

高性能水泥基复合材料的压剪性能和破坏准则

谢发祥 韩旭 蔡定鹏 陈徐东

Compression-shear performance and failure criteria of the high-performance cement-based composite

XIE Faxiang, HAN Xu, CAI Dingpeng, CHEN Xudong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220126.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力力学性能

Mechanical property of self-compacting lightweight aggregate concrete under combined compression-shear stress

复合材料学报. 2019, 36(8): 1984–1994 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181030.002>

高温后高延性混凝土的抗压性能及微观结构

Compressive properties and micro-structure of high ductility concrete exposed to elevated temperature

复合材料学报. 2020, 37(4): 985–996 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190731.001>

高温对钢纤维-聚乙烯醇纤维-CaCO₃晶须多尺度纤维/水泥复合材料弯曲性能和微观结构的影响

Influence of high temperature on flexural properties and micro structure of steel fiber-polyvinyl alcohol fiber-CaCO₃ whisker multi-scale fibers/cement composite

复合材料学报. 2021, 38(7): 2326–2335 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200907.001>

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>

自密实轻集料混凝土双轴受力力学性能

Mechanical properties of self-compacting lightweight aggregate concrete under biaxial loading

复合材料学报. 2019, 36(4): 993–1000 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180619.001>

灰粉比对苯丙乳液基水泥复合材料静态力学性能及破坏形态的影响

Effects of cement-powder ratio on static mechanical properties and failure forms of styrene-acrylic emulsion-based cement composites

复合材料学报. 2020, 37(9): 2324–2335 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200212.002>

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220126.002

高性能水泥基复合材料的压剪性能和破坏准则



谢发祥*, 韩旭, 蔡定鹏, 陈徐东
(河海大学 土木与交通学院, 南京 210098)

摘 要: 高性能水泥基复合材料 (High-performance cement based composite, HPCC) 是建筑领域的一种前沿性材料, 其强度高、韧性强, 具有很好的应用前景。高强度钢纤维通常以适当的混合比例加入 HPCC 中。设计并浇筑了 4 种不同钢纤维体积分数 (0.0vol%、0.5vol%、1.0vol%、2.0vol%) 的 HPCC, 对不同纤维含量的试件的压剪复合性能进行了深入研究。通过试验首先给出了 HPCC 复合应力作用下基于莫尔-库仑的压剪强度模型。研究表明, 纤维掺量对 HPCC 的压剪界面摩擦系数影响较小, 其平均值为 2.8826, 不同纤维掺入量的 HPCC 的摩擦系数与均值相比的差异在 -1.44%~8.51% 之间; 黏聚力则与钢纤维体积掺量呈二次抛物线关系。而 HPCC 压剪位移峰值与钢纤维掺入量之间呈现先增加后减小的现象。其次, 对 HPCC 破坏界面进行 SEM 形貌分析, 研究钢纤维影响 HPCC 基体的微观机制, 从 SEM 形态出发解释了材料压剪强度和位移变化的微观机制。最后, 结合试验结果和已有文献研究, 提出了基于 Ottosen 模型的 HPCC 破坏准则, 并给出了具体的拟合参数, 表明 HPCC 八面体剪应力高于普通混凝土材料。试验数据与理论分析结果吻合较好, 能够反映 HPCC 的破坏包络面特征。

关键词: 高性能水泥基复合材料 (HPCC); 压剪性能; 微观机制; 破坏准则; 纤维强化混凝土

中图分类号: TU528.59 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)11-5311-10

Compression-shear performance and failure criteria of the high-performance cement-based composite

XIE Faxiang*, HAN Xu, CAI Dingpeng, CHEN Xudong
(College of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: High-performance cement-based composites (HPCC) is a prospecting material in the construction field. Because of its high strength and increased toughness, the material has excellent applications prospects in the future. High-strength steel fibers are usually incorporated in HPCC with proper mixing ratios. Four kinds of HPCC with varying fibers volume fractions (0.0vol%, 0.5vol%, 1.0vol%, 2.0vol%) were designed and fabricated to study the combined compression-shear performances of HPCC. Firstly, the Mohr-Coulomb-based model of compression-shear strength of HPCC was proposed and verified based on the experimental data. The results demonstrate that the fiber content has little effect on the friction coefficient of the compression-shear interface of HPCC, with an average value of 2.8826, and the friction coefficients of HPCC with different fiber contents varies from -1.44% to 8.51% compared with the average values. The cohesion stress exhibits a quadratic parabola relationship with the volume content of steel fiber. However, the peak displacement of HPCC under compression-shear loads increases at first and then decreases with the increasing content of steel fibers. Secondly, the SEM morphology of the failure interface of HPCC was analyzed, and the microscopic mechanism of the influence of steel fiber on the HPCC matrix was studied. The SEM morphology images explain the microscopic mechanism of the deterioration of compressive

收稿日期: 2021-11-22; 修回日期: 2022-01-13; 录用日期: 2022-01-15; 网络首发时间: 2022-01-27 19:08:27
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220126.002>
通信作者: 谢发祥, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为桥梁工程 E-mail: xiefaxiang@hhu.edu.cn
引用格式: 谢发祥, 韩旭, 蔡定鹏, 等. 高性能水泥基复合材料的压剪性能和破坏准则 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5311-5320.
XIE Faxiang, HAN Xu, CAI Dingpeng, et al. Compression-shear performance and failure criteria of the high-performance cement-based composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(11): 5311-5320(in Chinese).

shear strength and variation of shear displacement. In the end, the Ottosen-based failure criterion of HPCC was proposed by combining the experimental results and the research data from the existing literature. And the specific fitting parameters were also presented, which predicts that the octahedral shear stress of HPCC is higher than that of the ordinary concrete. The experimental data are in good agreement with the theoretical analysis results, which can reflect the failure envelope characteristics of HPCC. The experimental data are in good agreement with the regression results, which could reflect the characteristics of the failure envelope of HPCC.

