

基于数字图像方法的混掺纤维应变硬化水泥基复合 材料力学性能及变形特征

郭伟娜, 鲍玖文, 张 鹏, 孙燕群, 马衍轩, 赵铁军

(青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033)

摘 要: 为揭示混掺纤维对应变硬化水泥基复合材料力学性能和变形行为的影响规律, 研究了玄武岩-聚乙烯醇(PVA)纤维应变硬化水泥基复合材料的抗拉、抗压性能及压应变演化特征。设计了纤维掺量为材料体积分数的 2%, 玄武岩纤维和 PVA 纤维掺量比分别为 3:1、1:1 和 1:3, 同时控制粉煤灰与水泥掺量的比值(FA/C)分别为 1.2、1.5 和 2.0。对不同粉煤灰掺量的混掺纤维应变硬化水泥基复合材料进行直接拉伸和抗压实验, 利用数字图像相关技术(DIC)对试样压缩过程中的水平、竖向应变演化及裂缝开展进行了分析。结果表明: 混掺纤维试样的抗压强度要明显高于单掺纤维试样的抗压强度, 表明混掺纤维能够有效改善材料的抗压强度; 在 FA/C(粉煤灰与水泥掺量的比值)为 1.2 和 1.5 时, 最佳纤维类型为 B0.5P1.5(玄武岩纤维体积分数 0.5%, PVA 纤维体积分数 1.5%), FA/C 为 2.0 时, 最佳纤维类型为 B1P1, 即粉煤灰掺量不同, 材料最佳纤维类型也不同, 表明粉煤灰掺量影响最佳纤维类型; 在混掺纤维试样中, 玄武岩纤维主要起提高材料强度的作用, 但其对材料的延性发展不利, 而 PVA 纤维的掺入能够有效改善材料的延性, 混掺纤维使材料的力学性能更加优越; 同时 DIC 技术可以有效表征材料应变演化及裂缝形成和扩展过程, 为研究受力过程中材料损伤和裂缝演化提供一种有效手段。

关键词: 粉煤灰; 玄武岩纤维; 应变硬化水泥基复合材料; 抗压强度; 数字图像相关; 应变演化

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)05-1401-09

网络出版时间: 2022-03-29



Mechanical Properties and Deformation Characteristics of Hybrid Fiber Strain Hardening Cementitious Composites Based on Digital Image Method

GUO Weina, BAO Jiuwen, ZHANG Peng, SUN Yanqun, MA Yanxuan, ZHAO Tiejun

(Department of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, China)

Abstract: To reveal the law of influence of hybrid fibers on the mechanical properties and deformation behavior of strain hardening cementitious composites (SHCC), the tensile and compressive properties of basalt-polyvinyl alcohol(PVA) fiber strain hardening cementitious composites (SHCC) were investigated at a constant fiber content of 2% (in volume fraction), different content ratios of basalt fiber and PVA fiber (*i.e.*, 3:1, 1:1 and 1:3), and different ratios of fly ash to cement (FA/C) (*i.e.*, 1.2, 1.5 and 2.0). The direct tensile and compressive strengths of hybrid fiber SHCC with different fly ash contents were analyzed. The horizontal and vertical strain evolution and crack development of the sample during compression were discussed *via* digital image correlation (DIC). The results show that the compressive strength of the mixed fiber specimens is greater than that of the single fiber specimens, indicating that the hybrid fiber can effectively improve the compressive strength. At FA/C ratios of 1.2 and 1.5, the optimal fiber type is B0.5P1.5 (*i.e.*, the volume fraction of basalt fiber is 0.5% and PVA fiber is 1.5%). At a FA/C ratio of 2.0, the optimal fiber type is B1P1. The optimal fiber type is different for different fly ash admixtures, indicating that the fly ash admixture affects the optimal fiber type. In the hybrid fiber specimens, basalt fibers mainly play a role in improving the strength, but it is not suitable for the ductility of the material. In contrast, incorporating PVA fibers can effectively enhance the material's ductility, the addition of hybrid fibers can enhance the

收稿日期: 2021-07-06。 修订日期: 2021-10-31。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51922052); 国家重点研发计划项目(2021YFB2600704); 山东省杰出青年基金(ZR2021JQ17)。

第一作者: 郭伟娜(1992—), 女, 博士研究生。

通信作者: 张 鹏(1981—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2021-07-06. Revised date: 2021-10-31.

First author: GUO Weina (1992—), female, Doctoral candidate.

E-mail: guoweina711@163.com

Correspondent author: ZHANG Peng (1981—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: peng.zhang@qut.edu.cn

mechanical properties. The DIC can effectively characterize the strain evolution and crack formation and propagation process of the material, thus providing an effective method for investigating the material damage and crack evolution in the loading process.

Keywords: fly ash; basalt fiber; strain-hardening cementitious composites; compressive strength; digital image correlation; strain evolution

应变硬化水泥基复合材料(SHCC)是由Li等在断裂力学和微观力学的基础上设计具有应变硬化和多缝开裂特征的水泥基复合材料^[1-2]。多缝开裂特征归因于随机、均匀分布的纤维。纤维在水泥基复合材料中的作用主要是阻裂、增强和增韧^[3]。目前,常用于制备SHCC的纤维有聚乙烯醇(PVA)纤维、聚乙烯(PE)纤维、钢纤维、芳纶纤维和涤纶树脂(PET)纤维等^[4-6],其中日产可乐丽PVA纤维运用最多,但由于日产PVA纤维价格昂贵,因此相关研究学者尝试利用其他纤维替代PVA纤维制备SHCC,从而降低材料成本。玄武岩纤维作为一种环保且具有优异性能的纤维,广泛运用在混凝土中,相关研究^[7-9]表明玄武岩纤维(BF)可以提高混凝土的抗拉、抗压、抗冲击等力学性能,同时其也具有增韧、提高材料耐久性等优点。

