

赵文华,孔佳慧,孙琦.绿色低成本超高性能混凝土性能与微观机理评价分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(3):313-322.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240183

ZHAO Wenhua, KONG Jiahui, SUN Qi. Evaluation and analysis of the performance and microscopic mechanism of green low-cost ultra-high performance concrete[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(3): 313-322. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20240183

# 绿色低成本超高性能混凝土性能与 微观机理评价分析

赵文华, 孔佳慧, 孙琦

(辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 针对超高性能混凝土(UHPC)水胶比低、成本高、水泥用量大等问题,利用工业固废及天然火山灰材料,制备以石灰石粉、矿渣和浮石粉为掺合料的绿色低成本UHPC,通过UHPC性能试验、BBD响应曲面试验、PCAS孔隙率分析系统及SEM扫描电镜技术,探究各掺合料对其基本物理性能及微观结构的影响。研究结果表明:采用石灰石粉、矿渣和浮石粉混掺替代水泥,可提升UHPC的力学性能及耐久性能,改善其微观结构,在保证UHPC良好性能的同时降低制备成本以及对环境的危害。研究成果可为制备绿色低成本UHPC提供参考。

**关键词:** 绿色超高性能混凝土; 固废; 低成本; 碳排放; 微观结构

中图分类号: TU525

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)03-0313-10

## Evaluation and analysis of the performance and microscopic mechanism of green low-cost ultra-high performance concrete

ZHAO Wenhua, KONG Jiahui, SUN Qi

(School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** To address the challenges associated with ultra-high performance concrete (UHPC), such as its low water-to-cement ratio, high production costs, and substantial cement consumption, this study developed an eco-friendly and cost-effective UHPC variant. This was achieved by incorporating industrial solid wastes and natural pozzolanic materials, specifically limestone powder, slag, and pumice powder, as supplementary cementitious materials. UHPC performance test, BBD response surface test, PCAS porosity analysis system and SEM scanning electron microscopy were used to explore the effects of various admixtures on its basic physical properties and microstructure. The results show that substituting cement with limestone powder, slag, and pumice powder not only enhances the mechanical strength and durability of UHPC but also refines its microstructure. Moreover, this substitution strategy significantly reduces both the economic and environmental costs of UHPC production while maintaining its superior performance. The outcomes of this study offer valuable insights for the formulation of sustainable and economically viable UHPC, contributing to the advancement of green construction materials.

**Keywords:** green ultra-high performance concrete; solid waste; low cost; carbon emissions; microstructure

## 0 引言

超高性能混凝土(UHPC)是一种新型水泥基复合材料。国际标准中UHPC养护28d的抗压强度通常为150MPa,国内相关规范中,将养护28d抗压强度超过100MPa的水泥基材料归类为

UHPC。UHPC具有超高的力学性能及耐久性能<sup>[1]</sup>,且微观结构非常致密,对腐蚀性环境(硫酸盐侵蚀、氯离子侵蚀、CO<sub>2</sub>渗透)抵抗能力较好<sup>[2]</sup>。UHPC因性能优异,应用较广泛,例如将UHPC用作海洋桥面的防水层,延长混凝土构件的使用寿命<sup>[3]</sup>。UHPC被认为是未来最有前途的建筑材料,

收稿日期: 2024-07-01 修回日期: 2024-08-01 接受日期: 2024-08-15 责任编辑: 黄琦

基金项目: 国家自然科学基金项目(52074144)

作者简介: 赵文华(1979-),男,辽宁阜新人,博士,副教授,主要从事土木与道路工程材料、桥梁工程方面的研究。E-mail: zhwh09@163.com

其主要特征是高胶凝材料用量(通常超过 $800 \text{ kg/m}^3$ )和低水胶比,其中,水泥含量为 $700\sim 1\,000 \text{ kg/m}^3$ ,减水剂掺量为水泥基材料含量的 $1\%\sim 3\%$ <sup>[4]</sup>。UHPC中水泥水化率仅为 $31\%\sim 35\%$ <sup>[5-6]</sup>,这导致体系中存在大量未水化的水泥颗粒,不仅会造成水泥资源的严重浪费,还会增加材料成本,加剧环境负担,不利于可持续发展。

为解决上述问题,学者们提出绿色或生态型UHPC,研究发展绿色低成本UHPC已成为目前的研究热点。HOU等<sup>[7]</sup>用赤泥代替水泥,发现赤泥的掺入可加速UHPC水化进程,提高UHPC早期龄期的耐久性,缩短凝结时间。YANG等<sup>[8]</sup>用磷渣替代部分水泥,发现磷渣可延长水泥水化的休眠期,降低混凝土的早期自收缩率。FAN等<sup>[9]</sup>研究表明,采用钢渣替代水泥可增大UHPC的湿堆积密度,提高其性能,降低能源消耗,减少碳排放量。ESMAEILI等<sup>[10]</sup>研究发现,利用铜尾矿替代部分水泥可改善UHPC的力学性能、耐久性和微观结构。WU等<sup>[11]</sup>采用甘蔗渣灰替代水泥,发现掺入甘蔗渣灰不仅可保持UHPC的抗压强度,还能改善其和易

性和自收缩性能。

近年来,UHPC已逐步摆脱对高成本材料的依赖,多种辅助胶凝材料已被证实可有效用于UHPC的制备。本文采用石灰石粉、矿渣和浮石粉替代部分水泥,探究3种掺合料对UHPC力学性能及微观结构的影响机理。通过优化材料配合比,实现UHPC的低成本制备。同时,降低对环境的影响,为绿色UHPC的开发提供理论依据和技术支持。

## 1 UHPC性能试验

### 1.1 试验材料

采用阜新市大鹰水泥厂生产的普通硅酸盐水泥,型号为P·O 42.5。采用江苏彭旺粉磨有限公司生产的矿渣粉。采用天然河砂,经水洗烘干后,筛选粒径为 $0\sim 1.25 \text{ mm}$ 的河砂作为细骨料。采用聚羧酸减水剂,其固含量为 $30\%$ 。石灰石粉取自河南巩义市,浮石粉取自河北灵寿县。对石灰石粉、矿渣、浮石粉和水泥进行XRF光谱测试,得到其化学组成,见表1。

表1 原材料化学组成

Tab.1 raw material chemical composition

原材料	化学成分质量分数/%								
	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	SrO	Cl
石灰石粉	69.51	5.09	0.80	0.38	0.29	0.13	0.12	0.06	0.02
矿渣	37.72	8.34	28.30	1.03	14.06	1.64	0.41	0.06	0.05
浮石粉	8.51	5.95	45.01	11.65	13.47	0.06	1.86	0.08	0.02
水泥	53.45	3.21	22.38	2.29	7.38	3.24	0.91	0.05	0.07

