

玄武岩纤维增强泡沫混凝土的单轴拉伸及准静态压缩性能

王小娟 崔浩儒 周宏元 李秀杰

Mechanical performance of basalt fiber reinforced foam concrete subjected to quasi-static tensile and compressive tests

WANG Xiaojuan, CUI Haoru, ZHOU Hongyuan, LI Xiujie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220422.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

负泊松比三明治结构填充泡沫混凝土的面内压缩性能

In-plane compression properties of negative Poisson's ratio sandwich structure filled with foam concrete

复合材料学报. 2020, 37(8): 2005–2014 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191207.001>

玄武岩格栅增强水泥基复合材料单轴拉伸力学性能试验及本构关系模型

Experiment on the uniaxial tensile mechanical behavior of basalt grid reinforced engineered cementitious composites and its constitutive model

复合材料学报. 2017, 34(10): 2367–2374 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170109.001>

碳纤维增强环氧树脂复合材料圆管多胞填充结构吸能特性的准静态压缩试验

Quasi-static compression experimental study on energy absorption characteristics of multicellular structures filled with carbon fiber reinforced epoxy composite tubes

复合材料学报. 2021, 38(9): 2894–2903 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201201.003>

粉煤灰空心球/Al复合泡沫材料准静态力学性能及本构模型

Quasi-static mechanical properties and constitutive model of fly ash cenosphere/aluminum syntactic foam

复合材料学报. 2021, 38(8): 2655–2665 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201116.003>

玄武岩纤维布增强树脂基复合材料约束高温损伤混凝土轴压力学性能

Axial compressive behavior of basalt fiber reinforced polymer-confined damaged concrete after exposed to elevated temperatures

复合材料学报. 2018, 35(8): 2002–2013 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170926.002>

玄武岩纤维增强聚合物筋增强珊瑚礁砂混凝土柱轴压试验

Axial compression test of basalt fiber reinforced polymer reinforced coral reef and sand aggregate concrete column

复合材料学报. 2020, 37(10): 2428–2438 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200219.003>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220422.001

玄武岩纤维增强泡沫混凝土的单轴拉伸及
准静态压缩性能



分享本文

王小娟¹, 崔浩儒¹, 周宏元^{* 1,2}, 李秀杰¹

(1. 北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124;

2. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 为研究玄武岩纤维增强泡沫混凝土的力学性能, 共设计了 52 组试件, 讨论了玄武岩纤维体积掺量和纤维长度对各密度试件的拉伸和压缩性能的影响。结果表明: 玄武岩纤维可显著提高试件的抗拉峰值应力(最大提升达到 737%)和峰值应变(最大提升达到 833%), 可有效改善中高密度试件的受拉失效模式, 使其出现伪应变硬化现象, 提升了试件的抗拉承载能力和变形能力。试件抗拉峰值应力和峰值应变随纤维体积掺量增大而增大, 随纤维长度增长先增大后降低; 另一方面, 玄武岩纤维能改变试件的受压破坏模式, 使其从纵向劈裂破坏转变为斜向剪切破坏和横向压溃破坏, 显著提高了中低密度试件的抗压承载力和吸能能力(最大提升达到 328%)。试件的吸能能力随纤维体积掺量增大而增强, 随纤维长度增长先提升后降低。

关键词: 玄武岩纤维泡沫混凝土; 单轴拉伸; 应变硬化; 准静态压缩; 能量吸收

中图分类号: TB301; TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2023)03-1569-17

Mechanical performance of basalt fiber reinforced foam concrete
subjected to quasi-static tensile and compressive tests

WANG Xiaojuan¹, CUI Haoru¹, ZHOU Hongyuan^{*1,2}, LI Xiujie¹

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To investigate the mechanical properties of basalt fiber reinforced foam concrete, the quasi-static tensile and compressive tests were carried out on the prepared 52 groups of specimens, and the effects of basalt fiber volume fraction and fiber length on the tensile and compressive properties of specimens with different densities were experimentally studied. The test results show that the basalt fiber could significantly improve the tensile peak stress (maximum improvement of 737%) and peak strain (maximum improvement of 833%) of specimens. Due to the appearance of pseudo strain hardening phenomenon, the basalt fiber could effectively improve the tensile failure mode of the medium and high density specimens, so as to improve the tensile bearing capacity and deformation ability of specimens. It is found that tensile peak stress and peak strain increase with increasing the fiber volume fraction, and increase first and then decrease with increasing the fiber length. Furthermore, basalt fiber could change the compression failure mode of specimens with the observed trend from longitudinal splitting failure to oblique shear failure and transverse crushing failure, resulting in significant improvement of the compressive bearing capacity and energy absorption ability of low and medium density specimens. In addition, it is observed that increasing the fiber volume content will lead to an increase in the energy absorption (maximum im-

收稿日期: 2022-03-02; 修回日期: 2022-04-12; 录用日期: 2022-04-12; 网络首发时间: 2022-04-22 10:39:39
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220422.001>
基金项目: 国家重点研发计划 (2019 YFD1101005); 国家自然科学基金 (52178096; 51808017; 51778028)
National Key Research and Development Project (2019 YFD1101005); National Natural Science Foundation of China (52178093; 51808017; 51778028)
通信作者: 周宏元, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为吸能材料、结构防护、结构抗爆设计 E-mail: hzhou@bjut.edu.cn
引用格式: 王小娟, 崔浩儒, 周宏元, 等. 玄武岩纤维增强泡沫混凝土的单轴拉伸及准静态压缩性能 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(3): 1569-1585.
WANG Xiaojuan, CUI Haoru, ZHOU Hongyuan, et al. Mechanical performance of basalt fiber reinforced foam concrete subjected to quasi-static tensile and compressive tests[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1569-1585(in Chinese).

provement of 328%) of the specimen, which increases first and then decreases with increasing the fiber length.

Keywords: basalt fiber reinforced foam concrete; uniaxial tension; strain hardening; quasi-static compression; energy absorption

泡沫混凝土作为一种轻质填充材料，具有隔音隔热性能好、密度和强度可调整、低碳环保等优点，被广泛应用于保温隔热层、吸音层、轻钢龙骨复合墙体^[1-2]等。早期一些专家对泡沫混凝土孔隙率、流动性、吸水率等物理性能^[3-4]开展了深入研究。近年来，泡沫混凝土作为一种多孔材料，其良好的吸能缓冲特性受到了广泛关注，因此诸多学者开展了其静动态力学性能及吸能特性的研究。张锦华等^[5]探明了不同密度等级的泡沫混凝土单轴压缩的破坏特征；王武祥等^[6]分析了泡沫混凝土绝干密度与抗压强度的关系。另外，马芹永等^[7]通过泡沫混凝土 SHPB 试验研究了其动态力学性能；刘海燕等^[8]研究了泡沫混凝土的吸能机制。

上述研究成果展现了泡沫混凝土良好的吸能特性，但抗拉强度低、韧性差、吸能效率低等缺点限制了其在工程上的应用。一些学者通过添加辅助胶凝材料如粉煤灰^[9]、再生微粉和微硅粉^[10]等来改善泡沫混凝土收缩大、易开裂的问题，也有一些学者通过掺入纤维如玻璃纤维^[11]、玄武岩纤维^[12-14]、聚丙烯纤维^[15]等来提高泡沫混凝土抗压强度及抗裂性。在诸多纤维材料中，玄武岩纤

维具有化学性质稳定、与混凝土相容性好、生产成本低廉、绿色环保、耐火性好^[16-18]等优势，能显著提高泡沫混凝土抗裂性能^[14]，但是对于玄武岩纤维增强泡沫混凝土的拉伸性能和压缩吸能性能的研究却鲜有报道。

鉴于此，本文设计了 4 种密度的泡沫混凝土与 4 种不同长度和 4 种不同掺量的玄武岩纤维组合制备了玄武岩纤维泡沫混凝土，系统研究了玄武岩纤维增强泡沫混凝土在准静态压缩下的破坏模式、抗压强度、压实应变和能量吸收等问题及在单轴拉伸下的失效过程、破坏模式、峰值应力、峰值应变等问题。

1 试验材料及试验方法

1.1 原材料和试件制备

水泥为河北省三河市产钧牌普通硅酸盐水泥 P.O 42.5，其 28 天抗压强度为 48 MPa，基本参数见表 1；玄武岩纤维 (BF) 为江苏绿材谷新材料科技发展有限公司提供，长度分别为 6 mm、9 mm、12 mm、15 mm，如图 1 所示，厂家提供的主要力学性能指标见表 2；发泡剂为市售的动物蛋白类发泡剂，拌合水为实验室自来水。

表 1 水泥基本参数
Table 1 Basic parameters of cement

Cement	Specific surface area/(m ² ·kg ⁻¹)	Setting time/min		Flexural strength/MPa		Compressive strength/MPa	
		Initial	Final	3 days	28 days	3 days	28 days
P.O 42.5	340	70	270	6	8.5	35	48

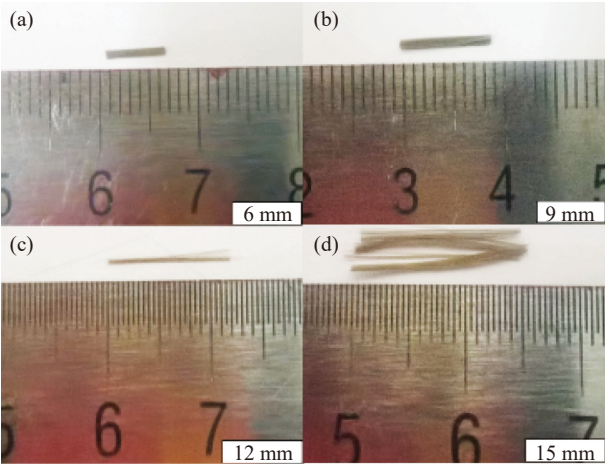


图 1 玄武岩纤维 (BF)
Fig. 1 Basalt fiber (BF)

玄武岩纤维增强泡沫混凝土 (BF/FC) 由图 2 设备进行制备，具体过程为：(1) 将发泡剂和水按 1 : 40 的体积比混合成发泡液，将称量好的发泡液注入到发泡机中，见图 2，制出稳定均匀的气泡；(2) 将水泥和水按水灰比 0.5 混合搅拌 2 min 制成水泥浆；(3) 将称量好的 BF 掺入水泥浆体中，搅拌 2 min；(4) 将气泡通入到搅拌均匀的纤维水泥浆中，通过泡沫用量来控制 FC 的密度，继续搅拌 1 min 得到均匀的 BF/FC 浆体；(5) 将 BF/FC 浆体浇注到试模中，刮平表面，在室温下静置 24 h；(6) 将试件拆模并在养护室中养护 28 天，养护室的温度为 (20±2)℃，相对湿度为 90%~95%。

表 2 BF 的主要性能指标
Table 2 Main properties of BF

Diameter/ μm	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Elongation/%	Density/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
13	4 150-4 750	95-115	3.1	2 650

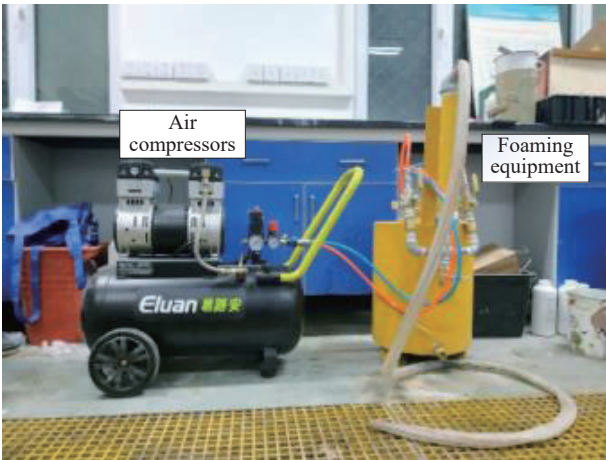


图 2 发泡设备
Fig. 2 Foaming machine

表 3 玄武岩纤维增强泡沫混凝土 (BF/FC) 配合比

Table 3 Mix proportion of basalt fiber reinforced foam concrete (BF/FC)

