DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20240749

不同试验制度下超高性能混凝土抗冲磨性能

张晓闯[1]，陈 波[1]，王雄锋[2]，葛龙甄[1]，徐 宁[1]

(1. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室，江苏 南京 210029；
2. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司，湖南 长沙 410014)

摘要：为明确不同试验制度对超高性能混凝土(UHPC)抗冲磨性能的影响，通过单掺与混掺纤维的方式，研究不同试验制度下UHPC的抗冲磨性能，探讨不同试验制度对UHPC抗冲磨性能影响。结果表明，水下钢球法(1 200 r/min)测得UHPC的抗冲磨强度为(51.0～71.6) h/(kg/m²)，随着纤维掺量(1.0%～2.0%)的增加而增大。掺入纤维后抗冲磨强度增长幅度为8%～41%，最优组为单掺2%体积掺量钢纤维组。高速水下钢球法(4 000 r/min)测得UHPC的抗冲磨强度仅有(8.0～17.6) h/(kg/m²)，掺入纤维后抗冲磨强度增长幅度为2.5%～120.0%，最优组为1%钢纤维与1%聚丙烯纤维混掺组，随着纤维掺量的增加，抗冲磨强度呈现先增大后减小的趋势。水下钢球法动力小，钢珠难以突破纤维构成的三维网络，试块磨蚀特征并不明显，表面中心处纤维并未裸露，不能准确反映UHPC抗冲磨性能；高速水下钢球法动力大，磨蚀特征明显，表面磨蚀均匀，且花费时间少，磨蚀效率高，能准确反映出UHPC的抗冲磨性能。

关键词：试验制度；UHPC；抗冲磨强度；高速水下钢球法；转速

中图分类号：TV331 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-7709(2025)03-0085-04

1 引言

高水头大流量泄水建筑物受到含砂石水流的冲刷和磨蚀，普通混凝土无法适应长期受冲磨的服役环境，导致泄水建筑磨损严重，急需研发高抗冲耐磨材料去服役。超高性能混凝土(UHPC)具有超高抗压强度和超高韧性，可为泄水建筑提供一种新的表面防护材料[1]。测试UHPC抗冲磨强度通常采用水下钢球法，优点是试件制备简单，能模拟含砂水流的推移质破坏形式，缺点是表面近底流速低，试验时间长[2]。水下钢球法在评价高强或超高强混凝土的冲磨性能时，同一研究所得结果差异小，不同研究所得结果差异大。吴后选等[3]得出不同组B2、B3、B4的抗冲磨强度分别为157、165、166 h/(kg/m²)；王雄锋等[4]测得不同组S20、S10P10、S10A10的抗冲磨强度分别为71.6、69.7、68.5 h/(kg/m²)。同一研究中数据差异小，说明数据稳定，未能显著区分各变量对抗冲磨性能的影响；而不同研究的数据相差大，无法进行可靠有效对比。丁建彤等[5]在水下钢球法的基础上，改进冲磨试验机叶片转速、增加钢球数量与质量、调整冲磨时间等，发明出高速水下钢球法，并能更加客观合理反映高强/超高强的抗冲磨性能[6]。为明晰不同试验制度对UHPC抗冲磨试验结果的影响，使用水下钢球法(1 200 r/min)和高速水下钢球法(4 000 r/min)，开展单掺钢纤维和混掺钢-PP纤维、钢-PVA纤维，长短PVA纤维UHPC的抗冲磨试验，研究两种试验制度下UHPC的抗冲磨性能。

2 试验材料与方法

2.1 原材料

水泥采用海螺P·O 42.5普通硅酸盐水泥；矿物掺合料为硅灰和粉煤灰；钢纤维(SF，长13 mm、直径0.2 mm、弹模200 GPa)、聚丙烯纤维(PP，长20 mm、直径0.3 mm、弹模5 GPa)和聚乙烯醇纤维(PVA，长6、12 mm、直径0.2 mm、弹模48 GPa)；南京本地砂，表观密度2 640 kg/m³，

收稿日期：2024-04-22，**修回日期**：2024-05-20

基金项目：国家自然科学基金重点项目(51739008)；江苏省自然科学基金资助项目(BK20201125)；南京水利科学研究院研究生学位论文基金(Yy424004)

