doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.202502001

掺PVA纤维超高性能混凝土水泥替代率试验研究

阮祯炎[1],史　俊[2],石飞停[3],曾　磊[4]

(1.长江大学 城市建设学院,湖北 荆州　434000;
2.中南大学 土木工程学院,湖南 长沙　410083;
3.盐城工学院 土木工程学院,江苏 盐城　224051;
4.安徽工程大学 建筑工程学院,安徽 芜湖　241000)

摘要:本文采用正交试验的方法对掺杂PVA纤维、石灰石粉和废玻璃粉的超高性能混凝土进行分析,研究了PVA纤维掺量、石灰石粉替代率和废玻璃粉替代率3种因素对混凝土抗压强度和抗弯强度的影响规律与显著程度,并对其机理进行分析。结果表明:废玻璃粉替代率达到20%时,混凝土抗压强度显著降低,整体上废玻璃粉替代率对抗压强度的影响最显著;在一定替代率和掺量下,加入石灰石粉、废玻璃粉和PVA纤维会提高试件极限抗弯强度,而废玻璃粉替代率对抗弯强度的影响最显著;石灰石粉和废玻璃粉替代率均为15%时,超高性能混凝土抗压强度达到最高为122.9 MPa。

关键词:超高性能混凝土;PVA纤维;石灰石粉;废玻璃粉;正交试验;抗压强度
中图分类号:TU528　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-5322(2025)02-0001-08

随着全球城市化进程的加速和基础设施建设的蓬勃发展,混凝土作为最主要的建筑材料,其需求量与日俱增。然而,传统混凝土的生产和使用过程中消耗大量自然资源,并排放大量二氧化碳,对环境造成严重负担。发展绿色、高性能混凝土已成为土木工程领域的重要研究方向。超高性能混凝土(UHPC)因其优异的力学性能和耐久性能,在高层建筑、大跨桥梁、海洋工程等领域展现出巨大的应用潜力。然而,UHPC的高水泥用量和低水胶比导致其生产成本高、自收缩大、脆性明显等问题,限制了其推广应用。

为了解决上述问题,国内外学者积极探索利用工业废渣和纤维增强技术来制备绿色超高性能混凝土。其中,废玻璃粉和石灰石粉作为工业副产品,可以部分替代水泥,降低混凝土的生产成本和环境负荷。废玻璃粉通过微集料填充效应和火山灰活性效应细化空隙结构提高混凝土的强度和耐久性[1-4],但过量的替代水泥会导致混凝土总孔隙率变大,混凝土力学性能降低[5]。石灰石粉同废玻璃粉类似具有微集料填充效应,同时石灰石粉颗粒的不规则形状可以增加与水泥基体的机械咬合力,提高混凝土的韧性,改善其脆性破坏模式[6-11],并通过细化孔径分布显著提升混凝土抗氯离子渗透性,其最佳掺量为15%~20%[12],此外纳米$CaCO_3$通过表面改性可显著提升其在水泥基体中的分散性[13]。

绿色超高性能混凝土在替代水泥情况下其抗裂性能相对降低。聚乙烯醇(PVA)纤维作为一种高性能合成纤维,具有强度高、弹性模量大、与水泥基体粘结性好等优点,可以有效改善混凝土的韧性和抗裂性能[14-17]。而钢纤维的加入可以提升混凝土的抗压强度,但随着掺量的加入抗压强度变化不显著,聚乙烯醇纤维随着掺量的增加,抗压强度逐渐下降,抗弯抗裂性能逐渐增强,两种纤维在改善抗弯性能方面有较好的协调性[18-20]。

本文以绿色超高性能混凝土为研究对象,创新性地采用废玻璃粉和石灰石粉作为水泥替代

收稿日期:2025-02-18
作者简介:阮祯炎(2000—),男,湖北潜江人,硕士生,主要研究方向为超高性能混凝土。
通信作者:史俊(1979—),男,安徽怀宁人,副教授,博士,主要研究方向为仿生多功能材料。

