

## 基于声震监测的钢纤维/混凝土裂纹扩展规律及失稳前兆

刘成禹 陈成海 张向向 曹洋兵 何锡阳

### Crack propagation law and failure precursor of steel fiber reinforced concrete based on acoustic emission and microseism monitoring

LIU Chengyu, CHEN Chenghai, ZHANG Xiangxiang, CAO Yangbing, HE Xiyang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220725.001>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 预应力活性粉末混凝土受弯过程声发射特性

Acoustic emission behavior of prestressed reactive powder concrete under flexural loads

复合材料学报. 2018, 35(10): 2860–2870 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180124.001>

#### 钢纤维形状对高性能混凝土性能的影响

Influence of steel fiber shape on the performance of high-performance concrete

复合材料学报. 2021, 38(12): 4313–4324 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210210.003>

#### 碳纤维增强环氧树脂复合材料螺栓连接结构在拉伸载荷下损伤过程的声发射分析

Acoustic emission analysis of carbon fiber reinforced polymer bolted joints damage process under tensile load

复合材料学报. 2019, 36(8): 1854–1863 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181009.001>

#### 基于应力强度因子评估 $WC_p$ 形状对 $WC_p/Fe$ 复合材料热疲劳裂纹扩展行为的影响

Effect of  $WC_p$  shape of  $WC_p/Fe$  composites on thermal fatigue crack propagation behavior based on stress intensity factor

复合材料学报. 2020, 37(2): 408–414 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190426.001>

#### 基于声发射信号的不同密度C/SiC复合材料损伤演化

Damage evolution of C/SiC composite materials with different densities based on acoustic emission signal analysis

复合材料学报. 2019, 36(2): 425–433 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180416.001>

#### 中央带裂缝混凝土循环拉伸断裂试验Felicity效应

Cyclic tensile fracture test of concrete with central crack and Felicity effect

复合材料学报. 2019, 36(12): 2968–2974 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190305.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220725.001

基于声震监测的钢纤维/混凝土裂纹  
扩展规律及失稳前兆



分享本文

刘成禹<sup>1,2</sup>, 陈成海<sup>1</sup>, 张向向<sup>\*1,2</sup>, 曹洋兵<sup>1,2</sup>, 何锡阳<sup>1</sup>

(1. 福州大学 紫金地质与矿业学院, 福州 350116; 2. 福州大学 地质工程福建省高校工程研究中心, 福州 350116)

**摘 要:** 对不同龄期、不同钢纤维掺量的钢纤维/混凝土 (SFRC) 单轴压缩过程中声发射 (AE) 和微震 (MS) 信号进行分析, 探究 SFRC 的声震信号特征及裂纹扩展规律。结果表明: (1) SFRC 加载过程中裂纹扩展可分为裂纹压密 (I)、裂纹稳定发育 (II)、裂纹急速扩展 (III) 和峰后破坏 (IV) 4 个阶段; (2) 随龄期增加, 第 I、第 II 阶段中 AE、MS 的能率、振率及微观裂纹和细、宏观裂纹的整体扩展速率均逐渐降低; 第 III、第 IV 阶段中 AE、MS 的能率、振率及微观裂纹及细、宏观裂纹的整体扩展速率均逐渐增大; (3) 随钢纤维掺量增加, 除第 I 阶段外, 其余 3 个阶段的 AE 能率和振率、微观裂纹整体扩展速率均逐渐增大; 各个阶段的 MS 能率和振率逐渐减小, MS 能量突增点的时间比逐渐增大, 表明细、宏观裂纹整体扩展速率降低, 破坏时间延迟; (4) SFRC 失稳前, AE、MS 的能率和振率、MS 能量占比均出现明显陡增, 可作为 SFRC 的失稳前兆指标。

**关键词:** 钢纤维/混凝土; 声发射; 微震; 裂纹扩展; 失稳前兆

**中图分类号:** TU528      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3851(2023)04-2240-11

Crack propagation law and failure precursor of steel fiber reinforced concrete  
based on acoustic emission and microseism monitoring

LIU Chengyu<sup>1,2</sup>, CHEN Chenghai<sup>1</sup>, ZHANG Xiangxiang<sup>\*1,2</sup>, CAO Yangbing<sup>1,2</sup>, HE Xiyang<sup>1</sup>

