

文章编号:1007-9629(2022)05-0483-07

# 玄武岩纤维对活性粉末混凝土 受压破坏的影响

杨立云\*, 林长宇, 张 飞, 谢焕真, 汪自扬  
(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘要:**采用三维数字图像相关方法(3D-DIC)对不同玄武岩纤维(BF)体积分数的玄武岩纤维-活性粉末混凝土(BF-RPC)进行单轴压缩破坏过程观测,分析破坏过程中BF-RPC裂纹扩展过程、损伤规律和破坏模式.结果表明:BF-RPC破坏过程可分为原生裂纹闭合、弹性变形、裂纹稳定扩展和裂纹加速扩展4个阶段;BF-RPC的损伤在扩容应变前较小且增长平缓,在扩容应变后迅速增长,在峰值破坏时随BF体积分数的增大而增大;BF体积分数影响BF-RPC的破坏模式,未掺入BF的活性粉末混凝土破坏模式为拉伸破坏,BF体积分数为0.5%和1.0%时,BF-RPC破坏模式均为拉剪破坏,BF体积分数为1.5%时,BF-RPC破坏模式为剪切破坏.

**关键词:**数字图像相关法;玄武岩纤维;活性粉末混凝土;单轴压缩;损伤演化;破坏模式

中图分类号:TU528.572

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.05.007

## Effect of Basalt Fiber on Failure of Reactive Powder Concrete under Uniaxial Compression

YANG Liyun\*, LIN Changyu, ZHANG Fei, XIE Huanzhen, WANG Ziyang  
(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing),  
Beijing 100083, China)

**Abstract:** The uniaxial compression failure process of basalt fiber-reactive powder concrete (BF-RPC) with different volume fraction of basalt fiber (BF) was observed by three dimensional-digital image correlation (3D-DIC) method. The crack propagation process, damage law and failure mode of BF-RPC in the failure process were studied. The results show that the failure process of BF-RPC can be divided into four stages: crack closure, elastic region, crack stable growth and crack accelerated growth. The damage is small and grows steadily before the dilatancy strain, but increases rapidly after dilatancy strain, and increases with the increase of the volume fraction of BF at peak failure. The BF-RPC failure mode is affected by the volume fraction of BF. The failure mode of reactive powder concrete without BF is tensile failure. When the volume fraction of BF is 0.5% and 1.0%, the failure mode of BF-RPC is tension-shear failure. When the volume fraction of BF is 1.5%, the failure mode of BF-RPC is shear failure.

**Key words:** digital image correlation; basalt fiber; reactive powder concrete; uniaxial compression; damage evolution; failure mode

Richard 在 1993 年研发的活性粉末混凝土 (RPC) 具有高强度、高耐久性、高韧性等优点, 被广泛应用于隧道衬砌、超高层建筑、大跨度桥梁、水利

工程和军事防御工程<sup>[1-3]</sup>. 目前, 很多学者在 RPC 基本力学性能方面做了大量研究: Wang 等<sup>[4]</sup>研究了玄武岩纤维 (BF) 和聚丙烯混杂纤维 RPC 的力学性能, 结

收稿日期:2021-01-18; 修订日期:2021-03-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974316);旧桥检测与加固交通行业重点实验室(北京)开放课题资助(2020-JQKFKT-5)

第一作者(通讯作者):杨立云(1983—),男,河北邢台人,中国矿业大学(北京)教授,博士生导师,博士.E-mail:yangly@cumtb.edu.cn

果表明随着纤维掺量的增加, RPC立方体抗压强度略有增强; Chen等<sup>[5]</sup>研究发现纤维的掺入有助于提高RPC韧性、延性和抗弯性能; 安明喆等<sup>[6]</sup>发现钢纤维体积分数大于1.75%时, RPC静态抗压强度和峰值应变显著提高. 也有学者研究了不同养护制度和特殊工作环境对RPC基本力学性能的影响: Yazici等<sup>[7-8]</sup>研究发现, 与标准养护制度相比, 高温养护制度能够显著提高RPC单轴抗压强度和抗弯强度; Li等<sup>[9]</sup>研究发现玄武岩纤维-活性粉末混凝土(BF-RPC)具有较高的抗盐耐腐蚀性, BF对RPC抗冻融性能的改善效果显著; Raza等<sup>[10]</sup>研究发现体积分数为3.00%的钢-玻璃混杂纤维可以防止高温条件下RPC的爆炸性剥落.

国内外在静态加载过程中纤维掺量对混凝土破坏特征的影响方面研究较少. 本文借助三维数字图像相关方法(3D-DIC), 对不同BF体积分数的BF-RPC进行单轴静态压缩破坏过程研究, 分析BF体积分数 $\varphi_{BF}$ 对BF-RPC在静态受压破坏过程中的裂纹扩展过程、损伤和破坏形式的影响, 以期在实际

工程中RPC的应用设计提供参考.

