

机制砂UHPC力学性能影响因素分析

黄海 王小虎 张红升 周旋 王星屹

中建三局集团有限公司

摘要: 采用机制砂替代天然石英砂配制UHPC超高性能混凝土,研究了机制砂石粉含量、钢纤维掺量对UHPC抗压强度、抗折强度、劈裂抗拉强度、弹性模量等力学性能的影响。结果表明,机制砂石粉含量在5%以内对UHPC力学性能无不利影响,适量石粉有利于UHPC力学性能提升;掺加体积掺量为3%以内的钢纤维能够有效提升UHPC力学性能,改善韧性;UHPC强度增长主要在28天龄期内,180天后基本无强度增长。

关键词: UHPC; 机制砂; 石粉; 钢纤维; 力学性能
【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2024.02.027

引言

超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)是一种新型水泥基复合材料,抗压强度可达100MPa以上,抗拉强度达到6MPa以上,抗折强度大于20MPa,其水胶比一般在0.20左右,因此具有极低的孔隙率和超高耐久性^[1-3]。UHPC材料通常包括水泥、硅灰、粉煤灰、矿粉、细集料等,其中必不可少的是钢纤维,不同的钢纤维掺量会对UHPC的力学性能带来不同的影响。

随着我国经济社会的进步与发展,石英砂、河沙等天然砂被过度开采,生态环境遭到破坏;同时天然砂具有地域性的特点,跨区域使用提升了生产成本,而机制砂来源更为广泛、生产线具备自动化程度高、运行成本低、节能减排、产量大的特点,使得机制砂能够在广泛区域内广泛使用。

UHPC的使用场景越发丰富,使用地域越发分散,为降低生产成本、加速UHPC的推广应用,采用机制砂代替天然砂生产UHPC具有重要意义。Zhang等^[4]采用再生砂替代河砂制备出抗压强度满足要求的UHPC,但再生砂的替代量与抗压强度成反比。王永霞、朱志刚等^[5-6]采用白云石、铁尾矿等作为河砂替代品,研究表明强度略有降低。胡尧等^[7]使用玻璃纱替代石英砂,改变养护条件,有效提升了UHPC的强度。机制砂是由不同岩石粉碎生产得到不同粒径砂粒的同时产生了不同比例的石粉,而石粉含量对UHPC的力学性能具有影响。

因此本文通过试验分析研究了机制砂石粉含量、钢纤维掺量对UHPC抗压强度、抗折强度、劈裂抗拉强度、弹性模量等力学性能的影响,通过试验数据分析,探明了石粉含量及纤维掺量对UHPC力学性能的影响规律。

一、试验原材料及配合比设计

(一) 试验原材料

试验采用普通硅酸盐水泥(P·O 42.5),烧失量4.6%;粒化高炉矿渣采用S95级矿粉,比表面积为 $430\text{m}^2/\text{kg}$;硅灰比表面积为 $25\times 10^4\text{m}^2/\text{kg}$,外观为灰白色粉末;粉煤灰采用一级粉煤灰,平均粒径 $3\mu\text{m}$,胶凝材料的化学组成见表1所示。集料采用机制砂,表观相对密度 $2.85\text{g}/\text{cm}^3$,石粉含量3.5%,含水率0.2%,最大粒径为 2.36mm ;减水剂采用聚羧酸系减水剂,减水率高于40%;钢纤维选用长度 13mm ,直径 0.2mm 的镀铜微丝,长径比为60,抗拉强度 2000MPa ,密度为 $7.85\times 10^3\text{kg}/\text{m}^3$ 。

表1 胶凝材料的化学组分

材料	水泥	硅灰	粉煤灰	粒化高炉矿渣
SiO ₂ (%)	24.6	95.2	58.23	11.7
Al ₂ O ₃ (%)	2.5	—	20.08	—
CaO (%)	64.2	1.85	4.09	1.81
MgO (%)	1.4	0.27	1.04	1.91
Fe ₂ O ₃ (%)	2.3	0.59	7.86	—
Na ₂ O (%)	—	0.17	1.0	0.682
SO ₃ (%)	2.06	—	1.7	2.14
Cl ⁻ (%)	0.02	2.48	—	3.6