(1. College of Zijin Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 2. Research Center of Geological Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** Uniaxial compression tests were performed on the steel fiber reinforced concrete (SFRC) specimens with different ages and steel fiber volume fractions. The acoustic emission (AE) and microseismic (MS) signals were monitored during the loading progress. Through the in-depth analysis of testing results, the feature of AE and MS signals and the evolution of crack propagation in SFRC were studied. The results show that: (1) The crack propagation of SFRC during uniaxial compression can be divided into four stages: Crack compaction stage (I), crack stable development stage (II), crack unstable propagation stage (III) and post-peak failure stage (IV). Different stages show different AE and MS characteristics. (2) With the increase of age, the energy rates and count rates of AE and MS in stages I and II decrease, as well as the generation rates of micro-, meso- and macro- cracks of the whole specimen. However, the energy rate and count rate of AE and MS in stages III and IV increase, as well as the generation rates of micro-, meso- and macro-cracks of the whole specimen increase. (3) With the increase of steel fiber volume fraction, the AE energy rate, AE count rate and micro-crack generation rate of the whole specimen in stages II, III and IV increase, while the MS energy rate and MS count rate in each stage decrease, and the MS energy surge time rate in each stage increase. Furthermore, the generation rates of meso- and macro- cracks of the whole specimen in each stage decrease, and the failure time is delayed. (4) Before the failure of SFRC, the energy rates and count rates of AE

收稿日期: 2022-04-29; 修回日期: 2022-06-24; 录用日期: 2022-07-12; 网络首发时间: 2022-07-25 15:52:20

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220725.001>

**基金项目:** 国家自然科学基金 (41272300); 中铁隧道局集团有限公司科技创新重点项目 (隧研合: 2018-53); 福建省自然科学基金 (2020 J05133)  
National Natural Science Foundation of China (41272300); Major Projects of Scientific and Technological Innovation of CRTG (2018-53);  
Natural Science Foundation of Fujian Province of China (2020J05133)

**通信作者:** 张向向, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为隧道与地下工程、页岩气压裂等方面 E-mail: [xxzhang@fzu.edu.cn](mailto:xxzhang@fzu.edu.cn)

**引用格式:** 刘成禹, 陈成海, 张向向, 等. 基于声震监测的钢纤维/混凝土裂纹扩展规律及失稳前兆 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(4): 2240-2250.

LIU Chengyu, CHEN Chenghai, ZHANG Xiangxiang, et al. Crack propagation law and failure precursor of steel fiber reinforced concrete based on acoustic emission and microseism monitoring[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(4): 2240-2250(in Chinese).

and MS increase sharply, as well as MS energy ratio. These variables can be used as the precursor index of SFRC failure.

**Keywords:** steel fiber reinforced concrete; acoustic emission; microseismic; crack propagation; failure precursor

钢纤维/混凝土 (SFRC) 受载变形破坏过程本质是其内部不同尺度裂纹扩展演化的过程, 钢纤维的掺入对该过程具有重要影响<sup>[1]</sup>, 导致不同掺量 SFRC 的失稳扩展前兆差异显著。因此, 开展 SFRC 变形破裂过程中不同尺度裂纹扩展规律及失稳前兆信息研究, 对 SFRC 工程结构的防灾减灾具有重要意义。

目前, 学者们主要通过应力-应变曲线分析 SFRC 变形破坏过程, 并将应力 (或应变)<sup>[2]</sup>、红外特征<sup>[3]</sup>或电位信号等<sup>[4]</sup>作为破坏前兆的判据。然而, 由于 SFRC 的破坏应力、应变、温度及电位等受众多因素影响, 难得出具有普遍适用性且相对准确的结论和判据。声发射 (AE) 和微震 (MS) 监测具有实时、动态及对结构影响小等优点<sup>[5]</sup>, 得到了广泛应用。自上世纪 50 年代末, Rusch<sup>[6]</sup>首次将 AE 技术引入到混凝土研究以来, 大量学者对混凝土的 AE 特征进行了研究。赖于树等<sup>[5]</sup>研究表明, AE 频谱特征、能量变化、事件计数率等与混凝土试样破坏过程的各个阶段均有较好的对应关系。Soulioti 等<sup>[7]</sup>研究发现, SFRC 板加载过程中的 AE 活动性与钢纤维掺量成正比, AE 参数的变化可用于表征 SFRC 的破坏过程。Aggelis<sup>[8]</sup>提出了基于 AE 技术的不同钢纤维掺量混凝土破坏模式分类方法。MS 监测方面, 王金贵等<sup>[9]</sup>研究发现, 水泥砂浆静爆拉伸过程中 MS 信号幅值随破裂速率增加而增大, 事件数随裂纹面积增大而增多。马克等<sup>[10]</sup>利用 MS 技术对蓄水初期混凝土拱坝坝踵区进行了监测。