Keywords: high-performance cement-based composites (HPCC); compression-shear performance; microscopic mechanism; failure criterion; fiber-reinforced concrete

高性能水泥基材料 (High-performance cement-based composite, HPCC) 是近年水泥基材料的研究热点之一^[1-2]。相比于普通水泥基材料, HPCC 的抗裂性、韧性、抗冲击及耐久性能等均有提高。有研究表明钢纤维含量直接影响 HPCC 性能, 但也有研究认为其对水泥基材料的弹性模量、抗折强度等无明显影响^[3-4]。钢纤维有序与无序排列的 HPCC 的双轴抗压能力也不相同^[5]。而钢纤维掺量、不同种类钢纤维的掺入比例等因素会影响 HPCC 的工作性能和增韧效果^[6]。因此钢纤维掺量对 HPCC 性能的影响仍需要进一步研究。

因其力学性能优异, HPCC 已经成为最具有应用前景的建筑材料。各国学者对 HPCC 的动静态单轴力学性能进行了大量试验研究^[7-10], 发现加入钢纤维能提高强度, 抑制裂缝发展^[11-13]。但有研究指出 HPCC 与普通混凝土的双轴拉压强度包络图有明显不同^[14]。

实际工程结构经常处于双轴或多轴受力状态。不同水泥基材料的压剪性能受到了很多关注^[15-18], 而由于 HPCC 强度较高, 目前涉及其压剪复合受力的报道较少。因此需要进一步研究不同纤维含量的 HPCC 的压剪性能和破坏准则。

本文对不同钢纤维掺量的 HPCC 进行了单轴抗压、劈裂抗拉及双轴压剪性能试验。通过试验结果分析了不同钢纤维掺量对 HPCC 力学性能的影响。采用 SEM 对 HPCC 进行形貌分析, 从微观机制角度研究钢纤维对水泥基体的影响。利用试

验数据和文献试验数据提出了基于 Ottosen 模型的破坏准则, 并给出了适用于 HPCC 的模型参数, 结果与试验数据吻合良好。

1 试验

1.1 HPCC 配合比

HPCC 试件水泥采用 PII 52.5 硅酸盐水泥, 细集料采用天然河砂, 另加入苏博特新材料有限公司生产的 SBT-HDC(V)^[19] 超细矿物掺合料和减水剂, 其中 SBT-HDC(V) 超细矿物掺合料是一种以粉煤灰和超细矿粉为主要原料的具有一定细度和活性的矿物掺合料, 减水剂也是苏博特公司生产的 PCA-I 系列聚羧酸高性能减水剂, 其物理性能符合国家标准 GB/T 18736—2017^[20], 拌合水采用城市自来水。本文考虑了 4 种不同钢纤维掺入量的配合比, 体积分数 ρ_f 分别为 0vol%、0.5vol%、1.0vol%、2.0vol%, 分别记为 C、0.5%SF/C、1%SF/C 和 2%SF/C, 详细配合比如表 1 所示。试验采用的微直钢纤维长度为 13 mm, 直径为 0.2 mm, 抗拉强度 2 800 MPa, 纤维如图 1 所示。

HPCC 试件的浇筑方法为先按照不同的配合比加入水泥、砂、SBT-HDC 掺料, 搅拌 2 min, 再加入水和减水剂和钢纤维搅拌 4~6 min。搅拌均匀后入模浇筑, 由于此配合比的 HPCC 为自密实型, 流动性非常好, 无需振捣即可自行密实, 之后覆膜养护, 在室温 (20±2)℃ 且相对湿度>90% 的条件下养护 24 h 后脱模, 再放入水中养护 3 天, 然后在自然室内环境中再养护 28 天后取出进行相

表 1 不同高性能水泥基材料 (HPCC) 配合比

Table 1 Various mix proportions of high-performance cement-based composites (HPCC)

Specimen	kg/m ³					
	Cement	HDC(V)	Water	Water reducing agent	Sand	Steel fiber
C	800	360	180	17.0	930.0	—
0.5%SF/C	800	360	180	17.0	925.4	39
1%SF/C	800	360	180	17.0	920.7	78
2%SF/C	800	360	180	17.0	911.4	156

Notes: SF—Steel fiber; C—Concrete; HDC(V) is a mineral blending material with a certain fineness and activity with fly ash and ultrafine mineral powder as the main raw materials.



图1 试验采用的钢纤维
Fig. 1 Steel fibers adopted in the experiments

关试验。

1.2 试验工况

HPCC 力学试验包括抗压强度试验、劈裂抗拉试验、压剪复合受力试验 3 项。预制试块的尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm。为保证试验结果的可靠性，每次试验采用 3 个试件。采用不同轴压比进行压剪试验，考虑到试件强度和双向试验机能力，采用的轴向压力分别为 15 kN、25 kN、35 kN 和 45 kN。在 2%SF/C 试块试验时发现，在轴向压力为 15 kN 时无法完成试验，因此 2%SF/C 试件只包含 25、35、45 kN 这 3 组压剪结果。具体试验工况见表 2。

1.3 加载设备和加载方式

HPCC 单轴劈裂试验采用瑞格尔仪器有限公司

生产的 RE-8060 型电液伺服万能试验机完成，抗压强度试验采用美特斯公司生产的 YAW-4306 型微机控制电液伺服万能试验机完成。单轴抗压和劈裂试验采用应力控制加载方式，按照 GB/T 50081—2002^[21] 的要求完成。HPCC 压剪试验采用长春试验机研究所生产的 CSS-283 型材料试验机，用直剪方式得到极限剪切荷载。

HPCC 压剪复合试验采用定侧向加载方式，首先竖直轴以 0.5 kN/min 加载速率加载至设定竖向压力，并保持 1 min，然后水平轴上预加载 0.5 kN，保持 2 min，最后采用位移控制方式施加横向剪切荷载至 6.5 mm。横向位移在 2 mm 以下时加载速率为 0.1 mm/min，2 mm 以上时为 0.3 mm/min。压剪试验过程中主要记录水平荷载和位移。图 2 为 HPCC 试件的压剪加载图片、加载框架和试件剪切面示意图。

2 试验结果和分析

2.1 HPCC 压剪试验荷载-位移曲线

采用材料压剪试验机进行不同轴向压力作用下 HPCC 试件的压剪试验，得到不同 HPCC 试件的横向剪切荷载-位移曲线，图 3(a)~3(d) 所示分别为 C、0.5%SF/C、1%SF/C 和 2%SF/C 试件的压剪荷载-位移曲线。可以看出，曲线大致可分为上升段、下降段和渐变段(含钢纤维)，首先是上升段，随着荷载的增加，剪切位移几乎线性上升，在第一阶段最后 HPCC 抗剪强度达到峰值，开始出现裂缝；其次为下降段，随着加载位移逐渐增加，试件裂缝进一步扩展，HPCC 的抗剪强度迅速下降，其中 C 试件在第二阶段末尾被完全剪坏，失去抗剪能力；最后为渐变段，此时 C 试件失去抗剪能力，残余荷载由轴向压力作用下的摩擦力提供，此荷载大小几乎保持不变，而含钢纤维的