相关研究表明纤维类型和胶凝材料组成对SHCC力学性能和变形性能均具有明显影响,其中由于玄武岩纤维具有良好的力学性能,因此,近几年来玄武岩纤维逐渐运用在水泥基复合材料中,用于改善材料的力学性能,其中,Zhang等^[10]对掺加玄武岩纤维的SHCC在高温条件下抗冲击性能进行研究,结果表明:在恒应变率加载下,BF-SHCC的动态抗压强度和耗能能力呈现增加趋势;为了降低SHCC材料成本和改善材料的力学性能,在材料中混掺纤维是一种较好的解决方法。与单掺纤维的SHCC相比,在SHCC中掺加2种或多种纤维能够为SHCC的设计提供更多的可能和选择,同时混掺纤维能够改善单掺纤维增强水泥基复合材料的不足,故许多学者对混掺纤维SHCC的力学性能进行研究。张聪等^[11]和于海洋等^[12]研究了纤维种类和掺量对混掺纤维应变硬化水泥基复合材料弯曲性能的影响,研究得到混掺纤维SHCC依然具有弯曲应变硬化行为,同时具有良好的延性;Zhang等^[13]对混掺玄武岩纤维和钢纤维SHCC的动态力学性能进行研究,得到在SHCC中混掺玄武岩纤维和钢纤维使材料的应变率敏感性明显增加;后来,其对掺加玄武岩纤维的SHCC的基本力学性能进行研究,结果表明玄武岩纤维对SHCC的静态拉、压强度均有提高^[14]。同时为了改善SHCC材料变形性能,相关学者通过改变SHCC胶凝材料组成改善材料的多缝开裂和应变硬化特征。Wang等^[15]对大掺

量粉煤灰SHCC力学性能进行研究,研究得到粉煤灰能够减小纤维/基质界面的黏结,从而改善材料延性;Zhang等^[16]和Ammasi等^[17]的研究也表明粉煤灰掺量增加能够有效改善SHCC的变形性能,但对材料强度发展不利。上述研究表明,耐碱性玄武岩纤维和粉煤灰掺量对SHCC力学性能和变形性能具有明显影响^[18]。

为了得到混掺纤维和粉煤灰掺量变化对SHCC力学性能和变形性能的影响,本工作利用直接拉伸实验、抗压实验对单掺PVA纤维、玄武岩纤维及混掺2种纤维和不同粉煤灰掺量的SHCC力学性能开展实验研究,讨论纤维类型、玄武岩纤维等体积替代PVA纤维和粉煤灰掺量对SHCC拉伸性能、抗压性能和压缩破坏形态的影响,并利用数字图像相关技术(DIC)分析不同SHCC试样在压缩加载过程中的变形,获得其在外力作用下材料变形场演化及裂缝产生与扩展过程。

1 实验

1.1 配合比

所用材料有P·O 42.5级普通硅酸盐水泥(青岛山水水泥有限公司)、I级粉煤灰(南京电厂)、石英砂(成都泰峰雪科技有限公司)、PVA/玄武岩纤维、水和高效减水剂(SP-江苏苏博特新材料股份有限公司)。PVA(日本可乐丽公司)和玄武岩纤维(吉林通鑫玄武岩科技公司)具体性能参数见表1,纤维掺量为材料体积分数的2%。为了研究不同粉煤灰掺量和不同玄武岩纤维(B)等体积分数替代PVA纤维(P)后SHCC的力学性能,采用的粉煤灰与水泥掺量的比值(FA/C)分别为1.2、1.5和2.0,并将其分别命名为FA1.2、FA1.5和FA2.0,而玄武岩纤维分别替代PVA纤维等体积分数的0.5%、1.0%、1.5%和2.0%,并分别将其命名为B0.5P1.5(玄武岩纤维体积分数为0.5%,PVA纤维体积分数为1.5%),B1P1,B1.5P0.5和B2,具体配合比见表2。

将混合物在砂浆搅拌机搅拌完成后,分别注入哑铃型和70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm的模具中,对试块进行振捣密实。室温24 h后拆模,放置在标准养护室内[温度为(20±2)℃,相对湿度≥95%],养护28 d后进行相关力学实验。

表 1 聚乙烯醇(PVA)和玄武岩纤维性能参数

Table 1 Physical properties of polyvinyl alcohol (PVA) and basalt fiber

Type	Diameter/ μm	Length/mm	Tensile strength/MPa	Elongation/%	Elastic modulus/GPa	Density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
PVA fiber	40	12	1 560	6.50	41.0	1 300
Basalt fiber	15	12	2 890	2.99	88.6	2 660

表 2 应变硬化水泥基复合材料(SHCC)配合比

Table 2 Mix proportions of strain hardening cementitious composites (SHCC)

Sample No.	Mix proportion/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)				Volume fraction $\varphi/\%$		
	Cement	Fly ash (FA)	Silica sand	Water	Superplasticizer (SP)	PVA fiber	Basalt fiber (BF)
FA1.2-B0.5P1.5-SHCC	550	650	550	301	6.0	1.5	0.5
FA1.2-B1P1-SHCC	550	650	550	301	6.5	1.0	1.0
FA1.2-B1.5P0.5-SHCC	550	650	550	301	7.0	0.5	1.5
FA1.2-B2-SHCC	550	650	550	301	7.5		2.0
FA1.5-B0.5P1.5-SHCC	480	720	550	301	5.0	1.5	0.5
FA1.5-B1P1-SHCC	480	720	550	301	5.5	1.0	1.0
FA1.5-B1.5P0.5-SHCC	480	720	550	301	6.0	0.5	1.5
FA1.5-B2-SHCC	480	720	550	301	6.5		2.0
FA2.0-B0.5P1.5-SHCC	400	800	550	301	3.8	1.5	0.5
FA2.0-B1P1-SHCC	400	800	550	301	4.2	1.0	1.0
FA2.0-B1.5P0.5-SHCC	400	800	550	301	5.0	0.5	1.5
FA2.0-B2-SHCC	400	800	550	301	5.8		2.0

1.2 方法

1.2.1 直接拉伸实验 根据 JSCE 规范^[19], 利用哑铃型试样进行单轴拉伸实验。每一种配合比至少制备 3 个哑铃型试样, 通过日本岛津生产的万能试验机(AG-IS 250kN)上进行力学实验, 以位移控制形式进行加载, 加载率为 0.1 mm/min, 同时在试样标距两侧放置高精度线性位移传感器实时监测试样变形。

1.2.2 抗压实验 对养护 28 d 的 70.7 mm 的立方体进行抗压实验, 采用量程为 300 kN 抗折-抗压全自动试验机(江苏无锡埃米诺试验机有限公司, DYE-300), 以荷载控制形式进行加载, 加载率为 0.5 MPa/s^[20], 实验的每组相同配比包含 3 个试块。以相同配比的纯浆体为对照组进行相应的抗压实验。