目前学界普遍将频率为 0~25 kHz 的信号定义为低频信号, 频率大于 25 kHz 的信号定义为高频信号; 混凝土受载过程中, 微观裂纹扩展产生的高频信号常被 AE 捕捉, 细、宏观裂纹扩展产生的低频信号常被 MS 捕捉<sup>[5, 11-14]</sup>。可见, 随着加载应力水平提高, 微观裂纹逐渐扩展为细、宏观裂纹, 仅用 AE 技术无法完整揭示 SFRC 受载过程中不同尺寸裂纹的演化规律, 有必要结合 MS 技术对 SFRC 受载裂纹扩展过程进行研究。

AE 及 MS 信号携带有脆性材料受载过程中不同尺度裂纹、损伤状态等大量信息, 综合应用 AE 和 MS 信号技术, 更利于深入分析材料受载过

程中微观裂纹和细宏观裂纹的扩展规律, 揭示材料的破坏机制及破坏前兆<sup>[15]</sup>。然而, 目前鲜见综合采用 AE 和 MS 监测技术从微观裂纹和细、宏观裂纹扩展两方面对 SFRC 受载过程中的裂纹扩展及失稳前兆进行研究的报道。另外, 在 SFRC 内部, 基体和钢纤维通过桥接作用共同承受内力, 其力学性能与钢纤维掺量和龄期密切相关<sup>[1]</sup>。

鉴于此, 本文分别对不同龄期和钢纤维掺量的 SFRC 试样进行单轴压缩试验, 同步监测试件变形破坏过程中的 AE 和 MS 信号, 通过监测信号的综合分析, 力求从微观裂纹和细、宏观裂纹扩展两方面揭示 SFRC 变形破坏过程及规律; 基于声震信号特征, 从能量释放率、振铃计数率和频率等多角度, 系统分析 SFRC 的失稳前兆特征, 提出失稳前兆信息的预警指标及裂纹失稳扩展判据。研究结果可为 SFRC 工程结构的防灾减灾提供指导。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

配制 SFRC 的水泥采用福建三明南方水泥有限公司生产的虎球牌 P·O42.5 R 普通硅酸盐水泥, 细骨料采用细度模数为 2.5 的河砂, 粗骨料采用粒径 5~10 mm 的连续级配碎石, 钢纤维采用河北普方钢纤维厂生产的端钩型钢纤维, 参数见表 1。

表 1 端钩型钢纤维参数			
Table 1 Parameters of hooked steel fiber			
Length/mm	Aspect ratio	Tensile strength/MPa	Elastic modulus E/GPa
35	60	1 100	200

1.2 试块成型

参照 CECS 13—2009<sup>[16]</sup>进行试样制备, 步骤如下: 首先将水泥和砂在混凝土强制搅拌机中干拌 2~3 min, 再加水搅拌 2~3 min, 然后分散加入碎石和钢纤维, 再搅拌 3~5 min 得到混凝土浆体; 浆体一次注模后置于振动台中振动至表面出浆后抹平, 覆盖保鲜膜防止水分蒸发, 在空气中养护 1 天后拆模制成 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块并编号, 每组 3 个试样。

1.3 试验方案

目前工程中所用的 SFRC 中, 0.5vol% 为常用

的钢纤维体积掺量之一<sup>[17-18]</sup>，为研究龄期对 SFRC 破裂的影响，对钢纤维体积掺量为 0.5vol%、龄期分别为 3 天、7 天和 28 天的 SFRC 试件进行试验。考虑到钢纤维掺量大于 2vol% 后，钢纤维增韧阻裂效果将降低<sup>[19]</sup>，为此，本文在对钢纤维掺量对 SFRC 破裂影响的试验研究中，采用龄期 28 天、

钢纤维掺量分别为 0.5vol%、1.0vol%、1.5vol%、2.0vol% 的试件进行单轴压缩试验，同时设置砂浆组和钢纤维掺量为 0vol% 的普通混凝土为对照组。为了保证钢纤维均匀分布，并保持水灰比和砂率固定不变，试样配合比参照 JTGF 30—2003<sup>[20]</sup> 及 JGJ 55—2011<sup>[21]</sup> 设置，见表 2。