由表1可知,石灰石粉的主要化学成分为CaO。石灰石粉是一种惰性矿物掺合料,其微细颗粒可起到填充、增大水泥基材料密实度的作用。浮石粉主要由玻璃质构成,含有少量的结晶质矿物。水泥、矿渣和浮石粉的主要化学成分均为CaO和SiO<sub>2</sub>。原材料XRD谱图见图1。其中, $\theta$ 为入射角。由图1可知,水泥的主要矿物成分为C<sub>3</sub>S和C<sub>2</sub>S;石灰石粉的主要矿物成分为CaCO<sub>3</sub>;浮石粉的主要矿物成分为NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>和CaMg(SiO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>;矿渣的矿物成分为SiO<sub>2</sub>、NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>和CaCO<sub>3</sub>。

原材料粒径分布见图2。由图2可知,石灰石粉、矿渣和浮石粉的粒径分布与水泥较为相似。石灰石粉的细度越小,对提升UHPC性能越有利。浮石粉粒径相对较小,粒径为 $15 \mu\text{m}$ 时,浮石粉与

水泥的粒径分布更相似<sup>[12]</sup>。

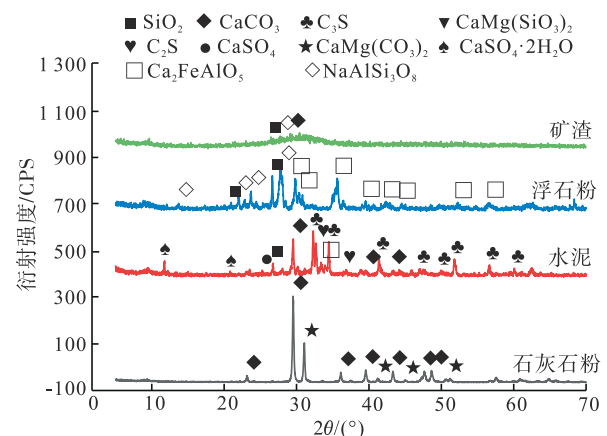


图1 原材料XRD谱图

Fig.1 XRD patterns of raw materials

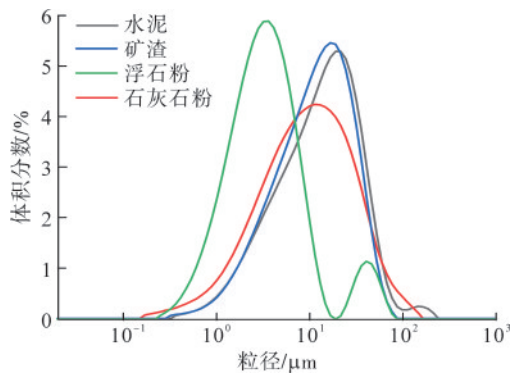


图2 原材料粒径分布

Fig.2 particle size distribution of raw materials

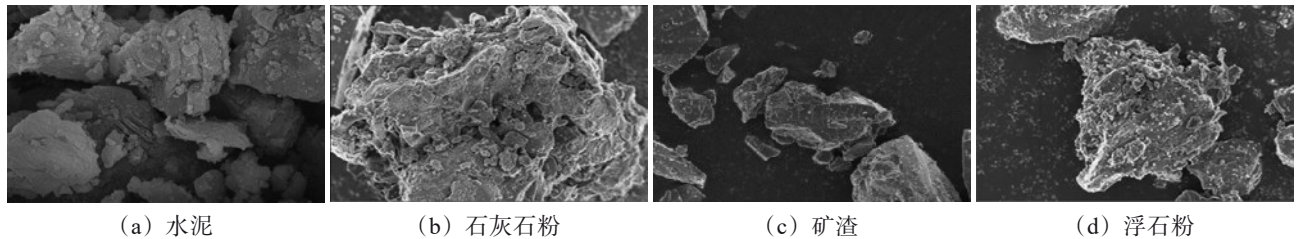


图3 原材料电镜扫描结果

Fig.3 electron microscope scanning results of raw materials

原材料电镜扫描结果见图3。由图3可以看出,水泥颗粒表面粗糙,较大的颗粒棱角明显,颗粒之间较分散,无团聚现象。石灰石粉呈不规则形状,颗粒较光滑,有明显的团聚现象。矿渣颗粒多为圆球状,表面光滑,大颗粒表面附着少量小颗粒,无团聚现象。浮石粉是浮石火山喷发的岩浆冷凝后形成的具有丰富气孔的玻璃质熔岩,微观结构粗糙多孔,颗粒形状不规则。根据《用于水泥中的火山灰质混合材料》(GB/T 2847—2022)对浮石粉的火山灰活性进行检测,本文采用的浮石粉满足要求,具有一定的火山灰活性。

### 1.2 UHPC 配合比

UHPC是一种水胶比极低的水泥基材料,水胶比一般为0.14~0.20<sup>[13-14]</sup>。本文水胶比取0.18,胶凝材料为水泥和硅灰。硅灰的最优掺量为水泥质量的10%~20%<sup>[13-14]</sup>,本文取20%。胶砂比对混凝土早期收缩和裂缝影响显著,取值不宜过小,本文取1.25。减水剂的最优掺量为胶凝材料质量的1%~2%<sup>[15]</sup>,本文取2%。UHPC基础配合比(质量比)为胶凝材料:水:砂:减水剂=1:0.18:0.8:0.02。将原材料依次倒入水泥砂浆搅拌机中,搅拌均匀后,加入水和减水剂混合溶液质量的1/2,再次搅拌均匀,然后加入剩余水和减水剂的混合溶液,直至搅拌成“准液态”时,停止搅拌,测试流动性后装入试模。脱模后将试件放入养护箱中,分别养护至相应龄期(3 d、7 d、28 d),测试其力

学性能。养护28 d后,基础配合比下UHPC性能的试验结果见表2。

表2 基础配合比下UHPC性能的试验结果  
**Tab.2 test results of UHPC performance under the foundation mix ratio**

性能指标	试验值
抗压强度/MPa	106.306
抗折强度/MPa	17.26
流动度/mm	185

为研究石灰石粉、矿渣和浮石粉对UHPC的影响,将这3种掺合料替代部分水泥,替代率为0~30%。不同材料替代率下UHPC的性能见图4。由图4可知,当石灰石粉、矿渣和浮石粉的掺量分别为10%时,UHPC的性能最优。