1.2.3 数字图像相关技术测量 利用数字图像相关技术(DIC)对试块压缩过程中的表面位移和应变进行分析。DIC 分析的基本原理是匹配试样表面散斑, 通过计算获得试样表面散斑的运动轨迹, 得到外力作用下物体表面散斑点的位移和应变变化情况^[21-22]。压缩实验前, 选取较平整的试块表面, 通过黑白哑光漆对试样观测面喷射均匀、随机分布的黑白散斑^[23-24]。利用工业相机对试样压缩过程进行记录拍摄, 工业相机镜头与试样的观察面垂直。工

业相机拍摄与压缩实验同步进行, 可得到试块不同抗压强度时对应的表面位移形变过程, 最后利用分析软件计算单轴压缩过程中试件变形场的演化过程。

1.2.4 微观观测 为了观测试样压缩失效后试样内部微结构的变化, 利用扫描电子显微镜(SEM, 日本 Hitachi Regulus 8100)对压缩失效后的试样进行观测分析, 主要观测试样开裂面位置处的纤维分布、纤维表面形态和断裂形式、基质缺陷等。从试样 B1P1 和试样 B1.5P0.5-FA1.2-SHCC 压缩失效试样切取包含裂缝的块体样本, 该样本包含试样失效时产生的裂缝, 然后利用 SEM 对样本进行观测。

2 结果与讨论

2.1 直接拉伸应力-应变

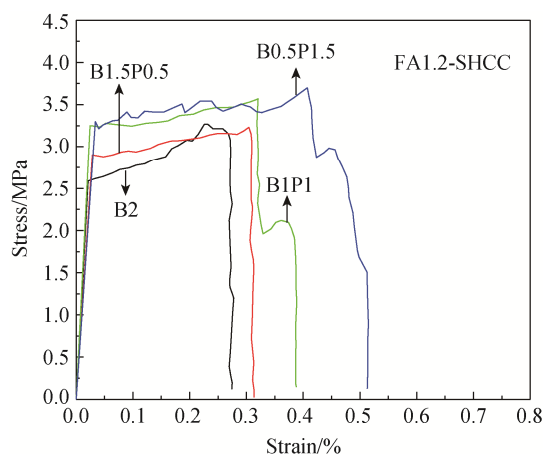
图 1 为 FA1.2-SHCC 混掺纤维试样拉伸应力-应变曲线(图 1a)及全部试样初裂强度(图 1b)和峰值强度(图 1c)。从图 1a 可见, 试样 FA1.2-SHCC 均表现出明显的应变硬化行为, 其中单掺 PVA 纤维试样 FA1.2-SHCC 拉伸应力-应变曲线参见文献[25]。随着玄武岩纤维的增加, 试样 FA1.2-SHCC 的失效应变逐渐降低, 且试样失效应变均在 0.27% 以上。同时从图 1a 可见, 纤维掺量不同, 试样峰值应力后曲线下降形式不同; 当玄武岩纤维掺量为 1.5% 和 2.0%

时, 峰值应力后曲线近似垂直下降, 表明试样发生脆性断裂, 这与文献[26–28]得到的曲线形式不同; 而当玄武岩纤维掺量为 1.0% 和 0.5% 时, 峰值应力后曲线以曲线形式下降, 这主要是由于玄武岩纤维长径比(800)明显大于 PVA 纤维(300), 使得裂缝面处大多数玄武岩纤维发生断裂失效, 进而造成试样

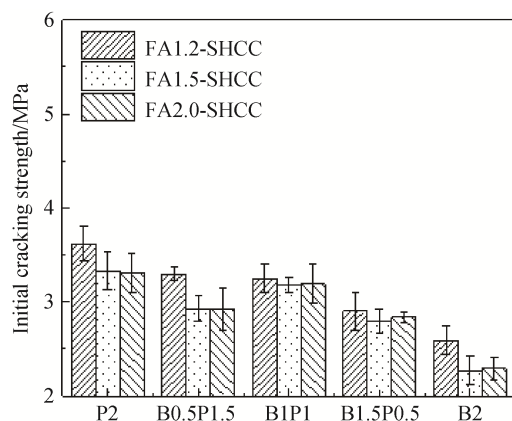
发生脆性断裂, 而随着 PVA 纤维掺量的增加, 裂缝面处 PVA 纤维发生拔出失效, 使得试样应力下降段以曲线形式下降; 同时与玄武岩纤维相比, PVA 纤维弹性模量低, 其伸长率约为玄武岩纤维的 2.174 倍, 因此玄武岩纤维在混掺纤维试样开裂后发生拔断, 而 PVA 纤维发生拔出且仍能够桥联裂缝, 进而有效控制裂缝宽度, 所以增加 PVA 纤维掺量, 可以有效提高材料延性。从图 1b~图 1c 可见, PVA-SHCC 的初裂强度和峰值强度要明显高于掺加其他纤维的试样; 同时在相同纤维类型下, 试样的初裂强度和峰值强度随着粉煤灰掺量的增加而逐渐降低, 分析原因可能是由于只有少量粉煤灰在早期参与材料内部的水化反应, 而大部分粉煤灰仅起填充作用, 因此材料早期强度主要与水泥水化产生的水化产物有关, 但当胶凝材料质量相同时, 粉煤灰掺量的增加导致水泥掺量降低, 从而造成材料水灰比增大, 进而导致材料强度降低。但当纤维类型为 B1P1, 试样 B1.5P0.5 时, 随着粉煤灰掺量的增加, 材料的初裂强度和峰值强度变化较小, 表明混掺纤维对粉煤灰对材料强度的降低作用可能存在一定影响。

2.2 抗压强度

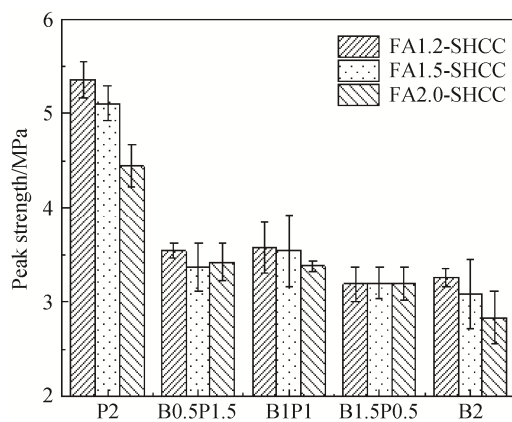
2.2.1 纤维类型对抗压强度的影响 不同纤维类型和粉煤灰掺量下 SHCC 单轴抗压强度实验结果如图 2 所示。从图 2 可见, 除试样 B2-SHCC 外, 其他所有掺加纤维试件的抗压强度均高于普通砂浆抗压强度; 同时当粉煤灰与水泥的比值为 1.2 时, 掺加纤维对抗压强度提高最为明显。当纤维类型为 B0.5P1.5 时, 其抗压强度要明显的高于其他试件, 表明混掺纤维能够有效改善材料抗压强度; 当玄武岩纤维掺量超过 0.5% 时, 抗压强度开始降低, 但其强度仍然高于单掺 PVA 纤维, 因此当材料中玄武岩