表 2 试样配合比  
Table 2 Mix proportion of specimen

Steel fiber volume fraction/vol%	Water/(kg·m <sup>-3</sup> )	Cement/(kg·m <sup>-3</sup> )	Sand/(kg·m <sup>-3</sup> )	Gravel/(kg·m <sup>-3</sup> )	Steel fiber/(kg·m <sup>-3</sup> )
Mortar(p)	210.0	411.8	1 778.2	0.0	0.0
0	210.0	411.8	800.2	978.0	0.0
0.5	218.0	427.5	801.8	940.7	39.3
1.0	226.0	443.1	813.1	915.3	78.5
1.5	234.0	458.8	805.1	866.2	117.8
2.0	242.0	474.5	806.6	828.9	157.0

单轴压缩试验在 TAJW-2000 岩体多场耦合三轴试验系统中进行。为更好获取试样加载全程的应力-应变曲线及峰后信息，加载采用位移控制方式进行，加载速率为常用的 0.5 mm/min<sup>[22]</sup>，从试验开始持续加载至应力-应变曲线峰后 0.7 倍破坏应力后结束。声震信号监测采用徐州福安科技有限公司生产的 YDD16 型煤岩动力灾害监测仪，AE 传感器为频率 50~500 kHz 的压电传感器，MS 传感器为频率 0~3 000 Hz 的加速度传感器。为消除外界干扰，试验在屏蔽箱中进行，如图 1 所示。试样和传感器、试样和加载垫板间涂适量凡士林。试件加载过程中，加载设备和 AE、MS 监测系统同时开启，实时记录相关力学参数和声震信号。

步开展 AE、MS 监测，得到加载过程的应力、AE 和 MS 能量、振铃、累计能量及累计振铃历时曲线。由于振铃变化趋势与能量类似，为节省篇幅，本文仅列出与能量相关的部分试验结果，如图 2、图 3 所示。

根据 SFRC 单轴压缩全过程的应力-应变(位移控制加载，加载速率 0.5 mm/min，横坐标的时间可反映应变变化)曲线斜率，可将 SFRC 受压过程分为裂纹压密、裂纹稳定发育、裂纹急速扩展及峰后破坏 4 个阶段，各阶段的 AE、MS 信号特征如下：

(1) 裂纹压密阶段(阶段 I)：在此阶段，应力约为峰值应力的 0%~25%。不同龄期 SFRC 的 AE、MS 的能量和振铃值均相对较高，且总体呈先增大后减小的趋势。随着龄期增加，该阶段 AE、MS 的能量和振铃值逐渐减小，其累计能量和累计振铃曲线的斜率也随之减小；该阶段的时长与达到强度峰值的时长比值也逐渐减小；

(2) 裂纹稳定发育阶段(阶段 II)：在此阶段，应力约为峰值应力的 25%~80%。3 天龄期试样产生较强的 AE、MS 信号，7 天和 28 天试样 AE、MS 信号则稳定在相对较低的数值。随着龄期增加，AE、MS 的能量及振铃值均减小；AE、MS 累计能量及累计振铃曲线斜率也逐渐减小；该阶段的时长与达到强度峰值时的时间比值则逐渐增加；

(3) 裂纹急速扩展阶段(阶段 III)：在此阶段，应力约为破坏应力的 80%~100%。3 天龄期试样 AE 信号较弱，但 MS 信号较强；7 天及 28 天龄期

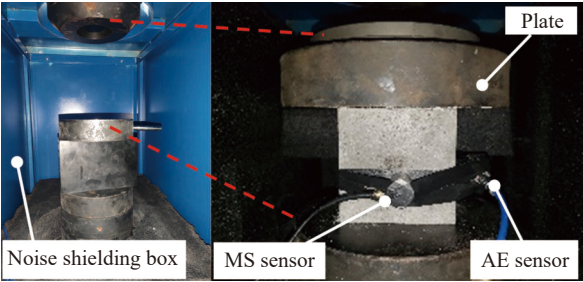


图 1 带屏蔽箱的加载系统及声发射(AE)和微震(MS)监测装置  
Fig. 1 Loading system with shielded box, acoustic emission (AE) and microseismic (MS) monitoring devices