表 2 HPCC 试验工况
Table 2 Designed experimental cases of HPCC

Item	Load profile	Axial load/kN	Number of load cases
ρ_F -C-comp	Uniaxial compression	-	1
ρ_F -SF/C-comp	-	-	3
ρ_F -C-split	Split tension	-	1
ρ_F -SF/C-split	-	-	3
ρ_F -C-X	-	-	4
ρ_F -SF/C-X	Combined compression-shear	15, 25, 35, 45	11

Notes: ρ_F =0vol%, 0.5vol%, 1vol%, 2vol%, is the volume fraction of steel fibers; X=15, 25, 35, 45 kN, is the axial pressure in the composite compression-shear tests.

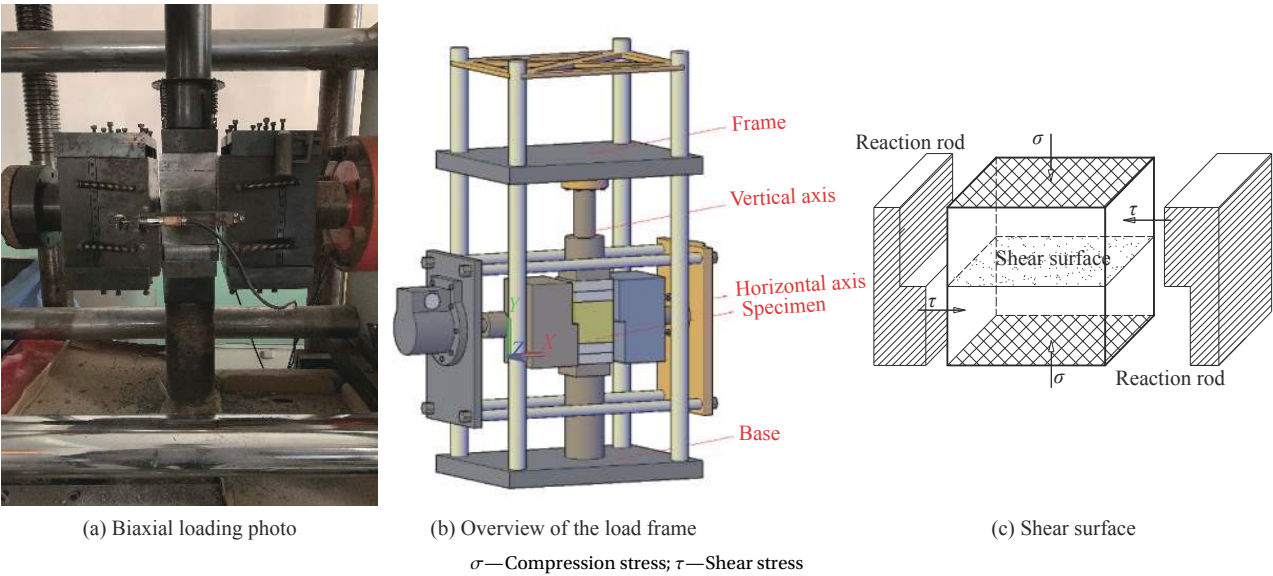


图 2 加载设备和剪切面示意图

Fig. 2 Loading equipment and sketchy shear surface

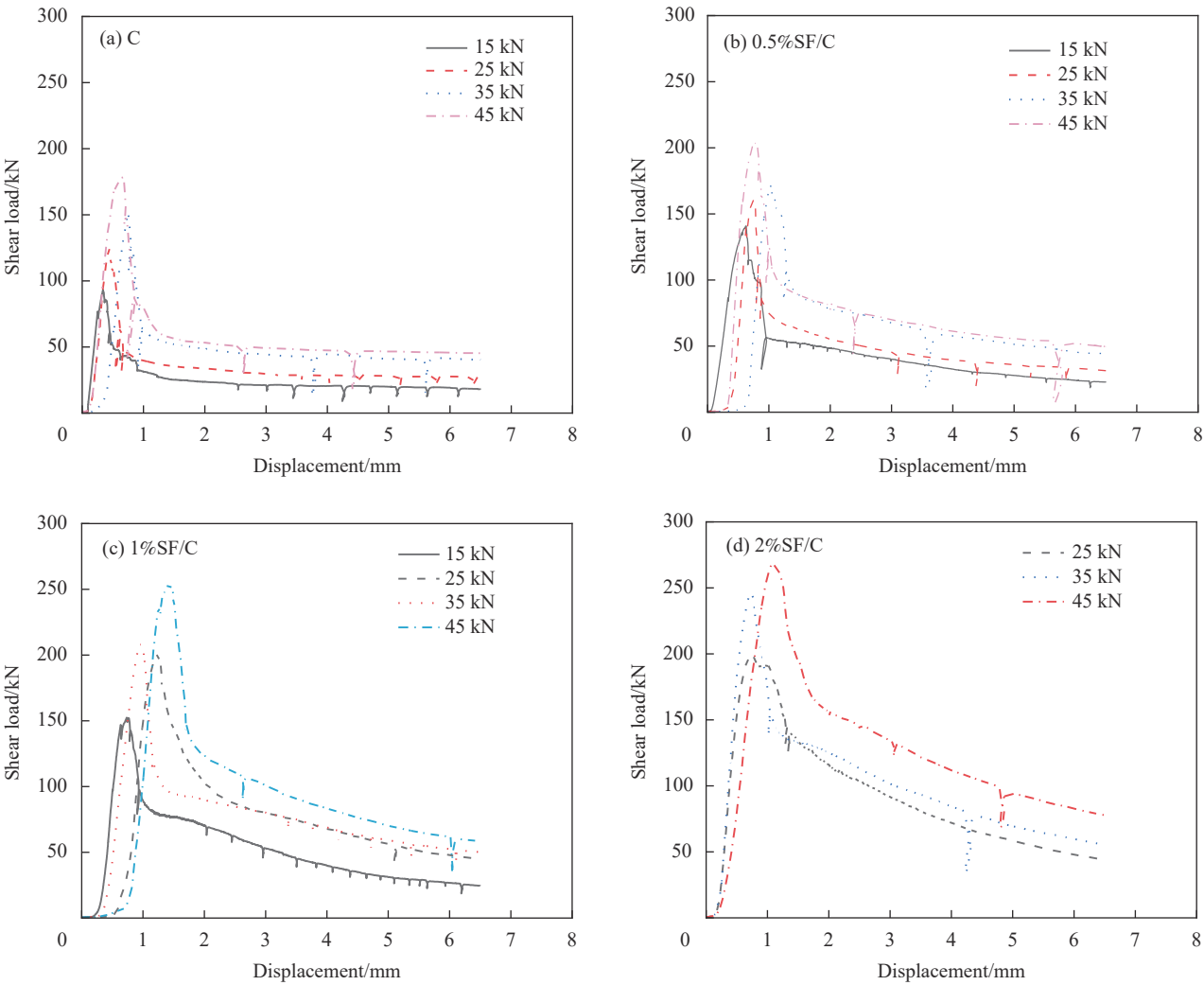


图 3 HPCC 的压剪试验荷载-位移曲线

Fig. 3 Compression-shear load versus displacement curves of HPCC specimens

SF/C 试件在第三阶段除摩擦力外，钢纤维也提供了抗剪能力，随着加载的进行钢纤维被拔出，其提供的抗剪能力逐渐下降，因此在荷载-位移曲线上可以看出荷载逐渐下降，直至最后剪切面上的钢纤维被全部拔出，荷载才趋于稳定。

表 3 不同配合比 HPCC 的单轴抗压和劈裂抗拉强度
Table 3 Uniaxial compression and splitting tensile strength of various HPCC

Specimen	Compressive strength/MPa					Splitting tensile strength/MPa				
	Test 1	Test 2	Test 3	Average	Standard deviation	Test 1	Test 2	Test 3	Average	Standard deviation
C	113.72	115.73	118.34	115.93	1.89	7.37	7.97	6.82	7.39	0.47
0.5%SF/C	135.14	121.65	121.56	126.12	6.38	12.29	12.61	13.21	12.70	0.38
1%SF/C	144.96	147.81	135.68	142.83	5.18	13.63	14.03	13.53	13.73	0.22
2%SF/C	137.61	120.19	127.58	128.46	7.14	14.44	13.41	14.00	13.95	0.42

2.3 HPCC 压剪复合强度

根据试验结果可以获得试件的压剪复合作用下的应力-应变曲线，提取出不同轴向力作用下 HPCC 试件的压剪峰值应力 τ_{fc} 和峰值应变 ε_1 。将试验结果整理汇总于表 4。