(a) Stress-strain curves of hybrid fiber specimens



(b) Initial cracking strength



(c) Peak strength

图 1 不同粉煤灰掺量和纤维类型的 SHCC 拉伸性能

Fig. 1 Tensile properties of different SHCCs with different fly ash contents and fiber types

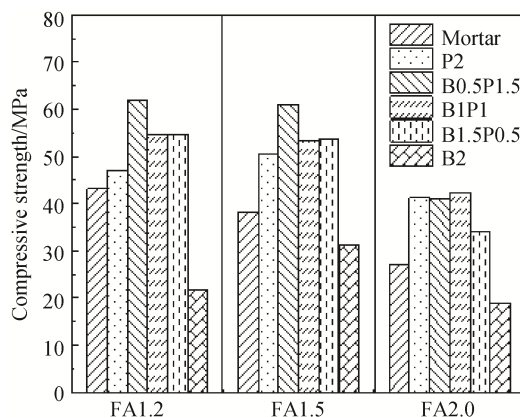


图 2 不同纤维类型对 SHCC 抗压强度的影响

Fig. 2 Effect of different fiber types on the compressive strength of SHCC

纤维体积分数小于 1.5% 时, 混掺纤维能够有效提高材料的抗压强度。另外, 混掺纤维试件的抗压强度高于单掺 PVA 纤维或玄武岩纤维的抗压强度, 表明 2 种纤维混掺能够有效改善单掺纤维增强体系的不足。

2.2.2 粉煤灰掺量对抗压强度的影响 通过单轴压缩实验得到不同粉煤灰掺量下混掺纤维 SHCC 抗压强度, 实验结果如图 3 所示。从图 3 可见, 随着粉煤灰掺量的增加, 砂浆试样和混掺纤维试样的抗压强度逐渐降低, 而单掺 PVA 纤维或玄武岩纤维试样的抗压强度先增加后降低, 即单掺纤维时, 试样的最佳粉煤灰掺量是其为水泥掺量的 1.5 倍, 而混掺纤维时其最佳粉煤灰掺量是其为水泥掺量的 1.2 倍。当纤维类型为 B0.5P1.5 时, 试样 FA1.2-SHCC、试样 FA1.5-SHCC 和试样 FA2.0-SHCC 的抗压强度分别为 62.03、61.10 MPa 和 40.89 MPa, 分别为单掺 PVA 纤维试样抗压强度的 1.317 倍(试样 FA1.2-SHCC)、1.21 倍(试样 FA1.5-SHCC)和 0.989 倍(试样 FA2.0-SHCC), 为单掺玄武岩纤维试样抗压强度的 2.834 倍(试样 FA1.2-SHCC)、1.958 倍(试样 FA1.5-SHCC)和 2.149 倍(试样 FA2.0-SHCC), 表明混掺纤

维能够充分发挥不同纤维的优势, 从而有效改善材料的抗压强度。同时通过对比不同粉煤灰掺量下 B0.5P1.5-SHCC 试样的抗压强度, 得到随着粉煤灰掺量的增加, 材料的抗压强度降低, 表明粉煤灰对材料早期抗压强度的发展不利, 但粉煤灰掺量的增加有利于纤维拔出, 进而有利于材料延性的增加。在所有纤维类型中, 试样 FA1.5-SHCC 的抗压强度与试样 FA1.2-SHCC 的抗压强度差异较小, 而试样 FA2.0-SHCC 抗压强度与试样 FA1.2-SHCC 和试样 FA1.5-SHCC 的抗压强度之间的差值较大, 因此在保证一定抗压强度的情况下, 当粉煤灰掺量与水泥掺量的比值不超过 1.5 时, 可以忽略粉煤灰掺量变化对 SHCC 材料抗压强度的影响, 而仅考虑纤维类型对 SHCC 材料抗压强度的影响; 但当粉煤灰掺量与水泥掺量的比值超过 1.5 时, 粉煤灰掺量对材料抗压强度影响较大, 在设计材料配合比时, 不仅要考虑混掺纤维类型对抗压强度的影响, 而且还要考虑粉煤灰掺量对抗压强度的影响; 但粉煤灰掺量较多时, 其对材料早期强度具有降低作用, 而在长龄期下, 由于大量粉煤灰发生二次水化, 进而有利于材料强度发展。

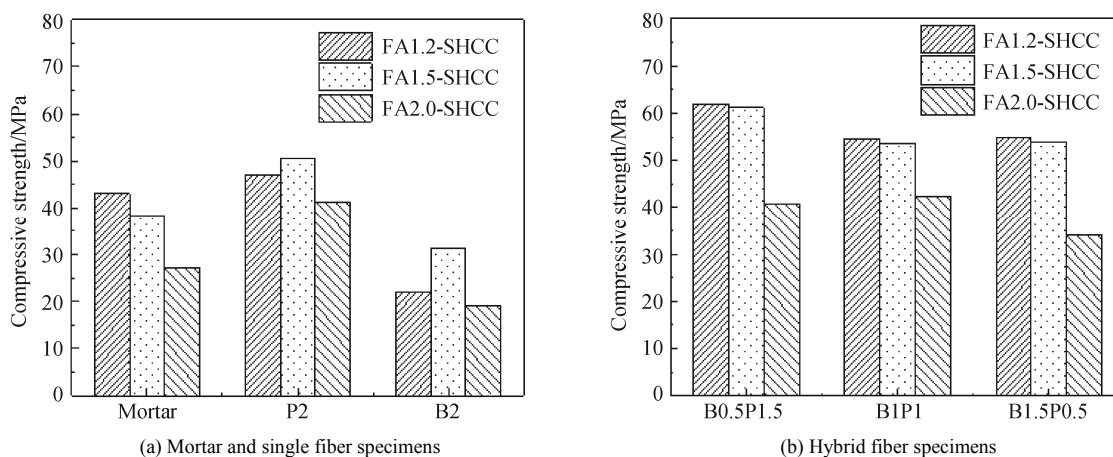


图 3 不同粉煤灰掺量下 SHCC 的抗压强度
Fig. 3 Compressive strength of SHCC with different fly ash contents