材料,结合纤维增强技术,系统探究其对UHPC力学性能的影响规律。基于《混凝土用复合掺合料(JG/T 486—2015)》[21]的技术规范要求及前期试验验证,确定10%~20%为石灰石粉在UHPC体系中的最优掺量范围。在此基础上,采用石灰石粉与玻璃粉1∶1复配的设计方案,同时引入钢纤维和聚乙烯醇纤维混掺的协同增强策略,以兼顾材料的绿色环保性与力学性能。通过试验,研究不同水泥替代率和聚乙烯醇纤维掺量对超高性能混凝土力学性能的影响规律,推动绿色超高性能混凝土的工程应用。

1　试验概况

1.1　试验材料

本试验水泥采用"山水牌"52.5级普通硅酸盐水泥(P.O 52.5),生产于诸城市阳春水泥有限公司;硅灰为灵寿县东岩矿产生产,平均粒径为0.1 μm,比表面积为15 000~20 000 m^2/kg;依据最大堆积密度理论,本次试验所用砂子的粒径应大于水泥的粒径,采用天然河砂,细度模数为2.9;玻璃粉采用不同分级筛进行筛选制得,粒径小于0.1 mm;石灰石粉选择浙长忠嘉有限公司生产的碳酸钙粉;钢纤维采用苏州龙宇钢纤维有限公司生产的平直型镀铜钢纤维,长度和半径分别为13 mm、0.6 mm;PVA纤维直径为0.2 mm、长度为12 mm,纤维性能参数见表1;所用减水剂为聚羧酸高效减水剂,减水效率为25%~35%;水为普通生活用水。

表1　PVA纤维的特征参数

Table 1　Characteristic parameters of PVA fiber

参数	参数值
长度/mm	12
密度/($g\cdot cm^{-3}$)	1.29
当量直径/μm	15.3
抗拉强度/MPa	1 830
弹性模量/GPa	40
断裂延伸率/%	7

1.2　配合比设计

考虑制作UHPC的成本过高,采用废玻璃粉和石灰石粉替代水泥能有效降低成本;而PVA纤维的加入能提高混凝土的弯曲强度。为探究玻璃粉与石灰石水泥的不同替换率和不同PVA掺量对UHPC力学性能的影响,采用正交试验设计方法,考虑废玻璃粉替代率A、石灰石粉替代率B、PVA掺量C这3种因素,每种因素3个水平,设计了Z1~Z10共10组混凝土配合比,其中Z1组为对照组。配合比设计见表2,水胶比为0.21,钢纤维体积含量2%,废玻璃粉、石灰石粉替代率均为10%、15%、20%,PVA掺量为体积含量,分别为0.1%、0.2%、0.3%。

表2　正交表与单方混凝土材料用量

Table 2　Orthogonal table and the dosage of unilateral concrete materials

编号	因素			混凝土材料用料/($kg\cdot m^{-3}$)							
	A/%	B/%	C/%	水泥	砂子	硅灰	玻璃粉	石灰石	减水剂	钢纤维	聚乙烯醇
Z1	0	0	0	1 154	1 282.3	128.3	0	0	25.6	156	0
Z2	10	10	0.1	897	1 282.3	128.3	128	128	25.6	156	1.19
Z3	10	15	0.2	833	1 282.3	128.3	128	192	25.6	156	2.38
Z4	10	20	0.3	769	1 282.3	128.3	128	256	25.6	156	3.57
Z5	15	10	0.2	833	1 282.3	128.3	192	128	25.6	156	2.38
Z6	15	15	0.3	769	1 282.3	128.3	192	192	25.6	156	3.57
Z7	15	20	0.1	705	1 282.3	128.3	192	256	25.6	156	1.19
Z8	20	10	0.3	769	1 282.3	128.3	256	128	25.6	156	3.57
Z9	20	15	0.1	705	1 282.3	128.3	256	192	25.6	156	1.19
Z10	20	20	0.2	641	1 282.3	128.3	256	256	25.6	156	2.38