表 4 不同配合比 HPCC 试件压剪复合试验特征值
Table 4 Characteristic values of compression-shear composite experiments for HPCC specimens with different mix proportions

Specimen	Peak load/kN	τ_{fc} /MPa	$\varepsilon_1/10^{-3}$
C-15	90.17	9.02	4.51
C-25	126.17	12.62	4.64
C-35	148.27	14.83	5.93
C-45	169.40	16.94	8.42
0.5%SF/C-15	129.60	12.96	4.36
0.5%SF/C-25	162.33	16.23	5.97
0.5%SF/C-35	174.30	17.43	6.27
0.5%SF/C-45	212.43	21.24	7.48
1%SF/C-15	152.21	15.22	7.52
1%SF/C-25	211.80	21.18	9.85
1%SF/C-35	217.67	21.77	9.83
1%SF/C-45	251.73	25.17	11.67
2%SF/C-25	199.93	19.99	9.29
2%SF/C-35	237.77	23.78	7.74
2%SF/C-45	252.27	25.23	9.94

Notes: τ_{fc} —Peak shear stress; ε_1 —Strain of HPCC when the shear stress reaches peak.

已有文献 [15-17, 22] 研究表明，在轴向压力较小的情况下，水泥基材料的压剪复合强度与轴向压力呈线性关系，即不同轴向压力作用下的剪切强度和轴向应力可以用下式表达：

$$\tau_{fc} = \mu\sigma + c \tag{1}$$

式中： τ_{fc} 、 σ 为压剪峰值应力和轴向应力； μ 、 c

2.2 HPCC 单轴强度

根据试验结果将不同配合比的 HPCC 抗压、劈裂抗拉强度整理成表 3。可见，本文 HPCC 单轴抗压强度均在 110 MPa 以上，含纤维 HPCC 的劈裂抗拉强度均大于 12 MPa。

为摩擦系数和黏聚力。

利用表 4 数据可以获得不同 HPCC 试件的 μ 、 c ，如表 5 所示。将试验值和拟合曲线绘制在图 4 中。

从表 5 可以看出，不同配合比试件的 μ 略有差别，与平均值的差异在 -1.44%~8.51% 之间，可

表 5 HPCC 剪切摩擦系数 μ 和黏聚力 c
Table 5 Friction coefficient μ and cohesive stress c of HPCC

Specimen	μ (Error)	c	R^2
C	2.8054(-2.68%)	5.1275	0.9726
0.5%SF/C	2.7558(-4.40%)	8.3305	0.9441
1%SF/C	3.1280(8.51%)	11.1074	0.9694
2%SF/C	2.8411(-1.44%)	13.0705	0.9504
Average	2.8826	-	-

Note: R^2 —Coefficient of determination.