(二) UHPC配合比

基于最紧密堆积原理,UHPC基体更为密实,微裂缝和孔隙等缺陷更少,进而获得更高的承载力和优异的耐久性。根据课题组前期大量试验结果,胶凝材料体系采用75%水泥、25%的矿物掺合料(其中粉煤灰44kg、矿粉44kg及硅灰132kg),水胶比为0.18,胶砂比为1.05,钢纤维体积掺量为2%。

表2 UHPC基础配合比

水胶比	胶砂比	单位体积材料用量 (kg/m ³)							
		水泥	粉煤灰	硅灰	矿渣粉	机制砂	钢纤维	减水剂	水
0.18	1.05	880	44	132	44	1155	157	13.2	198

(三) 试件成型与养护

按照配合比对原材料称量,然后将胶凝材料、砂等倒入搅拌机搅拌混合均匀,将减水剂加入水中,混合均匀后缓慢倒入搅拌锅中,搅拌2~5分钟至基体呈现良好的流动性,进一步缓慢加入钢纤维,继续搅拌3~6min至UHPC呈现较好的流动性与包裹性。搅拌完成后,迅速进行流动度测试,然后浇筑至相应尺寸试模中,覆盖保鲜膜准备养护。

试件成型后立即放入标准养护室养护24h后拆模,拆模后蒸汽养护2d。蒸汽养护时升温速度控制在 $12\text{C}/\text{h}$ 左右,升温至指定温度(蒸汽温度 $90\text{C}\pm 5\text{C}$)后,保持48h,养护完成后,以 $15\text{C}/\text{h}$ 的速度对试件进行降温至室温后可开展后续力学性能试验。需要说明的是长龄期力学性能试验是试块结束蒸养后继续标养达到相应龄期后的试验。

(四) 力学性能测试

抗压强度试验参照GB/T31387-2015《活性粉末混凝土》^[8],试件采用边长为 100mm 立方体混凝土试件,试验加载速度为 $1.2\text{MPa}/\text{s}$,选用2000KN万能试验机;抗折强度试验参照GB/T31387-2015《活性粉末混凝土》和GB/T50081-2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》^[9],试块为 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 400\text{mm}$ 的棱柱体试件,采用MTS微机控制电子万能试验机进行加载,加载速度为 $0.5\text{mm}/\text{min}$,试件的跨距为 300mm ,采用四点抗弯加载模式。劈裂抗拉试验参照GB/T50081-2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》,试验仪器的加载速度为 $0.1\text{MPa}/\text{s}$ 。弹性模量参考GB/T50081-2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》静弹性模量试验方法。

二、结果分析与讨论

(一) 集料对机制砂UHPC力学性能影响

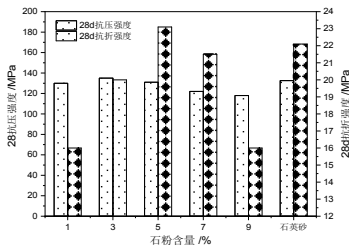
UHPC体系内集料、水泥石、纤维互为一个整体，依靠其间黏结力成为混凝土强度来源，其中，机制砂由于石粉含量差异，对UHPC力学性能将带来显著影响。