1.3　试验方法

1.3.1 试件制备

本试验为混杂纤维超高性能混凝土,考虑纤维分散均匀性,采用"先干后湿",并且湿拌时分两次加入纤维以确保均匀性。养护为恒温恒湿标准养护,见图1a。

1.3.2 试件测试

立方体试件抗压强度根据《超高性能混凝土

试验方法标准（T/CECS 864—2021）》[22]进行，试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm，采用 3 000 kN电液伺服万能压力机以 1 mm/min 速率进行加载，测试 3 d、7 d、28 d 的试件抗压强度，见图 1b；抗弯强度试验依据《纤维混凝土试验方法标准（CECS 13—2009）》[23]进行，试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm，采用三分点加载，并在跨中安装位移计，以 0.2 mm/min 进行连续稳定加载，见图 1c。



a 恒温恒湿标准养护　　b 抗压强度测试　　c 抗弯强度测试

图 1　部分试验图

Fig. 1　Partial test diagram

2　结果与分析

2.1　力学试验结果

为探讨PVA掺量、废玻璃粉和石灰石粉替代率等因素对混凝土抗压强度和抗弯强度的影响规律，开展试验并对试验结果进行极差和方差分析。超高性能混凝土强度试验结果见表 3，极差分析结果见表 4，方差分析结果见表 5。

表 3　超高性能混凝土强度试验结果

Table 3　Strength test results of ultra-high performance concrete　　MPa

编号	抗压强度			28 d极限抗弯强度
	3 d	7 d	28 d	
Z1	86.8	99.2	124.0	8.5
Z2	84.0	103.0	112.0	10.1
Z3	59.5	71.8	87.6	12.4
Z4	75.5	87.7	111.0	15.3
Z5	87.9	96.0	115.6	17.7
Z6	84.8	111.9	122.9	15.8
Z7	45.2	58.1	71.7	11.8
Z8	39.1	45.3	56.6	9.7
Z9	68.5	80.0	87.9	16.5
Z10	55.9	75.8	90.2	13.0

2.2　抗压强度

Z1~Z4试件破坏形态如图 2 所示。对比Z1试件，掺杂PVA纤维后混凝土破坏由试件顶部左侧或者右侧最先生出向下延伸的裂缝，形成最主要的竖向裂缝；随着荷载的增加，混凝土侧边出现剥落现象，试件顶部右侧陆续出现细小裂缝并向下发展，混凝土中部未出现明显裂缝，直至试件达到屈服，试件顶部出现压溃现象，最终破坏。在试件受压过程中，随着PVA掺量的增加，混凝土剥落现象逐渐不明显。说明PVA的掺入改善了混凝土的塑性性能，抑制裂缝的产生和发展。

表 4　极差分析结果

Table 4　Range analysis results　　MPa

极差来源	抗压强度			抗弯极限强度		
	A	*B*	*C*	*A*	*B*	*C*
K_1	103.5	94.7	90.5	12.6	12.5	12.8
K_2	103.4	99.5	97.8	15.1	14.9	14.4
K_3	78.2	91.0	96.8	13.1	13.4	13.6
R_j	25.3	8.5	7.3	2.5	2.4	1.6
排序	$R_A>R_B>R_C$			$R_A>R_B>R_C$		

注：*K*值表示某个因素在同一水平下试验结果的平均值；*R*值是某个因素 *K*值中的最大值与最小值的差。

根据表 3 超高性能混凝土强度试验结果可知，养护 28 d 时在废玻璃粉替代率较小的情况下，Z2、Z3 和 Z4 抗压强度分别为 112.0 MPa、87.6 MPa 和 111.0 MPa，均小于 Z1 的抗压强度为 124.0 MPa。分析其强度下降的原因有两点：1）在没有细度优化、活性激发及合理配比情况下，少量的废玻璃粉替代水泥会导致混凝土强度小幅度下降；2）PVA纤维的亲水性，导致凝胶材料

表5　方差分析结果
Table 5　Variance analysis results

指标		统计参数					是否显著	贡献率/%
		自由度	平方和	均方差	*F*值	*P*值		
抗压强度	*A*	2	1 273.469	636.734	0.527	0.655	否	86.3
	B	2	108.842	54.421	0.045	0.957	否	7.4
	C	2	93.429	46.714	0.039	0.963	否	6.3
	误差	2	2 417.662	1 208.831	/	/		/
抗弯极限强度	*A*	2	10.234	5.117	0.238	0.808	否	44.9
	B	2	8.956	4.478	0.208	0.828	否	39.3
	C	2	3.627	1.814	0.084	0.922	否	15.9
	误差	2	42.972	21.486	/	/		/