## 1 试验

### 1.1 原材料

水泥(C)为北京金隅公司生产的P·O 42.5普通硅酸盐水泥; 硅粉(SF)为甘肃三远材料有限公司生产的RPC专用硅粉, 二氧化硅含量<sup>1)</sup>在90.0%以上, 平均粒径为0.10~0.30  $\mu\text{m}$ , 比表面积为25  $\text{m}^2/\text{g}$ ; 石英砂(QS)为巩义市蓝之润净水材料销售有限公司销售的石英砂, 二氧化硅含量为99.2%, 粒径为0.16~1.25 mm; BF为桐乡市蓝石复合材料有限公司生产的短切玄武岩纤维, 单丝直径为15  $\mu\text{m}$ , 长度为12 mm, 密度为2 580  $\text{kg}/\text{m}^3$ ; 减水剂(WR)为湖南中岩建材科技有限公司生产的聚羧酸高效减水剂, 减水效率为35%; 拌和水(W)为自来水.

### 1.2 配合比

为得到强度高、流动性较好的BF-RPC<sup>[11-12]</sup>, 设定其水胶比和胶砂比分别为0.20、0.61. BF-RPC的配合比见表1.

表1 BF-RPC的配合比  
Table 1 Mix proportions of BF-PRC

Specimen	Mix proportion/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )					$\varphi_{BF}/\%$
	C	SF	QS	WR	W	
S0	706.00	160.00	1 419.00	21.65	173.20	0
S0.5	706.00	160.00	1 407.00	21.65	173.20	0.5
S1.0	706.00	160.00	1 393.00	21.65	173.20	1.0
S1.5	706.00	160.00	1 378.00	21.65	173.20	1.5

### 1.3 试验方法

采用MTS电液伺服控制压力机, 加载速率为0.2  $\text{mm}/\text{min}$ . 为减小BF-RPC试件端面与加载台之间的摩擦阻力, 在 $\phi 50 \times 100$  mm的圆柱体试件两端涂抹适量的凡士林.

3D-DIC系统主要由2台CCD相机、2台LED灯和计算机组成. 试验前先调整相机支架的平整度及其与试件加载区的相对位置, 接着调整相机焦距以保证试件表面散斑的清晰度, 再利用校正板在试件加载区域内确定空间坐标. 调整好3D-DIC系统后, 要保持相机位置不变直到试验结束. 试验过程中调整LED灯亮度以及相机光圈大小, 保证拍摄可靠的灰度值图像, 相机采样频率为3 fps. 需要注意的是MTS加载系统与3D-DIC拍摄系统需要同时开始.

## 2 破坏过程及损伤分析

### 2.1 应力-应变曲线

体应变 $\epsilon_v$ 是轴向应变 $\epsilon_a$ 、横向应变 $\epsilon_t$ 和径向应变 $\epsilon_r$ 之和. 考虑BF-RPC试件是圆柱体以及加载方式为上下对称加载, 因此 $\epsilon_t$ 和 $\epsilon_r$ 相等<sup>[13]</sup>, 而 $\epsilon_a$ 和 $\epsilon_t$ 可通过在试件表面应变场中设置虚拟引伸计求得<sup>[14]</sup>.

体应变 $\epsilon_v$ 主要由BF-RPC内部原生裂纹闭合和加载过程中新裂纹张开扩展所引起的体积变化 $\epsilon_{vc}$ 以及相同应力水平下所引起的弹性体应变 $\epsilon_{ve}$  2个部分组成.  $\epsilon_{ve}$ 计算式为:

$$\epsilon_{ve} = \frac{1 - 2\nu}{E} \sigma \quad (1)$$

式中:  $E$ 、 $\nu$ 分别为根据轴向应力 $\sigma$ -轴向应变 $\epsilon_a$ 曲线中弹性阶段所求得的弹性模量、泊松比.

1)文中涉及的含量、水胶比等除特殊说明外均为质量分数或质量比.

由此可得,静态加载过程中反映裂纹闭合和张开的裂纹体应变 $\epsilon_{vc}$ 为<sup>[15]</sup>:

$$\epsilon_{vc} = \epsilon_v - \epsilon_{ve} \quad (2)$$

BF-RPC试件的轴向应力-轴向(横向)应变( $\sigma-\epsilon_a(\epsilon_l)$ )曲线、弹性(裂纹)体应变-轴向应变( $\epsilon_{vc}(\epsilon_{ve})-\epsilon_a$ )曲线见图1、2.图2中:体应变上升段表示体积减小,下降段表示体积增大;裂纹应变上升段表示裂纹闭合,下降段表示裂纹扩展.由图1、2可见,不同BF体积分数的BF-RPC在单轴压缩过程中,其轴向应力-轴向(横向)应变曲线、弹性(裂纹)应变-轴向应变曲线的形状和与特征相似.