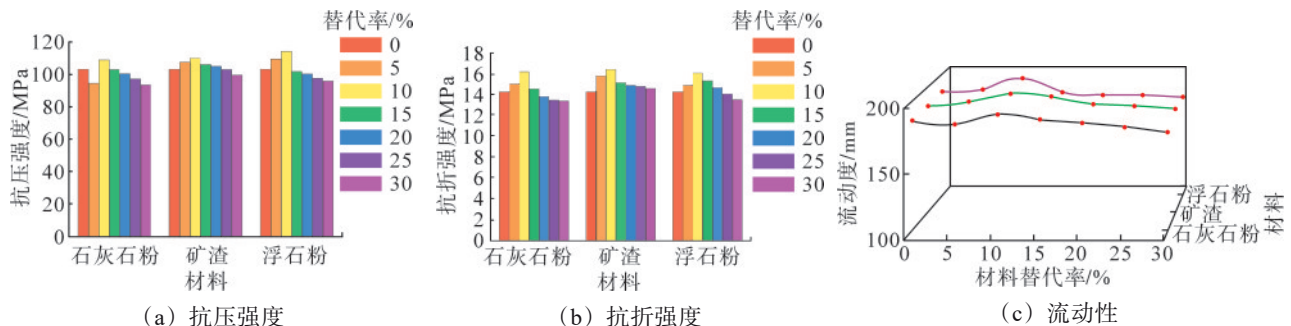


图4 不同材料替代率下UHPC的性能

Fig.4 UHPC performance under different material substitution rates

### 2 配合比优化

为进一步优化配合比,根据基础配合比,以石灰石粉、矿渣、浮石粉掺量为影响因素,以抗压强度、抗折强度、流动度为响应值,开展BBD响应曲面试验,并对试验结果进行回归拟合,得到最优配合比。

#### 2.1 BBD 响应曲面试验

三因素三水平试验方案见表 3。其中,因素 A、因素 B、因素 C 分别为石灰石粉掺量、矿渣掺量、浮石粉掺量,均为质量分数。

表 3 三因素三水平试验方案

**Tab.3 three-factor and three-level experimental scheme**

因素水平	因素 A/%	因素 B/%	因素 C/%
1	5	5	5
2	10	10	10
3	15	15	15

共开展 17 组(中心点重复 5 组) BBD 响应曲面试验,根据单因素试验结果,记录不同配合比下 UHPC 的抗压强度、抗折强度及流动度,见表 4。

表 4 BBD 响应曲面试验结果

Tab.4 BBD response surface test results

组别	因素 A/%	因素 B/%	因素 C/%	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	流动度/mm
1	5	5	10	101.75	16.81	187.3
2	15	5	10	101.08	14.61	178.8
3	5	15	10	93.75	14.77	164.2
4	15	15	10	92.11	15.39	179.9
5	5	10	5	102.62	15.96	178.8
6	15	10	5	94.78	15.20	172.8
7	5	10	15	98.22	14.52	170.9
8	15	10	15	96.16	13.28	191.9
9	10	5	5	106.31	16.50	191.3
10	10	15	5	94.09	13.73	170.4
11	10	5	15	100.85	13.26	190.4
12	10	15	15	95.57	14.72	179.4
13	10	10	10	110.32	17.92	197.3
14	10	10	10	108.64	17.88	195.8
15	10	10	10	108.55	17.47	200.0
16	10	10	10	109.14	17.34	194.8
17	10	10	10	109.02	17.81	197.3

#### 2.2 模型建立

根据 BBD 响应曲面试验结果,拟合得到抗压强度  $Y_1$ 、抗折强度  $Y_2$  及流动度  $Y_3$  的多项式函数,即

$$Y_1 = 69.145 00 + 4.552 35x_A + 2.621 85x_B + 2.165 60x_C - 0.009 70x_Ax_B + 0.077 00x_Ax_C + 0.069 40x_Bx_C - 0.274 43x_A^2 - 0.204 03x_B^2 - 0.193 13x_C^2, \quad (1)$$

$$Y_2 = 10.715 00 + 0.529 60x_A + 0.171 35x_B + 0.986 85x_C + 0.028 20x_Ax_B + 0.002 00x_Ax_C + 0.042 30x_Bx_C - 0.044 50x_A^2 - 0.047 03x_B^2 - 0.078 23x_C^2, \quad (2)$$

$$Y_3 = 157.050 00 + 4.941 00x_A + 1.328 50x_B + 2.038 50x_C + 0.242 00x_Ax_B + 0.270 00x_Ax_C + 0.099x_Bx_C - 0.475 30x_A^2 - 0.304 30x_B^2 - 0.262 30x_C^2, \quad (3)$$

式(1)~式(3)中: $x_A$ 、 $x_B$ 、 $x_C$ 分别为因素 A、B、C 的因素水平。

根据式(1)~式(3)建立 BBD 响应曲面模型,分析石灰石粉、矿渣和浮石粉掺量对模型的影响,得到 UHPC 的最优配合比。抗压强度、抗折强度、流动度 BBD 响应曲面模型各因素交互结果见图 5~图 7。

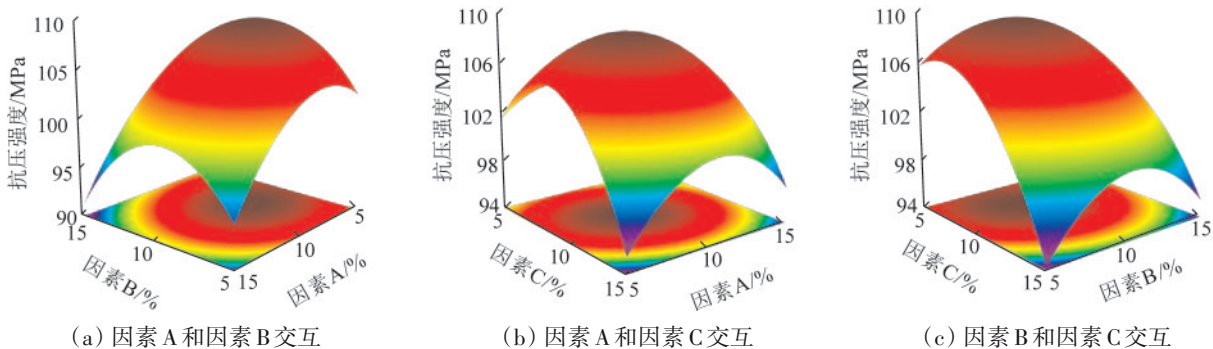


图 5 抗压强度 BBD 响应曲面模型各因素交互结果

Fig.5 interaction results of various factors of compressive strength BBD response surface model