2 SFRC 受载过程中 AE 和 MS 响应规律

2.1 不同龄期 SFRC 受压 AE、MS 响应规律

对钢纤维掺量为 0.5vol%、龄期分别为 3 天、7 天和 28 天的 SFRC 试样进行单轴压缩试验，同



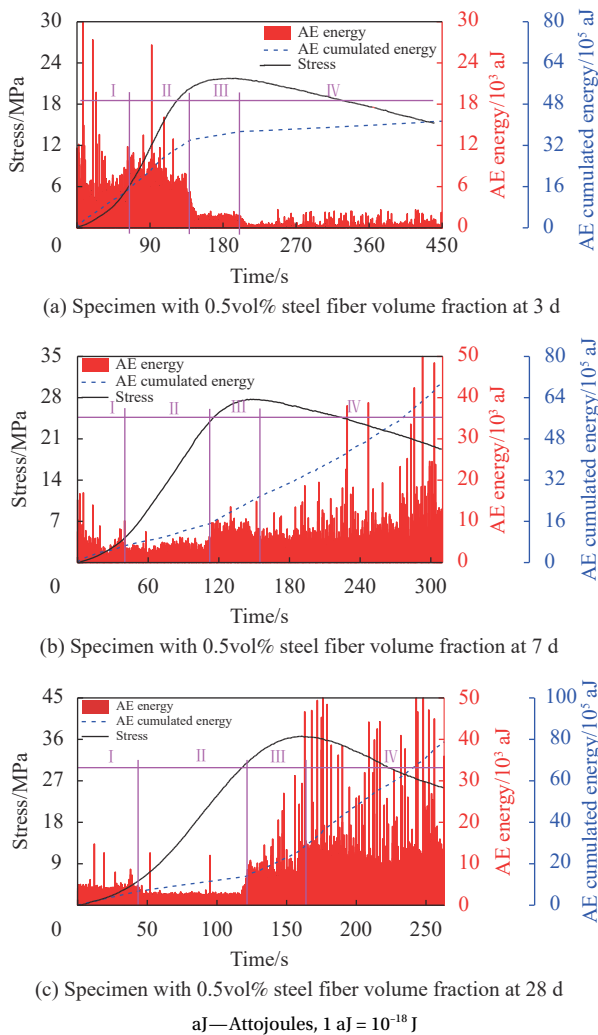


图2 不同龄期 SFRC 应力及 AE 能量历时曲线

Fig. 2 Duration curves of AE energy and stress for SFRC at different curing ages

试样则产生较强的 AE、MS 信号。随龄期增加，AE、MS 累计能量及累计振铃曲线斜率逐渐增大，该阶段的时长与达到强度峰值的时长比值逐渐减小；

(4) 峰后破坏阶段(阶段 IV)：在此阶段，3 天龄期试样 AE 信号较弱，但 MS 信号较高；7 天及 28 天龄期试样持续产生较强的 AE 和 MS 信号。随龄期增加，该阶段的 AE、MS 的累计能量、累计振铃曲线的斜率逐渐变大。

上述结果表明：不同龄期 SFRC 试样受载全过程皆有 AE 及 MS 信号产生，3 天龄期试样 AE 信号变化模式为“活跃-稳定”型，MS 响应为“始终活跃”型；超过 7 天的试样 AE 响应为“活跃-稳定-活跃”型，而 MS 响应为“平静-活跃”型。监测结果表明，从开始加载至失稳破坏过程