Z1试件　Z2试件　Z3试件　Z4试件

图2　试件受压破坏形态
Fig. 2　Failure mode of specimen under compression

在搅拌时出现拌合不均匀现象,影响混凝土密实度,且PVA的掺入会让更多的空气渗入,使凝胶材料之间的接触面积减少,最终导致混凝土强度降低[20]。当废玻璃粉替代率达到20%时,相比较废玻璃粉替代率为10%和15%时,抗压强度出现大幅度下降,这是因为废玻璃粉替代率过高,会导致水泥水化胶凝产物数量降低;另外,废玻璃粉具有高光滑度,过量的替代会使废玻璃粉与水泥浆之间的黏结力不足。

抗压强度主效应图如图3所示。由图3可知,当废玻璃粉替代率低于20%时,废玻璃粉替代率对抗压强度影响较小,这与极差分析结果相吻合。对比Z2~Z6,在废玻璃粉替代率为10%和15%,且在其他材料相同的情况下,抗压强度变化随石灰石粉替代率和PVA掺量的变化相对较小,可见PVA纤维掺量和石灰石粉替代率对混凝土抗压强度的影响较小并相似。

Z4和Z6对比其他试件,其抗压强度相对较高,由此可见,当废玻璃粉替代率低于20%,水泥

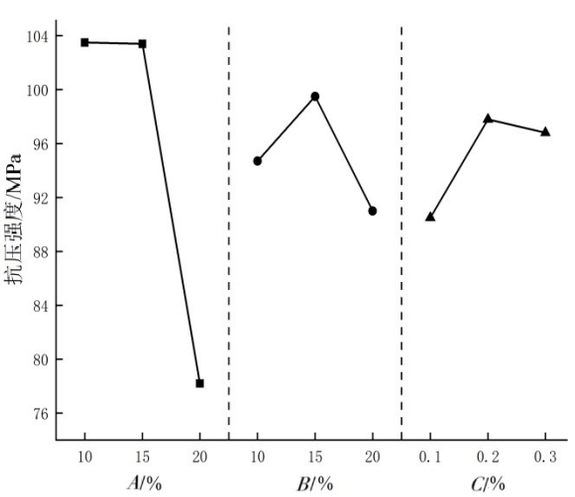


图3　抗压强度主效应图
Fig. 3　Main effect diagram of compressive strength

总替代率为30%时,颗粒级配互补[24],且石灰石粉及碳酸钙在早期参与水化形成碳铝酸钙,减小凝胶空隙,提升强度[25];而废玻璃粉中的二氧化硅在碱性环境下具有火山灰活性,能够与水泥水

化产物氢氧化钙（$Ca(OH)_2$）反应，生成额外的C-S-H凝胶，提升混凝土后期强度，因此，采用石灰石粉和废玻璃粉替代部分水泥可在保证力学性能前提下实现UHPC的绿色化转型。

Z3和Z7相对于Z2~Z6（废玻璃粉替代率小于20%），试件抗压强度显著降低。回顾试件制备和养护过程分析其原因：Z3和Z7试件制备时，PVA纤维在搅拌过程中未分多次加入，PVA纤维未在混凝土中均匀分布，导致纤维分布不均并出现团聚现象。这种不均匀分布形成了局部薄弱区，降低了试件的整体密实度，从而显著影响抗压强度。因此在混凝土制备过程中应严格遵循分次投料工艺，优化搅拌时间和速度，确保纤维均匀分散。

各因素对混凝土抗压强度贡献率排序为：废玻璃粉替代率>石灰石粉替代率>PVA纤维掺量。综合图3结果可得出，废玻璃粉替代率为10%和15%时，对混凝土抗压强度影响很小；废玻璃粉替代率达到20%时，将大幅度降低混凝土抗压强度。由表5可以看出，石灰石粉替代率和PVA纤维掺量对抗压强度的贡献率分别为7.4%和6.3%，显然它们对抗压强度的影响并不显著。