2.3 压缩试样变形场演化及破坏形态

为表征不同纤维类型对变形场演化的影响, 选择 FA1.2-SHCC 中纤维类型 B0.5P1.5、B1P1、B1.5P0.5 和 B2 试样在不同荷载下的应变云图进行对比分析。

2.3.1 水平应变 ϵ_x 云图 图 4 为混掺纤维和单掺玄武岩纤维的试样 FA1.2-SHCC 在单轴压缩过程中水平应变演化过程。从试样 B0.5P1.5-FA1.2-SHCC 可以观察到, 在荷载较小时, 试样上端面为压应变,

而下端面为拉应变; 随着荷载的继续增加, 蓝绿色区域逐渐扩展, 而橙色区域较为集中并形成应变集中区域; 当荷载增加至 200 kN 时, 应变集中区域迅速扩展, 表明试件内部出现失稳。在试样失效时, 试样上下端面均出现应变集中区域, 而在下端面应变集中区域存在一定的联系, 且应变集中区域之间的间距大致在 20 mm 以内。上述现象在试样 B1.5P0.5-FA1.2-SHCC 和试样 B2-FA1.2-SHCC 中也可观察到, 但在试样 B1P1-FA1.2-SHCC 中, 其应变

变化明显与其他试样不同,在加载过程中,试样大部分区域为橙黄色,少许区域为紫色,并且随着荷载的增加,试样表面橙、黄色区域减小,而绿色区域增加,同时在试样下端面区域形成应变集中区域,其在失效时可演化为宏观裂缝。对比不同纤维类型的试样可以看出,试样失效时试样表面都存在应变集中区域,同时应变集中区域从平行于加载方向的

区域逐渐演变为倾斜延伸的剪切式应变区域,此现象在试样 B1.5P0.5-FA1.2-SHCC 中最为明显,表明试样并不是突然发生破坏,而是在试样表面出现多条裂缝后发生延性破坏,表现出多缝开裂破坏,且试样表面裂缝宽度较小,这主要是由于在水泥基复合材料中掺加纤维能够有效控制裂缝宽度,降低材料发生脆性破坏的可能。

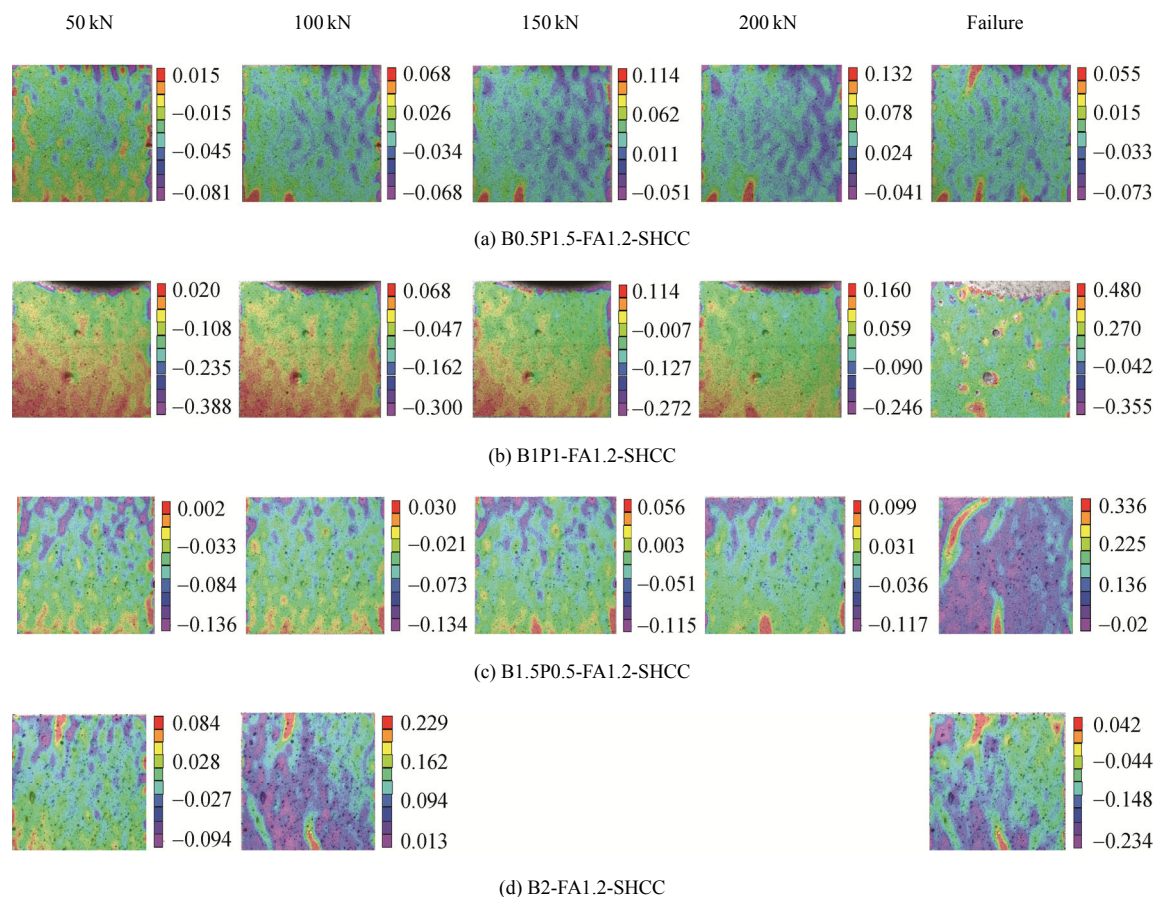


图 4 不同纤维掺杂的 FA1.2-SHCC 试样的水平向应变云图
Fig. 4 Horizontal strain clouds of FA1.2-SHCC specimens doped with different kinds of fibers