Target density of foam concrete/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Cement/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Water/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Foam/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Length of fiber/mm	Fiber volume fraction/vol%	Mass of fiber/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
400	230.98	115.49	56.56	0/6/12/15	0/0.15/0.3/0.45	0/3.98/7.96/11.94
700	439.22	219.61	44.38	0/6/12/15	0/0.15/0.3/0.45	0/3.98/7.96/11.94
1 000	647.45	323.73	32.27	0/6/12/15	0/0.15/0.3/0.45	0/3.98/7.96/11.94
1 300	855.67	427.84	20.09	0/6/12/15	0/0.15/0.3/0.45	0/3.98/7.96/11.94

1.3 单轴拉伸和准静态压缩试验

加载设备采用 MTS 公司的 Exceed E45 电子万能试验机 (300 kN) 如图 3(a) 所示。为了提高拉伸试验精度,避免加载过程中偏心引起的二次应力及试件末端的表面砂浆与粘结层撕裂导致应力-应变曲线急剧下降的问题,参考 Li 等^[19] 的试验制作了拉伸夹具。试件两端采用 E44 环氧树脂胶 (环氧树脂胶厚度不超过 1 mm,与 300 mm 长度的试件相比可忽略不计;环氧树脂胶的弹性模量约为 3.0 GPa,远高于试件的弹性模量,因此可忽略其拉伸变形量;环氧树脂胶抗拉强度高于 10 MPa 远大于试件抗拉强度) 和带有螺孔的钢板粘结,钢板通过螺栓固定在试验机夹头上。在加载前,调整试件与加载设备连接夹头的松紧程度和预拉夹头球铰,校正试件微小的不均匀受力。采用位移控制的加载方式,加载速度为 0.2 mm/min,对应

1.2 试件设计

共设计了 52 组单轴拉伸试件和准静态压缩试件,每组包含 3 个相同的拉伸试件和 3 个相同的压缩试件,总计 156 个拉伸试件和 156 个压缩试件。单轴拉伸试件采用 100 mm×100 mm×300 mm 棱柱体试件,准静态压缩试件采用 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试件。考虑了 3 个试验变量:FC 密度、BF 体积掺量及玄武岩纤维长度。FC 密度为 400 kg/m³、700 kg/m³、1 000 kg/m³、1 300 kg/m³;BF 体积掺量为 0vol%、0.15vol%、0.30vol%、0.45vol%;BF 长度为 6 mm、9 mm、12 mm、15 mm。BF/FC 的配合比见表 3,试件汇总见表 4。

的名义应变率为 1.11×10⁻⁵ s⁻¹,并在拉伸过程中采集力-位移数据。夹具形式、试件粘接形式和加载装置如图 3(b) 和图 3(c) 所示。

在准静态压缩试验过程中,为了受力均匀,在试件两端分别放置两块钢板,如图 3(d) 所示。准静态压缩试验采用位移控制的加载方式,加载速度为 5 mm/min,对应的名义应变率为 8.3×10⁻⁴ s⁻¹,并在压缩过程中记录实时力-位移数据。

2 单轴拉伸试验结果

2.1 BF/FC 的破坏模式

不同密度 BF/FC 试件的破坏模式如图 4 所示。首先荷载随着拉伸变形的增大逐步增加,当试件标距内出现肉眼可见的裂缝时,试件被拉断并伴随着“砰”的响声,经观察主裂缝两边无微裂缝,且出现在试件标距内的任意位置,具有随机性。随着密度增加试件断裂时发出的声响也会增大,

表 4 BF/FC 试件汇总
Table 4 Summary of BF/FC specimens

Tensile specimen	Compressive specimen
FC-424	FC-439
0.15vol%BF(6)/FC-414	0.15vol%BF(6)/FC-438
0.30vol%BF(6)/FC-426	0.30vol%BF(6)/FC-440
0.45vol%BF(6)/FC-405	0.45vol%BF(6)/FC-428
0.15vol%BF(9)/FC-411	0.15vol%BF(9)/FC-444
0.30vol%BF(9)/FC-432	0.30vol%BF(9)/FC-440
0.45vol%BF(9)/FC-419	0.45vol%BF(9)/FC-423
0.15vol%BF(12)/FC-416	0.15vol%BF(12)/FC-439
0.30vol%BF(12)/FC-405	0.30vol%BF(12)/FC-429
0.45vol%BF(12)/FC-424	0.45vol%BF(12)/FC-442
0.15vol%BF(15)/FC-435	0.15vol%BF(15)/FC-419
0.30vol%BF(15)/FC-419	0.30vol%BF(15)/FC-415
0.45vol%BF(15)/FC-407	0.45vol%BF(15)/FC-404
FC-713	FC-710
0.15vol%BF(6)/FC-721	0.15vol%BF(6)/FC-736
0.30vol%BF(6)/FC-726	0.30vol%BF(6)/FC-713
0.45vol%BF(6)/FC-714	0.45vol%BF(6)/FC-730
0.15vol%BF(9)/FC-708	0.15vol%BF(9)/FC-740
0.30vol%BF(9)/FC-719	0.30vol%BF(9)/FC-702
0.45vol%BF(9)/FC-732	0.45vol%BF(9)/FC-720
0.15vol%BF(12)/FC-726	0.15vol%BF(12)/FC-725
0.30vol%BF(12)/FC-732	0.30vol%BF(12)/FC-704
0.45vol%BF(12)/FC-734	0.45vol%BF(12)/FC-711
0.15vol%BF(15)/FC-715	0.15vol%BF(15)/FC-715
0.30vol%BF(15)/FC-711	0.30vol%BF(15)/FC-725
0.45vol%BF(15)/FC-703	0.45vol%BF(15)/FC-696
FC-1 032	FC-1 025
0.15vol%BF(6)/FC-1 024	0.15vol%BF(6)/FC-1 026
0.30vol%BF(6)/FC-1 017	0.30vol%BF(6)/FC-1 044
0.45vol%BF(6)/FC-1 009	0.45vol%BF(6)/FC-1 016
0.15vol%BF(9)/FC-1 003	0.15vol%BF(9)/FC-1 011
0.30vol%BF(9)/FC-1 013	0.30vol%BF(9)/FC-1 003
0.45vol%BF(9)/FC-1 026	0.45vol%BF(9)/FC-992
0.15vol%BF(12)/FC-1 011	0.15vol%BF(12)/FC-997
0.30vol%BF(12)/FC-1 007	0.30vol%BF(12)/FC-997
0.45vol%BF(12)/FC-1 023	0.45vol%BF(12)/FC-1 016
0.15vol%BF(15)/FC-1 034	0.15vol%BF(15)/FC-1 001
0.30vol%BF(15)/FC-1 010	0.30vol%BF(15)/FC-1 000
0.45vol%BF(15)/FC-1 032	0.45vol%BF(15)/FC-1 041
FC-1 305	FC-1 322
0.15vol%BF(6)/FC-1 317	0.15vol%BF(6)/FC-1 331
0.30vol%BF(6)/FC-1 333	0.30vol%BF(6)/FC-1 332
0.45vol%BF(6)/FC-1 319	0.45vol%BF(6)/FC-1 308
0.15vol%BF(9)/FC-1 326	0.15vol%BF(9)/FC-1 320
0.30vol%BF(9)/FC-1 322	0.30vol%BF(9)/FC-1 326
0.45vol%BF(9)/FC-1 307	0.45vol%BF(9)/FC-1 293
0.15vol%BF(12)/FC-1 311	0.15vol%BF(12)/FC-1 307
0.30vol%BF(12)/FC-1 304	0.30vol%BF(12)/FC-1 308
0.45vol%BF(12)/FC-1 337	0.45vol%BF(12)/FC-1 306
0.15vol%BF(15)/FC-1 328	0.15vol%BF(15)/FC-1 302
0.30vol%BF(15)/FC-1 321	0.30vol%BF(15)/FC-1 310
0.45vol%BF(15)/FC-1 317	0.45vol%BF(15)/FC-1 296

Note: Three number in the materials name indicate the volume fraction of the fiber, the length of the fiber, and the density of the specimen, respectively.

但随着纤维掺量的提高，断裂时发出的声响变小。观察试件破坏形态发现，随着试件密度的增大，

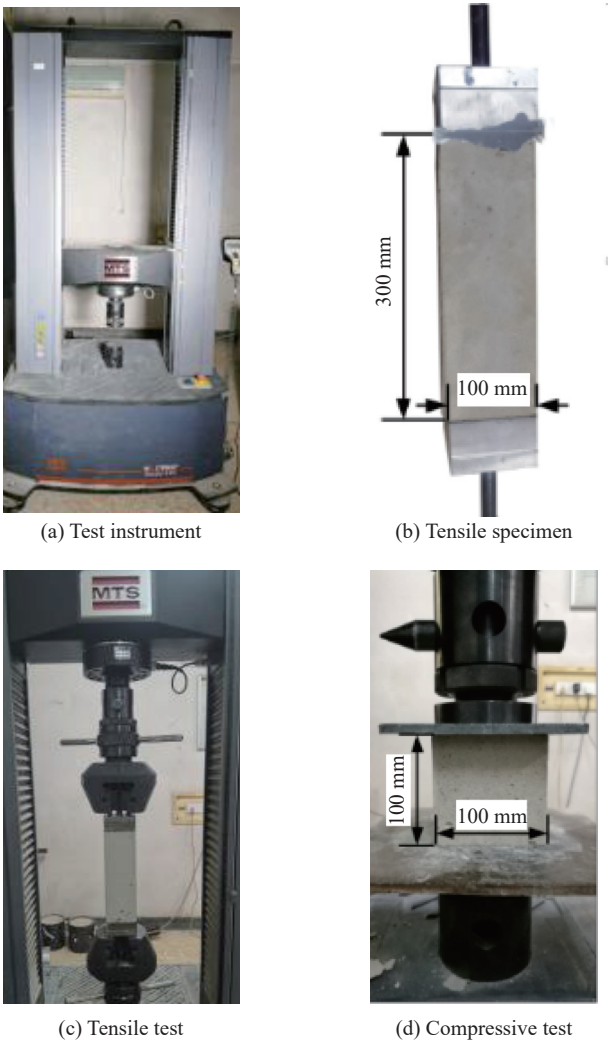


图 3 试验设备、试件及加载装置
Fig. 3 Test instrument, specimen and loading device

其断口趋于平整、清晰。此外，对于纤维掺量较高且长度较长的试件可在断口处清晰看见拔出的纤维。

2.2 BF/FC 的形变

由于 FC 内部缺陷较多导致试验数据离散性较大，因此在 3 个数据中选取峰值应力为中值的应力-应变曲线进行试验结果分析^[19]。本试验 4 组不同密度 FC 试件的应力-应变曲线如图 5 所示。在加载初期，试件处于弹性阶段，应力随应变线性增加，不同密度 FC 的拉伸弹性模量基本相同。弹性阶段结束试件即发生破坏，因此 FC 的初裂应变为峰值应变，初裂强度为峰值强度，达到峰值强度后曲线无平滑的下降段。FC 的峰值强度和峰值应变均随其密度提高而增加。