按曲线之间的相互联系,可以将BF-RPC的单轴压缩破坏过程分为以下4个阶段.

第I阶段 原生裂纹闭合阶段.此阶段体应变和裂纹应变均随着轴向应变的增加而增大,试件体积收缩,原始裂纹闭合,裂纹应变上升至水平段标志着原生裂纹闭合阶段结束.

第II阶段 弹性变形阶段.此阶段开始的轴向应力和轴向应变称为弹性应力 $\sigma_{ce}$ 和弹性应变 $\epsilon_{ce}$ ,体应变 $\epsilon_v$ 与弹性体应变 $\epsilon_{ve}$ 增量保持一致,裂纹应变保持定值,也就是BF-RPC试件体积的改变只与弹性体应变有关,裂纹应变开始下降标志着弹性变形阶段

的结束.

第III阶段 裂纹稳定扩展阶段.此阶段开始的轴向应力和轴向应变称为起裂应力 $\sigma_{ci}$ 和起裂应变 $\epsilon_{ci}$ ,是轴向裂纹形成的标志;在裂纹稳定扩展阶段,体应变增量中包括裂纹扩展引起的体积增量,因此体应变增量小于弹性体应变增量,裂纹应变表现为缓慢下降状态,体应变开始下降标志着裂纹稳定扩展阶段的结束.

第IV阶段 裂纹加速扩展阶段.此阶段开始的轴向应力和轴向应变称为扩容应力 $\sigma_{cd}$ 和扩容应变 $\epsilon_{cd}$ ,是裂纹不稳定扩展的标志,结束时的轴向应力和轴向应变称为峰值应力 $\sigma_f$ 和峰值应变 $\epsilon_f$ ;裂纹加速扩展导致裂纹应变加速下降,体应变开始下降导致试件总体积变大,横向应变加速增长.

由图1中的峰值应力 $\sigma_f$ 可以看出:BF能够有效提高BF-RPC的峰值应力,且随着BF体积分数的增大,BF-RPC的峰值应力先增大后减小;当 $\varphi_{BF}=0.5\%$ 时,BF-RPC的 $\sigma_f$ 达到最大值,此时BF的增强效果最为显著, $\sigma_f$ 的增值幅度为13%;当 $\varphi_{BF}>0.5\%$ 时,BF-RPC峰值应力降低的主要原因在于纤维体积分分数过大而导致的结团现象,增加了其内部孔隙和薄弱面.