2.3.2 竖向应变 ε_y 云图 图 5 为在不同压缩加载下混掺纤维试样的竖向应变演化情况。从图 5 可见,试样应变最大值出现在试样的顶面和底面,并且随着荷载的增加试样的正应变最大值大体呈增加趋势。当荷载为 50 kN 时,所有试样表面应变并未出现明显的应变集中区域,而压缩最大应变主要出现在试样顶面,此时试样内部初始微裂缝和微缺陷处于闭合状态;随着荷载的增加,试样表面逐渐出现应变集中区域,同时试样压应变区域逐渐扩大,且试样的竖向应变明显大于其横向应变,表明试样此时处于压密状态,而竖向压应变逐渐从试样底面和顶面向其中部扩展。比较各试样失效时的应变区域,混掺纤维试样表面均出现多个横向应变集中区域,

而在试样 B1P1-FA1.2-SHCC 和试样 B1.5P0.5-FA1.2-SHCC 中横向应变集中区域逐渐延伸和扩展,形成贯穿型裂缝,因此根据橙黄色应变集中区域的变化可以得到裂缝的产生、扩展过程。而在单掺玄武岩纤维试样中,其失效时试样表面并未形成明显的应变集中带,表明试样失效时其表面并未出现明显裂缝。

对比不同试样的竖向应变演化过程,得到试样在压缩过程中竖向应变演化规律基本一致,大体为:试样顶面、底面出现峰值应变→峰值应变趋势逐渐向中部扩展→出现应变集中区域→应变集中区域逐渐扩展应变集中带→水平裂纹区域形成→试样失效。

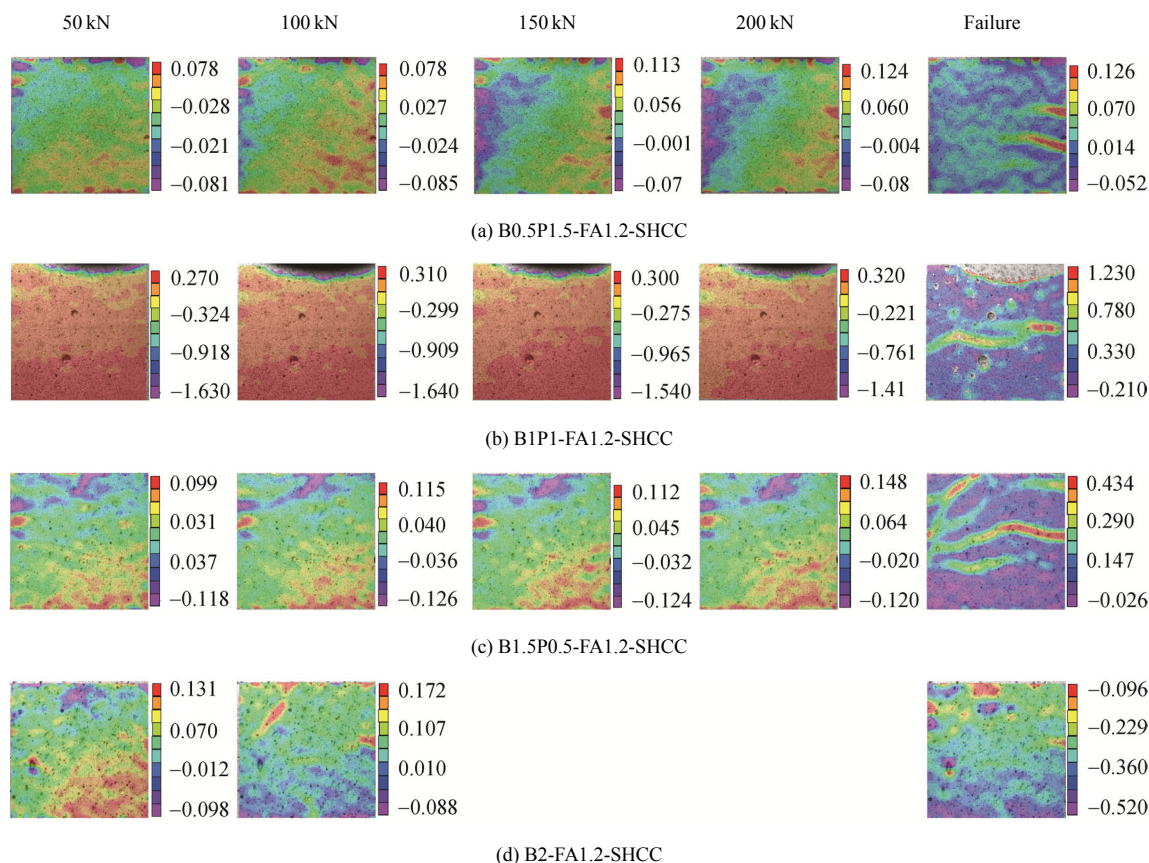


图 5 不同纤维掺杂的试样 FA1.2-SHCC 的竖向应变云图

Fig. 5 Vertical strain clouds of FA1.2-SHCC specimens doped with different kinds of fibers

2.3.3 单轴压缩破坏形态 为了比较不同纤维类型 SHCC 试样的失效形式, 图 6 为 FA1.2-SHCC 试样的失效形态。单掺 PVA 纤维试样失效时表面未出现明显开裂, 试样仍保持为一个整体; 而在试样中掺加玄武岩纤维后, 试样失效时表面出现细小裂缝; 同时随着玄武岩纤维掺量的增加, 试样失效时其表面裂缝数目逐渐增多, 其中当玄武岩纤维等体积分数替换 1.5%PVA 纤维时, 试样表面不但出现多条裂缝, 而且试样表面出现部分剥落; 而当玄武岩纤维完全替代 PVA 纤维时, 试样失效时出现多条裂缝且试样表面存在大面积剥落。根据试样不同失效形式可知, 随着玄武岩纤维的掺加, 试样延性破坏能力逐渐降低, 故掺加适量的玄武岩纤维能够改善材料的抗压强度, 但对试样保持其延性不利; 而 PVA 纤维在试样中大多

起桥接作用, 对材料强度改善效果不明显, 但可明显改善材料延性, 使材料发生延性破坏。对比 FA1.2-SHCC 试样应变云图和试样破坏形态可知, 随着荷载的增加, 图 4 和图 5 中试样表面应变集中区域逐渐扩展, 进而演化为试样表面的宏观裂缝(图 6)。