48 组 BF/FC 试件拉伸应力-应变曲线如图 6 所示，特征点如表 5 所示。在初期加载阶段，试件

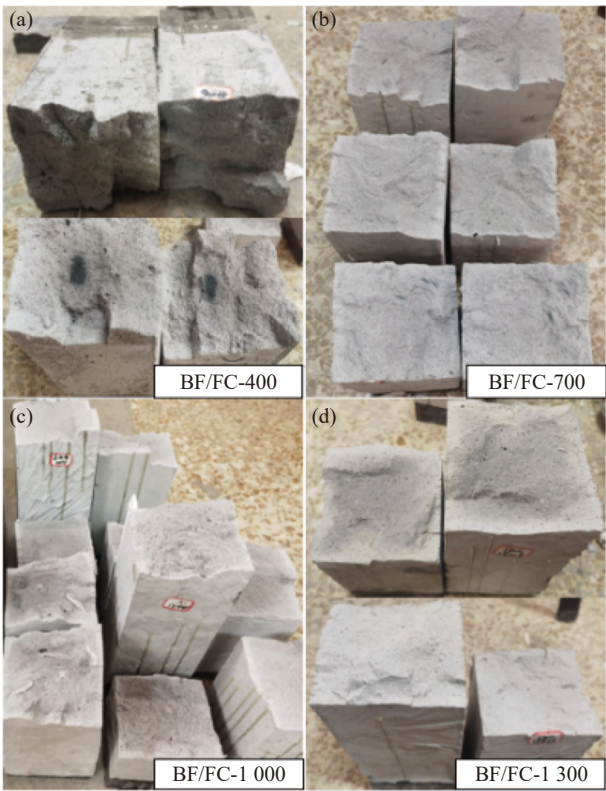


图4 BF/FC 拉伸破坏模式

Fig. 4 Tensile failure mode of BF/FC

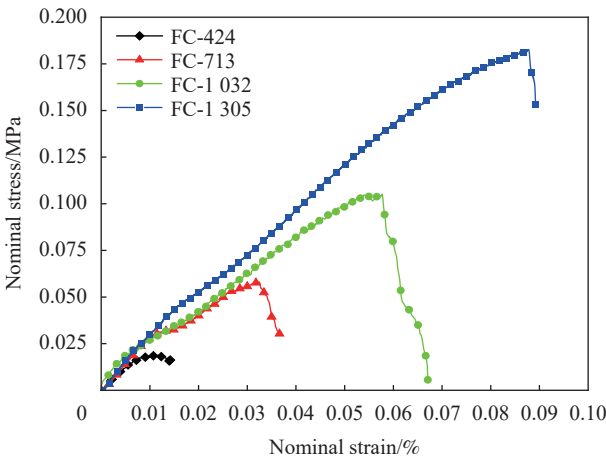


图5 不同密度FC 单轴拉伸名义应力-名义应变曲线

Fig. 5 Nominal stress-nominal strain curves of FC with different densities subjected to uniaxial tension

处于弹性阶段，应力-应变关系表现为线性增加，不同试件的拉伸弹性模量差别不大。当试件达到峰值应变后，试件即发生破坏。在低密度FC中掺入玄武岩纤维后，可以观察到试件到达峰值应变后曲线的下降段较平缓，如图6(a)~6(b)所示。低密度玄武BF/FC试件达到峰值应变后发生开裂，纤维的桥接作用使裂缝处仍能传递拉应力，因此

截面应力未发生陡降。当BF/FC密度较高时，试件达到峰值应变时的应力较大，纤维的有限桥接作用无法传递较大的拉应力，导致试件发生突然破坏，如图6(e)~6(h)。如图6(c)~6(d)所示，虽然一些试件的峰值应力接近，但其下降段不尽相同。这是由于试件中BF的分布具有随机性，试件发生拉伸破坏的位置及裂缝走向也具有随机性，当断裂面处纤维分布较多时，试件发生破坏后，大量的纤维能够继续传递拉应力，故其下降段较平缓；当断裂面处纤维分布较少时，试件发生破坏后，少量的纤维难以传递拉应力，导致下降段发生陡降。

高密度BF/FC试件的应力-应变曲线如图6(e)~6(h)所示，观察到斜率减小的折线型弹性阶段，弹性阶段斜率的减小代表试件拉伸弹性模量的减小。在试件的几何形状、边界条件和外力的作用形式未发生改变时，弹性模量的减小意味着试件抗拉刚度的减小。试件在抗拉刚度减小的同时还能继续承受荷载，可认为试件在拉伸过程中出现了伪应变硬化的现象。在对纤维织物混凝土，工程水泥基复合材料(ECC)^[20-22]等拉伸试验研究中出现了伪应变硬化的现象，即材料在拉伸过程中出现了裂缝、损伤、缺陷后仍具有抵抗变形的能力，同时产生了一定程度的塑性变形。对比图6(b)、图6(d)、图6(f)、图6(h)，BF/FC应力-应变曲线弹性阶段的转折点和对应相同密度FC峰值点较接近，说明BF/FC出现伪应变硬化现象时，试件薄弱面达到极限抗拉强度继而出现裂缝，裂缝出现时纤维的桥接作用能有效抑制裂缝扩展，使试件能够继续承载。最后当裂缝处的纤维拔出或断裂时，试件无法继续承载并突然发生破坏。这种伪应变硬化现象主要出现在密度较高、纤维掺量高和长度较长的BF/FC中，FC密度越高、纤维掺量越高及长度越长基材与纤维的相互作用越强，从而伪应变硬化现象越明显。

从试件的应力-应变曲线可以归纳为两种失效模式：模式I为试件在出现初始裂缝后直接发生破坏；模式II为试件出现了明显的伪应变硬化现象。各组试件的失效模式归类如表5所示。试验结果表明：掺入适量纤维可使脆性破坏的失效模式I变为伪塑性破坏的失效模式II，提高FC的韧性和耗能能力。

2.3 BF/FC 拉伸试验数据

BF 掺量及长度对 BF/FC 峰值应力的影响如图 7

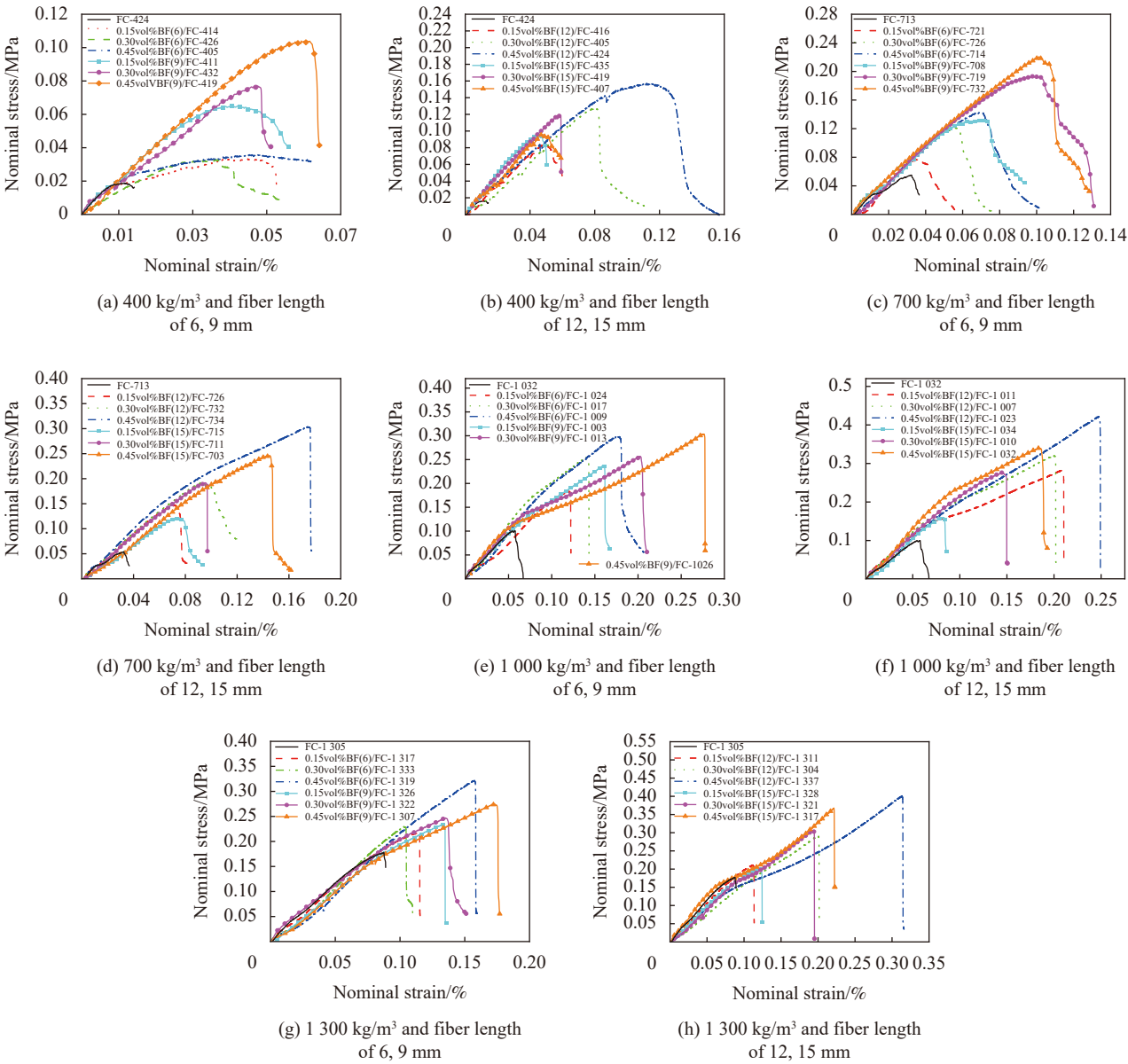


图6 48组BF/FC单轴拉伸名义应力-名义应变曲线

Fig. 6 Nominal stress-nominal strain curves of 48 sets of BF/FC subjected to uniaxial tension

和图8所示，具体试验数据见表5。

BF对 400 kg/m³、700 kg/m³、1 000 kg/m³ 和 1 300 kg/m³ 试件的峰值强度平均提升了 357%、206%、161% 和 53%，峰值应变平均提升了 367%、180%、207% 和 84%。试验数据表明 BF 对低密度 FC 的抗拉性能提升效果最好。密度较低时，FC 基底材料较松散，与纤维的相互作用较弱，虽然掺入纤维后试件抗拉强度的提升较小，但相较于 FC 自身极低的抗拉强度，提升效果十分显著；密度较高时，泡沫混凝土基底材料较密实，与纤维的相互作用较强，同时 FC 自身已具有较高的抗

拉强度，虽然掺入纤维后抗拉强度提升较多，但相对提升效果不如低密度那样明显。

如图7所示，在相同密度、相同纤维长度下，试件的抗拉性能随着纤维掺量增加而提升。当 BF 体积分数为 0.45vol% 时，试件抗拉性能提升最明显。许多学者在研究 BF 掺量对于混凝土受拉性能影响时发现，BF 体积分数在 0.4vol%~0.6vol% 时混凝土受拉性能提升作用达到峰值^[13, 23]。目前有限试验数据无法验证 0.45vol% 为最佳纤维体积掺量，后续试验中会考虑更高的纤维掺量。

如图8所示，在相同密度、相同体积掺量下，BF 长度对试件抗拉性能先提升后降低。当 BF 长

表 5 BF/FC 单轴拉伸试件的特征点
Table 5 Characteristics of BF/FC specimen subjected to uniaxial tension

