变水化产物的组成，但各物相峰强存在一定差异，表明 AS 和 CMP 掺量对水化程度有一定影响。

图 9 中氢氧化钙 (CH) 衍射峰强度较低，随着 AS 和 CMP 掺量的增加，各组试样基本无法观察到明显的钙矾石 (AFt) 衍射峰，这是由于与水泥相比，CMP 的 SO_3 含量更低，限制了铝酸三钙 (C_3A) 与硫酸盐发生反应^[25]； SiO_2 衍射峰强度有所

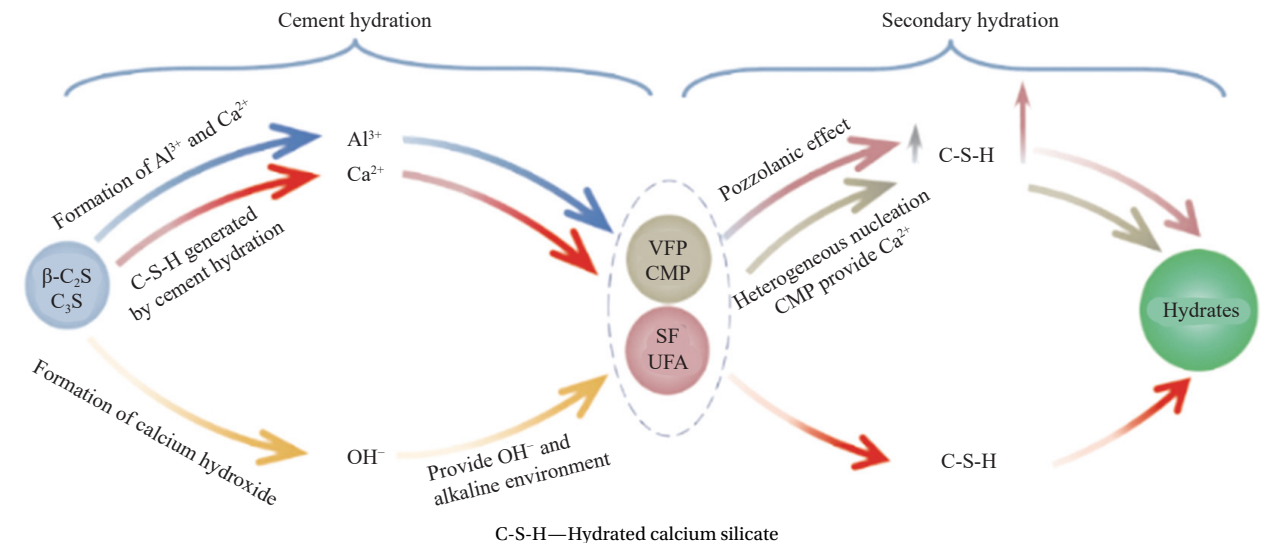


图 8 风积沙超细颗粒 (VFP) 和 CMP 参与水化反应过程

Fig. 8 Aeolian sand very fine particles (VFP) and CMP participate in the hydration reaction process

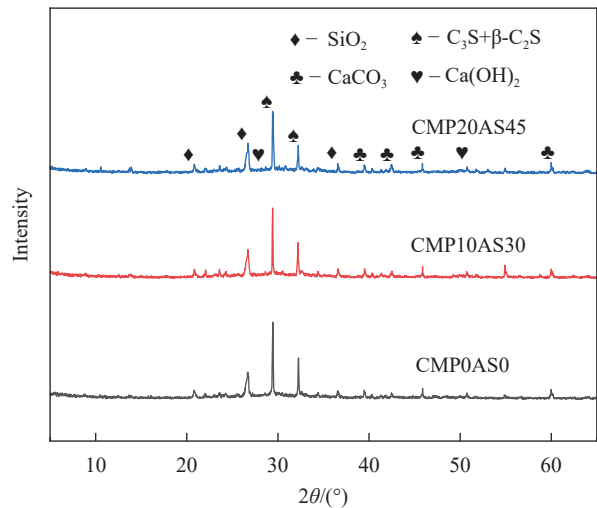


图 9 不同 AS 和 CMP 取代率下 UHPC 的 XRD 图谱
Fig. 9 XRD patterns of UHPC with different substitution rates of AS and CMP