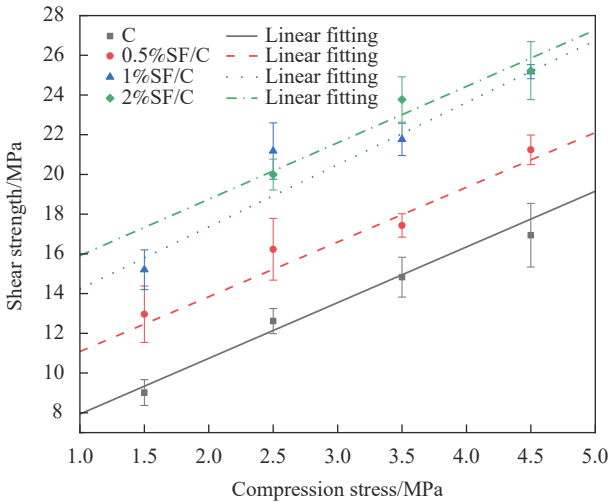


图 4 HPCC 压剪强度与轴向应力关系
Fig. 4 Relationships of compression-shear strength and axial stress of HPCC

以认为不同 HPCC 试件的摩擦系数一致。但是 ρ_f 对 HPCC 的黏聚力有比较明显的影响，可以用下式表示：

$$c = f_{\tau} \left(1 + a_1 \rho_f + a_2 \rho_f^2 \right) = 5.064 \left(1 + 1.544 \rho_f - 0.337 \rho_f^2 \right)$$

(2)

其中： f_{τ} 为无轴向压力作用时无钢纤维 HPCC 的剪切强度； a_1 、 a_2 为钢纤维影响系数。

将不同纤维掺量 HPCC 的压剪摩擦系数和黏聚力的实测值和拟合值一起作图，如图 5 和图 6 所示。可见，HPCC 压剪强度和黏聚力的拟合效果与实测数据吻合较好。

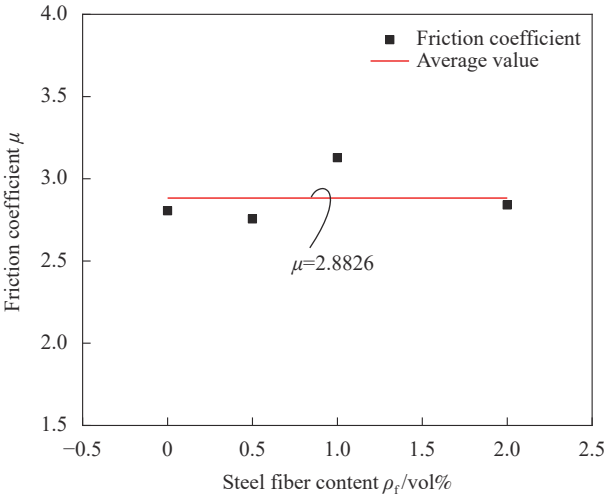


图 5 HPCC 摩擦系数与钢纤维含量关系

Fig. 5 Friction coefficient versus steel fiber content of HPCC

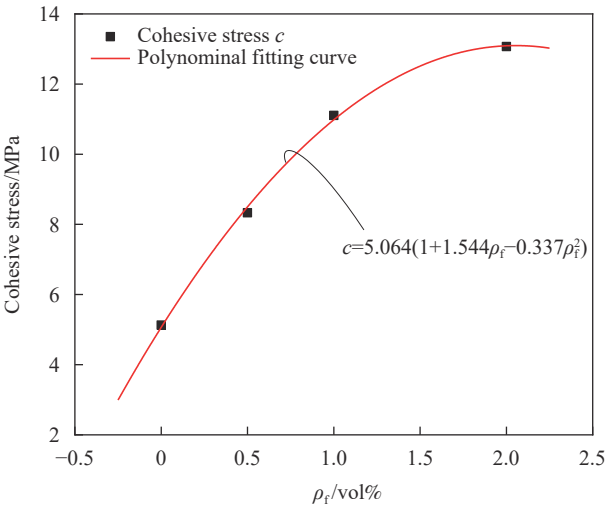


图 6 HPCC 黏聚力与钢纤维含量关系

Fig. 6 Cohesive stress versus steel fiber content of HPCC

2.4 HPCC 压剪位移

压剪峰值位移也是 HPCC 压剪复合受力形态

的重要指标。但是由于水泥基材料的离散特点及加载设备本身固有的间隙，测试获得的剪切位移值一般精确程度不高，但是其变化的规律性还是比较明显的。提取表 4 中的位移数据，可以获得 HPCC 试件的压剪位移值，将其绘制在图 7 中。可以看出，随着轴向荷载的增加，HPCC 的峰值剪切位移总体上呈现增加趋势，说明轴向荷载对剪切位移有一定的提高作用。在相同的轴向荷载作用下，在轴向力较小时，无钢纤维试件的剪切位移峰值通常小于含钢纤维试件，而在所有试件中 1%SF/C 的剪切位移最大，说明一定含量的钢纤维对 HPCC 的峰值剪切位移有比较明显的提高作用，但是 2%SF/C 试件的峰值剪切位移反而降低，表明 ρ_f 过大反而使峰值剪切位移减小。这是由于适量的钢纤维掺入可以降低水泥基材料的总孔隙率，改善孔隙结构。而钢纤维含量超过一个临界值以后，水泥基材料内的纤维将进一步造成孔隙结构分布不均匀，使内部缺陷增多，总孔隙率增大。因此，由于内部潜在缺陷的增加，导致 2%SF/C 钢纤维含量下的剪切峰值位移比 1%SF/C 钢纤维含量的试件反而更小。

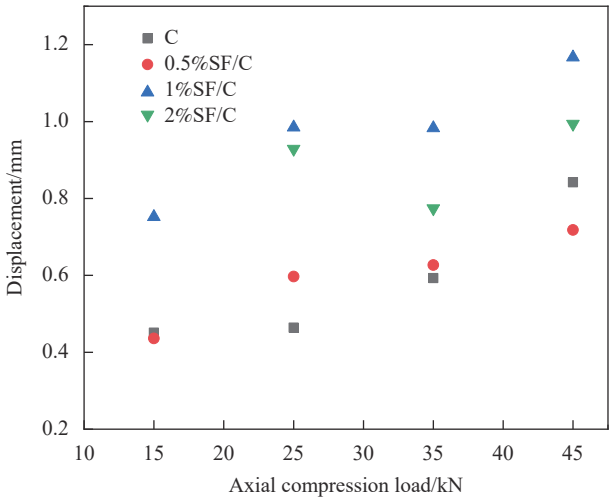


图 7 HPCC 峰值轴向荷载与剪切位移峰值关系

Fig. 7 Relationships between axial force and peak shear displacement of HPCC

2.5 HPCC 压剪微观机制

提取压剪试验中试件破坏界面的 HPCC 试样，采用 SEM 对其进行形貌分析。图 8(a)~8(d) 分别为 C、0.5%SF/C、1%SF/C 和 2%SF/C 的微观形貌图像。