Specimen index	Peak stress/MPa	Improvement rate/%	Peak strain	Improvement rate/%	FM
FC-424	0.019	-	0.012	-	I
0.15vol%BF(6)/FC-414	0.033	74	0.049	308	I
0.30vol%BF(6)/FC-426	0.033	74	0.037	208	I
0.45vol%BF(6)/FC-405	0.036	90	0.048	300	I
0.15vol%BF(9)/FC-411	0.065	242	0.039	225	I
0.30vol%BF(9)/FC-432	0.077	305	0.047	292	I
0.45vol%BF(9)/FC-419	0.104	447	0.059	392	I
0.15vol%BF(12)/FC-416	0.087	358	0.050	317	I
0.30vol%BF(12)/FC-405	0.130	584	0.080	567	I
0.45vol%BF(12)/FC-424	0.159	737	0.112	833	I
0.15vol%BF(15)/FC-435	0.098	416	0.046	283	I
0.30vol%BF(15)/FC-419	0.121	537	0.059	392	I
0.45vol%BF(15)/FC-407	0.099	421	0.047	292	I
FC-713	0.058	-	0.032	-	I
0.15vol%BF(6)/FC-721	0.079	37	0.035	10	I
0.30vol%BF(6)/FC-726	0.122	110	0.054	69	I
0.45vol%BF(6)/FC-714	0.146	152	0.070	119	I
0.15vol%BF(9)/FC-708	0.134	131	0.067	109	I
0.30vol%BF(9)/FC-719	0.196	238	0.098	206	I
0.45vol%BF(9)/FC-732	0.224	286	0.101	216	I
0.15vol%BF(12)/FC-726	0.151	160	0.072	125	I
0.30vol%BF(12)/FC-732	0.196	238	0.092	188	I
0.45vol%BF(12)/FC-734	0.308	431	0.175	447	I
0.15vol%BF(15)/FC-715	0.125	116	0.072	125	I
0.30vol%BF(15)/FC-711	0.196	238	0.095	198	I
0.45vol%BF(15)/FC-703	0.250	331	0.145	353	I
FC-1 032	0.105	-	0.058	-	I
0.15vol%BF(6)/FC-1 024	0.187	78	0.120	107	I
0.30vol%BF(6)/FC-1 017	0.259	147	0.141	143	I
0.45vol%BF(6)/FC-1 009	0.302	188	0.177	205	I
0.15vol%BF(9)/FC-1 003	0.242	131	0.159	174	I
0.30vol%BF(9)/FC-1 013	0.261	149	0.203	250	II
0.45vol%BF(9)/FC-1 026	0.308	193	0.275	374	II
0.15vol%BF(12)/FC-1 011	0.288	174	0.208	259	II
0.30vol%BF(12)/FC-1 007	0.325	210	0.200	245	II
0.45vol%BF(12)/FC-1 023	0.426	306	0.247	326	II
0.15vol%BF(15)/FC-1 034	0.165	57	0.082	41	I
0.30vol%BF(15)/FC-1 010	0.281	168	0.144	148	I
0.45vol%BF(15)/FC-1 032	0.346	137	0.184	217	II
FC-1 305	0.183	-	0.088	-	I
0.15vol%BF(6)/FC-1 317	0.224	22	0.115	31	I
0.30vol%BF(6)/FC-1 333	0.234	28	0.103	17	I
0.45vol%BF(6)/FC-1 319	0.326	78	0.158	80	I
0.15vol%BF(9)/FC-1 326	0.239	31	0.133	51	I
0.30vol%BF(9)/FC-1 322	0.251	37	0.135	53	I
0.45vol%BF(9)/FC-1 307	0.280	53	0.173	97	II
0.15vol%BF(12)/FC-1 311	0.216	18	0.112	27	I
0.30vol%BF(12)/FC-1 304	0.297	62	0.167	90	I
0.45vol%BF(12)/FC-1 337	0.406	122	0.314	257	II
0.15vol%BF(15)/FC-1 328	0.208	14	0.121	38	I
0.30vol%BF(15)/FC-1 321	0.311	70	0.193	119	II
0.45vol%BF(15)/FC-1 317	0.373	104	0.221	151	II

Note: FM—Failure mode.

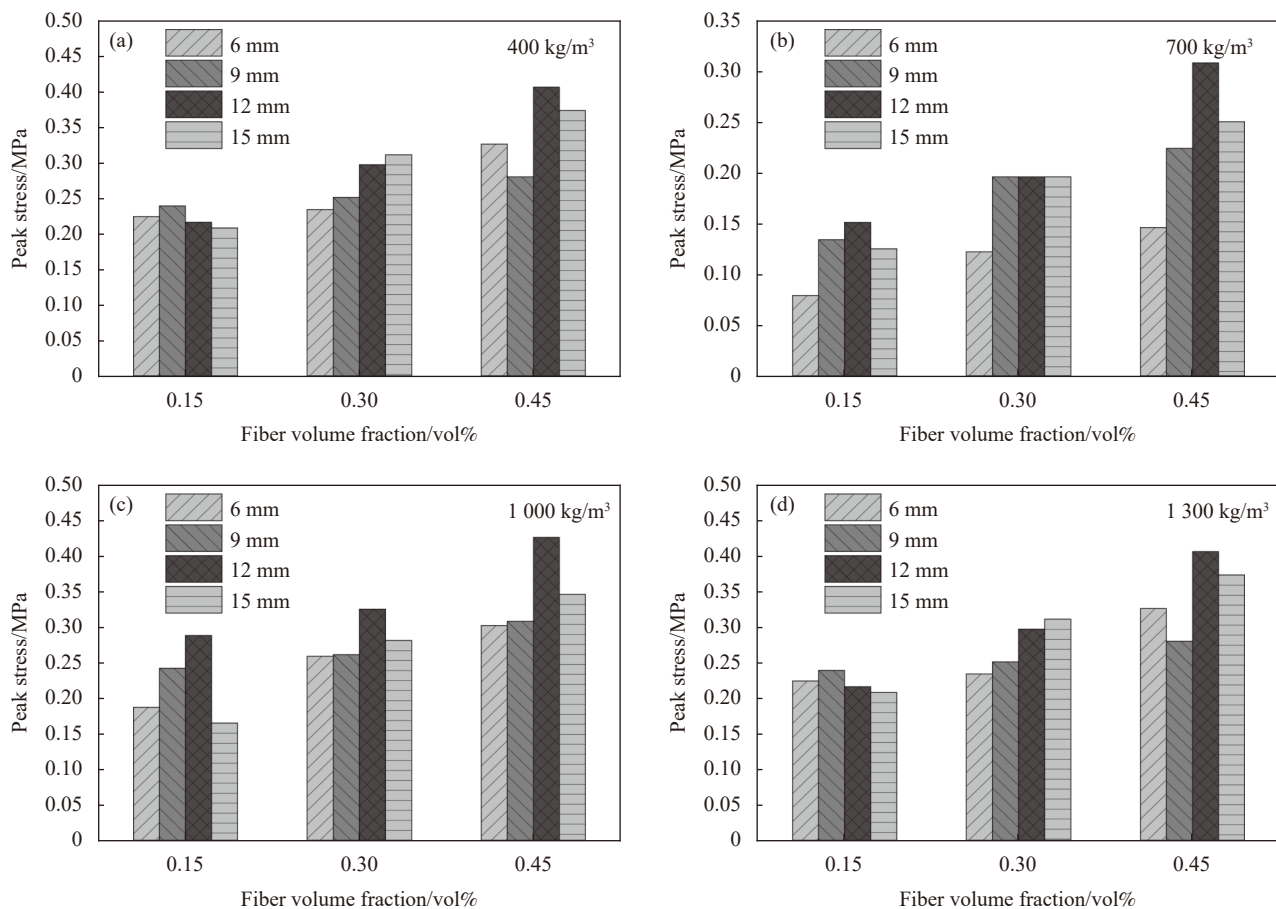


图7 BF 掺量对 BF/FC 拉伸峰值应力的影响

Fig. 7 Effect of BF volume fraction on peak stress of BF/FC under tension

度为 12 mm 时, 试件的抗拉性能改善最显著。但当 BF 长度为 15 mm 时, 试件的抗拉强度有所降低, 纤维越长导致其在混凝土内部的分散性就越差, 纤维更易聚集成团, 试件产生薄弱区, 如图 9 所示。

2.4 BF/FC 的微观形貌

为了观察 BF/FC 试件拉伸后纤维形态, 分别从 FC-424、0.15vol%BF(6)/FC-414、0.45vol%BF(6)/FC-405、0.15vol%BF(15)/FC-435 四个试件的断裂面上切割出尺寸为 8 mm×8 mm×5 mm 试件, 采用场发射扫描电子显微镜 ZEISS Gemini 300, 对切割出的试件进行 SEM 分析。FC-424 的 SEM 图像如图 10(a) 所示, 可以观察到低密度 FC 的基材较松散, 并能分析出水化产物的构成。0.15vol%BF(6)/FC-414 的 SEM 图像如图 10(b) 所示, 当纤维长度过短或者纤维掺量不足时, 纤维与基材之间出现了明显的粘结滑移, 基材内出现了较明显的微裂缝。试件的密度较低导致基材与纤维的相互作用较弱, 因此纤维表面并未观察到明显划痕。

0.45vol%BF(6)/FC-405 的 SEM 图像如图 10(c) 所示, 当纤维掺量过多时, 纤维在基材中会成簇分布, 使基材的结构较松散, 从而难以提升整体抗拉强度; 0.15vol%BF(15)/FC-435 的 SEM 图像如图 10(d) 所示, 当纤维长度过长时, 纤维不能完全均匀分散, 纤维会出现弯曲、打卷等乱向分布, 削弱了纤维的桥接效果。总体来说, 微观结构机制分析与宏观试验结果较一致。

3 准静态压缩试验结果及分析

3.1 BF/FC 破坏模式

在准静态压缩试验过程中, BF/FC 在不同密度和不同纤维掺量及长度下呈现 3 种不同的破坏模式: 横向压溃破坏、斜截面剪切破坏和纵向劈裂破坏。其中, 横向压溃破坏是在压缩过程中, 试件表面首先出现未贯穿的横向主裂缝, 然后横向主裂缝的两侧出现较短的纵向裂缝或斜裂缝, 随着纵向裂缝或斜裂缝的扩展, 试件表面逐渐剥落直至试件被压溃, 如图 11(a) 所示。斜截面剪