2.3　抗弯强度

荷载-挠度曲线图如图4所示。对比Z1，其他试件的极限抗弯强度和对应挠度均增加；对比Z2~Z7，在废玻璃粉掺量不变的情况下，极限抗弯强度随着石灰石粉替代率和掺入PVA纤维含量的增加而增高，而其中PVA纤维掺量的加入，在混凝土中有效起到桥接作用，受到弯曲荷载时能延缓裂缝的延展，提高抗弯强度，石灰石粉与废玻璃粉颗粒级配互补，优化混凝土的颗粒分布，提高密实度，从而增强抗弯强度。Z4极限抗弯强度为15.3 MPa大于Z8极限抗弯强度9.7 MPa，Z6极限抗弯强度15.8 MPa大于Z4的15.3 MPa，可见废玻璃粉替换率未到20%时，石灰石粉对极限抗弯强度的影响效果比废玻璃粉显著，而达到20%时则相反；Z5极限抗弯强度大于Z7，可得出石灰石粉替代率比PVA纤维掺量对极限抗弯强度的影响效果更显著。

由表4的极差分析结果可知，废玻璃粉对极限抗弯强度影响最大，极差为2.5 MPa；石灰石粉影响程度相似，极差为2.4 MPa；PVA纤维影响程度最低，极差为1.6 MPa。图5为极限抗弯强度主效应图。由图5可看出，石灰石粉、废玻璃粉和

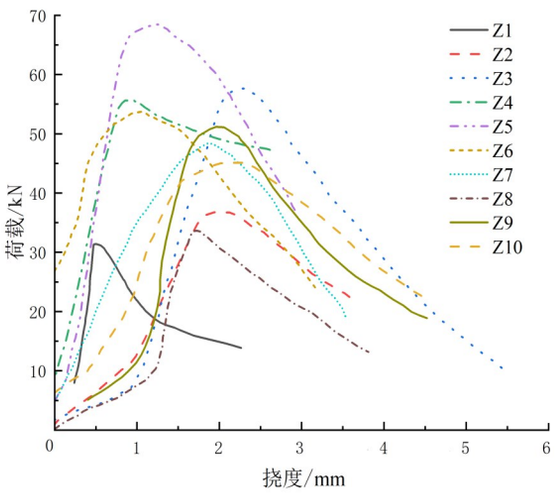


图4　荷载-挠度曲线图

Fig. 4　Load-deflection curves of concrete of Z1~Z10 group

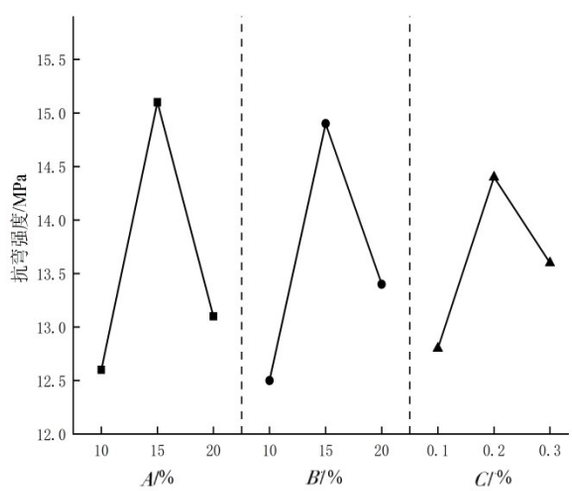


图5　极限抗弯强度主效应图

Fig. 5　Main effect diagram of ultimate flexural strength

PVA纤维对极限抗弯强度的影响程度差异较小。由表5的方差分析结果可以看出，废玻璃粉替代率、石灰石粉替代率和PVA纤维掺量对极限抗弯强度的贡献率分别为44.9%、39.3%、15.9%。显然，影响混凝土极限抗弯强度显著程度的排序为：废玻璃粉替代率>石灰石粉替代率>PVA纤维掺量。与极差分析结果相似，即废玻璃粉替代率对混凝土极限抗弯强度的影响最显著。

2.4　微观结构分析

为进一步探究石灰石粉和废玻璃粉替代水泥以及钢纤维和PVA纤维混掺制备的超高性能混凝土的力学性能变化规律，取部分试块进行SEM电镜扫描，结果如图6所示。石灰石粉颗粒