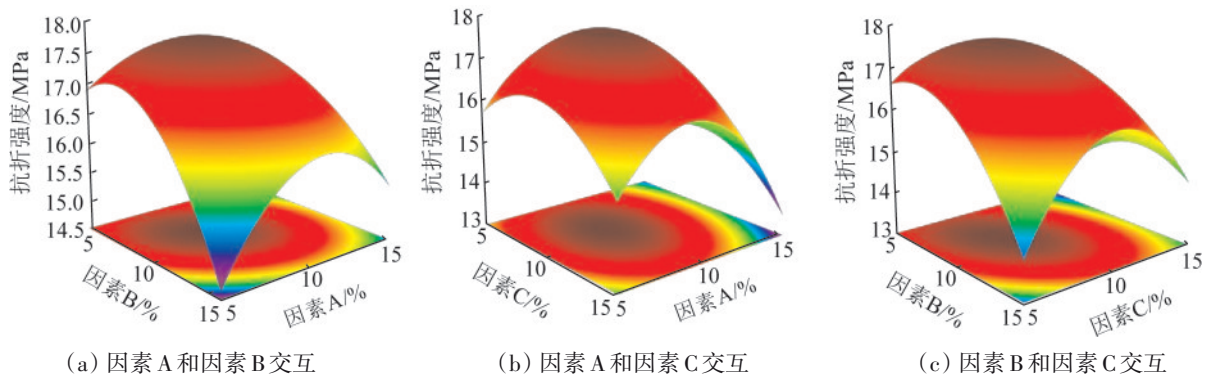


图6 抗折强度BBD响应曲面模型各因素交互结果

Fig.6 interaction results of various factors of flexural strength BBD response surface model

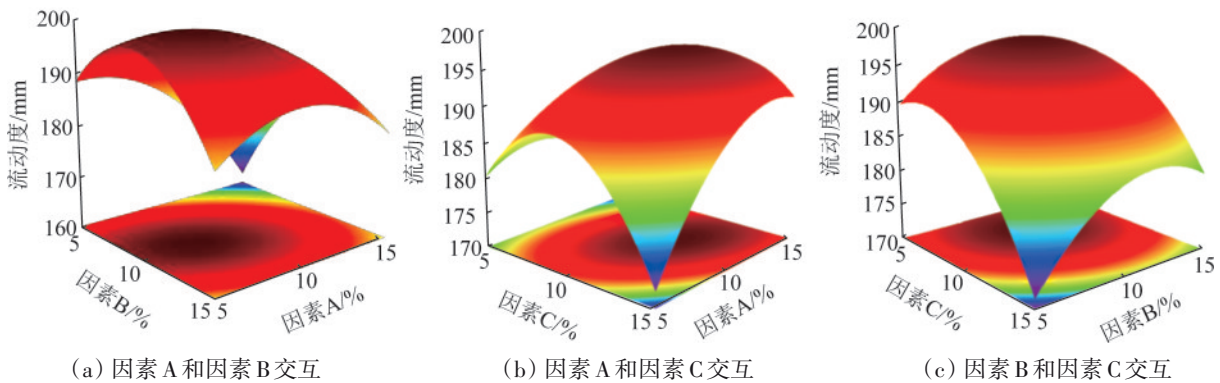


图7 流动性BBD响应曲面模型各因素交互结果

Fig.7 interaction results of various factors of the fluidity BBD response surface model

由图5可知, 因素B对抗压强度的影响极为显著, 因素A和因素C对抗压强度的影响较为显著, 影响大小排序为: 因素B>因素A>因素C。由图6可知, 因素C对抗折强度的影响极为显著, 因素A和因素B对抗折强度的影响较为显著, 影响大小排序为: 因素C>因素A>因素B。由图7可知, 因素B对流动性的影响极为显著, 因素A和因素C对流动性的影响较为显著, 影响大小排序为: 因素B>因素A>因素C。

利用多项式函数, 通过BBD响应曲面试验及模型显著性分析, 优化石灰石粉、矿渣和浮石粉的掺量, 得到UHPC的最优配合比(质量比), 见表5。

表5 UHPC的最优配合比  
Tab.5 optimal ratio of UHPC

水泥	石灰石粉	矿渣	浮石粉	硅灰	砂	水	减水剂
0.591	0.074	0.063 3	0.071 7	0.2	0.8	0.18	0.02

### 2.3 模型可靠性验证

最优配合比下UHPC的试验值与预测值对比见表6。

表6 最优配合比下UHPC的试验值与预测值对比  
Tab.6 comparison of UHPC test value and predicted value under optimal mix ratio

类别	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	流动性/mm
试验值	115.450	18.980 0	202.600
预测值	110.306	18.106 8	197.893

采用绝对相对偏差 $E_{ARD}$ 来计算最优配合比下抗压强度、抗折强度和流动度的试验值与预测值的差异, 计算式为

$$E_{ARD} = \frac{E_E - E_P}{E_P} \times 100\%$$

式中:  $E_E$ 为试验值;  $E_P$ 为预测值。

计算得到抗压强度、抗折强度和流动度的 $E_{ARD}$ 分别为4.7%、4.8%和2.4%, 均小于5%, 表明基于BBD响应曲面模型和多目标函数优化设计的配合比精确度较高。为直观地反映试验值与预测值之间的关系, 绘制试验值与预测值1:1关系曲线, 见图8。由图8可以看出, 各点均匀分布在直线两侧, 试验值与预测值吻合度较高, 验证了BBD响应曲面模型的准确性及优化后配合比的合理性, 表明采用石灰石粉、矿渣和浮石粉混掺替代部分水泥来制备绿色低碳UHPC是可行的。

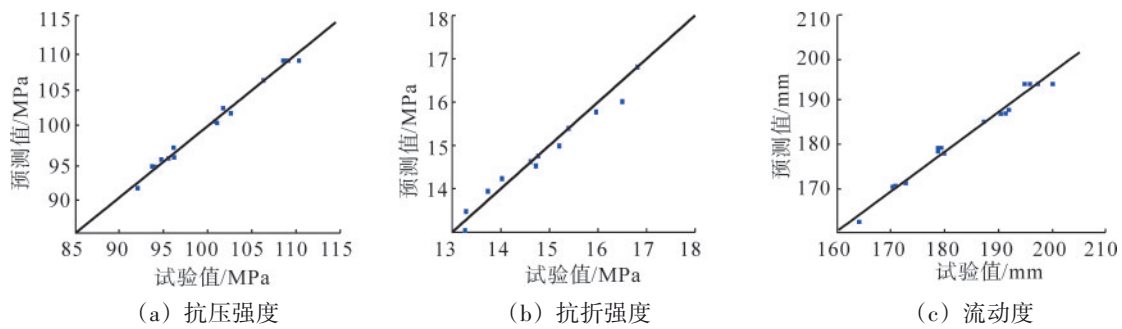


图8 试验值与预测值1:1关系曲线

Fig.8 1:1 relationship curve between the experimental value and the predicted value