在保持水胶比为0.18、钢纤维体积掺量2%不变下，研究了机制砂石粉含量从1%增至9%对UHPC力学性能影响，并与天然石英砂进行比对。

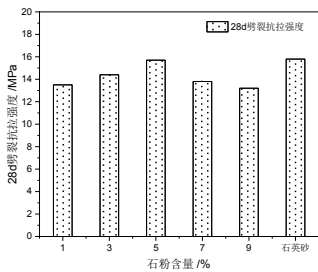
图2.1 (a) 为UHPC养护28天抗压强度、抗折强度结果。机制砂石粉含量在5%以内时对抗压与抗折强度并无不利影响，适量石粉反而有利于提升抗折强度，石粉含量为5%机砂UHPC的强度性能与天然石英砂基本相当。当石粉含量超过5%时强度逐渐减小。陈行等的研究认为，机砂石粉含量超过一定极限时，会破坏UHPC的紧密堆积，改变胶砂比，从而对强度造成负面影响。此外，机砂石粉能够增强混凝土保水性，过量石粉可能造成UHPC内部供水不足，出现收缩，形成内外微裂纹，影响到强度发展。

图2.1 (b) 为UHPC养护28天劈裂抗压强度结果。机制砂夹带适量石粉有利于提升UHPC劈裂抗压强度，石粉含量为5%时28天劈裂抗压强度为最高，达到15.4MPa，与平行试验石英砂的强度性能相当。与抗压、抗折强度规律一样，当石粉含量超过5%时，劈裂抗压强度明显下降。由于机砂石粉粒径较小，在UHPC中主要起到物理填充作用。也有学者认为，机制石粉可作为水泥水化成核位点，加速水泥水化，有助于水泥石结构形成。当石粉含量超过极限时，将引起混凝土结构收缩，对劈裂抗压强度带来不利影响。

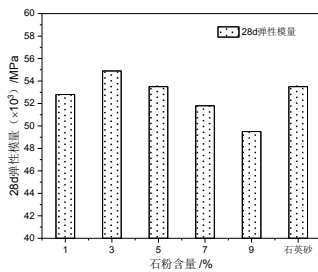
图2.1 (c) 为UHPC养护28天弹性模量结果。机砂含粉量为3~5%时的弹性模量接近石英砂，表明适量石粉对UHPC抵御形变时有利的。当石粉含量超过5%时弹性模量大幅减小，采用机制砂配制UHPC时应当对石粉含量加以重视。



(a) 抗压/抗折强度



(b) 劈裂抗压强度



(c) 弹性模量

图2.1不同含量机制砂配制UHPC力学性能规律

(二) 钢纤维掺量对机制砂UHPC力学性能影响

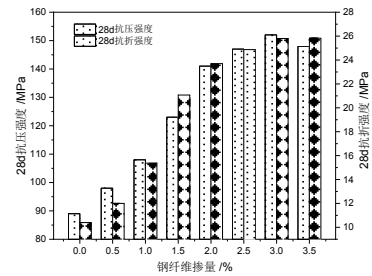
掺有钢纤维的UHPC在受压过程主要呈现塑性变形破坏，与未掺钢纤维的破坏形式截然不同。保持水胶比为0.18，采用石粉含量为3%机制砂，研究了掺加体积掺量为0~3.5%钢纤维对UHPC力学性能的影响。

图2.2 (a) 显示不同钢纤维掺量对UHPC养护28天抗压强度、抗折强度的影响。随着钢纤维掺量增加，抗压/抗折强度均呈不断增长趋势，当钢纤维掺量为3%时强度增长趋近饱和。实际UHPC拌制过程发现，掺加过多钢纤维更易在混凝土内部结团、出现分布不均匀现象。钢纤维增加了混凝土黏结性，起到传递荷载和桥接水泥石的作用。

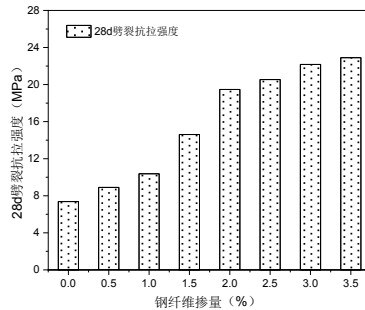
图2.2 (b) 显示不同钢纤维掺量对UHPC养护28天劈裂抗压强度的影响。随着钢纤维掺量增加，UHPC劈裂抗压强度显著提高，当钢纤维掺量超过2%时，劈裂抗压强度增幅趋近平缓。