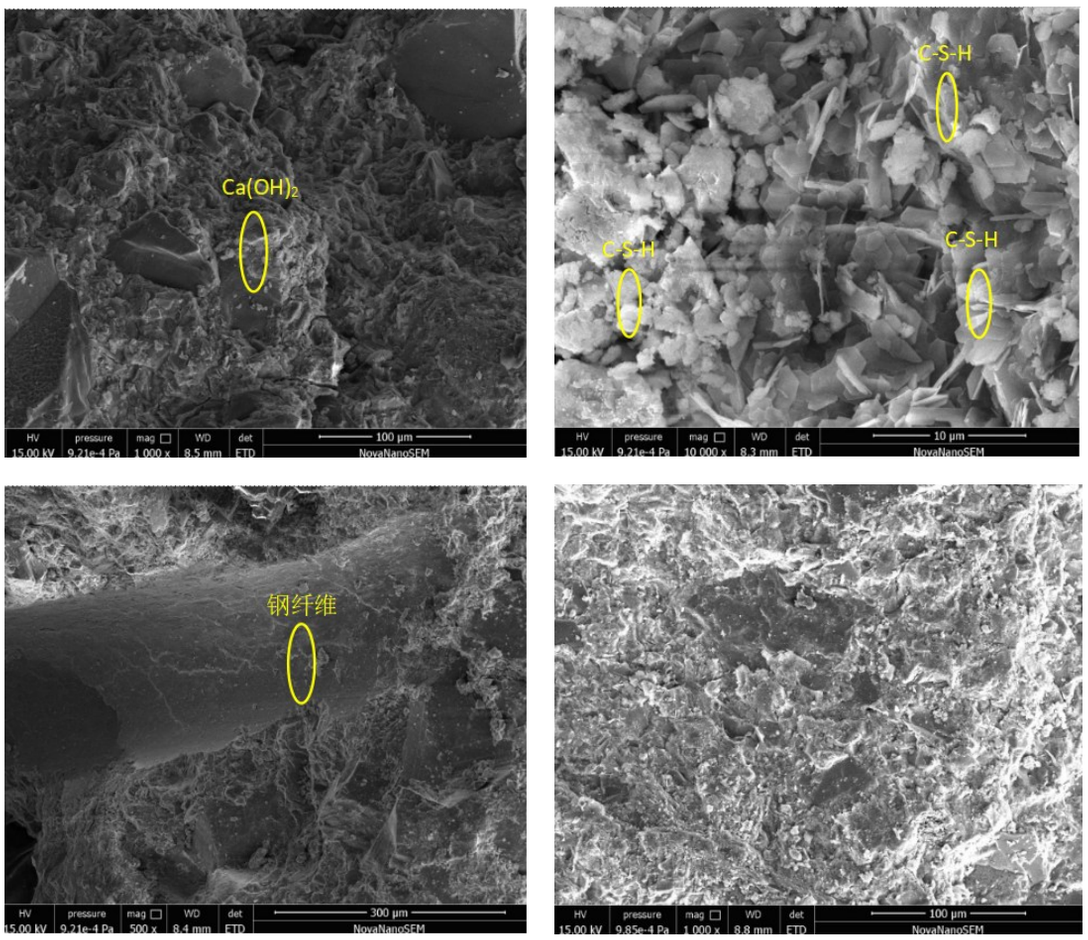


图6　混凝土微观结构特征

Fig. 6　Microstructural characteristics of concrete

紧密嵌布于凝胶网络结构中,有效填充了50~200 nm范围内的有害孔隙,这种物理填充效应与化学活性的协同作用,显著优化了基体的孔隙结构。废玻璃粉在碱性环境下通过火山灰反应生成的C-(N)-A-S-H凝胶具有显著的低钙硅比特征(Ca/Si=0.89±0.05),这种特殊的凝胶结构为体系提供了优异的力学性能和耐久性基础。PVA纤维和钢纤维不参与水化反应,C-S-H凝胶会吸附在PVA纤维表面,增大内部孔隙率,而PVA纤维与钢纤维在基体中形成三维网络结构,当掺量适当时,纤维表面与水泥水化产物形成厚约2~5 μm的致密过渡区。

孔隙率和孔径分布对UHPC的力学性能至关重要。已有的研究结果[26]显示,根据不同孔径尺寸对水泥基材料的危害程度可以将孔分为4类:孔径小于20 nm的无害孔、20~50 nm的少害孔、50~200 nm的有害孔和大于200 nm的多害孔。通过压汞试验测得的28 d龄期混凝土芯样测试结果见表6。