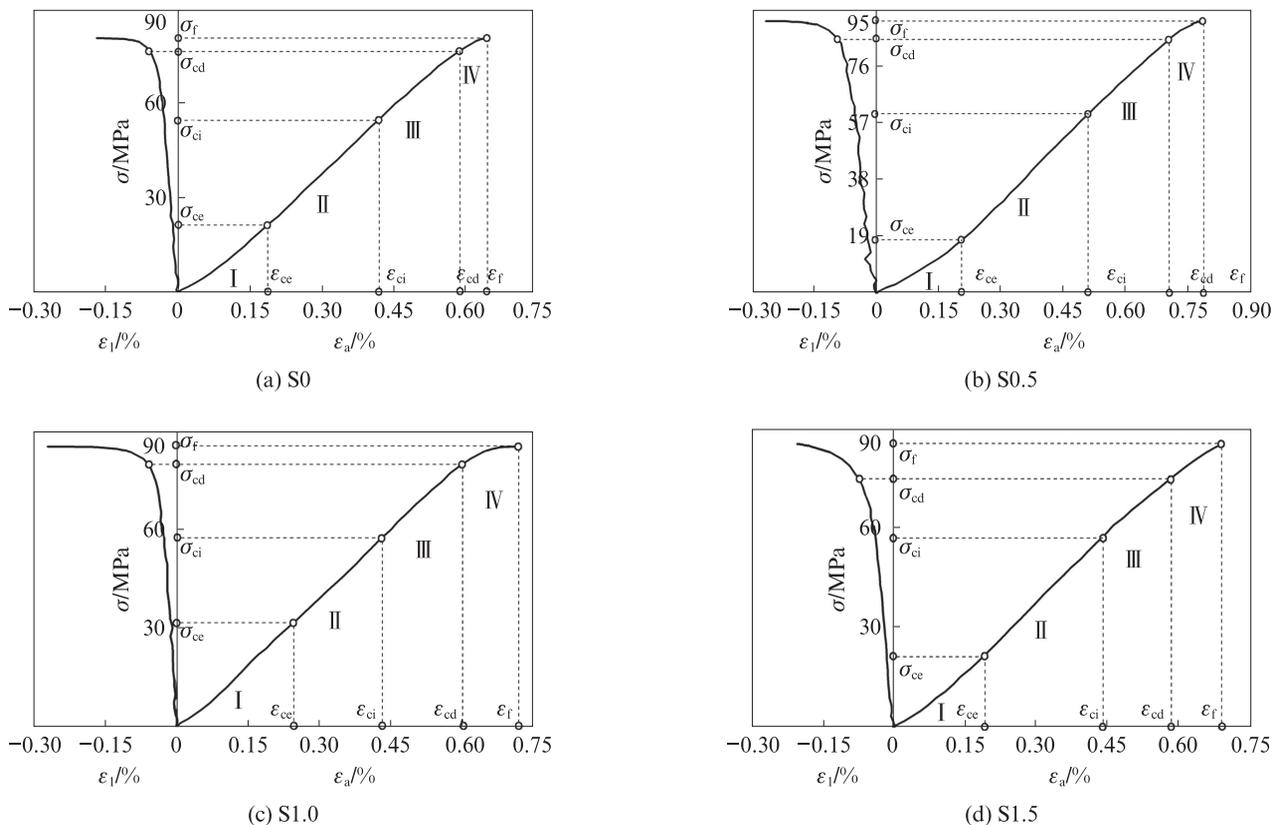


图1 BF-RPC试件的轴向应力-轴向(横向)应变曲线  
Fig. 1  $\sigma-\epsilon_a(\epsilon_l)$  curves of BF-RPC specimens