混凝土常常因韧性不足，导致工程构件发生病害。折压比、拉压比能够表征混凝土韧性优劣性。图2.2 (c) 显示不同钢纤维掺量对UHPC养护28天折压比、拉压比的影响。体积掺量为1.5%~2.0%的钢纤维对于UHPC韧性提升相对最佳，当钢纤维掺量超过2%时韧性提升效果趋近饱和。

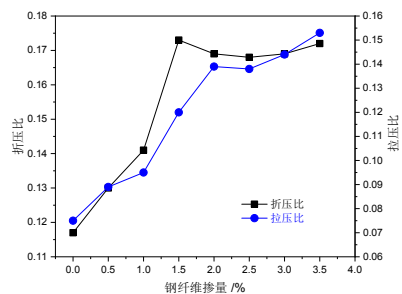
钢纤维由于优异的力学性能，能够在UHPC中参与水泥石桥接，帮助传递荷载，从而有效抑制混凝土裂缝发展。但当UHPC中存在过多钢纤维时，更易成团，难以分散，因而造成UHPC密实度减小，影响到力学性能和耐久性能。



(a) 抗压/抗折强度



(b) 劈裂抗压强度



(c) 28天折压/拉压比

图2.2不同钢纤维掺量配制UHPC力学性能规律

(三) 机制砂UHPC长龄期力学性能讨论

设计水胶比为0.18, 采用石粉含量为3%机制砂、体积掺量为2%钢纤维, 进行机制砂UHPC配制, 并对养护3d~270d的长龄期力学性能展开了研究。

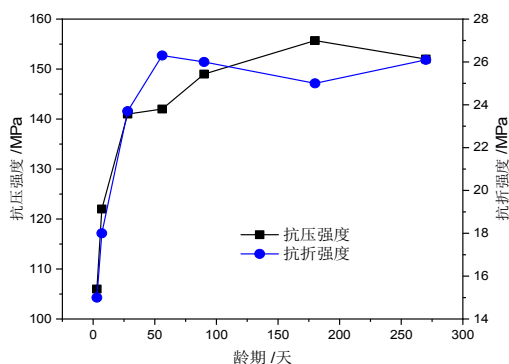
图2.3 (a) 为UHPC长龄期抗压强度、抗折强度测试结果。UHPC在28天以内时强度发展迅速, 养护28~180天阶段内呈现缓慢增长, 随着养护龄期增加, 强度增长速率趋近平缓。其中, 抗压强度在28天时即达到最高强度80%以上, 到180天达到155.7MPa, 之后几乎不再增长。与此不同, 抗折强度增长周期相对更短, 自养护56天后即不再增长。

研究^[10-13]表明钢纤维的加入增强了UHPC体积稳定性, 进而显著提升了抗压和抗折强度。到养护后期, UHPC内活性矿掺料参与混凝土二次水化, 进一步提高了混凝土强度。

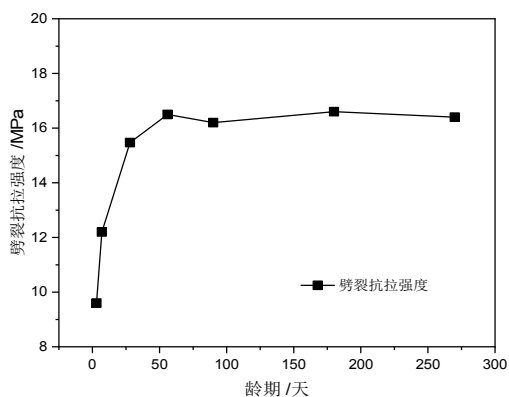
图2.3 (b) 为UHPC长龄期劈裂抗拉强度测试结果。劈裂抗拉强度在28天内增长较为迅猛, 至28天时即达到最高强度的90%以上, 养护56天时达到最高16.5MPa, 随后的劈裂抗拉强度趋近平缓, 难有进一步提升。