由表6可知,与基准混凝土Z1对比,龄期为28 d时,复掺废玻璃粉与石灰石粉的超高性能混凝土的平均孔径减小,孔隙率总体增大,小于20 nm的无害孔和20~50 nm少害孔增加,随着石灰石粉和废玻璃粉取代水泥的数量增加,孔隙率先减小后增大。复掺废玻璃粉与石灰石粉复掺含量均为10%时,总孔隙率从8.3%变为7.2%,此时石灰石粉微填充主导,废玻璃粉和火山灰反应未充分激发;复掺废玻璃粉与石灰石粉含量均为15%时,总孔隙率从7.2%变为7.6%,废玻璃粉和石灰石粉协同效应达到峰值,凝胶孔增加补偿毛细孔减少;复掺废玻璃粉与石灰石粉含量均为20%时,总孔隙率从7.6%变为8.8%,废玻璃粉颗粒堆积导致新生孔隙,石灰石粉填充效应饱和。可见废玻璃粉与石灰石粉含量在10%~15%时孔隙率增幅最小(≤0.4%),且孔径分布最优。

表6　混凝土芯样的孔隙参数测试结果
Table 6　Test results of pore parameters of concrete core samples

编号	孔径尺寸分布/%				平均孔径/nm	总孔隙率/%
	<20 nm	20~50 nm	50~200 nm	>200 nm		
Z1	23.5	16.3	10.3	44.7	58.2	8.3
Z2	26.3	18.9	8.1	46.7	55.3	7.2
Z6	27.4	23.2	5.4	44.0	48.6	7.6
Z10	25.6	21.3	8.1	45.0	51.9	8.8

3　结 论

本研究采用正交试验设计方法，系统研究了石灰石粉、废玻璃粉与PVA纤维的复掺协同效应。通过多因素、多水平的优化组合，深入分析了不同材料掺量比例对混凝土抗压强度、抗弯强度等关键力学性能的影响规律。PVA纤维的加入会降低混凝土的抗压强度。在复掺情况下，废玻璃粉替代率未达到20%时，石灰石粉和废玻璃粉均能提高混凝土的抗压强度，废玻璃粉替代率达到20%时，会大幅度降低抗压强度。废玻璃粉替代率、石灰石粉替代率和PVA掺量对混凝土抗压强度的贡献率分别为86.3%、7.4%和6.3%，表明废玻璃粉替代率对抗压强度影响最显著。

相比较标准组Z1，加入石灰石粉、废玻璃粉和PVA纤维的试件极限抗弯强度均增大。对极限抗弯强度的影响程度，废玻璃粉替代率>石灰石粉替代率>PVA掺量，其中石灰石粉替代率和废玻璃粉替代率的影响效应相差不大。试验结果表明，石灰石粉替代率和废玻璃粉替代率均为15%，PVA掺入量0.3%时，颗粒级配互补，抗压强度最高为122.9 MPa，极限抗弯强度为15.8 MPa，可满足超高层建筑、大跨桥梁等高强度场景的需求，同时利用工业废料降低材料成本，减少水泥用量，降低CO_2排放，兼具优异的力学性能、环保性与经济性。

参考文献：

[1] VAITKEVIČIUS V, ŠERELIS E, HILBIG H. The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2014, 68: 102-109.

[2] TAHWIA A M, ESSAM A, TAYEH B A, et al. Enhancing sustainability of ultra-high performance concrete utilizing high-volume waste glass powder[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01648.

[3] 徐海宾，杜永超，刘松鑫，等. 掺玻璃粉超高性能混凝土力学性能[J]. 混凝土，2023(8)：38-42.

[4] ZHAO S L, JIANG B, SONG K K, et al. Machine learning assisted design of high-entropy alloys with ultra-high micro-hardness and unexpected low density[J]. Materials & Design, 2024, 238: 112634.

[5] 李特，李琦. 不同替代率玻璃粉对混凝土性能的影响[J]. 水泥技术，2024(2)：91-96.

[6] 常秀龙，何廷树，牛梦蝶，等. 石灰石粉对不同强度等级混凝土性能的影响[J]. 新型建筑材料，2024，51(11)：23-29.

[7] RAMEZANIANPOUR A A, GHIASVAND E, NICKSERESHT I, et al. Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes[J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(10): 715-720.