作者简介：张晓闯(2001-)，男，硕士研究生，研究方向为超高性能混凝土，E-mail:1016604645@qq.com

通讯作者：陈波(1978-)，男，博士、教授、硕导，研究方向为水工材料，E-mail:bchen@nhri.cn

中国知网 https://www.cnki.net

细度模数 2.9；液体减水剂，减水效率＞30%；拌合用水为实验室自来水。基体配合比见表 1，UHPC纤维种类及掺量见表 2。

表 1 UHPC 基体配合比

Tab.1 UHPC matrix mix ratio kg/m³

编号	水泥	硅灰	粉煤灰	砂	水	减水剂
Blank	687	264	106	1 163	169	14.8

表 2 抗冲磨试验所需纤维种类及掺量

Tab.2 Anti-abrasion test required fiber type and content

编号	体积掺量/%			
	钢纤维	PP 纤维	PVA 纤维 (12 mm)	PVA 纤维 (6 mm)
S10	1.0			
S15	1.5			
S20	2.0			
S10P2	1.0	0.2		
S10P5	1.0	0.5		
S10P8	1.0	0.8		
S10P10	1.0	1.0		
S10A2	1.0		0.2	
S10A5	1.0		0.5	
S10A8	1.0		0.8	
S10A10	1.0		1.0	
A5V15			0.5	1.5
A10V10			1.0	1.0
A20V0			2.0	

2.2 抗冲磨试验

混凝土试件成型、脱模后，标准养护 28 d，取出后放入 80 ℃水中，热养 3 d 进行测试。参照《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150-2017)[7]进行水下钢球法和高速水下钢球法混凝土冲磨试验。两种冲磨试验对比见表 3。

表 3 不同冲磨制度对比

Tab.3 Comparison of different grinding systems

名称	水下钢球法 (X 方法)	高速水下钢球法 (Y 方法)
适用范围	水下流动介质磨损	水下高速介质磨损
研磨钢球数量/个	70	120
转速/(r·min^{-1})	1 200	4 000
冲磨时长/h	72	48
研磨钢球最大直径/mm	25.4	30
冲磨深度/mm[5]	1～2	3～4
表面近底速度/(m·s^{-1})[5]	1.8	3.8
钢球投影面积/%[5]	25.8	50

试件尺寸为 ϕ300 mm×100 mm，测试前，浸水 48 h；测试时，擦去表面水分，称重 M_1；将试件放入仪器内，冲磨 72/48 h 后，取出擦净表面水分和杂质，称重 M_2；损失量 $M_T=M_1-M_2$；抗冲磨强度 $R_a=TA/M_T$，T 为冲磨时间，A 为受冲磨面积。冲磨试验机见图 1。

3 结果与讨论

3.1 扩展度和抗压强度

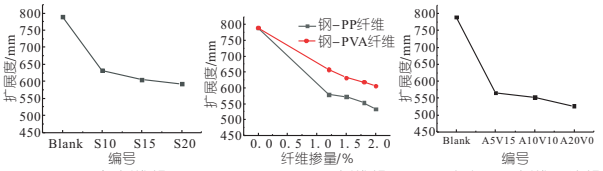
如图 2 所示，随纤维掺量增加，UHPC 扩展度降低。原因是纤维与基体间的摩擦力大，限制了浆体流动，导致扩展度降低；其中 PVA 纤维混掺不易分散，更加不利于拌合物的流动性[8]。



(a) 1 200 r/min (b) 4 000 r/min

图 1 钢球法试验机

Fig.1 Steel ball testing machine

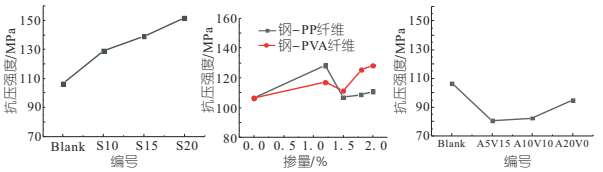


(a) 钢纤维组 (b) PP、PVA纤维组 (c) 长短PVA纤维混掺组

图 2 不同配比 UHPC 拌合物的扩展度

Fig.2 The expansion degree of UHPC mixture with different proportions

从图 3 中看出，随着纤维掺量增加，UHPC 抗压强度呈上升趋势。但 PVA 纤维混掺未明显改善 UHPC 的抗压强度，可能是 PVA 纤维在基体中分散不均，甚至团聚，起不到抑制裂缝的作用，导致抗压强度降低。如图 3(b)所示，随着 PP/PVA 纤维掺量增大，抗压强度先降低后升高，这可能是由于 PP/PVA 纤维掺量较少时，钢纤维增强作用大于有机纤维削弱作用，抗压强度增大。当有机纤维掺量为 0.5%时，削弱作用大，抗压强度减小。随着有机纤维掺量再增加，纤维间距变小，与基体粘结力增大，削弱作用小于增强作用，所以抗压强度增大[9]。