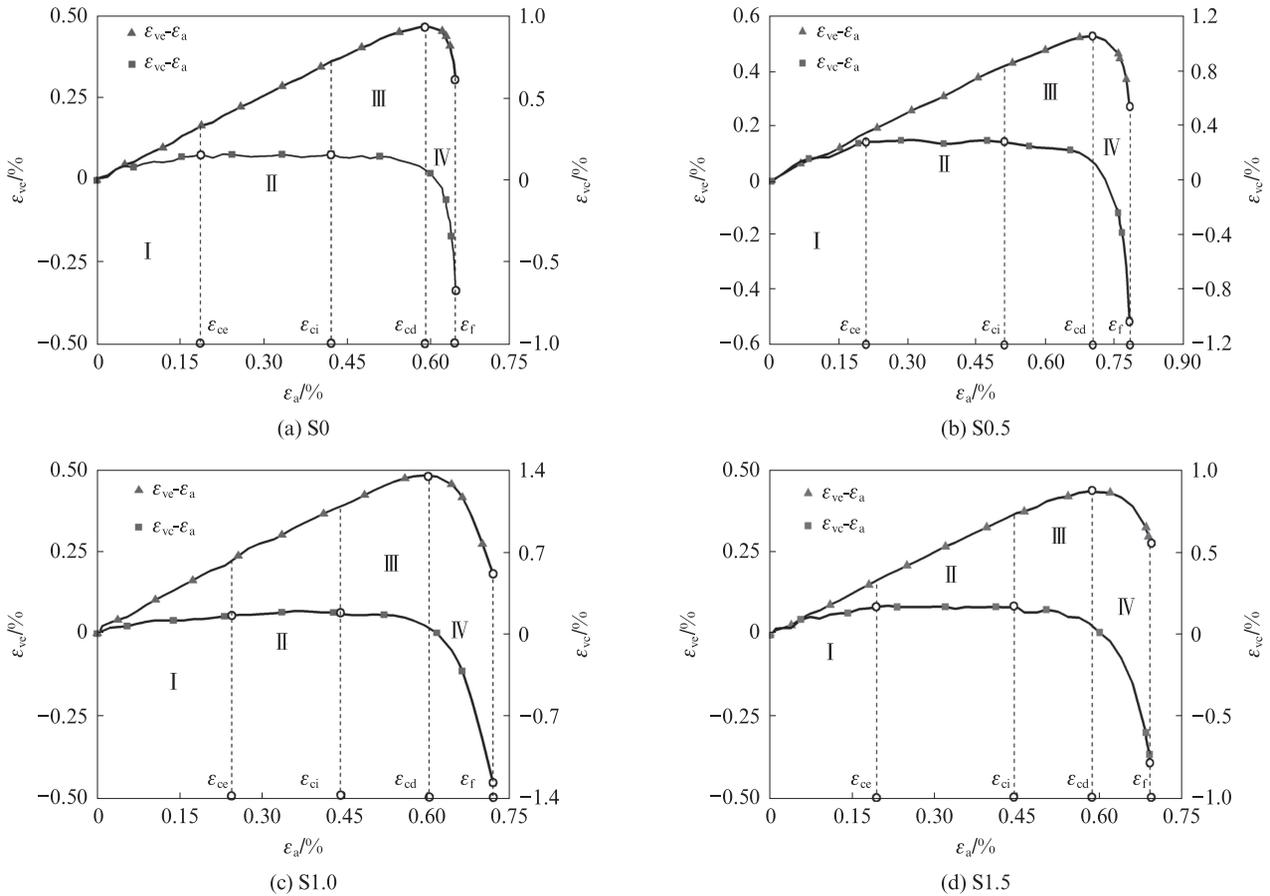


图2 BF-RPC试件的弹性(裂纹)应变-轴向应变曲线

Fig. 2  $\epsilon_{vc}(\epsilon_{vc})-\epsilon_a$  curves of BF-RPC specimens

2.2 BF对破坏阶段的影响

为了更好地探究不同BF体积分数对BF-RPC破坏阶段的影响,采用破坏阶段占比Q进行分析,破坏阶段占比用该阶段轴向应变变化量占峰值应变的百分比来表征.BF-RPC试件的破坏阶段占比见图3.由图3可见,随着BF体积分数的增大:BF-RPC原生裂纹闭合阶段的破坏阶段占比呈震荡式变化,当 $\varphi_{BF}=0.5\%$ 时,BF-RPC原生裂纹闭合阶段的破坏阶段占比最小,而当 $\varphi_{BF}>0.5\%$ 时,BF-RPC原生裂纹闭合阶段的破坏阶段占比大于 $\varphi_{BF}=0.5\%$ 的BF-RPC,这说明BF的掺入可以改变BF-RPC的内部孔隙和原始缺陷;BF-RPC弹性变形阶段的破坏阶段占比也呈现出震荡式变化,当 $\varphi_{BF}=0.5\%$ 时,BF-RPC弹性变形阶段的破坏阶段占比最大;BF-RPC裂纹稳定扩展阶段的破坏阶段占比逐渐减小,裂纹加速扩展阶段的破坏阶段占比逐渐增大,当 $\varphi_{BF}=1.5\%$ 时,BF-RPC裂纹稳定扩展阶段的破坏阶段占比最小,而裂纹加速扩展阶段的破坏阶段占比最大,这主要是因为过多BF的掺入增加了BF-RPC的内部孔隙和薄弱面,在薄弱面处裂纹更容易张开和扩展,减小了

裂纹稳定扩展阶段的破坏阶段占比,但是BF掺入较多,其加筋拉结效果最为显著,导致裂纹加速扩展阶段的破坏阶段占比最大.

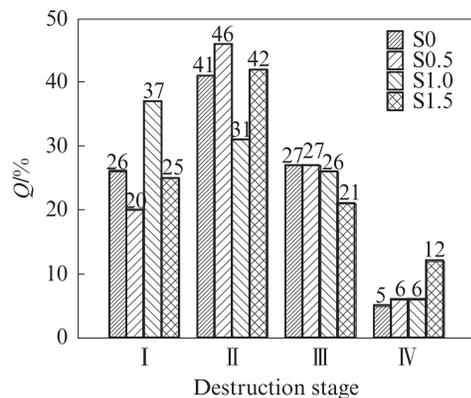


图3 BF-RPC试件的破坏阶段占比

Fig. 3 Q of BF-RPC specimens

2.3 BF对试件损伤的影响

应变场的标准差可以表征试件表面应变场非均匀演化(局部化)过程,试件内部裂纹扩展与表面应变场演化有关,可以通过表面应变场的标准差来表征试件损伤演化过程<sup>[16]</sup>.定义某一时刻水平应变场标

准差  $S$  为:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X})^2} \quad (3)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_k \quad (4)$$

式中:  $X_k$  为应变场中任意点  $k$  的应变值;  $\bar{X}$  为  $X_k$  的平均值.

BF-RPC 试件的水平应变场标准差演化曲线见图 4. 由图 4 可见, BF 的掺入改变了 BF-RPC 试件的损伤演化过程: 在扩容应变  $\epsilon_{cd}$  之前, 试件损伤较小且增长较为平缓; 在扩容应变  $\epsilon_{cd}$  之后, 试件损伤急剧增加且在峰值破坏之前均有明显的突跳; 峰值破坏时对应的损伤随着 BF 体积分数的增大而增大, 主要是因为 BF-RPC 在单轴受压状态下, 内部 BF 对外力有传导和分散作用, 在 BF 对外力进行传导和分散过程中, BF 拉结的混凝土就会产生微裂纹. 纤维的断裂和微裂纹的扩展导致了混凝土内部损伤产生, 且随着 BF 体积分数的增大这种作用趋于明显, BF-RPC 内部产生的损伤也将增大.