图 8(a) 中试件基体表面附着了大量未反应的胶凝材料，通过对比可以看出，随着钢纤维含量

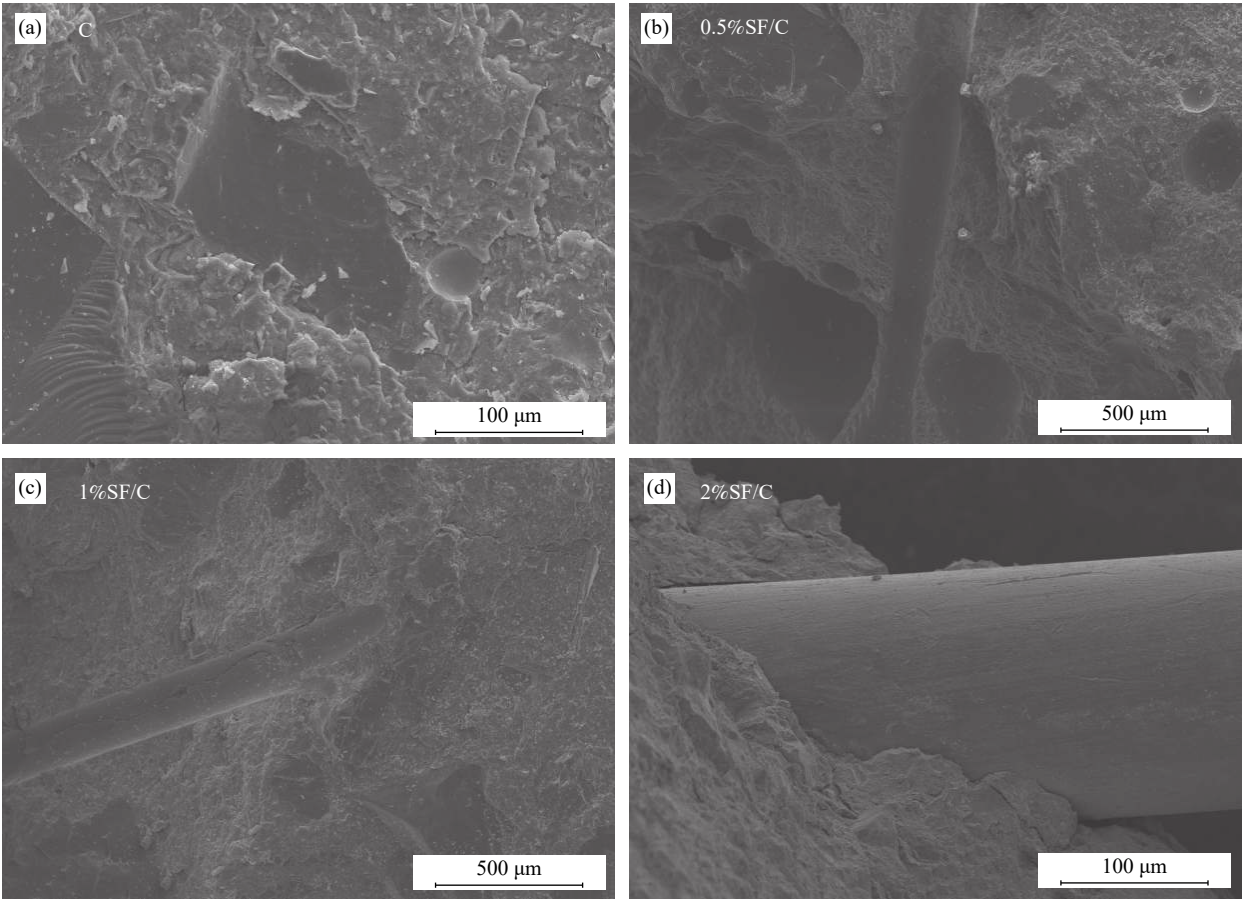


图 8 HPCC 的微观形貌 SEM 图像

Fig. 8 Micro morphology SEM images of HPCC

的增加，水泥基体表面的胶凝材料逐渐变少，基体表面更加平整规则，说明水泥基材料的水化程度有所提高，一方面这是由于钢纤维分布在水泥基体中有良好的导热作用，可以促进水化反应^[23]。另外一方面，图 8(b) 和图 8(c) 中可以看到钢纤维被拔出后在基体上留下的纤维槽，纤维槽附近有很多孔隙，多余的孔隙也会增加基体内部表面积，促进水化反应。但是，纤维与基体界面较薄弱，在加载过程中会首先开裂，接着钢纤维发挥桥联作用，逐渐被拔出。从图 8(c) 中可以看到钢纤维被拔出时，纤维槽处的水泥基体会产生裂缝，验证了该区域基体较薄弱。图 8(d) 为 2%SF/C 中一根残留的钢纤维，2%SF/C 水化程度较高，因此纤维表面没有附着很多胶凝材料，可以观察到钢纤维附近的水泥基体已经开裂，有一小部分基体已经剥落，表明过多的纤维掺量会降低钢纤维和水泥基体之间的黏聚力，导致 2.4 节所述的宏观上压剪位移的减小。

2.6 基于 Ottosen 模型的 HPCC 破坏准则

1977 年 Ottosen^[24] 通过薄膜比拟法来模拟混

凝土破坏包括面形状的变化，提出了一种适用应力范围较广的四参数破坏准则。以 Ottosen 模型为基础建立 HPCC 的破坏准则具有一定的理论和实践价值。

以 Ottosen 模型为基础的破坏准则的表达式如下：

$$\begin{aligned} F(I_1, J_2, \cos 3\theta) &= A \frac{J_2}{f_c^2} + \lambda \frac{\sqrt{J_2}}{f_c} + B \frac{I_1}{f_c} - 1 = 0 \\ \lambda &= k_1 \cos \left[\frac{1}{3} \arccos(k_2 \cos 3\theta) \right] \quad (0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ) \\ \lambda &= k_1 \cos \left[\frac{\pi}{3} - \frac{1}{3} \arccos(-k_2 \cos 3\theta) \right] \quad (30^\circ < \theta \leq 60^\circ) \end{aligned} \tag{3}$$

其中：A、B、k₁、k₂为拟合材料参数；f_c为混凝土轴向抗压强度；I₁、J₂分别是应力不变量；θ为罗德角。

参考文献 [2, 5, 25-29] 的研究成果，结合本文 HPCC 试验值，根据式 (3) 进行数学拟合分析，得到了适用于 HPCC 的破坏准则，四参数拟合结果如表 6 所示。

表 6 Ottosen 破坏准则的拟合参数

Table 6 Fitting parameters of Ottosen failure criterion			
A	B	k_1	k_2
1.32	4.01	12.68	0.98

Note: A, B, k_1 , k_2 —Fitting parameters in Ottosen criterion.