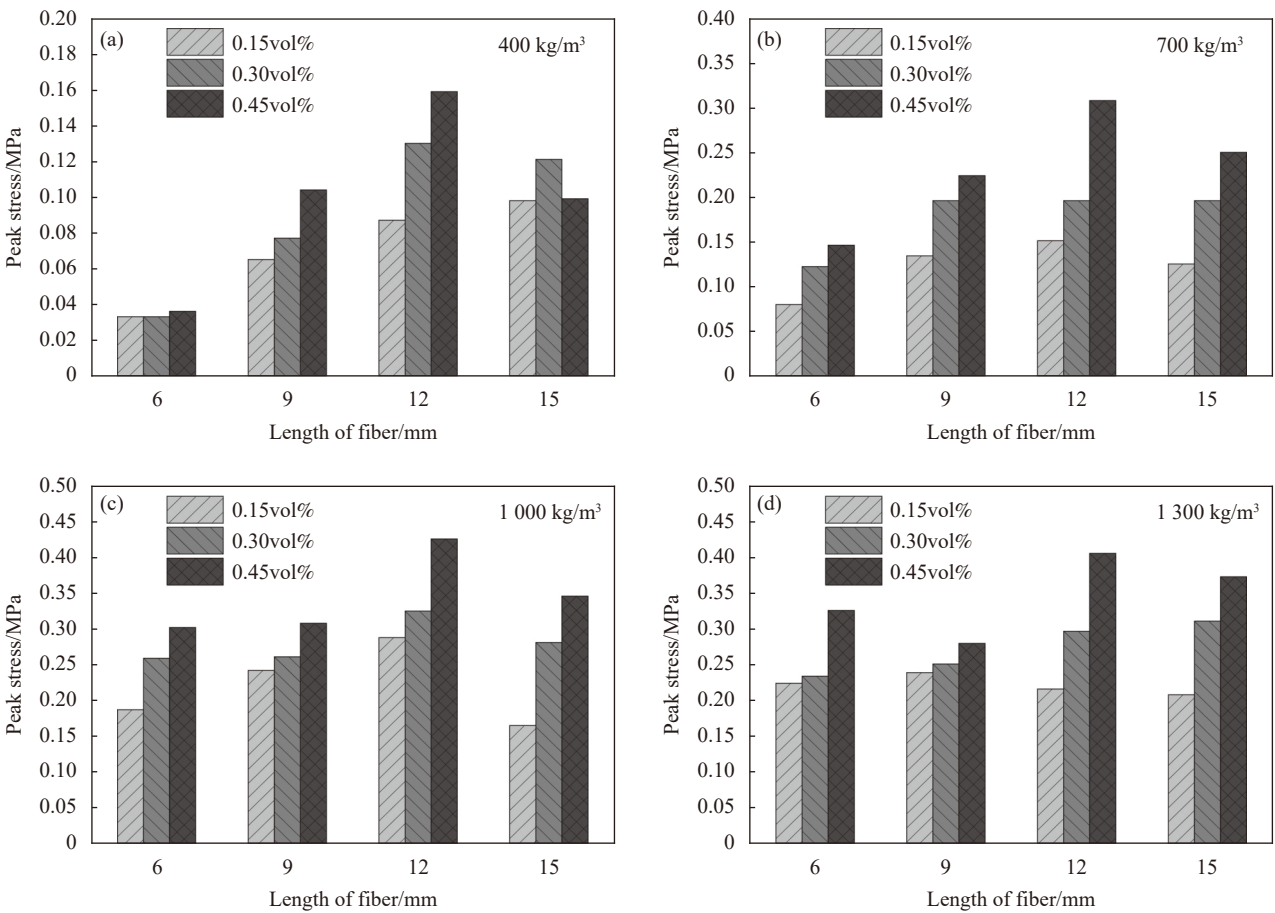


图 8 BF 长度对 BF/FC 拉伸峰值应力的影响

Fig. 8 Effect of length of BF on peak stress of BF/FC under tension

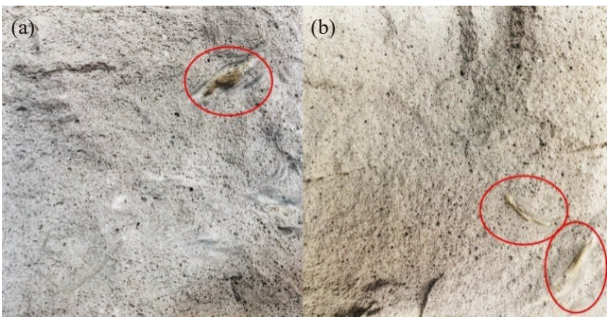


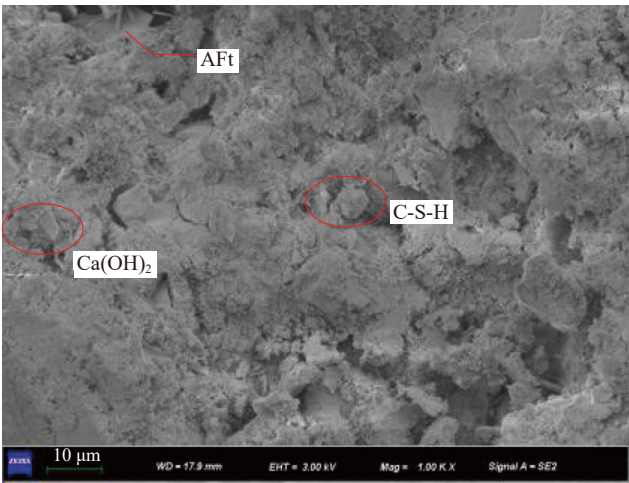
图 9 15 mm BF 成团示意图

Fig. 9 Schematic of gathering of BF with length of 15 mm

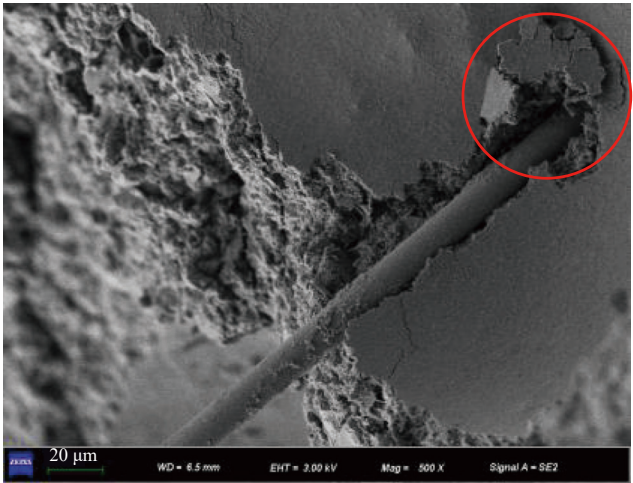
切破坏是在压缩过程中，试件首先出现贯穿的斜向主裂缝，然后主裂缝两侧出现纵向裂缝，随着裂缝扩展，试件表面逐渐剥落，最终试件被压溃，如图 11(b) 所示。纵向劈裂破坏是在压缩过程中，试件首先出现贯穿的纵向主裂缝，然后主裂缝两侧出现较多的纵向裂缝，随着裂缝扩展，试件逐渐剥落直至压溃，如图 11(c) 所示。

各密度未掺 BF 的 FC 均呈现纵向劈裂破坏。

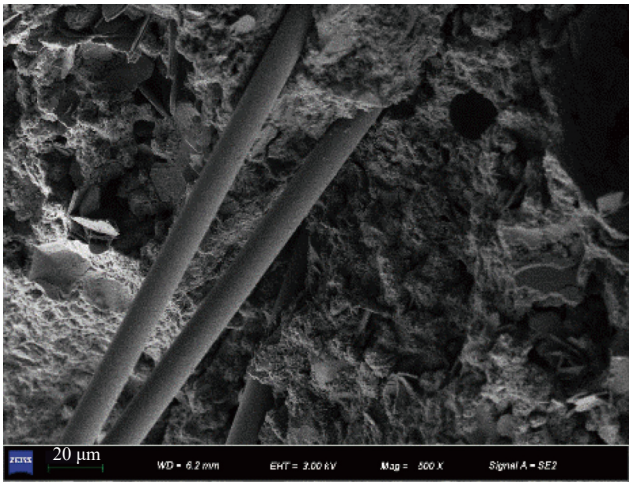
对于 400 kg/m³ 的 BF/FC，当纤维掺量为 0.15vol% 时，试件呈纵向劈裂破坏；当纤维掺量增加至 0.3vol% 时，试件发生斜截面剪切破坏；当纤维掺量继续增加至 0.45vol% 时，纤维长度为 6 mm 和 15 mm 的试件出现斜截面剪切破坏，纤维长度为 9 mm 和 12 mm 的试件为横向压溃破坏。对于 700 kg/m³ 的 BF/FC，当纤维掺量为 0.15vol% 时，试件为纵向劈裂破坏；当纤维掺量增加到 0.3vol% 时，纤维长度为 9 mm 和 12 mm 的试件出现斜截面剪切破坏，纤维长度为 6 mm 和 15 mm 的试件呈现纵向劈裂破坏；当纤维掺量增至 0.45vol% 时，仅 12 mm 纤维的试件表现出横向压溃破坏，其他试件皆发生斜截面剪切破坏。对于 1000 kg/m³ 的 BF/FC，当纤维掺量为 0.15vol% 时，试件呈现纵向劈裂破坏；当纤维掺量增加至 0.3vol% 和 0.45vol% 时，仅掺 12 mm 纤维的试件呈斜截面剪切破坏，其余试件均发生纵向劈裂破坏。对于 1300 kg/m³ 的 BF/FC，试件均呈现竖向劈裂破坏。以掺入 12 mm 纤维长度的试件为例，



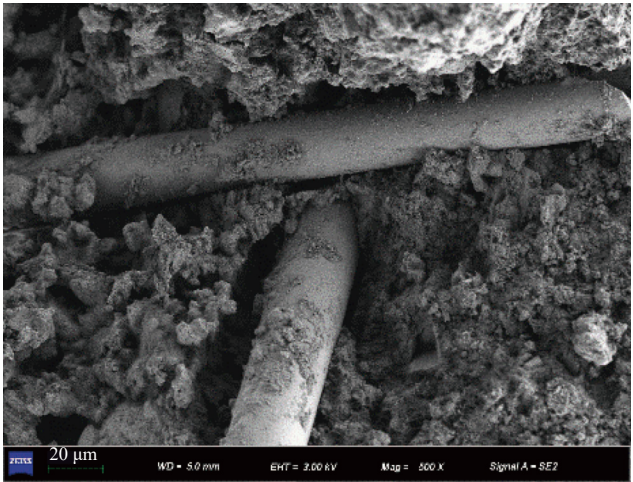
(a) FC-424



(b) 0.15vol%BF(6)/FC-414



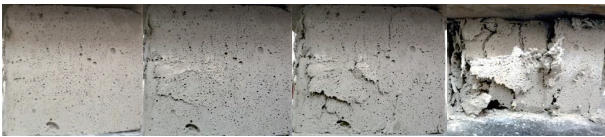
(c) 0.45vol%BF(6)/FC-405



(d) 0.15vol%BF(15)/FC-435

图 10 BF/FC 的 SEM 图像

Fig. 10 SEM images of BF/FC



(a) Transverse crushing failure



(b) Oblique shear failure



(c) Longitudinal splitting failure

图 11 BF/FC 压溃模式

Fig. 11 Failure pattern of BF/FC

典型的裂缝开展模式见图 12。观察各试件的裂缝开展和破坏模式发现：随着纤维掺量的增加，中低密度试件从纵向劈裂破坏转变为斜截面剪切破坏直至横向压溃破坏。对中高密度试件，纤维掺量的增加使试件从纵向劈裂破坏转变为斜截面剪切破坏。高密度试件均发生纵向劈裂破坏，纤维的掺入未改变其破坏模式。在同一纤维掺量下，9 mm 和 12 mm 的中长度纤维对试件破坏模式的改变作用显著；由于 6 mm 短纤维与基材的相互作用较弱及 15 mm 长纤维在试件内易成团导致纤维对试件压缩力学性能作用不明显，因此 6 mm 的短纤维和 15 mm 的长纤维对改变试件破坏模式的影响较小。