### 3 破坏模式分析

为分析 BF-RPC 在单轴压缩过程中的破坏模

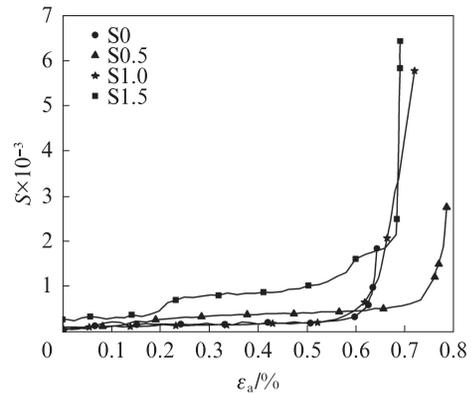


图 4 BF-RPC 试件的水平应变场标准差演化曲线  
Fig. 4 Evolution curves of  $S$  of BF-RPC specimens

式(剪切破坏、拉伸破坏、复合型破坏), 在主裂纹两侧附近布置 4 对标志点  $E(0, 1)$ 、 $F(2, 3)$ 、 $G(4, 5)$ 、 $H(6, 7)$ (见图 5), 在试件表面位移场中提取这 4 对标志点的垂直位移和水平位移, 并将其分解至裂纹的切向方向和法向方向. 通过分析裂纹两侧标志点的切向位移  $T$  和法向位移  $N$  随时间的演化曲线, 可以探究裂纹扩展机制. BF-RPC 受压主裂纹两侧标志点的切向位移和法向位移全程演化曲线见图 6, 图中  $T_0$ 、 $N_0$  分别为点 0 在切向、法向的位移, 其他类推.

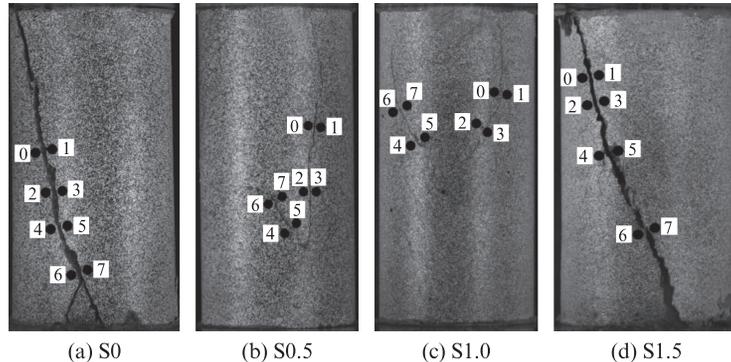


图 5 裂纹两侧标志点位置  
Fig. 5 Location of marks on both sides of cracks

由图 6 可见: 试件 S0 中, 4 对标志点的切向位移均没有分离趋势, 而法向位移在加载的不同阶段均出现了分离现象, 这说明未掺加 BF 的 RPC 试件破坏模式为拉伸破坏; 试件 S0.5 中, 4 对标志点分别在加载到峰值应变的 71%、34%、17%、94% 时, 法向位移开始出现分离,  $F(2, 3)$ 、 $G(4, 5)$ 、 $H(6, 7)$  标志点分别在加载到峰值应变的 63%、25%、25% 时, 切向位移开始出现分离, 这说明当  $\varphi_{BF}=0.5\%$  时, BF-RPC 破坏是由拉伸和剪切破坏共同作用造成的; 试件 S1.0 中, 4 对标志点的切向位移和法向位移均在不同时刻出现了分离现象, 这说明当  $\varphi_{BF}=1.0\%$  时, BF-RPC 的破坏是由拉伸和剪

切破坏共同作用造成的; 试件 S1.5 中,  $E(0, 1)$  在加载至峰值应变的 30% 左右时, 切向位移开始出现分离, 法向位移在加载开始就保持着 0.001 mm 的位移差直到破坏, 可认为其法向位移没有出现分离,  $F(2, 3)$ 、 $G(4, 5)$ 、 $H(6, 7)$  标志点在加载至峰值应变的 30% 左右时, 切向位移开始出现分离, 法向位移基本未分离, 这说明当  $\varphi_{BF}=1.5\%$  时, BF-RPC 的破坏模式为剪切破坏. 由此可见, BF 的加入改变了 BF-RPC 在单轴受压状态下的破坏模式: 未掺加 BF 的 RPC 主裂破坏模式为拉伸破坏; 随着 BF 体积分数的增大, BF-RPC 的破坏模式逐渐从拉剪破坏过渡到剪切破坏.