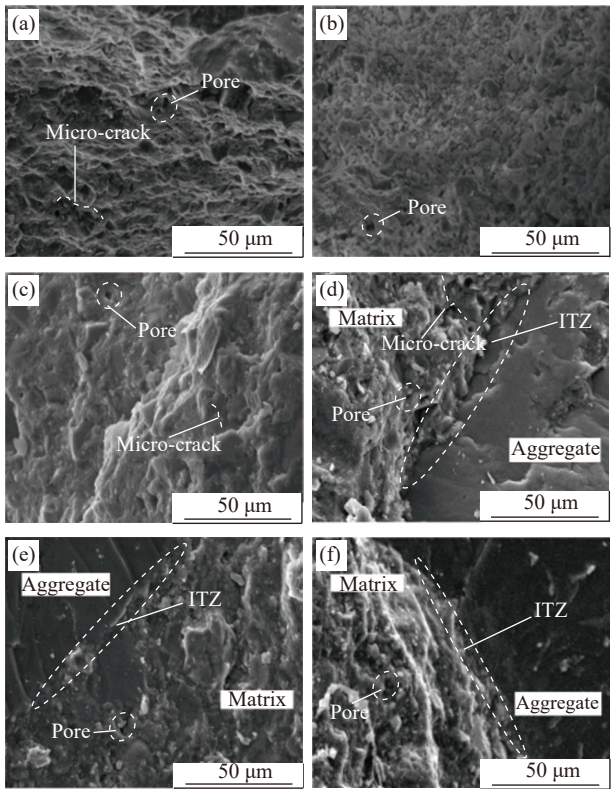
升高，这是由于水泥中 SiO_2 含量小于 CMP，且 AS 中也含有少量的可溶性非晶质 SiO_2 。

$\text{C}_3\text{S}+\beta\text{-C}_2\text{S}$ 衍射峰强度下降，这是由于 CMP 掺量变高，水泥量减少。此外，在蒸汽养护的条件下，激发了残余水泥颗粒进一步水化及掺合料的火山灰反应^[18]。

2.5.2 UHPC 的微观形貌

采用 FEI 公司生产的 Quanta200 型 SEM 观察 CMP0AS0、CMP10AS30、CMP20AS45 三组试件的微观结构 (图 10)，不同 AS 和 CMP 掺量所得到的 UHPC 基体 (图 10(a)、10(c)、10(e)) 密实度均较高，界面过渡区附近 (图 10(b)、10(d)、10(f)) 的浆体与

骨料粘结良好，CMP10AS30 组基体密实度略高，微细孔、微裂缝略少，这说明了 AS 和 CMP 在最佳掺量下，可以较好地发挥填充效应和活性效应，



ITZ—Interface transition zone

图 10 AS 和 CMP 取代率对 UHPC 微观结构的影响：((a), (b)) CMP0AS0; ((c), (d)) CMP10AS30; ((e), (f)) CMP20AS45

Fig. 10 Effect of AS and CMP substitution rate on microstructure of UHPC: ((a), (b)) CMP0AS0; ((c), (d)) CMP10AS30; ((e), (f)) CMP20AS45

优化UHPC的微观结构。

3 结论

(1) 风积沙等质量取代河砂的取代率为30wt%、再生复合微粉(CMP)等质量取代水泥的取代率为10wt%时,抗压强度比对照组提高7.06%;劈裂抗拉强度提高8.25%。

(2) 建立了考虑风积沙超细颗粒(VFP)和CMP火山灰活性的强度增长预测模型,并采用试验数据进行验证,发现计算结果与试验结果的变化趋势吻合较好。其活性成分的水化贡献对超高性能混凝土抗压强度提升有一定的积极作用。

(3) 风积沙和CMP在合理的掺量下可发挥较好的填充效应和反应活性,促进水泥水化及硅灰、粉煤灰的火山灰反应,增强骨料和浆体的粘结力,提高基体及界面过渡区(ITZ)微观结构密度。

参考文献:

[1] MENGXI D, RUI Y, YUAN F, et al. Possibility and advantages of producing an ultra-high performance concrete (UHPC) with ultra-low cement content[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 273: 122023.

[2] LI Y, ZHANG H, LIU X, et al. Time-varying compressive strength model of aeolian sand concrete considering the harmful pore ratio variation and heterogeneous nucleation effect[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019(3): 1-15.

[3] LI Y, ZHANG H, LIU G, et al. Multi-scale study on mechanical property and strength prediction of aeolian sand concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 247: 118538.

[4] LUO F J, HE L, PAN Z, et al. Effect of very fine particles on workability and strength of concrete made with dune sand[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 47: 131-137.