(a) 钢纤维组 (b) PP、PVA纤维组 (c) 长短PVA纤维混掺组

图 3 不同配比 UHPC 的抗压强度

Fig.3 Compressive strength of UHPC with different proportions

3.2 不同冲磨制度对冲磨性能影响

3.2.1 抗冲磨强度

高速和普通水下钢球法测试的抗冲磨强度见表 4。由表 4 可知，试件配比相同，水下钢球法测得抗冲磨强度大，抗冲磨强度最小可达 51 h/(kg/m²)，最大为 71.6 h/(kg/m²)；高速水下钢球法(高速法)的抗冲磨强度最小为 8 h/(kg/m²)，最大也仅 17.6 h/(kg/m²)，不足水下钢球法的1/5。根据数据分析，采用水下钢球

中国知网 https://www.cnki.net

表 4　不同冲磨制度试验结果

Tab.4　Test results of different grinding systems

编号	X 方法抗冲磨强度	差异比率/%	Y 方法抗冲磨强度	差异比率/%
Blank	51.0	0	8.0	0
S10P2	60.6	18.8	15.2	90.0
S10P5	65.7	28.8	14.5	81.3
S10P8	66.7	30.8	14.9	86.3
S10P10	69.7	36.7	17.6	120.0
S10A2	54.8	7.5	10.1	26.3
S10A5	57.9	13.5	9.2	15.0
S10A8	60.9	19.4	9.7	21.3
S10A10	68.5	34.3	10.4	30.0
S10	55.2	8.2	14.4	80.0
S15	58.3	14.3	12.0	50.0
S20	71.6	40.4	15.8	97.5
A5V15	68.7	34.7	9.4	17.5
A10V10	55.7	9.2	8.2	2.5
A20V0	60.6	18.8	8.4	5.0

注:抗冲磨强度单位为 h/(kg/m²)。

法时,掺纤维相对于基准组的差异比率为(7.5～40.4)%,最大值差异比率仅为 40.4%;高速法的差异比率为(5～120)%,最大值差异比率为 120%,是水下钢球法的 4 倍。

从抗冲磨强度数值上看,水下钢球法所测数值较大,数值之间差距小,而高速法测得的数值更小,数值之间的差距更小,无法分辨出何种方法更具有优势。但根据差异比率,水下钢球法的数据最大值差异比率仅 40%,而高速法达 120%,差异比率越大,相对基准组的变化程度越大,说明高速法更能体现出每个配比相对基准组的变化程度,分析出纤维变量对抗冲磨性能的影响。如表 4 所列,纤维掺量在 2%时,高速法测得 S20、S10P10、S10A10、A5V15、A10V10、A20V0 的差异比率分别为 97.5%、120.0%、30.0%、17.5%、2.5%、5.0%,最小相差 22.5%,最大相差 115.0%,而水下钢球法分别为 40.4%、36.7%、34.3%、34.7%、9.2%、18.8%,最小相差 3.7%,最大相差 21.6%,显然高速法所测数据的数值大且变化范围更大。根据差异比率的大小,能够量化纤维变量对抗冲磨性能影响的程度,避免因数据相近影响对规律的分析。综上所述,高速法能够显著表明纤维组相对于基体变化程度,且不同配比的差异比率相差大,所得数据离散性好,能显著分辨和反映出不同材料抗冲磨性能的优劣。

两种方法的数据相差大,原因可能是高速水下钢球法采用更多数量和更大尺寸的钢球,叶片转速更快,试件表面近底速度快,钢球在接触试件表面时能够传递更多的功,试件质量损失多,导致抗冲磨强度较小。水下钢球法的差异比率小,说明所测数据分布集中,离散性差,可能是水下钢球法表面近底速度仅为高速法的 1/2,钢球携带的动能小,对试件表面做功少,同时 UHPC 密实、高强,并不会对 UHPC 表面造成大的磨损,导致试件质量损失少,抗冲磨强度差距小,更加说明水下钢球法不能显著反映 UHPC 等高强混凝土的抗冲磨性能。