### 3 性能及环境效益对比分析

以基础配合比为对照组,以优化后的配合比为试验组,对比分析对照组和试验组UHPC的物理性能、力学性能、化学性能、经济性以及环境效益。

#### 3.1 流动性

依据《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419—2005)测试流动度,得到对照组、试验组UHPC的流动度分别为185 mm和202.6 mm。与对照组相比,试验组UHPC的流动度提高了9.5%,与FERDOSIAN等<sup>[10]</sup>的研究结果相比,本文UHPC的流动度提高了6.2%,表明采用石灰石粉、矿渣、浮石粉混掺替代部分水泥,可增加自由水的含量,起到良好的填料效应及稀释效应,对UHPC的流动性有积极作用,利于试件成型。

#### 3.2 力学性能

依据《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—2021)开展抗压强度、抗折强度试验。养护龄期为3 d时,石灰石粉、矿渣、浮石粉混掺替代部分水泥,会降低UHPC的早期强度。对照组UHPC的28 d抗压强度、抗折强度分别为106.31 MPa、17.26 MPa;试验组UHPC的28 d抗压强度、抗折强度分别为115.45 MPa、18.98 MPa,与对照组相比,试验组抗压强度和抗折强度分别提高了8.60%和9.97%。这是由于随着养护龄期的延长,水化反应不断生成水化产物C-S-H,可改善UHPC的微观结构,从而提高其抗压强度和抗折强度。与石子钊<sup>[17]</sup>采用钢渣替代水泥相比,养护28 d条件下,本试验制备的绿色UHPC的抗压强度提高了0.91%,抗压强度、抗折强度均满足规范要求,表明适量混掺石灰石粉、矿渣和浮石粉对提高UHPC的强度有积极作用。

#### 3.3 抗氯离子渗透性

依据《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2024)测试UHPC的抗氯离

子渗透性能。电通量试验结果对比见表7。由表7可知,与对照组相比,养护28 d和56 d,试验组UHPC的电通量分别减小了5.95%和9.97%。这是由于随着养护龄期的延长,水化产物持续增多,UHPC的内部结构更加致密,可更好地阻止外界离子进入试件内部,提高UHPC抗氯离子渗透性能。

表7 电通量试验结果对比

Tab.7 comparison of electric flux test results

组别	养护28 d电通量/C	养护56 d电通量/C
对照组	420	361
试验组	395	325

#### 3.4 抗碳化性能

依据《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2024),研究最优配合比下不同养护龄期UHPC的碳化深度。对碳化后的试件喷涂酚酞酒精溶液,当二氧化碳进入试件内部时,会与混凝土中的碱性物质发生中和反应,导致pH值降低。不同养护龄期UHPC的碳化结果见图9。由图9可以看出,不同龄期下各试件均未发生显色反应,即碳化深度为0,表明本文所制备的UHPC结构致密,具有良好的抗碳化性能。

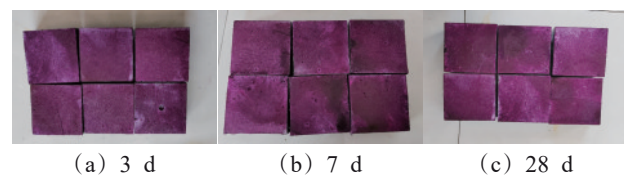


图9 不同养护龄期UHPC的碳化结果

Fig.9 carbonization results of UHPC at different curing ages

#### 3.5 成本分析

由于制备UHPC材料用量大,且加工材料时需消耗大量的电能,原材料成本及加工成本(电费、人工费、折旧费)较高,制约了UHPC的广泛应用。为分析对照组和试验组UHPC的制备成本和加工成本,忽略硅灰、砂、减水剂和水对加工成本的影响,只考虑水泥、石灰石粉、矿渣和浮石粉

对加工成本的影响。由于各地材料价格存在差异, 本文材料的单位价格取产地的价格, 加工成本取材料厂商所提供的价格, 见表 8。

表 8 材料的单位价格及加工成本

**Tab.8 unit price and processing cost of material**

材料	单位价格/(元·t <sup>-1</sup> )	加工成本/(元·t <sup>-1</sup> )
水泥	320	40.0
石灰石粉	100	19.4
矿渣	85	24.0
浮石粉	260	27.8
硅灰	1 800	
砂	50	
减水剂	3 000	
水	2	

对照组、试验组各制备 1 m<sup>3</sup> UHPC 所需制备成本分别为 1 069.79 元和 1 013.09 元, 与对照组相比, 试验组制备成本降低了 5.3%。对照组和试验组各制备 1 m<sup>3</sup> UHPC 所需的加工成本分别为 51.04 元和 45.57 元, 与对照组相比, 试验组加工成本降低了 10.7%, 表明采用石灰石粉、矿渣和浮石粉混掺替代部分水泥, 可降低 UHPC 的制备成本和加工成本, 经济性较好。

### 3.6 环境效益评价

为评估 UHPC 的生态性, 根据 EN ISO 14040 和 EN ISO 14044 标准, 采用 5 个评价指标来评估 UHPC 的环境效益。基础材料的环境效益<sup>[18]</sup>见表 9, 对照组和试验组 UHPC 的环境效益对比见表 10。其中,  $\epsilon_{CED}$  为可再生能源消耗量;  $\epsilon_{CEN}$  为不可再生能源消耗量;  $\epsilon_{GWP}$  为 CO<sub>2</sub> 排放量;  $\epsilon_{AP}$  为酸性物质排放量;  $\epsilon_{EP}$  为磷化物排放量。

表 9 基础材料的环境效益

**Tab.9 environmental benefits of base materials**

材料	环境效益/(10 <sup>-4</sup> ·MJ·kg <sup>-1</sup> )				
	$\epsilon_{CED}$	$\epsilon_{CEN}$	$\epsilon_{GWP}$	$\epsilon_{AP}$	$\epsilon_{EP}$
水泥	971.0	58 000	4 800.0	5.310 0	0.330 00
硅灰	0	35 400	1 500.0	8.590 0	0.818 00
砂	14.9	220	10.6	0.065 7	0.002 99
减水剂	12 000.0	279 500	9 400.0	119.000 0	57.900 00
石灰石粉	0	0	260.0	0	0
矿渣	0	0	3.0	0	0
浮石粉	0	0	4.8	0	0