综上所述, 在 SHCC 中掺加 PVA 纤维能够有效的改善材料的延性, 而掺加高强高模量的玄武岩纤维能够较好改善材料强度, 但对材料延性发展不利。因此日后设计材料配合比时, 应根据所掺纤维的性能, 严格控制不同纤维类型的掺量。同时, 利用应变演化云图能够有效表征荷载变化过程中试样不同区域变形和破坏规律, 并且能够实时监测压缩过程中裂缝产生和扩展信息, 进而表征试样在不同荷载和破坏形态下的裂缝特征。

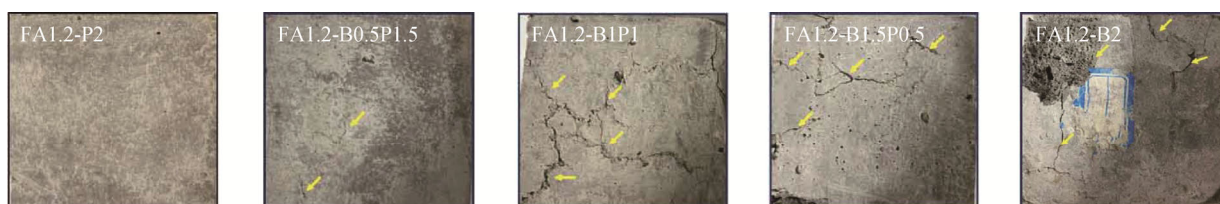


图 6 FA1.2-SHCC 试样压缩失效形态

Fig. 6 FA1.2-SHCC specimens compression failure patterns

2.4 微观结构

从混掺纤维 FA1.2-SHCC 压缩失效后试样切取包含裂缝的块状试样, 利用 SEM 对块体试样的开裂面进行微观观测, 观察基质、骨料、玄武岩纤维和 PVA 纤维表面和纤维失效形式, 观测结果如图 7 所示。由图 7 可见, 玄武岩纤维和 PVA 纤维在基质内随机、均匀分布。在荷载作用下, 由于纤维与基质之间的黏结力超过纤维的极限拉伸强度, 进而使大部分纤维发生断裂, 只有少数纤维被拔出, 同时在纤维表面附着部

分基质, 而 PVA 纤维表面伴有明显划痕, 从而增加了 PVA 纤维发生断裂的可能, 进而导致试样延性的降低, PVA 纤维出现轻微的颈缩, 表明纤维被拔出; 同时图中 PVA 纤维端部凹凸不平, 表明试样开裂时纤维被拔断, 发生断裂失效。PVA 纤维表面出现少许纤维屑, 这主要是由于纤维在拔出过程中所受摩擦力较大所致; 而玄武岩纤维裸露在外, 同时纤维端部较为平整且表面较为光滑以及未出现明显的颈缩现象, 这主要是由于玄武岩纤维拉伸强度较大造成的。

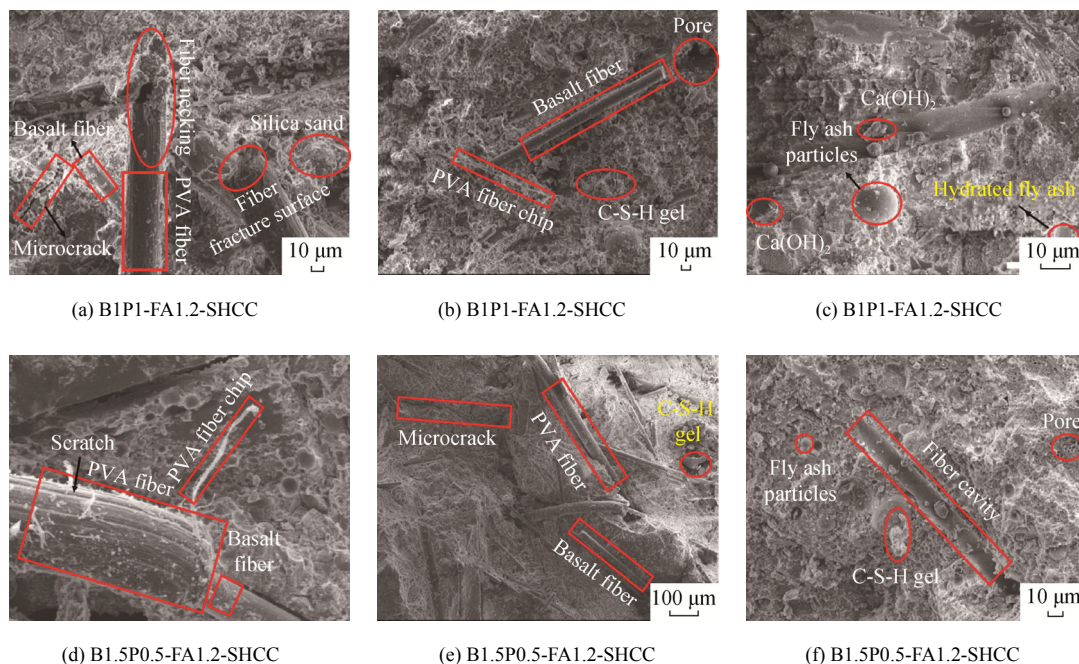


图 7 FA1.2-SHCC 试样的微观结构
Fig. 7 Microstructures of FA1.2-SHCC specimens

3 结论

1) 比较不同试样的抗压强度可知, 在不同粉煤灰掺量下, SHCC 的最佳纤维类型不同, 其中 FA/C 为 1.2 和 1.5 时, 最佳纤维类型为 B0.5P1.5, 而当 FA/C 为 2.0 时, 其最佳纤维类型为 B1P1, 即粉煤灰掺量影响材料的最佳纤维类型。

2) 随着粉煤灰掺量的增加, 单掺纤维试样的抗压强度先增加后降低, 而混掺纤维试样的抗压强度逐渐降低, 但混掺纤维试样的抗压强度均高于单掺纤维试样的抗压强度, 表明混掺纤维能够有效改善材料的抗压强度, 同时粉煤灰掺量的增加对材料抗压强度的发展不利。

3) 掺加纤维使得试样在压缩过程中产生多条裂缝, 有效防止试样发生脆性破坏, 有利于改善材料的变形性能。

4) 在混掺纤维 SHCC(玄武岩纤维和 PVA 纤维) 中, PVA 纤维在 SHCC 中主要起桥接作用, 有效改善材料的延性, 但其对材料强度的改善作用不明显; 而玄武岩纤维的掺加对 PVA-SHCC 的抗压强度具有明显提高作用, 但其对试样延性发展不利, 因此在 SHCC 中混掺 2 种纤维, 可以使 2 种纤维充分发挥其性能, 进而改善材料的强度和变形性能。