不同制度下的抗冲磨强度见图 4。采取不同冲磨方法,得到的规律不完全相同。由图 4(a)可知,UHPC 的抗冲磨强度随纤维掺量增加而增大。2%纤维掺量时,单掺钢纤维的试件抗冲磨强度最高,钢-PP 纤维次之,钢-PVA 纤维最小。由图 4(b)可知,UHPC 的抗冲磨强度随纤维掺量增大而先减小后增大。钢-PP 组整体上抗冲磨强度最高,钢纤维组次之,钢-PVA 组最差。可见何种方法得出的规律更可靠还需进一步分析。

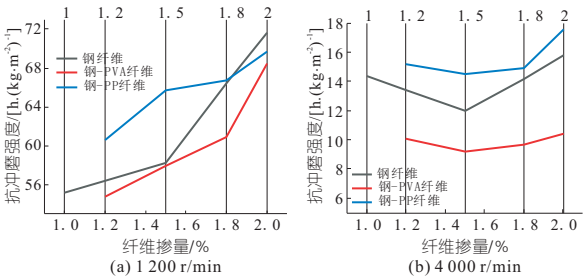


图 4　不同制度下 UHPC 抗冲磨强度

Fig.4　Anti-abrasion strength of UHPC under different systems

掺入纤维,不论采用何种方法,UHPC 抗冲磨强度呈上升趋势,这是因为纤维与基体紧密粘结,形成了紧密三维网络结构,能够吸收冲击载荷[4]。水下钢球法得出钢-PP 纤维掺量在 1.2%～1.8%时 UHPC 抗冲磨强度最大,2.0%时钢纤维组最大,而高速法表明钢-PP 纤维掺量在 1.2%～2.0%时最大。这是由于钢纤维的边壁效应,冲磨时,钢纤维受冲击脱落或被磨断,水泥基体直接受到冲击[4];而 PP 纤维有弹性,能缓冲钢球冲击,且 PP 纤维不会脱落,所以两种方法均表明钢-PP 组抗冲磨强度大;当纤维掺量为 2.0%时,高速条件下,钢纤维的边壁效应更明显,钢纤维脱落更快,保护层作用变弱,抗冲磨强度明显下降。高速法反映出抗冲磨强度与抗压强度正相关,而水下钢球法不完全符合。可能由于水下钢球法动力小,钢珠难以突破纤维构成的三维网络,并未突破基体表面,高速法的钢球动能大,磨蚀深度可达 3～4 mm,能够磨蚀到本体[5],所以高速法反映出的规律更加准确。

3.2.2　表观形貌

图 5 为高速水下钢球法和测试后试件的冲磨形貌。在 1 200 r/min 转速下测试 72 h 的试块,其表面较为光滑,表面中心处纤维并未裸露,说明

中国知网　https://www.cnki.net

有钢球未磨蚀到中心处，更未磨蚀到试件本体，由内及外，磨痕渐渐明显，纤维渐渐裸露，最外侧一圈有浅浅沟壑，说明磨蚀重点部位为表面外圈。在 4 000 r/min 转速下测 48 h 后，试件表面明显看出凹凸不平，并未发现中心处没有磨损现象，整个表面形态表现出均匀对称的状态，外侧圈沟壑较深，这与水下钢球法一致。对比来看，水下钢球法未均匀磨蚀全试件表面，存在磨蚀不到的地方，且磨损率较低，磨蚀不到试件本体，磨蚀特征并不明显，不能够真实反映出 UHPC 的抗冲磨性能，而高速法磨蚀均匀，不存在未磨蚀区域，磨蚀深度大，磨蚀时间只需 48 h，磨蚀效率高，所以可以认为，高速法能准确快速反映出纤维变量对 UHPC 的抗冲磨性能[5]。