把本文 HPCC 计算所得曲线与 Ottosen 关于普通混凝土的破坏准则曲线^[24]一同绘制在图 9，可见根据 Ottosen 破坏准则获得的曲线光滑外凸，能够比较好地描述 HPCC 的破坏包络面。与普通混凝土相比，HPCC 破坏子午面有一定的偏转。在相同的静水压力下，相同八面体正应力 σ_{oct} 条件下，HPCC 的八面体剪应力 τ_{oct} 大于普通混凝土，说明 HPCC 与普通混凝土相比，其破坏强度特性有明显差异。通过计算应力矢量在破坏偏平面上的投影，将不同静水压力下偏平面上的包络线绘制在图 10 中，可见用 Ottosen 准则仍然能够比较准确的描述 HPCC 破坏特征。

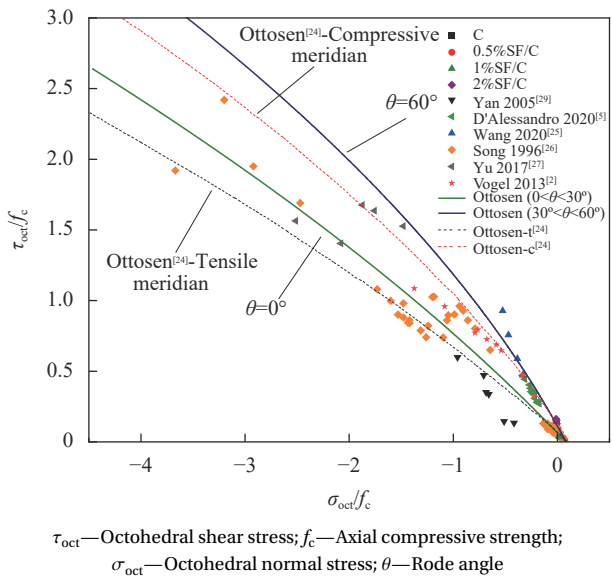


图 9 普通混凝土与 HPCC 的 Ottosen 破坏准则曲线比较
Fig. 9 Comparison of Ottosen failure criterion curves between ordinary concrete and HPCC

3 结论

(1) 压剪复合受力状态下，高性能水泥基复合材料 (HPCC) 试件的压剪强度随轴向压力的增加而增加。其中摩擦力部分主要受轴向力的影响，钢纤维掺量的影响不显著，不同纤维掺量下的摩擦系数基本不变，其平均值为 2.8826，不同纤维掺入量的 HPCC 的摩擦系数与均值相比的差异在 -1.44%~8.51% 之间；而黏聚力部分受钢纤维掺

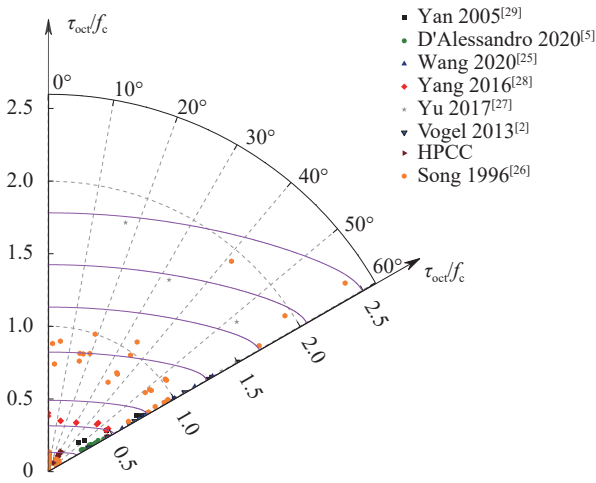


图 10 HPCC 偏平面上的破坏包络线
Fig. 10 Ultimate strength envelope in the deviatoric plane of HPCC

量的影响时显著，呈现先增加后减小的抛物线变化规律。

(2) HPCC 剪切峰值位移随轴向压力的增加而增加，钢纤维含量对剪切峰值位移有明显影响。试验结果表明，1vol% 的纤维掺量对剪切位移的提高作用明显，而 2vol% 纤维掺量反而降低剪切峰值位移。

(3) 通过对 HPCC 破坏界面的微观形貌进行分析可知，钢纤维的加入可促进水泥基体的水化，提高基体水化程度。同时钢纤维会让水泥基体中的孔隙增多，而钢纤维与附近基体的黏结强度较低，使钢纤维附近的基体更易破坏，从而宏观上可能导致单轴强度和剪切位移的降低。

(4) 综合采用相关文献 [2, 5, 24-27, 29] 中不同类型高性能水泥基材料的实验数据与本文试验数据进行了拟合分析，确定了基于 Ottosen 模型的 HPCC 破坏准则及其参数，试验数据和拟合结果的吻合程度较高，可以用于 HPCC 破坏阶段的计算。

参考文献：

[1] 孙伟. 高性能水泥基复合材料的新进展[J]. 港口工程, 1995(1): 34-40.
SUN Wei. Advances in high-performance cement-based composites[J]. Harbor Engineering, 1995(1): 34-40(in Chinese).
[2] VOGEL F, SOVJÁK R, JOGL M. Experimental tests of the UHPC in triaxial compression[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 486: 78-83.
[3] LARSEN I L, THORSTENSEN R T. The influence of steel fibres on compressive and tensile strength of ultra high