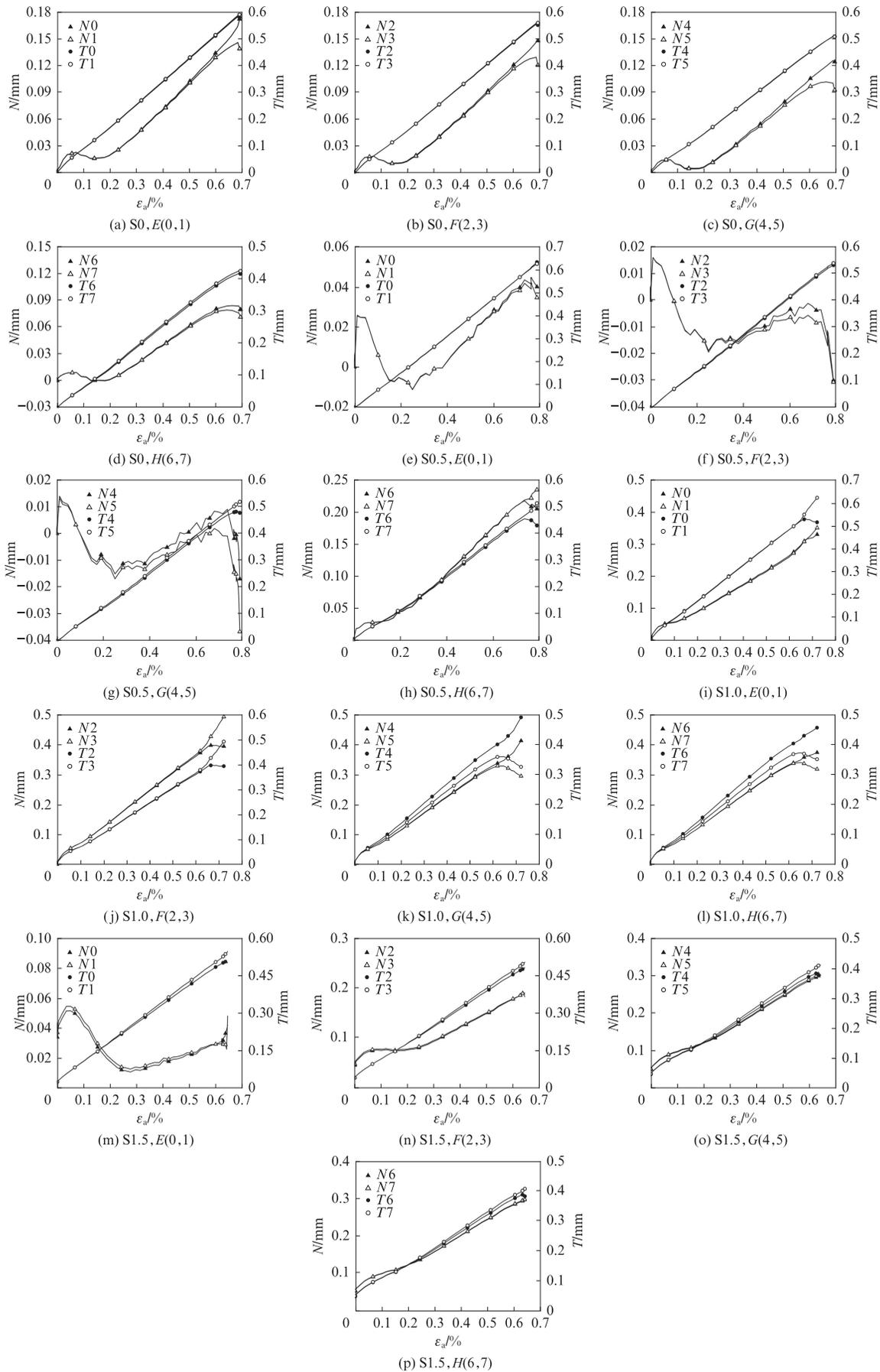


图6 BF-RPC受压主裂纹两侧标志点的切向位移和法向位移全程演化曲线

Fig. 6 Full range evolution curves of  $T$  and  $N$  of mark points on both sides of BF-RPC compression main cracks

## 4 结论

(1)玄武岩纤维(BF)-活性粉末混凝土(BF-RPC)的单轴压缩破坏过程可以分为4个阶段:原生裂纹闭合阶段、弹性变形阶段、裂纹稳定扩展阶段和裂纹加速扩展阶段.当BF体积分数为0.5%时,BF-RPC原生裂纹闭合阶段的破坏阶段占比最小,弹性变形阶段的破坏阶段占比最大.