表 10 对照组和试验组 UHPC 的环境效益对比

**Tab.10 comparison of environmental benefits of UHPC between control group and experimental group**

组别	环境效益/(10 <sup>-4</sup> ·MJ·kg <sup>-1</sup> )				
	$\epsilon_{CED}$	$\epsilon_{CEN}$	$\epsilon_{GWP}$	$\epsilon_{AP}$	$\epsilon_{EP}$
对照组	1 253	71 366	5 262	9.96	1.887 1
试验组	1 003	56 471	4 054	8.60	1.804 2

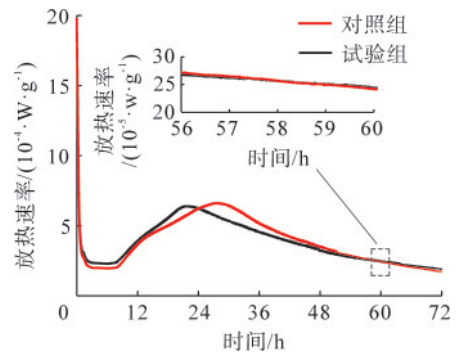
由表 10 可知, 与对照组相比, 试验组可再生能源消耗量、不可再生能源消耗量、CO<sub>2</sub> 排放量、

酸性物质排放量和磷化物排放量分别降低了 19.95%、20.87%、22.96%、13.65% 和 4.49%。通过以上分析可知, 采用石灰石粉、矿渣、浮石粉混掺替代部分水泥制备 UHPC, 可降低能源消耗, 环境效益较好。

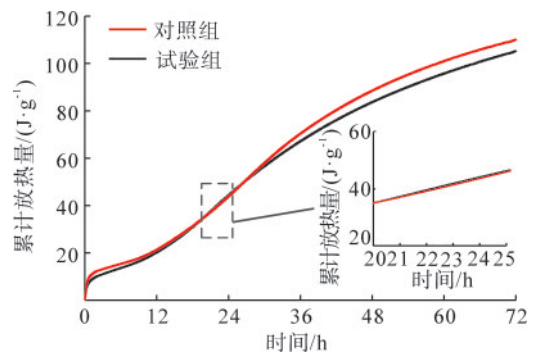
## 4 微观分析

### 4.1 水化热

早期水化热释放所产生的温度应力是导致 UHPC 开裂的关键因素之一<sup>[19]</sup>。最优配合比下 UHPC 的水化放热曲线见图 10。



(a) 放热速率



(b) 累计放热量

图 10 最优配合比下 UHPC 的水化放热曲线

Fig.10 hydration heat release curve of UHPC under the optimal ratio

由图 10 可知, 对照组 UHPC 的热流峰值出现时间较早, 这一特性对水泥早期水化过程具有显著的促进作用<sup>[20]</sup>。由于试验组 UHPC 中吸湿材料的种类较多<sup>[21]</sup>, 与对照组相比, 其 UHPC 的水化反应起始时间约延迟 2.5~3 h。采用石灰石粉、矿渣和浮石粉混掺替代部分水泥, 可减少水泥使用量, 有效调控 UHPC 的水化热释放过程, 降低放热峰, 缓解温度应力集中, 显著降低其开裂风险, 提升 UHPC 基体的稳定性与耐久性。

### 4.2 孔结构

为分析石灰石粉、矿渣和浮石粉混掺替代部分水泥对 UHPC 孔结构的影响, 采用压汞法 (MIP), 得到最优配合比下不同养护龄期 UHPC 的累积孔隙

体积和累积孔体积, 见图 11。由图 11 (a) 可知, 随着水化反应的不断进行, 累积孔隙体积逐渐减小。养护 28 d 时, 累积孔隙体积为  $0.021 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。由图 11 (b) 可知, UHPC 的孔径随着养护龄期的延长逐渐细化, 养护龄期为 28 d 时, 累积孔体积为  $0.0027 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。随着养护龄期的延长, 孔

径分布逐渐均匀, 且主要集中分布在  $10 \sim 20 \text{ nm}$  附近, 多为无害孔, 对 UHPC 强度基本无影响。根据不同孔径尺寸对结构的危害程度, 将孔径分为 4 类, 分别为孔径小于  $20 \text{ nm}$  的无害孔、 $[20,100) \text{ nm}$  的少害孔、 $[100,200] \text{ nm}$  的有害孔和大于  $200 \text{ nm}$  的多害孔<sup>[22]</sup>。

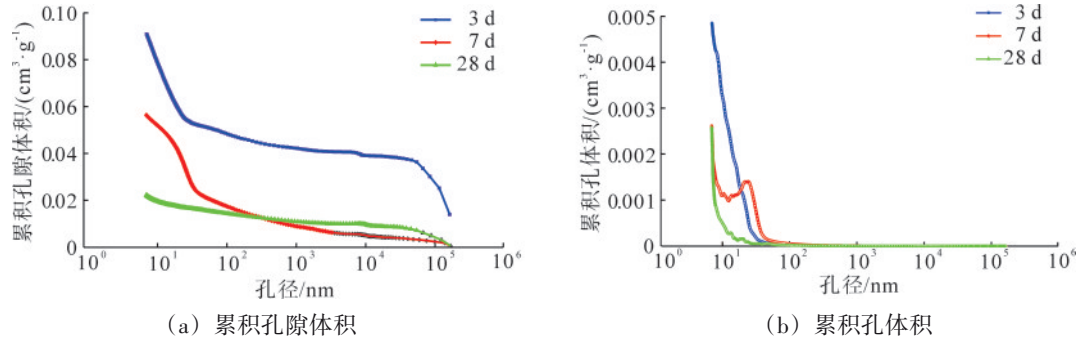


图 11 最优配合比下不同养护龄期 UHPC 的累积孔隙体积与累积孔体积

Fig.11 cumulative pore and cumulative pore volume of UHPC at different curing ages under the optimal ratio

利用 PCAS 孔隙率分析系统, 得到最优配合比下不同养护龄期 UHPC 的孔结构, 见图 12。UHPC 中大部分为小凝胶孔<sup>[23]</sup>。养护 3 d、7 d、28 d, UHPC 的孔隙率分别为 36.06%、20.27% 和 11.92%,