FC 抗拉强度低且在压缩过程中有向外膨胀的趋势，因此试件易发生受拉破坏产生贯穿的纵向

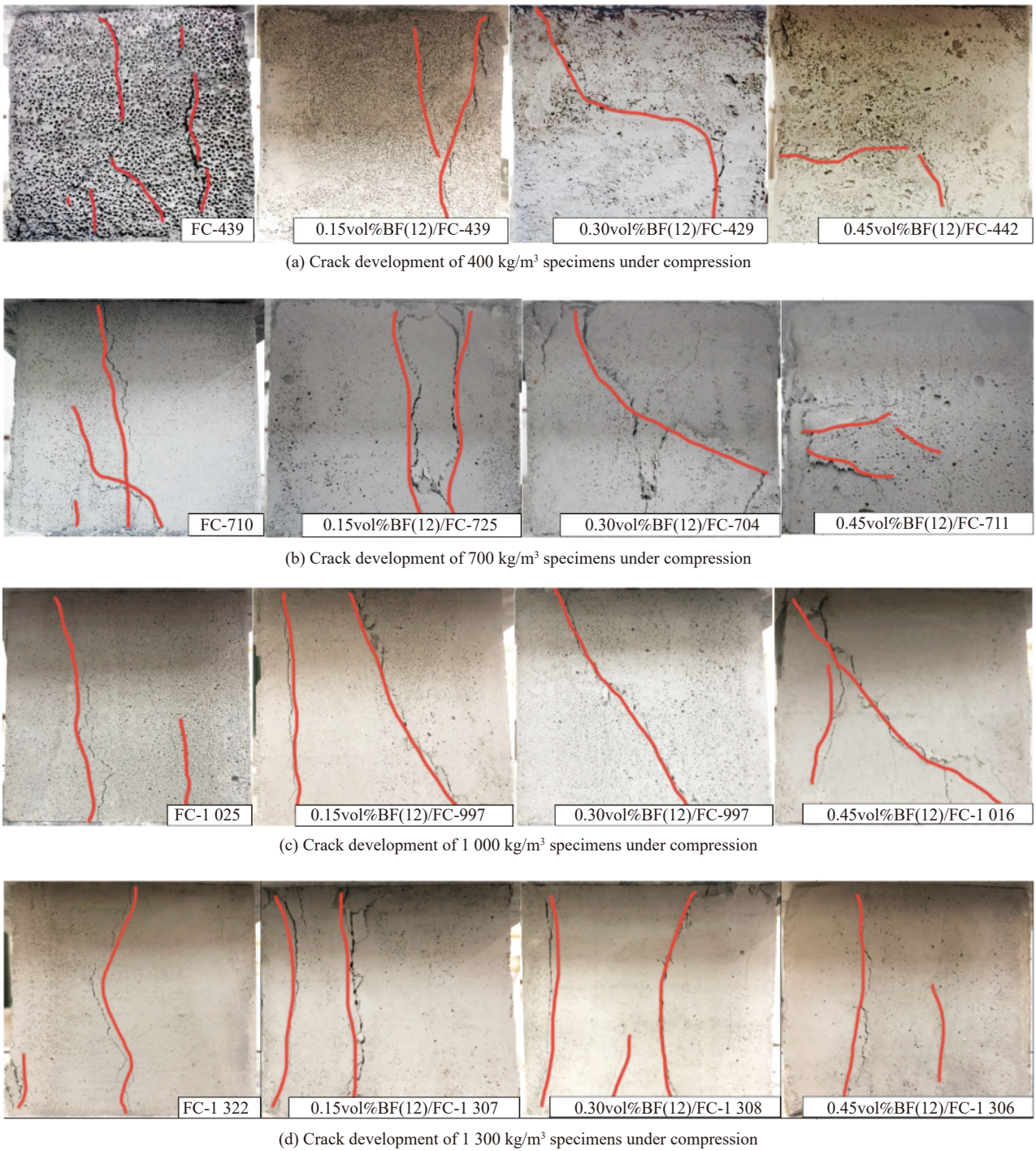


图 12 纤维长度为 12 mm 的 BF/FC 裂缝开展模式

Fig. 12 Crack development of BF/FC with fiber length of 12 mm

裂缝。泡沫混凝土密度越高，泊松比越大导致压缩时向外膨胀作用越显著，更易出现竖向裂缝。试件掺入纤维后，纤维在试件内部的拉结作用显著提高了试件的抗拉强度，有效约束试件横向变形，限制了竖向裂缝的发展。随着掺量增加，裂缝的初始走向逐渐从竖向转变为斜向，甚至产生

横向初始裂缝。当试件密度较低时，较强的纤维拉结作用显著影响了初始裂缝的发展方向；当试件密度较高时，试件的泊松比较大，有限的纤维拉结作用无法有效限制竖向裂缝的开展。

图 13 为 400 kg/m³ 试件压缩应变达到 70% 时的压溃情况。其中图 13(a) 为试件 FC-439 的压溃

情况，其破坏模式为竖向劈裂破坏；图 13(b) 为试件 0.30vol%BF(12)/FC-429 的压溃情况，其破坏模式为斜截面剪切破坏；图 13(c) 为试件 0.45vol%BF(12)/FC-442 的压溃情况，其破坏模式为横向压溃破坏。如图 13 所示：试件 FC-439 外圈散落着未被压实的剥落块且体积较大，试件中心呈现较小的圆形压实区域；试件 0.30vol%BF(12)/FC-429 外圈散落着较少剥落块，大部分剥落块体积较小且呈片状，试件中心呈较大的多边形压实区域，试件表面可观察到纤维的拔出；试件 0.45vol%BF(12)/FC-442 外圈散落着少量未被压实的剥落块且体积较小，试件呈较完整的方形压实区域，试件表面存在大量纤维的拔出。

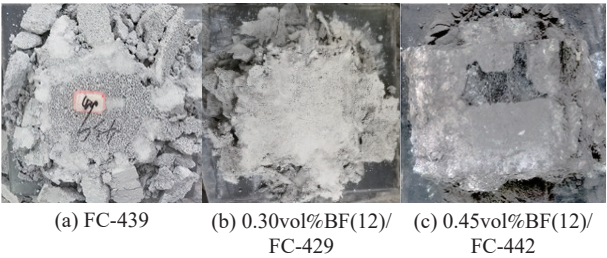


图 13 BF/FC 试件压溃情况对比
Fig. 13 Comparison of collapse modes of BF/FC specimens

3.2 BF/FC 单轴压缩吸能能力

与拉伸试验相同，在 3 个数据中选取峰值应力为中值的应力-应变曲线进行试验结果分析^[19]。通常使用初始峰值应力、平台应力、压实应变、吸能总量和比吸能来评价多孔材料的吸能能力。本文采用的是由 Miltz 等^[24]提出的用能量吸收效率 E_f 来确定材料的压实应变：

$$E_f(\varepsilon_a) = \frac{1}{\sigma_a} \int_0^{\varepsilon_a} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon, \quad 0 \leq \varepsilon_a \leq 1 \tag{1}$$

式中： $\sigma(\varepsilon)$ 是泡沫材料在受压状态下的名义应力-应变关系； ε 介于 $0 \sim \varepsilon_a$ 之间； ε_a 是试件任一时刻的应变值； σ_a 是 $\varepsilon = \varepsilon_a$ 时所对应的应力，吸能效率极大值所对应的应变即为压实应变 ε_D ^[25]，压实应变 ε_D 可由下式求出：

$$\left. \frac{dE_f(\varepsilon_a)}{d\varepsilon_a} \right|_{\varepsilon_a = \varepsilon_D} = 0, \quad 0 \leq \varepsilon_a < 1 \tag{2}$$

平台应力 σ_m 为试件达到压实应变前所承受的应力的平均值，平台应力 σ_m 可由下式计算：

$$\sigma_m = \frac{1}{\varepsilon_D} \int_0^{\varepsilon_D} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \tag{3}$$

总吸能 E_a 由荷载-位移关系曲线积分获得：

$$E_a = \int_0^l P dl \tag{4}$$

其中： l 为试件达到压实应变之前，任一时刻的位移值； P 为任一位移值试件受到的压力。

比吸能 E_{SA} 是试件的总吸能 E_a 与试件总质量 m 的比值：

$$E_{SA} = \frac{E_a}{m} \tag{5}$$

表 6 为不同 BF/FC 准静态压缩试验能量吸收指标。图 14、图 15 为 BF 掺量及长度对试件能量吸收的影响。如表 6 所示， 400 kg/m^3 的 BF/FC 的峰值应力、平台应力、吸能和比吸能均随纤维掺量的增加而增加，随纤维长度的增加先增大后减小。与拉伸试验现象相同，BF 随纤维长度的增加变得易打结且不易分散，导致试件局部有效截面积减小，继而承载力降低。由表 6 可知， 700 kg/m^3 、 $1\,000 \text{ kg/m}^3$ 、 $1\,300 \text{ kg/m}^3$ 的中高密度 BF/FC 的峰值应力差别不大，纤维的掺入未显著提高试件的峰值应力，但其平台应力、吸能和比吸能随纤维掺量的增加而增大，随纤维长度的增加先增大后减小。结合表 6 分析，当纤维长度为 12 mm ，体积掺量为 $0.45 \text{ vol\%}$ 时，试件的平台应力、吸能及比吸能均达到最大值， 442 kg/m^3 、 711 kg/m^3 、 $1\,016 \text{ kg/m}^3$ 、 $1\,306 \text{ kg/m}^3$ 的 BF/FC 与对应密度 FC 相比，平台应力分别提高了 282% 、 134% 、 127% 、 168% ，总吸能分别提高了 328% 、 155% 、 135% 、 174% 。其结果表明 BF 对低密度试件的吸能能力有较显著的提升，保证了材料轻量化的同时提高了其吸能能力。

选取了能量吸收能力最好的 12 mm 试块名义应力-应变曲线进行对比分析，图 16 为选取的应力-应变曲线。FC 和 BF/FC 试件准静态压缩名义应力-应变曲线基本相似，试件依次出现弹性阶段、平台阶段和密实阶段。对于 400 kg/m^3 试件，FC 和 BF/FC 应力-应变均无明显峰值；对于 700 kg/m^3 试件，泡沫混凝土有较明显的峰值应力，BF/FC 无明显峰值应力； $1\,000 \text{ kg/m}^3$ 和 $1\,300 \text{ kg/m}^3$ 试件均有明显峰值应力。BF/FC 的平台应力均高于相同密度等级的 FC 的平台应力，随着纤维掺量的增加试件的平台应力显著提高，其吸能能力也大幅度提高。FC 主要靠气孔的坍塌破坏进行吸能，而 BF/FC 作为纤维复合材料可以通过基材开裂破

表 6 BF/FC 准静态压缩能量吸收指标
Table 6 Energy absorption characteristics of BF/FC under quasi-static compression

Specimen index	Peak and plateau stress/MPa	ε_D	E_a /J and E_{SA} /(J·g ⁻¹)
FC-439	0.525/0.411	0.47	190.0/0.433
0.15vol%BF(6)/FC-438	0.995/0.696	0.42	309.5/0.707
0.30vol%BF(6)/FC-440	1.259/0.636	0.43	311.2/0.707
0.45vol%BF(6)/FC-428	1.589/1.050	0.51	532.9/1.245
0.15vol%BF(9)/FC-444	1.246/0.724	0.52	407.1/0.917
0.30vol%BF(9)/FC-440	1.229/0.881	0.52	448.7/1.020
0.45vol%BF(9)/FC-423	1.772/1.250	0.43	576.2/1.362
0.15vol%BF(12)/FC-439	1.254/0.923	0.52	468.0/1.066
0.30vol%BF(12)/FC-429	1.755/1.427	0.57	789.4/1.840
0.45vol%BF(12)/FC-442	1.910/1.570	0.56	813.1/1.840
0.15vol%BF(15)/FC-419	1.390/0.784	0.53	441.2/1.053
0.30vol%BF(15)/FC-415	1.696/1.399	0.51	692.0/1.668
0.45vol%BF(15)/FC-404	1.443/0.846	0.59	490.2/1.213
FC-710	4.561/1.459	0.33	614.8/0.866
0.15vol%BF(6)/FC-736	4.220/1.430	0.53	831.6/1.130
0.30vol%BF(6)/FC-713	4.137/1.848	0.39	857.7/1.203
0.45vol%BF(6)/FC-730	4.470/1.386	0.57	916.7/1.256
0.15vol%BF(9)/FC-740	5.072/1.718	0.44	955.6/1.291
0.30vol%BF(9)/FC-702	3.553/2.636	0.49	1 258.0/1.792
0.45vol%BF(9)/FC-720	5.070/3.249	0.44	1 423.4/1.977
0.15vol%BF(12)/FC-725	5.723/2.440	0.45	1 118.3/1.542
0.30vol%BF(12)/FC-704	4.063/2.994	0.52	1 534.3/2.179
0.45vol%BF(12)/FC-711	4.305/3.413	0.50	1 566.7/2.204
0.15vol%BF(15)/FC-715	5.250/2.338	0.37	985.8/1.379
0.30vol%BF(15)/FC-725	4.648/3.292	0.47	1 516.5/2.092
0.45vol%BF(15)/FC-696	5.064/2.719	0.49	1 313.5/1.887
FC-1 025	9.459/3.760	0.36	1 587.9/1.549
0.15vol%BF(6)/FC-1 026	11.707/3.758	0.46	2 086.0/2.033
0.30vol%BF(6)/FC-1 044	13.488/4.327	0.49	2 365.9/2.266
0.45vol%BF(6)/FC-1 016	12.417/5.047	0.48	2 558.2/2.518
0.15vol%BF(9)/FC-1 011	11.565/4.933	0.37	2 096.2/2.073
0.30vol%BF(9)/FC-1 003	12.319/5.536	0.47	2 580.7/2.573
0.45vol%BF(9)/FC-992	11.471/6.739	0.51	3 193.3/3.219
0.15vol%BF(12)/FC-997	8.913/5.017	0.52	2 716.4/2.725
0.30vol%BF(12)/FC-997	12.503/6.959	0.55	3 374.7/3.385
0.45vol%BF(12)/FC-1 016	14.011/8.529	0.50	3 739.2/3.680
0.15vol%BF(15)/FC-1 001	9.984/4.969	0.51	2 536.6/2.534
0.30vol%BF(15)/FC-1 000	11.940/5.390	0.53	2 981.3/2.981
0.45vol%BF(15)/FC-1 041	12.538/6.911	0.51	3 430.7/3.296
FC-1 322	23.601/4.547	0.38	2 351.2/1.779
0.15vol%BF(6)/FC-1 331	24.556/5.920	0.37	2 646.3/1.988
0.30vol%BF(6)/FC-1 332	23.282/5.990	0.43	3 180.0/2.377
0.45vol%BF(6)/FC-1 308	20.178/8.669	0.49	4 136.7/3.163
0.15vol%BF(9)/FC-1 320	23.643/6.124	0.37	2 759.1/2.090
0.30vol%BF(9)/FC-1 326	24.580/6.502	0.50	3 776.5/2.848
0.45vol%BF(9)/FC-1 293	25.920/9.083	0.47	4 189.5/3.240
0.15vol%BF(12)/FC-1 307	21.120/7.136	0.44	3 452.7/2.642
0.30vol%BF(12)/FC-1 308	20.126/10.708	0.50	5 135.4/3.926
0.45vol%BF(12)/FC-1 306	22.800/12.194	0.56	6 433.7/4.926
0.15vol%BF(15)/FC-1 302	24.311/5.397	0.39	2 816.0/2.163
0.30vol%BF(15)/FC-1 310	23.903/11.051	0.52	5 432.6/4.147
0.45vol%BF(15)/FC-1 296	20.191/9.794	0.52	4 884.6/3.769

Notes: ε_D —Densification strain; E_a and E_{SA} —Energy absorption and specific energy absorption.