图2.3 (c) 为UHPC长龄期弹性模量测试结果。UHPC弹性模量在28天内发展较为迅速, 28天即达到最高值的85%, 养护至180天弹性模量几乎不再增长。

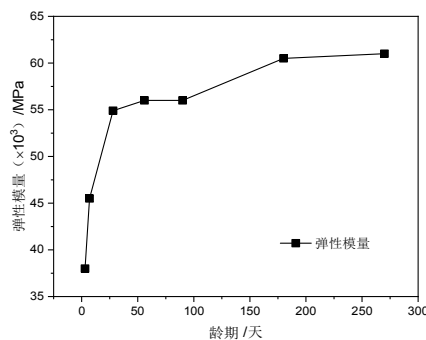
UHPC弹性模量由混凝土骨料和水泥石两部分决定。随着养护龄期增长, 水泥石水化程度不断提高, 水泥石与钢纤维接合更加牢固, 有效提升UHPC抵御形变能力, 呈现出弹性模量持续增长规律。



(a) 抗压/抗折强度



(b) 劈裂抗拉强度



(c) 弹性模量

图2.3 机制砂UHPC长龄期力学性能发展规律

三、结论

(1) 机制砂夹带适量石粉有助于提升UHPC力学性能, 采用石粉含量为5%机砂配制UHPC性能与天然石英砂基本相当, 石粉含量超过5%将对力学性能造成不利影响。

(2) 掺加钢纤维能够有效提升UHPC力学性能, 钢纤维体积掺量为3%时提升作用趋近饱和, 掺加1.5%~2%钢纤维对UHPC韧性增强效果最佳。

(3) UHPC强度发展主要集中在28天养护龄期内, 其中抗压强度到28天即达到最高强度80%以上, 随着龄期推延, 增长速率变缓, 龄期自180天后基本无强度增长。

参考文献

[1] Sedran F D L. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model[J]. Cem Concr Res, 1994, 24 (6): 997.

[2] Tuan N V, Ye G, Breugel K V, et al. The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete[J]. Constr Build Mater, 2011, 25 (4): 2030.

[3] Tuan N V, Hanh P H, Thanh L T, et al. Ultra high performance concrete using waste materials for high-rise buildings[C] // Proceedings of CIGOS-2010 Immeubles de grande Hauteur et Ouvrages Souterrains. Paris, 2010.

[4] 赵学涛, 杨鼎宜, 朱从香, 杨俊, 刘森. 掺机制砂的超高性能混凝土试验研究[J]. 混凝土, 2020 (09): 152-154+160

[5] 王永霞. 含白云石粗骨料超高性能混凝土的性能试验研究[J]. 长江科学院院报, 2020, 37 (1): 149-155.

[6] 朱志刚, 李北星, 周明凯. 梯级粉磨铁尾矿制备超高性能混凝土的研究[J]. 功能材料, 2015 (20): 20043-20047.

[7] 胡尧, 陈飞翔, 张国志, 等. 珊瑚砂和玻璃微珠制备超高性能混凝土的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2021 (2): 1-4.

[8] GB/T 31387-2015, 活性粉末混凝土[S].

[9] GB/T 50081-2019, 混凝土物理力学性能试验方法标准[S].

[10] 余睿, 范定强, 孙美娟等. 钢纤维掺量及其3D空间结构对超高性能混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49 (11): 2313-2321.

[11] 文韬, 姜久红, 王云飞. 纤维掺量对超高韧性混凝土受弯性能的影响[J]. 湖北工业大学学报, 2021, 36 (02): 95-98.

[12] 田会文, 周臻, 陆纪平等. 钢纤维掺量对FRP管约束超高性能混凝土轴压性能的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49 (03): 481-487.

[13] 吴继因, 许志鹏, 王铭涛等. 纤维混凝土增韧效应研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37 (S1): 220-223.