[5] DONG W, SHEN X D, XUE H J, et al. Research on the freeze-thaw cyclic test and damage model of aeolian sand lightweight aggregate concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 123: 792-799.

[6] SHAO J H, GAO J M, ZHAO Y S, et al. Study on the pozzolanic reaction of clay brick powder in blended cement pastes[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 213: 209-215.

[7] 刘超, 胡天峰, 刘化威, 等. 再生复合微粉对混凝土力学性能及微观结构的影响[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(4): 726-735.

LIU Chao, HU Tianfeng, LIU Huawei, et al. Effect of recycled composite micro-powder on mechanical proper-

ties and microstructure of concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(4): 726-735(in Chinese).

[8] JIANG J Y, FENG T T, CHU H Y, et al. Quasi-static and dynamic mechanical properties of eco-friendly ultra-high-performance concrete containing aeolian sand[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 97: 369-378.

[9] CHU H Y, WANG F J, WANG L G, et al. Mechanical properties and environmental evaluation of ultra-high-performance concrete with aeolian sand[J]. *Materials*, 2020, 13(14): 3148.

[10] YU R, SPIESZ P, BROUWERS H J H. Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)[J]. *Cement and Concrete Research*, 2014, 56: 29-39.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准: GB/T 50080—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test method of performance on ordinary fresh concrete: GB/T 50080—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016(in Chinese).

[12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 活性粉末混凝土: GB/T 31387—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Reactive powder concrete: GB/T 31387—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015(in Chinese).

[13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 建设用砂: GB/T 14684—2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Sand for building: GB/T 14684—2001[S]. Beijing: Standards Press of China, 2001(in Chinese).

[14] 李玉根, 张慧梅, 刘光秀, 等. 风积砂混凝土基本力学性能及影响机理[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(5): 1212-1221.

LI Yugen, ZHANG Huimei, LIU Guangxiu, et al. Mechanical properties and influence mechanism of aeolian sand concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(5): 1212-1221(in Chinese).

[15] 牛旭婧, 朋改非, 尚亚杰, 等. 热水-干热组合养护对超高性能混凝土力学性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2018, 46(8): 1141-1148.

NIU Xujing, PENG Gaifei, SHANG Yajie, et al. Influence of combined curing composed of precuring in hot water and

heating in dry air on mechanical properties of ultra-high performance concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018, 46(8): 1141-1148(in Chinese).

[16] 李根峰, 申向东, 吴俊臣, 等. 风积沙混凝土早期自收缩变形的影响因素研究及数值模拟[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(3): 996-1002.

LI Genfeng, SHEN Xiangdong, WU Junchen, et al. Experimental study and numerical simulation on the influence factors of self-shrinkage deformation of aeolian sand concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(3): 996-1002(in Chinese).

[17] FLOREA M V A, NING Z, BROUWERS H J H. Activation of liberated concrete fines and their application in mortars[J]. Construction and Building Materials, 2014, 50: 1-12.

[18] REIG L, SORIANO L, BORRACHERO M V, et al. Influence of calcium aluminate cement (CAC) on alkaline activation of red claybrick waste (RCBW)[J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 65: 177-185.

[19] XIAO J Z, MA Z M, SUI T B, et al. Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 188: 720-731.

[20] LAWRENCE P, CYR M, RINGOT E. Mineral admixtures in mortars: Effect of inert materials on short-term hydration[J]. Cement & Concrete Research, 2003, 33(12): 1939-1947.

[21] CYR M, LAWRENCE P, RINGOT E. Mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical effects of inert materials on short-term hydration[J]. Cement & Concrete Research, 2005, 35(4): 719-730.

[22] LAWRENCE P, CYR M, RINGOT E. Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength[J]. Cement & Concrete Research, 2005, 35(6): 1092-1105.

[23] CYR M, LAWRENCE P, RINGOT E. Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength[J]. Cement & Concrete Research, 2006, 36(2): 264-277.

[24] 王慧慧, 商海平, 龙广成, 等. UHPC抗压强度与组成参数之间的关系模型研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(11): 2816-2822.

WANG Huihui, SHANG Taoping, LONG Guangcheng, et al. Study on relationship between compressive strength and composition parameters of UHPC[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(11): 2816-2822(in Chinese).

[25] DUAN Z H, HOU S D, XIAO J Z, et al. Study on the essential properties of recycled powders from construction and demolition waste[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 253: 119865.