这是由于随着养护龄期的延长, 水化产物逐渐增多, 可填充基体孔隙, 降低孔隙率<sup>[24]</sup>, 有助于提高 UHPC 的强度和耐久性。

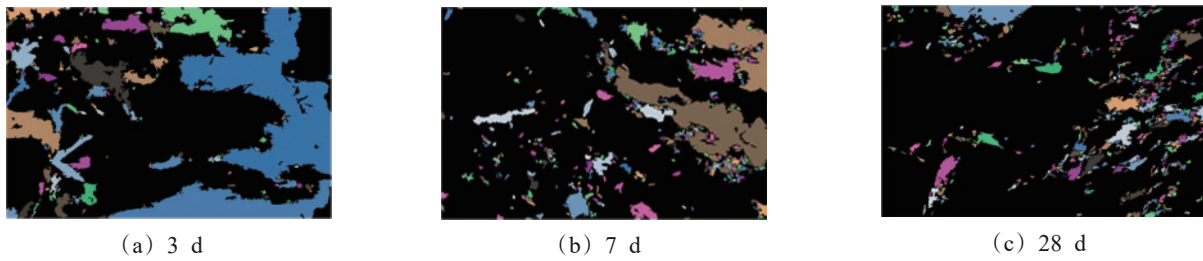


图 12 最优配合比下不同养护龄期 UHPC 的孔结构

Fig.12 pore structure of UHPC at different curing ages with optimal ratio

### 4.3 水化产物

最优配合比下 UHPC 水化产物的 XRD 衍射谱图见图 13。

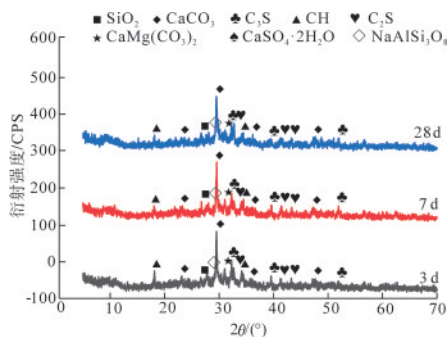


图 13 最优配比下 UHPC 水化产物的 XRD 衍射谱图

Fig.13 XRD diffraction pattern of UHPC hydration products under the optimal ratio

由图 13 可知, UHPC 的主要结晶相为 CH、 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{SiO}_2$  及来自水泥熟料的矿物相 ( $\text{C}_2\text{S}$ 、 $\text{C}_3\text{S}$ )。随着养护龄期的延长, 水泥熟料矿物相的衍射峰逐渐降低, 产生这种现象可能有以下两方面原因: 一是未水化的水泥逐渐减少; 二是火山灰反应逐渐变强, 可消耗大量的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 导致  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  含量降低<sup>[25]</sup>, 衍射强度减弱。水化产物 CH 常存在于硅酸钙水合物 (C-S-H/CH) 纳米复合材料或大气孔中<sup>[26]</sup>, 可填充 UHPC 基体的孔隙, 提高 UHPC 微观结构的致密度和后期强度, 与孔结构试验结果一致。

### 4.4 SEM 电镜扫描

为研究石灰石粉、矿渣和浮石粉混掺替代部分水泥对 UHPC 微观形貌的影响, 通过扫描电镜观

察最优配合比下不同养护龄期UHPC的微观形貌, 见图14, 其中, ITZ表示界面过渡区<sup>[27]</sup>, 即骨料与胶凝材料之间的特定区域。由图14可以看出, 随着养护龄期的延长, UHPC的孔洞和裂缝数量逐渐减少, 同时, 孔洞和裂缝的宽度也有所减小。各

种胶凝产物与砂浆衍生出的水化产物互相交织、叠加, 消除了界面过渡区。此外, 附着的絮状C-S-H凝胶填充UHPC内部孔隙, 优化了微观结构, 整体密实性有所提高。

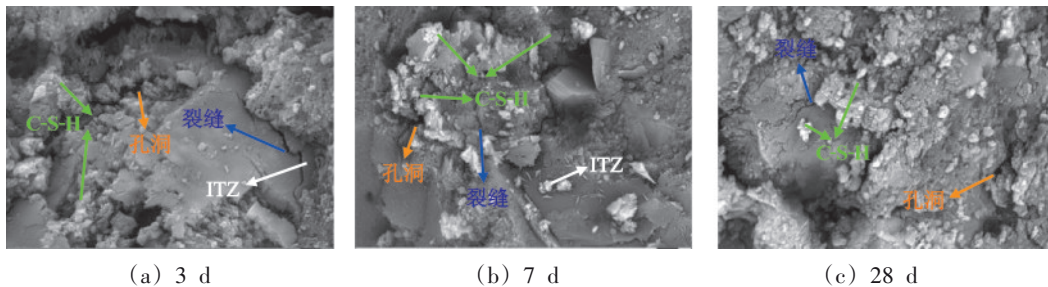


图14 最优配合比下不同养护龄期UHPC的SEM扫描结果

Fig.14 SEM scanning results of UHPC at different curing ages under optimal ratios

#### 4.5 对照组和试验组水化产物及孔结构对比分析

为进一步验证本文所制备的UHPC的性能, 对养护28 d下对照组和试验组UHPC的水化产物进行对比, 见图15。

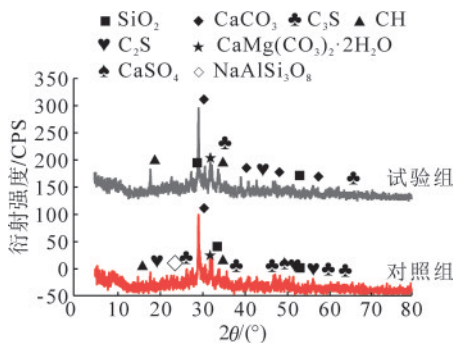


图15 对照组和试验组UHPC的XRD谱图对比

Fig.15 comparison of XRD patterns of UHPC in control group and experimental group

由图15可知, 对照组UHPC水泥水化不完全, 存在较多未水化水泥熟料的矿物相C<sub>2</sub>S、C<sub>3</sub>S, 导致UHPC的微观结构疏松多孔。试验组由于降低了水泥用量, 未水化水泥熟料的矿物相C<sub>2</sub>S、C<sub>3</sub>S较少, 水泥基本完全水化, 产生较多的C-S-H凝胶, 可改善UHPC的微观结构。