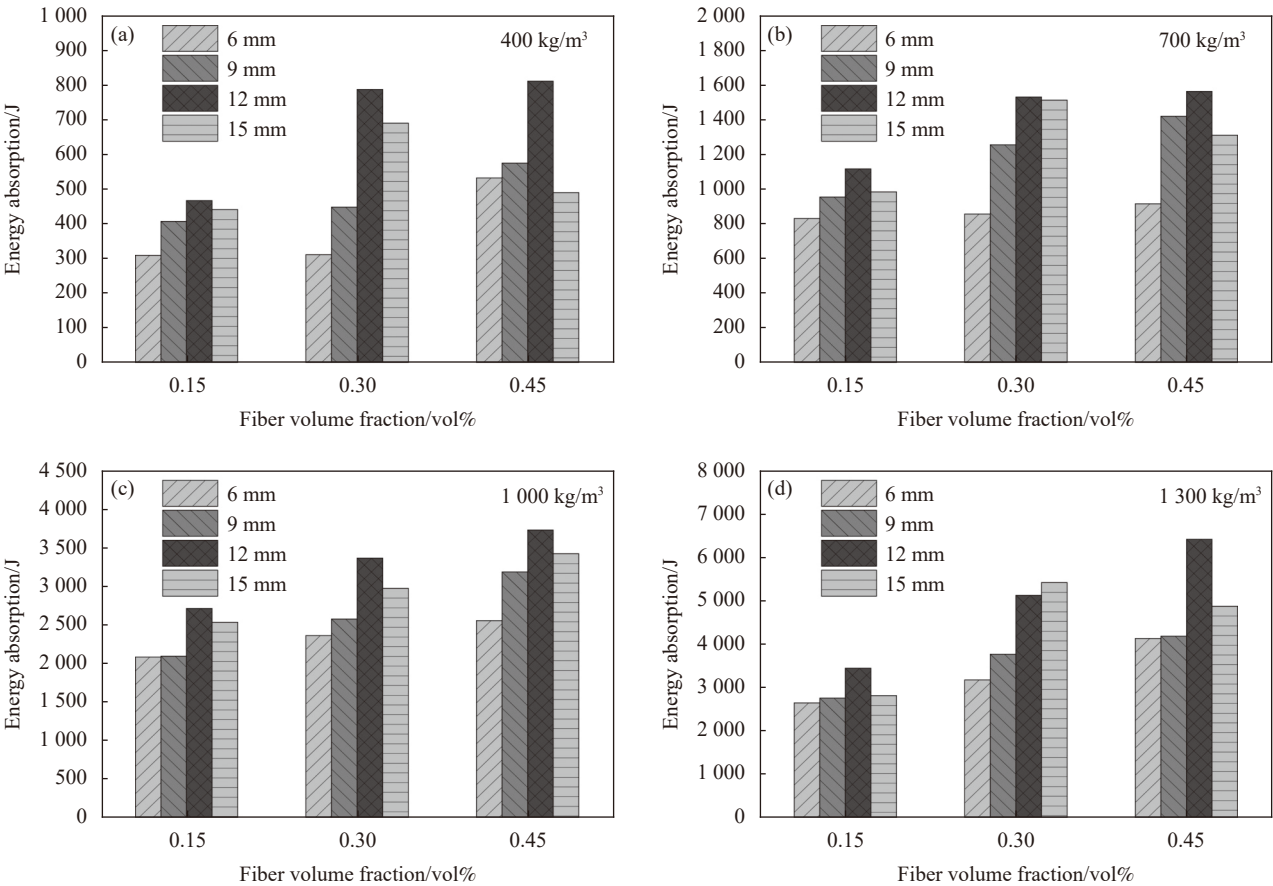


图 14 BF 维掺量对 BF/FC 吸能的影响

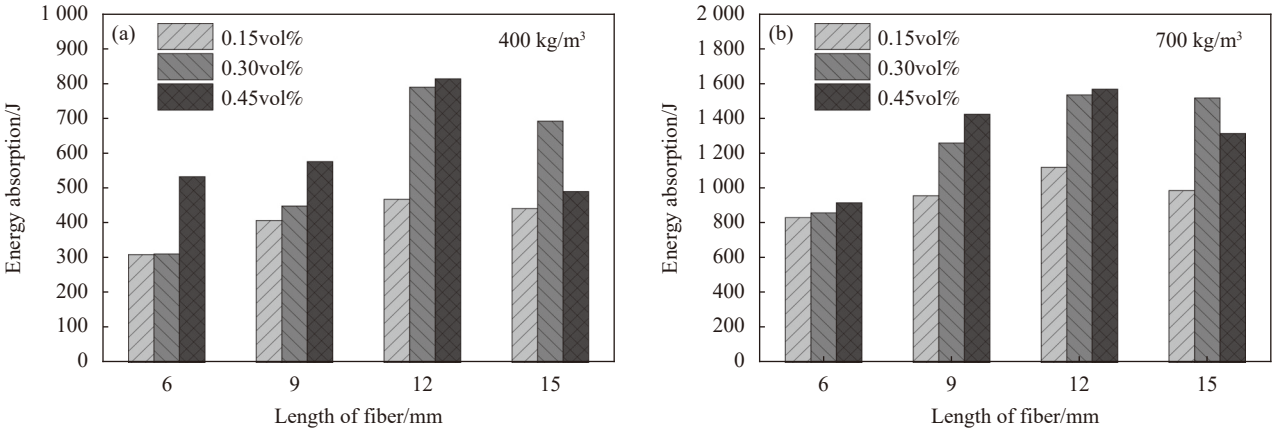
Fig. 14 Effect of BF volume fraction on energy absorption of BF/FC specimen

碎、纤维断裂、纤维与基材摩擦等多种方式进行吸能^[26]。在一定范围内, 纤维越长、体积掺量越高, 纤维断裂与摩擦吸收的能量也就越多, 其损伤过程也越为稳定, 故其平台应力也就越高, 吸能也就越多。掺入 BF 会导致 FC 小孔数量急剧增加^[27-28], 内部孔结构更加均匀, 降低了由初始缺陷导致试件破坏的机率, 从而使其破坏过程更加稳定, 因此 BF/FC 的吸能性能优于泡沫混凝土。

4 结论

开展了 52 组玄武岩增强泡沫混凝土试件的单轴拉伸和准静态压缩试验, 研究了玄武岩纤维体积掺量和纤维长度对不同密度试件的破坏模式、承载能力、变形能力、吸能能力的影响。