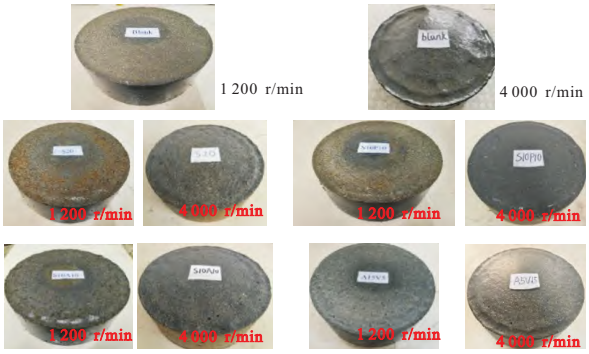


图 5 试件表面磨损形貌

Fig.5 Wear morphology of specimen surface

4 结论

a. 纤维能够提高 UHPC 的抗冲磨强度。单掺钢纤维组和钢-PP 纤维混掺组比钢-PVA 混掺和 PVA 纤维混掺组的抗冲磨强度高。

b. 水下钢球法测得抗冲磨强度为(51.0～71.6) h/(kg/m^2)，高速水下钢球法则为(8.0～17.6) h/(kg/m^2)。高速水下钢球法所测数值变化幅度较大，最大值差异比率为 120%，是水下钢球法的 3 倍，能更显著分辨和反映出不同材料抗冲磨性能的优劣。

c. 高速水下钢球法磨损率高，磨蚀均匀，且花费时间少，磨蚀效率高，能准确反映出 UHPC 的抗冲磨性能。

参考文献：

[1] 王晓飞，周海龙，姚占全. 超高性能混凝土基于抗剪切强度参数的 Mohr-Coulomb 破坏准则[J].中国农村水利水电，2023(6)：255-260.

[2] HORSZCZARUK E. Mathematical model of abrasive wear of high performance concrete[J]. Wear，2008，264(1/2)：113-118.

[3] 吴后选，胡宝瑶，王志鹏，等. 纤维对掺膨胀剂超高性能混凝土性能的影响[J]. 武汉理工大学学报，2021，43(11)：17-22.

[4] 王雄锋，陈波，张晓闯，等. 纤维混掺超高性能混凝土抗冲磨与拉伸性能研究[J]. 水利学报，2023，54(10)：1248-1256.

[5] 丁建彤，戴玭，白银，等. 一种新的抗推移质冲磨试验方法——高速水下钢球法的建立[J]. 混凝土，2011(12)：5-8.

[6] 白银，李洁，丁建彤，等. 同强度等级下粉煤灰掺量对抗冲磨混凝土性能的影响[J]. 水电能源科学，2022，40(4)：166-169.

[7] 国家能源局.水工混凝土试验规程：DL/T5150-2017[S].北京：中国电力出版社，2018.

[8] WILLE K，EL T S，NAAMAN A E. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading[J]. Cement and concrete composites，2014，48：53-66.

[9] YOO D Y，LEE J H，YOON Y S. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites[J]. Composite structures，2013，106：742-753.

Anti-abrasion Performance of Ultra-high Performance Concrete Under Different Test Systems

ZHANG Xiao-chuang[1]，CHEN Bo[1]，WANG Xiong-feng[2]，GE Long-zhen[1]，XU Ning[1]

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention，Nanjing Hydraulic Research Institute，Nanjing 210029，China；2. PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited，Changsha 410014，China)

Abstract：In order to clarify the influence of different test systems on the anti-abrasion performance of ultra-high performance concrete (UHPC)，the impact and abrasion resistance of UHPC under different test regimes were investigated by single blending and fiber blending. The results show that the impact resistance of UHPC measured by underwater steel ball method (1 200 r/min) is 51.0-71.6 h/(kg/m^2)，which increases with the increase of fiber doping (1.0%-2.0%). The increase in impact strength after fiber doping is 8%-41%，and the optimal group is the single doped 2% volume doped steel fiber group. High-speed underwater steel ball method (4 000 r/min) measured UHPC impact abrasion strength is only 8.0-17.6 h/(kg/m^2)，the fiber doped impact abrasion strength growth of 2.5%-120.0%，the optimal group is 1% steel fibers and 1% polypropylene fibers blended group，with the increase in the amount of fiber doped impact abrasion strength shows a tendency of increasing and then decreasing. The power of underwater steel ball method is small. The steel ball is difficult to break through the three-dimensional network composed of fibers. The abrasion characteristics of the specimen is not obvious. The center of the surface fiber is not exposed，and it can not accurately respond to the anti-abrasion performance of the UHPC. High-speed underwater steel ball method has large power，the abrasion characteristics is obvious，the surface abrasion is uniformity and spends less time，abrasion efficiency is high，which can accurately reflect the anti-abrasion performance of the UHPC.

Key words：test system；UHPC；anti-abrasion strength；high-speed underwater steel ball method；speed

中国知网 https://www.cnki.net