利用PCAS孔隙率分析系统, 得到养护28 d下对照组和试验组UHPC的孔结构, 见图16。

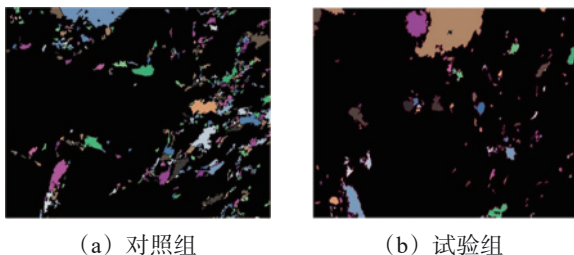


图16 对照组与试验组UHPC孔隙率

Fig.16 porosity of UHPC in the control group and the test group

由图16可以看出, 试验组UHPC的孔结构更致密。对照组和试验组UHPC的孔隙率分别为19.21%和11.92%, 与对照组相比, 试验组UHPC的孔隙率降低了37.9%。

## 5 结论

采用石灰石粉、矿渣和浮石粉混掺替代部分水泥制备绿色UHPC, 并通过试验验证UHPC的性能, 观察其微观结构, 得出如下结论。

(1) 石灰石粉、矿渣和浮石粉混掺替代部分水泥, 可降低UHPC的早期强度, 改善微观结构, 提高后期强度。与对照组相比, 试验组UHPC的抗压强度和抗折强度分别提高了8.60%和9.97%。

(2) 通过抗氯离子渗透性能试验和抗碳化性能试验, 验证了试验组UHPC具有优异的耐久性。优化后的配合比较合理, 研究结果可靠。

(3) 石灰石粉、矿渣和浮石粉混掺替代部分水泥, 可通过火山灰反应和内部固化作用促进UHPC基体水化, 提高水化产物含量, 降低UHPC的早期水化热和开裂风险。

本文未分别研究石灰石粉、矿渣和浮石粉对UHPC微观结构的影响, 以及材料性能、材料交互作用对UHPC的影响, 未来可针对上述不足继续开展研究, 拓宽生态型UHPC的应用前景。

#### 参考文献(References):

[1] SHI C J, WU Z M, XIAO J F, et al. A review on ultra high performance concrete: part I. Raw materials and mixture design[J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 741-751.  
 [2] WANG D H, SHI C J, WU Z M, et al. A review on ultra high performance concrete: part II. Hydration, microstructure and properties[J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 368-377.  
 [3] TAHWIA A M, HAMIDO M A, ELEMAM W E. Using mixture design method for developing and optimizing eco-friendly ultra-high performance concrete characteristics[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18: e01807.

- [4] EDWIN R S, DE SCHEPPER M, GRUYAERT E, et al. Effect of secondary copper slag as cementitious material in ultra-high performance mortar[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 119:31-44.
- [5] CHEYREZY M, MARET V, FROUIN L. Microstructural analysis of RPC(reactive powder concrete)[J]. *Cement and Concrete Research*, 1995, 25(7):1491-1500.
- [6] HABEL K, VIVIANI M, DENARIÉ E, et al. Development of the mechanical properties of an ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPC)[J]. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(7): 1362-1370.
- [7] HOU D S, WU D, WANG X P, et al. Sustainable use of red mud in ultra-high performance concrete (UHPC): design and performance evaluation[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 115:103862.
- [8] YANG R, YU R, SHUI Z H, et al. Low carbon design of an Ultra-High Performance Concrete (UHPC) incorporating phosphorous slag[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 240:118157.
- [9] FAN D Q, ZHANG C P, LU J X, et al. Recycling of steel slag powder in green ultra-high strength concrete (UHSC) mortar at various curing conditions[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 70: 106361.
- [10] ESMAEILI J, OUDAH AL-MWANES A. Production of eco-friendly UHPC with high durability and resistance to harsh environmental conditions using copper mine tailings[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 76:107297.
- [11] WU N S, JI T, HUANG P, et al. Use of sugar cane bagasse ash in ultra-high performance concrete (UHPC) as cement replacement [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 317:125881.
- [12] 刘爽. 掺浮石粉超高性能混凝土的制备及性能研究[D]. 重庆:重庆大学, 2020:23-32.
- [13] 任亮, 郑胜佩, 蔡昂霖, 等. 不同损伤模型下超高性能混凝土 SHPB 试验数值模拟对比[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2023, 39(4):660-669.
- REN Liang, ZHENG Shengpei, CAI Anglin, et al. Comparison on numerical simulation of SHPB test for ultra-high performance concrete under different damage models[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science)*, 2023, 39(4):660-669.
- [14] 龚建清. 超高性能混凝土的级配效应研究[D]. 长沙:湖南大学, 2008:35-66.
- [15] 刘从燕. 减水剂在商品混凝土中的应用研究[D]. 南昌:南昌大学, 2014:33-48.
- [16] FERDOSIAN I, CAMÕES A. Eco-efficient ultra-high performance concrete development by means of response surface methodology [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 84:146-156.
- [17] 石子钊. 钢渣固废基低收缩 UHPC 组成设计与收缩调控研究[D]. 包头:内蒙古科技大学, 2024:23-60.
- [18] 黄文意. 掺陶瓷颗粒绿色超高性能混凝土的力学性能和微观结构[D]. 南昌:华东交通大学, 2021:46-49.
- [19] CHA S L, JIN S S. Prediction of thermal stresses in mass concrete structures with experimental and analytical results[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 258:120367.
- [20] CUI K, LAU D, ZHANG Y Y, et al. Mechanical properties and mechanism of nano-CaCO<sub>3</sub> enhanced sulphoaluminate cement-based reactive powder concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 309:125099.
- [21] LURA P, WYRZYKOWSKI M, TANG C, et al. Internal curing with lightweight aggregate produced from biomass-derived waste[J]. *Cement and Concrete Research*, 2014, 59:24-33.
- [22] GU C P, JI Y J, YAO J K, et al. Feasibility of recycling sewage sludge ash in ultra-high performance concrete: volume deformation, microstructure and ecological evaluation[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 318:125823.
- [23] AKIN ALTUN İ, YILMAZ İ. Study on steel furnace slags with high MgO as additive in Portland cement[J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(8):1247-1249.
- [24] BAKHBERGEN U, SHON C S, ZHANG D C, et al. Assessment of Reactive powder concrete subjected to three different sodium sulfate Concentrations: compressive Strength, Absorption, Porosity, Microstructure, and durability[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 325:126804.
- [25] XU Q, JI T, GAO S J, et al. Characteristics and applications of sugar cane bagasse ash waste in cementitious materials[J]. *Materials*, 2018, 12(1):39.
- [26] ZHAO S J, FAN J J, SUN W. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 50:540-548.
- [27] KNOP Y, PELED A. Packing density modeling of blended cement with limestone having different particle sizes[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 102:44-50.