(1) 玄武岩纤维可显著提高试件的抗拉峰值应力和峰值应变。试件的抗拉峰值应力和峰值应变随纤维体积掺量增大而增大, 随纤维长度增长先



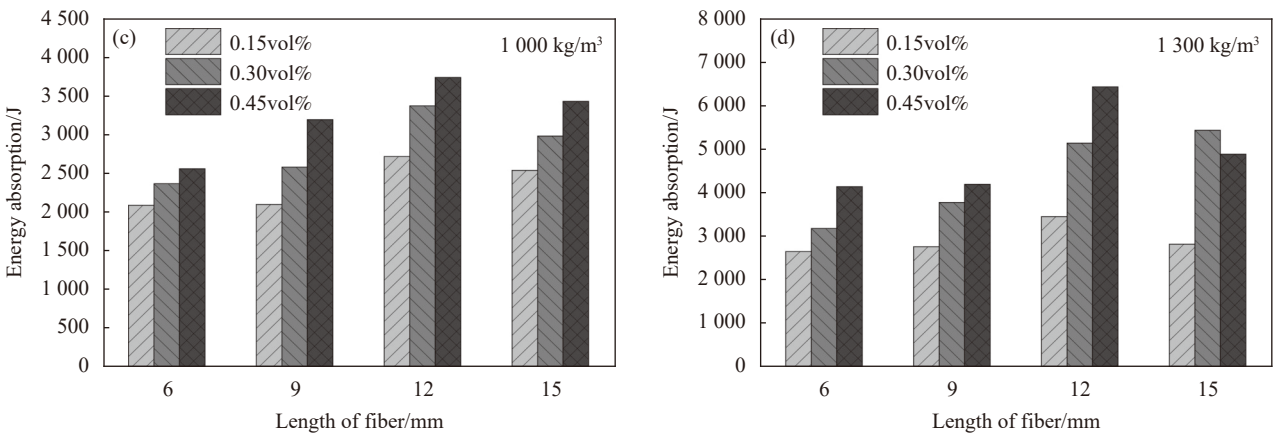


图 15 BF 长度对 BF/FC 吸能的影响

Fig. 15 Effect of BF length of on energy absorption of BF/FC specimen

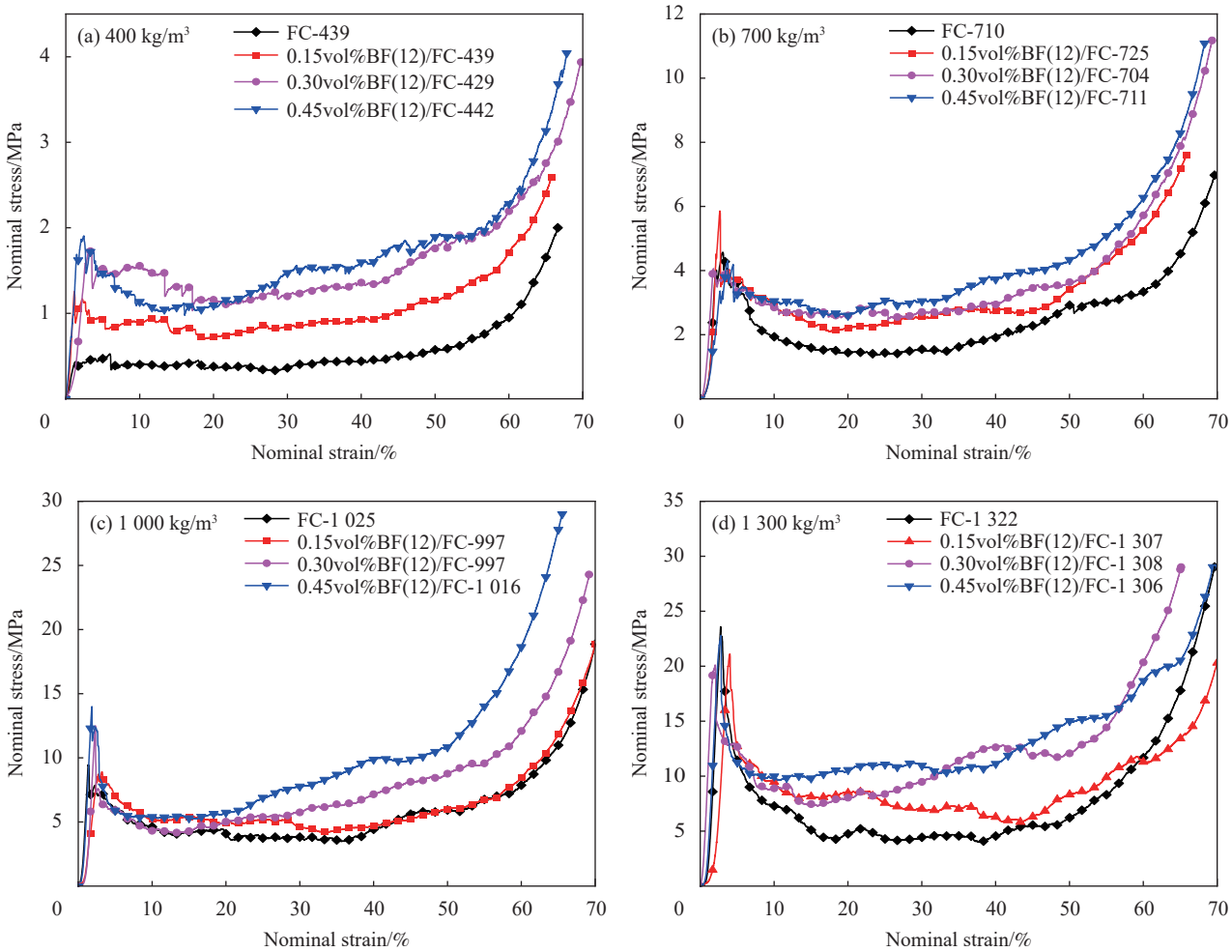


图 16 BF 长度为 12 mm 的 BF/FC 名义应力-应变曲线

Fig. 16 Nominal stress-strain curves of BF/FC with BF length of 12 mm

增大后降低。掺入玄武岩纤维能改变 1 000 kg/m³、1 300 kg/m³ 中高密度试件的受拉失效模式，使其出现伪应变硬化现象，从脆性破坏转变为伪塑性

破坏，提升了试件的承载能力和变形能力。
(2) 玄武岩纤维可显著提升 400 kg/m³ 试件的抗压峰值应力，对 700 kg/m³、1 000 kg/m³、

1 300 kg/m³ 试件的抗压峰值应力提升不明显；对各密度试件的压实应变、平台应力、总吸能和比吸能均有显著提升。试件的吸能能力随纤维体积掺量增大而增强，随纤维长度增长先提升后降低。

(3) 玄武岩纤维可改变 400 kg/m³、700 kg/m³、1 000 kg/m³ 中低密度试件的受压破坏模式，使其从纵向劈裂破坏转变为斜向剪切破坏和横向压溃破坏，显著提高试件的吸能能力。

(4) 当玄武岩纤维的体积掺量为 0.45%、长度为 12 mm 时，玄武岩纤维泡沫混凝土的抗拉峰值应力、峰值应变和压缩吸能能力均达到最大值。本文推荐 0.45% 体积分数、12 mm 的玄武岩纤维泡沫混凝土应用于吸能防护领域。

参考文献：

- [1] 崔玉理, 贺鸿珠. 温度对泡沫混凝土性能影响[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(5): 836-839, 846.
CUI Yuli, HE Hongzhu. Influence of temperature on performances of foam concrete[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(5): 836-839, 846(in Chinese).
- [2] 李从波, 文梓芸, 殷素红. 大型承重保温夹芯复合墙体的材料选型及模拟[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(6): 1012-1016.
LI Congbo, WEN Ziyun, YIN Suhong. Material selection and simulation research of large bearing insulation sandwich composite wall[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(6): 1012-1016(in Chinese).
- [3] 张亚梅, 孙超, 王申, 等. 不同密度等级泡沫混凝土的性能和孔结构[J]. 重庆大学学报, 2020, 43(8): 54-63.
ZHANG Yamei, SUN Chao, WANG Shen, et al. Properties and pore structure of foam concrete with different density[J]. Journal of Chongqing University, 2020, 43(8): 54-63(in Chinese).
- [4] 宋强, 张鹏, 鲍玖文, 等. 泡沫混凝土的研究进展与应用[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(2): 398-410.
SONG Qiang, ZHANG Peng, BAO Jiuwen, et al. Research progress and application of foam concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(2): 398-410(in Chinese).
- [5] 李升涛, 陈徐东, 张锦华, 等. 不同密度等级泡沫混凝土的单轴压缩破坏特征[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6): 1146-1153.
LI Shengtao, CHEN Xudong, ZHANG Jinhua, et al. Failure characteristics of foam concrete with different density under uniaxial compression[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6): 1146-1153(in Chinese).
- [6] 王武祥. 泡沫混凝土绝干密度与抗压强度的相关性研究[J]. 混凝土世界, 2010(6): 50-53.
WANG Wuxiang. Correlation between absolute dry density and compressive strength of foam concrete[J]. China Concrete, 2010(6): 50-53(in Chinese).
- [7] 袁璞, 马芹永, 张海东. 轻质泡沫混凝土SHPB试验与分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(17): 116-119.
YUAN Pu, MA Qinyong, ZHANG Haidong. SHPB tests for light weight foam concrete[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(17): 116-119(in Chinese).
- [8] 刘海燕, 李然. 泡沫混凝土吸能机理试验研究[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2010, 29(2): 166-167, 180.
LIU Haiyan, LI Ran. Experimental study on energy absorbing mechanism of foam concrete[J]. Journal of Chengdu University (Natural Science), 2010, 29(2): 166-167, 180(in Chinese).
- [9] 刘军, 齐玮, 刘润清, 等. 粉煤灰对泡沫混凝土物理力学性能的影响[J]. 材料导报, 2015, 29(16): 111-114.
LIU Jun, QI Wei, LIU Runqing, et al. Effect of fly ash on physical and mechanical properties of foam concrete[J]. Materials Reports, 2015, 29(16): 111-114(in Chinese).
- [10] 王小娟, 刘路, 贾昆程, 等. 陶粒泡沫混凝土的力学性能及吸能特性[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(1): 207-215.
WANG Xiaojuan, LIU Lu, JIA Kuncheng, et al. Mechanical properties and energy absorption characteristics of ceramic foam concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(1): 207-215(in Chinese).
- [11] 詹炳根, 郭建雷, 林兴胜. 玻璃纤维增强泡沫混凝土性能试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 32(2): 226-229.
ZHAN Binggen, GUO Jianlei, LIN Xingsheng. Properties of foamed concrete with fibre glass reinforcement[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2009, 32(2): 226-229(in Chinese).
- [12] 王静文, 王伟. 玄武岩纤维增强泡沫混凝土响应面多目标优化[J]. 材料导报, 2019, 33(24): 4092-4097.
WANG Jingwen, WANG Wei. Response surface based multi-objective optimization of basalt fiber reinforced foamed concrete[J]. Materials Reports, 2019, 33(24): 4092-4097(in Chinese).
- [13] 杨瑞环, 霍冀川, 赵星. 玄武岩纤维掺量对泡沫混凝土性能的影响[J]. 西南科技大学学报, 2014, 29(2): 29-32, 65.
YANG Ruihuan, HUO Jichuan, ZHAO Xing. The effect of basalt fibre dosage on the properties of foam concrete[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2014, 29(2): 29-32, 65(in Chinese).
- [14] 范然森, 程新, 詹炳根. 玄武岩纤维泡沫混凝土性能研究及抗裂评价[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020, 43(9): 1223-1228.
FAN Ransen, CHENG Xin, ZHAN Binggen. Performance study and crack resistance evaluation of basalt fibre foam concrete[J]. Journal of Hefei University of Technology

- (Natural Science), 2020, 43(9): 1223-1228(in Chinese).
- [15] 江旋, 季韬, 徐维, 等. 聚丙烯纤维掺量对碱矿渣泡沫混凝土砌块性能影响的研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(4): 95-98, 114. JIANG Xuan, JI Tao, XU Wei, et al. Effect of polypropylene fibre content on behavior of alkali-activated slag foamed concrete block[J]. New Building Materials, 2021, 48(4): 95-98, 114(in Chinese).
- [16] 杨小芳, 于水军, 高岩, 等. 泡沫混凝土和混凝土耐火极限的比较研究[J]. 火灾科学, 2012, 21(2): 78-83. YANG Xiaofang, YU Shuijun, GAO Yan, et al. Comparison of the fire resistance limits of foamed concrete and concrete[J]. Fire Safety Science, 2012, 21(2): 78-83(in Chinese).
- [17] 周宏元, 于鸿鑫, 王小娟, 等. 玄武岩纤维平纹织物约束建筑固体废弃物颗粒力学性能及吸能特性[J]. 复合材料学报, 2022, 39(2): 695-706. ZHOU Hongyuan, YU Hongxin, WANG Xiaojuan, et al. Mechanical properties and energy absorption characteristics of basalt fiber plain woven fabric constrained building solid waste particles[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(2): 695-706(in Chinese).
- [18] 刘霞, 李峰, 余殷鹏. 玄武岩纤维增强聚合物筋增强珊瑚礁砂混凝土柱轴压试验[J]. 复合材料学报, 2020, 37(10): 2428-2438. LIU Xia, LI Feng, SHE Yinpeng. Axial compression test of basalt fiber reinforced polymer reinforced coral reef and sand aggregate concrete column[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(10): 2428-2438(in Chinese).
- [19] LI H N, LIU P F, LI C, et al. Experimental research on dynamic mechanical properties of metal tailings porous concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 213: 20-31.
- [20] 高淑玲, 王文昌. 应变硬化水泥基复合材料性能与应用研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(21): 3620-3629. GAO Shuling, WANG Wenchang. A review on performance and application of strain hardening cementitious composites[J]. Materials Reports, 2019, 33(21): 3620-3629(in Chinese).
- [21] 董志芳, 邓明科, 张聪. 纤维织物增强高延性混凝土单轴拉伸性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(10): 13-25. DONG Zhifang, DENG Mingke, ZHANG Cong. Experimental investigation on uniaxial tension behavior of textile-reinforced highly ductile concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(10): 13-25(in Chinese).
- [22] 罗洪林, 杨鼎宜, 周兴宇, 等. 不同长径比聚丙烯纤维增强混凝土的力学特性[J]. 复合材料学报, 2019, 36(8): 1935-1948. LUO Honglin, YANG Dingyi, ZHOU Xingyu, et al. Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete with different aspect ratios[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(8): 1935-1948(in Chinese).
- [23] 周浩, 贾彬, 黄辉. 玄武岩纤维混凝土受拉性能试验研究与分析[J]. 建筑结构, 2020, 50(24): 104-109. ZHOU Hao, JIA Bin, HUANG Hui. Experimental study and analysis on tensile performance of basalt fiber concrete[J]. Building Structure, 2020, 50(24): 104-109(in Chinese).
- [24] MILTZ J, GRUENBAUM G. Evaluation of cushioning properties of plastic foams from compressive measurements[J]. Polymer Engineering & Science, 1981, 21(15): 1010-1014.
- [25] TAN P J, HARRIGAN J J, REID S R. Inertia effects in uniaxial dynamic compression of a closed cell aluminium alloy foam[J]. Materials Science and Technology, 2002, 18(5): 480-488.
- [26] 张文武, 张丹, 王珊珊, 等. 吸能材料缓冲性能评价方法综述[J]. 包装工程, 2022, 43(5): 143-151. ZHANG Wenwu, ZHANG Dan, WANG Shanshan, et al. Review of evaluation methods of cushioning performance of energy absorbing materials[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(5): 143-151(in Chinese).
- [27] BATOOL F, BINDIGANAVILE V. Microstructural parameters of fiber reinforced cement-based foam and influence on compressive and thermal properties[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 31: 101320.
- [28] 陈峰宾, 许斌, 焦华喆, 等. 玄武岩纤维混凝土纤维分布及孔隙结构表征[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(2): 273-280. CHEN Fengbin, XU Bin, JIAO Huazhe, et al. Fiber distribution and pore structure characterization of basalt fiber reinforced concrete[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(2): 273-280(in Chinese).