[8] 赵学涛，杨鼎宜，杜保聪，等. 石粉含量对超高性能混凝土性能影响研究[J]. 混凝土与水泥制品，2020(3)：6-9.

[9] LI P P, BROUWERS H J H, CHEN W, et al. Optimization and characterization of high-volume limestone powder in sustainable ultra-high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 242: 118112.

[10] WANG D H, SHI C J, FARZADNIA N, et al. A quantitative study on physical and chemical effects of limestone powder on properties of cement pastes[J]. Construction and Building Materials, 2019, 204: 58-69.

[11] 南雪丽，王毅，陈浩，等. 石灰石粉对可持续UHPC胶凝材料体系强度影响[J]. 兰州理工大学学报，2024，50(6)：113-118.

[12] HUO X Y, WANG P W, WANG S H, et al. Experimental study on the mechanical properties and impermeability of basalt-PVA hybrid fibre reinforced concrete[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 21: e03646.

[13] ABDALLA J A, THOMAS B S, HAWILEH R A, et al. Influence of nano-TiO_2, nano-Fe_2O_3, nanoclay and nano-$CaCO_3$ on the properties of cement/geopolymer concrete[J]. Cleaner Materials, 2022, 4: 100061.

[14] NOUSHINI A, VESSALAS K, SAMALI B. Static mechanical properties of polyvinyl alcohol fibre reinforced concrete

(PVA-FRC)[J]. Magazine of Concrete Research, 2014, 66(9): 465-483.
[15] YAO J, GE Y L, RUAN W Q, et al. Effects of PVA fiber on shrinkage deformation and mechanical properties of ultra-high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2024, 417: 135399.
[16] NOUSHINI A, SAMALI B, VESSALAS K. Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013, 49: 374-383.
[17] 刘美业, 龚思雨, 曹志远, 等. 钢-聚乙烯醇纤维混凝土力学性能与孔结构研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(S1): 623-628.
[18] 江雨航. 钢-聚乙烯醇混杂纤维混凝土性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2022.
[19] 海然, 刘俊霞, 张茂亮, 等. 钢-聚乙烯醇混杂纤维超高性能混凝土性能研究[J]. 混凝土, 2016(5): 95-97, 101.
[20] 戎泽斌, 王成. 聚乙烯醇纤维掺量对混凝土力学性能宏微观破坏特征的影响[J]. 陕西水利, 2022(9): 1-5.
[21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土用复合掺合料: JG/T 486—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
[22] 中国工程建设标准化协会. 超高性能混凝土试验方法标准:T/CECS 864—2021 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
[23] 中国工程建设标准化协会. 纤维混凝土试验方法标准:CECS 13—2009 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
[24] 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.
[25] 何小玲. 石灰石粉集料对UHPC混凝土性能影响试验研究[J]. 江西建材,2024(9):46-48.
[26] 吴中伟,廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京:中国铁道出版社,1999.

Experimental Study on Cement Substitution Rate of Ultra-high Performance Concrete Mixed with PVA Fiber

RUAN Zhenyan[1], SHI Jun [2], SHI Feiting[3], ZENG Lei[4]

1. School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou Hubei 434000, China;
2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;
3. School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224051, China;
4. School of Architectural and Civil Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu Anhui 241000, China

Abstract: In this paper, the ultra-high performance concrete doped with PVA fiber, limestone powder and waste glass powder is analyzed by orthogonal test. It studies the influence laws and significance degrees of three factors, namely the content of PVA fibers, the substitution rate of limestone powder, and the substitution rate of waste glass powder, on the compressive strength and flexural strength of the concrete, and analyzes the mechanism thereof. The results show that when the substitution rate of waste glass powder reaches 20%, the compressive strength of concrete decreases significantly, and the overall substitution rate of waste glass powder has the most significant influence on the compressive strength. Under a certain substitution rate and dosage, the addition of limestone powder, waste glass powder, and PVA fibers can increase the ultimate flexural strength of the specimens. Among them, the substitution rate of waste glass powder has the most significant influence on the flexural strength. When the substitution rate of limestone powder and waste glass powder is 15%, the compressive strength of ultra-high performance concrete reaches up to 122.9 MPa .

Keywords: UHPC; PVA fiber; limestone powder; waste glass powder; orthogonal experiment; compressive strength

(责任编辑:陈 虹)