(2)不同BF体积分数的BF-RPC试件在达到扩容应变前损伤较小且增长较平缓,在达到扩容应变后试件损伤迅速增长,峰值破坏时BF-RPC的损伤随着BF体积分数的增大而增大.

(3)BF的掺入改变了BF-RPC单轴压缩过程中的破坏模式:未掺入BF的活性粉末混凝土的破坏模式为拉伸破坏;BF体积分数为0.5%和1.0%的BF-RPC破坏模式均为拉剪破坏;BF体积分数为1.5%的BF-RPC破坏模式为剪切破坏.了解静压破坏模式对BF-RPC的工程应用有着重要的指导意义.

### 参考文献:

- [ 1 ] 王秋维,史庆轩,陶毅,等.活性粉末混凝土抗压力学性能及指标取值[J].建筑材料学报,2020,23(6):1381-1389.  
WANG Qiuwei, SHI Qingxuan, TAO Yi, et al. Compressive mechanical properties and indexes of reactive powder concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6):1381-1389. (in Chinese)
- [ 2 ] 吴礼程,王哲,刘迪,等.围压及钢纤维掺量对活性粉末混凝土力学特性的影响[J].建筑材料学报,2018,21(2):208-215.  
WU Licheng, WANG Zhe, LIU Di, et al. Effect of confining pressure and steel fiber volume content on mechanical property of reactive powder concrete[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2):208-215. (in Chinese)
- [ 3 ] 张倩倩,魏亚,张景硕,等.钢纤维掺量对活性粉末混凝土断裂性能的影响[J].建筑材料学报,2014,17(1):24-29.  
ZHANG Qianqian, WEI Ya, ZHANG Jingshuo, et al. Influence of steel fiber content on fracture properties of RPC[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(1):24-29. (in Chinese)
- [ 4 ] WANG D H, JU Y Z, SHEN H, et al. Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber[J]. Construction and Building Materials, 2019, 197:464-473.
- [ 5 ] CHEN X, WAN D W, JIN L Z, et al. Experimental studies and microstructure analysis for ultra high-performance reactive powder concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 229:116924.
- [ 6 ] 安明喆,宋子辉,李宇,等.不同钢纤维含量RPC材料受压力学性能研究[J].中国铁道科学,2009,30(5):34-38.  
AN Mingzhe, SONG Zihui, LI Yu, et al. Study on mechanical performance of reactive powder concrete with different steel fiber contents under uniaxial compression[J]. China Railway Science, 2009, 30(5):34-38. (in Chinese)
- [ 7 ] YAZICI H, YARDIMCI M Y, AYDIN S, et al. Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(3):1223-1231.
- [ 8 ] KANNAN R P R, MATHANGI D P, SUDHA C, et al. Experimental investigation of reactive powder concrete exposed to elevated temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2020, 261:119593.
- [ 9 ] LI W J, LIU H B, ZHU B, et al. Mechanical properties and freeze-thaw durability of basalt fiber reactive powder concrete[J]. Applied Sciences, 2020, 10(16):5682.
- [ 10 ] RAZA S, QURESHI L, ALI B, et al. Mechanical properties of hybrid steel-glass fiber-reinforced reactive powder concrete after exposure to elevated temperatures[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2020, 45(5):4285-4300.
- [ 11 ] 何晓雁,秦立达,张淑艳,等.基于正交理论的玄武岩纤维活性粉末混凝土配合比设计[J].硅酸盐通报,2016,35(5):1402-1406.  
HE Xiaoyan, QIN Lida, ZHANG Shuyan, et al. Mixture ratio design of basalt fiber reactive powder concrete based on orthogonal theory[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(5):1402-1406. (in Chinese)
- [ 12 ] 何峰,黄政宇.活性粉末混凝土原材料及配合比设计参数的选择[J].新型建筑材料,2007(3):74-77.  
HE Feng, HUANG Zhengyu. Selection of raw materials and parameters of mix design for active powder concrete[J]. New Building Materials, 2007(3):74-77. (in Chinese)
- [ 13 ] XING H Z, ZHANG Q B, ZHAO J. Stress thresholds of crack development and poisson's ratio of rock material at high strain rate[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(3):945-951.
- [ 14 ] XING H Z, ZHANG Q B, RUAN D, et al. Full-field measurement and fracture characterisations of rocks under dynamic loads using high-speed three-dimensional digital image correlation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 113:61-72.
- [ 15 ] CAI M, KAISER P, TASAKA Y, et al. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(5):833-847.
- [ 16 ] MA S P, WANG L G, JIN G C. Damage evolution inspection of rock using digital speckle correlation method (DSCM)[J]. Key Engineering Materials, 2006, 326-328,1117-1120.