- performance concrete: A review[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 256: 119459.
- [4] YOO D, BANTHIA N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2016, 73: 267-280.
- [5] D'ALESSANDRO K C, ROBERTS-WOLLMANN C L, COUSINS T E. Direct biaxial behavior of ultra-high-performance concrete[J]. *ACI Materials Journal*, 2020, 117(2): 259-270.
- [6] 张平, 陈旭, 李凯, 等. 超高韧性混凝土配合比设计优化及力学性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2020, 47(8): 69-72.
- ZHANG Ping, CHEN Xu, LI Kai, et al. Design optimization and mechanics study of mixture ratio of super high toughness concrete[J]. *New Construction Materials*, 2020, 47(8): 69-72(in Chinese).
- [7] PERUMAL R. Performance and modeling of high-performance steel fiber reinforced concrete under impact loads[J]. *Computers and Concrete*, 2014, 13(2): 255-270.
- [8] 陈升平, 倪亮, 卢应发, 等. 钢纤维对混凝土轴压性能影响的试验研究[J]. *湖北工业大学学报*, 2020, 35(5): 97-101.
- CHEN Shengping, NI Liang, LU Yingfa, et al. Experimental research on influence of steel fiber on axial compression performance of concrete[J]. *Journal of Hubei University of Technology*, 2020, 35(5): 97-101(in Chinese).
- [9] 孟龙, 黄瑞源, 蒋东, 等. 钢纤维的掺入对混凝土材料力学性能的优化[J]. *低温建筑技术*, 2019, 41(6): 17-21.
- MENG Long, HUANG Ruiyuan, JIANG Dong, et al. Optimization of mechanical properties of concrete materials by incorporation of steel fibers[J]. *Low Temperature Building Technology*, 2019, 41(6): 17-21(in Chinese).
- [10] ZHOU X, YANG Y, LI X. Acoustic emission characterization of the fracture process in steel fiber reinforced concrete[J]. *Computers and Concrete*, 2016, 18(4): 923-936.
- [11] QI J, WU Z, MA Z J, et al. Pullout behavior of straight and hooked-end steel fibers in UHPC matrix with various embedded angles[J]. *Construction & Building Materials*, 2018, 191: 764-774.
- [12] 马恺泽, 刘亮, 刘超, 等. 高强混合钢纤维混凝土的力学性能[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(2): 261-265.
- MA Zekai, LIU Liang, LIU Chao, et al. Mechanical properties of hybrid steel fiber reinforced high strength concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20(2): 261-265(in Chinese).
- [13] 海然, 刘盼, 杨艳蒙, 等. 钢纤维增强粉煤灰自密实混凝土力学性能[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(1): 87-92.
- HAI Ran, LIU Pan, YANG Yanmeng, et al. Mechanical properties of steel fiber reinforced fly ash self-compacting concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(1): 87-92(in Chinese).
- [14] 周甲佳. 高强高性能混凝土多轴应力状态下力学性能试验和理论研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- ZHOU Jiajia. Experimental and theoretical study on behavior of high strength and high performance concrete under multi-axial loads[D]. Nanjing: Southeast University, 2015(in Chinese).
- [15] XIE F, CAI D, JI L, et al. Combined compression-shear performance and failure criteria of internally cured concrete with super absorbent polymer[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 266: 120888.
- [16] YU Z, HUANG Q, XIE X, et al. Experimental study and failure criterion analysis of plain concrete under combined compression-shear stress[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 179: 198-206.
- [17] 邓志恒, 李作华, 杨海峰, 等. 再生混凝土压-剪复合受力性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(5): 18-24.
- DENG Zhiheng, LI Zuohua, YANG Haifeng, et al. Mechanic behavior of recycled aggregate concrete subjected to compression-shear loading[J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(5): 18-24(in Chinese).
- [18] WANG J, XIE F, ZHANG C, et al. Experimental study and failure criterion analysis on combined compression-shear performance of self-compacting concrete[J]. *Materials*, 2020, 13(3): 713.
- [19] 江苏苏博特新材料股份有限公司. SBT-HDC(V) UHPC掺合料: Q/320115 JJK 042—2017[S]. 北京: 江苏苏博特新材料股份有限公司, 2017: 1-4.
- Sobute New Materials CO., LTD.. SBT-HDC(V) mineral admixture for UHPC: Q/320115 JJK 042—2017[S]. Beijing: Sobute New Materials CO., LTD., 2017: 1-4(in Chinese).
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 高强高性能混凝土用矿物外加剂: GB/T 18736—2017[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Mineral admixtures for high strength and high performance concrete: GB/T 18736—2017[S]. Beijing: Standardization Administration of the People's Republic of China, 2017(in Chinese).
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003: 17-20.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2002[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003: 17-20(in Chinese).
- [22] 余振鹏, 黄侨, 赵志青, 等. 自密实轻骨料混凝土压剪复合受力性能[J]. *复合材料学报*, 2018, 36(8): 1984-1994.

- YU Zhenpeng, HUANG Qiao, ZHAO Zhiqing, et al. Mechanical property of self-compacting lightweight aggregate concrete under combined compression-shear stress[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 36(8): 1984-1994(in Chinese).
- [23] 杨勇, 任青文. 钢纤维混凝土力学性能试验研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2006(1): 92-94.
- YANG Yong, REN Qingwen. Experimental study on mechanical performance of steel fiber reinforced concrete[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2006(1): 92-94(in Chinese).
- [24] OTTOSEN N S. A failure criterion for concrete[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1977, 103(4): 527-535.
- [25] WANG Y, WANG Y, ZHAO Y, et al. Experimental study on ultra-high performance concrete under triaxial compression[J]. *Construction & Building Materials*, 2020, 263: 120225.
- [26] 宋玉普, 赵国藩, 彭放, 等. 多轴应力下多种混凝土材料的通用破坏准则[J]. *土木工程学报*, 1996(1): 25-32.
- SONG Yupu, ZHAO Guofan, PENG Fang, et al. General failure criterion for different concrete materials under multiaxial stresses[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1996(1): 25-32(in Chinese).
- [27] 余自若, 赵海增, 安明喆, 等. 三轴压下活性粉末混凝土的力学性能研究[J]. *铁道学报*, 2017, 39(7): 117-122.
- YU Ziruo, ZHAO Haizeng, AN Mingzhe, et al. Mechanical properties of reactive powder concrete under triaxial compression[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2017, 39(7): 117-122(in Chinese).
- [28] 杨健辉, 汪洪菊, 孟海平, 等. 高强钢纤维碳纳米管混凝土双轴受压试验与破坏准则[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(11): 35-44.
- YANG Jianhui, WANG Hongju, MENG Haiping, et al. Biaxial compression tests and failure criteria for high strength steel fiber and carbon nanotube reinforced concrete[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(11): 35-44(in Chinese).
- [29] 闫光杰. 200 MPa级活性粉末混凝土(RPC200)的破坏准则与本构关系研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2005.
- YAN Guangjie. Research on failure criteria and constitutive model of 200 MPa reactive powder concrete[D]. Beijing: Beijing Transporation University, 2005(in Chinese).