参考文献:

- [1] LI V C, LEUNG C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites[J]. J Eng Mech, 1992, 118(11): 2246–2264.
- [2] MAALEJ M, LI V C. Flexural/tensile-strength ratio in engineered cementitious composites[J]. J Mater Civ Eng, 1994, 6(4): 513–528.
- [3] LIU T N, YANG Y Z, CHEN Z T, et al. Optimization of fiber volume fraction to enhance reinforcing efficiency in hybrid fiber reinforced strain hardening cementitious composite[J]. Cem Concr Comp, 2020, 113: 103704.
- [4] IURIE C, MARCO L, VIKTOR M, et al. Tensile behavior of

- high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC) made with high-performance polyethylene, aramid and PBO fibers[J]. *Cem Concr Comp*, 2020, 113: 103704.
- [5] LIN X Y, YU J, LI H D, et al. Recycling polyethylene terephthalate wastes as short fibers in strain-hardening cementitious composites (SHCC)[J]. *J Hazard Mater*, 2018, 357: 40–52.
- [6] ZHANG Z G, ZHANG Q. Matrix tailoring of engineered cementitious composites (ECC) with non-oil-coated, low tensile strength PVA fiber[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 161: 420–431.
- [7] CUI S G, XU X F, YAN X J, et al. Experimental study on the interfacial bond between short cut basalt fiber bundles and cement matrix[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 256: 119353.
- [8] RALEGAONKAR R, GAVALI H, ASWATH P, et al. Application of chopped basalt fibers in reinforced mortar: A review[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 164: 589–602.
- [9] FIORE V, SCALICI T, BELLA G D, et al. A review on basalt fibre and its composites[J]. *Compos Part B-Eng*, 2015, 74: 74–94.
- [10] ZHANG N, XU M F, SONG S, et al. Impact resistance of basalt fiber strain-hardening cementitious composites exposed to elevated temperatures[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 262: 120081.
- [11] 张聪, 夏超凡, 袁振, 等. 混杂纤维增强应变硬化水泥基复合材料的弯曲性能预测[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(1): 14–22.
ZHANG Cong, XIA Chaofan, YUAN Zhen, et al. *J Build Mater(in Chinese)*, 2021, 24(1): 14–22.
- [12] 于海洋, 李地红, 代函函, 等. 混杂纤维增强应变硬化水泥基复合材料的弯曲性能研究[J]. *材料导报*, 2020, 34(Z1): 229–304.
YU Haiyang, LI Dihong, DAI Hanhan, et al. *Mater Rep(in Chinese)*, 2020, 34(Z1): 229–304.
- [13] ZHANG N, ZHOU J, MA G W. Dynamic properties of strain-hardening cementitious composite reinforced with basalt and steel fibers[J]. *Int J Concr Struct Mater*, 2020, 14(1): 44–58.
- [14] 张娜, 周健, 徐名凤, 等. 玄武岩纤维高延性水泥基复合材料的动态力学性能[J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(5): 1–9.
ZHANG Na, ZHOU Jian, XU Mingfeng, et al. *Expl Shock Wave(in Chinese)*, 2020, 40(5): 1–9.
- [15] WANG S, LI V C. Engineered cementitious composites with high-volume fly ash[J]. *ACI Mater J*, 2007, 104(3): 233–243.
- [16] ZHANG Z G, QIAN S Z, MA H. Investigating mechanical properties and self-healing behavior of micro-cracked ECC with different volume of fly ash[J]. *Constr Build Mater*, 2014, 52: 17–23.
- [17] AMMASI A K, RAGUL. Strength and durability of high-volume fly ash in engineered cementitious composites[J]. *Mater Today Proc*, 2018, 11(5): 24050–24058.
- [18] 张楚楚. 玄武岩纤维增强水泥基材料及其复合梁高性能化研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
ZHANG Chuchu. The study on high performance of the basalt fibers reinforced cement-based materials and its composite beams (in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2018.
- [19] JSCE-2008. Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC) [S]. Tokyo, 2008.
- [20] 混凝土物理力学性能试验方法标准. GBT 50081-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties. GBT 50081-2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [21] HU J H, SUN M Q, LI J, et al. Tensile characteristics of strain-hardening cement-based composites with different curing ages[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 221: 709–719.
- [22] 张朝阳, 孔祥明, 卢子臣. 用数字图像相关法研究聚合物改性砂浆的力学性能[J]. *硅酸盐学报*, 2018, 46(2): 187–192.
ZHANG Chaoyang, KONG Xiangming, LU Zichen. *J Chin Ceram Soc*, 2018, 46(2): 187–192.
- [23] LI Z, JIN Z Q, GAO Y, et al. Coupled application of innovative electromagnetic sensors and digital image correlation technique to monitor corrosion process of reinforced bars in concrete[J]. *Cem Concr Comp*, 2020, 113: 103730.
- [24] 李曙光, 陈改新, 纪国晋, 等. 基于数字图像处理技术的引气混凝土冻融损伤定量评价(英文)[J]. *硅酸盐学报*, 2014, 42(8): 951–959.
LI Shuguang, CHEN Gaixin, JIN Guojin, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2014, 42(8): 951–959.
- [25] 郭伟娜, 张鹏, 鲍玖文, 等. 粉煤灰掺量对应应变硬化水泥基复合材料力学性能及损伤特征的影响[J]. *建筑材料学报*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20210607.1628.008.html>.
GUO Weina, ZHANG Peng, BAO Jiuwen, et al. *J Build Mater (in Chinese)*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20210607.1628.008.html>.
- [26] WEIMANN M, LI V C. Hygral behavior of engineered cementitious composite (ECC)[J]. *Int J Restorat Build Monument* 2003, 9(5): 513–34.
- [27] GIDEON P A G V Z, VOLKER S, ROMILDO D T F, et al. Comparative testing of crack formation in strain-hardening cement-based composites (SHCC)[J]. *Mater Struct*, 2016, 49: 1175–1189.
- [28] YU J, YAO J, LIN X Y, et al. Tensile performance of sustainable strain-hardening cementitious composites with hybrid PVA and recycled PET fibers[J]. *Cem Concr Res*, 2018, 107: 110–123.