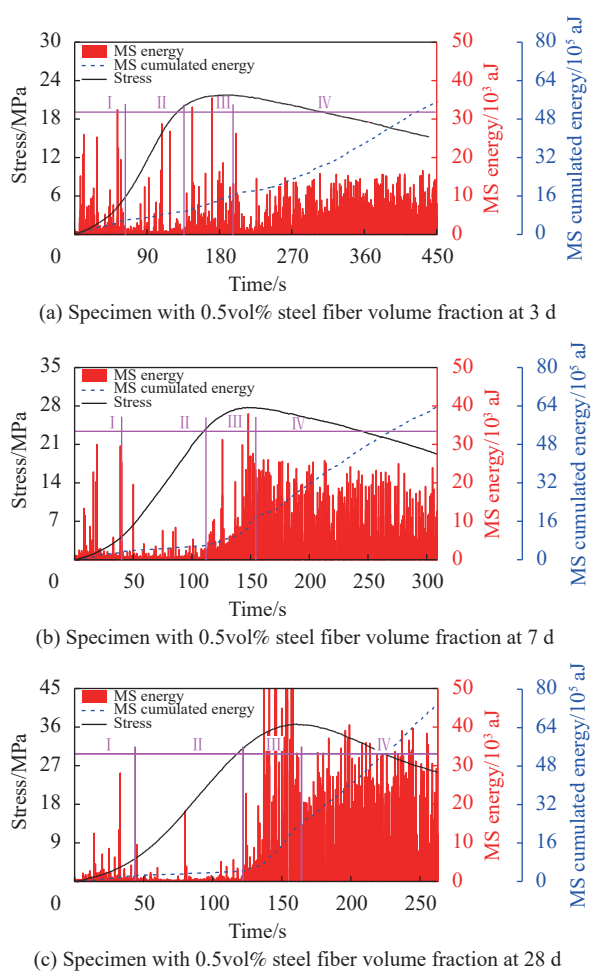


图3 不同龄期 SFRC 应力及 MS 能量历时曲线

Fig. 3 Duration curves of MS energy and stress for SFRC at different curing ages

中，3 天龄期试样微观裂纹呈“快速扩展-稳定扩展”两阶段特征，而细、宏观裂纹保持较快扩展；龄期超过 7 天的试样微观裂纹呈“快速扩展-稳定扩展-急速扩展”三阶段特征，而细、宏观裂纹呈“缓慢扩展-急速扩展”两阶段特征。

分析短龄期 SFRC 这种现象的原因，主要是由于短龄期 SFRC 强度较低，内部结构相对疏松，水泥石的内聚力、水泥石与粗骨料的粘结力，以及钢纤维与基体的粘结力都相对较小，SFRC 内部存在较多的原生裂纹和相对不稳定的界面。在受压第 I 阶段，试样内部原生裂纹受到压密作用，释放较强的 AE 能量。由于短龄期 SFRC 强度相对较低，随应力增加，在加载第 II 阶段 SFRC 内部水泥砂浆颗粒产生错位和滑移，裂纹进一步扩展，释放较强的 AE 能量。在第 III、IV 阶段时，试样内部细观裂纹沿原裂纹壁面扩展贯通，形成宏观裂纹并进一步扩展<sup>[23]</sup>。由于 AE 主要反映微观裂纹的

扩展情况，MS 主要反映宏观裂纹扩展情况<sup>[5,11-14]</sup>，因此在第 III、IV 阶段时 AE 响应较弱，而 MS 响应较强。

对钢纤维体积掺量 0.5vol%、不同龄期试样受压各阶段的 AE、MS 振率(单位时间产生的振铃计数)、能率(单位时间释放的能量)进行对比分析，如表 3 和表 4 所示。考虑到不同 AE、MS 监测仪器型号不同，监测结果可能存在差异，为提高规律的普适性，表中数值均以 3 天龄期试样为基准进行归一化处理。

表 3 不同龄期 SFRC 试样 AE 能率及振率归一化值  
Table 3 Normalized AE energy rate and count rate of SFRC at different curing ages

Loading stage	AE energy rate			AE count rate		
	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
I	1.00	0.69	0.65	1.00	0.79	0.74
II	1.00	0.45	0.35	1.00	0.59	0.50
III	1.00	4.65	5.90	1.00	3.22	5.83
IV	1.00	17.33	30.99	1.00	5.94	8.04

表 4 不同龄期 SFRC 试样 MS 能率及振率归一化值  
Table 4 Normalized MS energy rate and count rate of SFRC at different curing ages

Loading stage	MS energy rate			MS count rate		
	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
I	1.00	0.87	0.55	1.00	0.95	0.92
II	1.00	0.69	0.50	1.00	0.34	0.31
III	1.00	2.40	3.79	1.00	3.62	5.34
IV	1.00	1.88	3.19	1.00	5.85	8.71

可以看出：随着龄期增加，第 I、第 II 阶段的 AE、MS 能率和振率逐渐减小，第 III、第 IV 阶段的能率和振率增加。

已有研究表明，AE 能量与裂纹破裂扩展时所释放能量成正比关系，而裂纹扩展时所释放的能量等于新增加的表面能，即 AE 事件能量越大，对应的破裂面积越大，反之越小<sup>[15]</sup>，因此，能率与振率可用于反映试样内部破裂面积的增加速率。本文定义裂纹整体扩展速率为单位时间内试样整体内部新增破裂的总面积。上述结果表明：SFRC 试样的微观裂纹及细、宏观裂纹的整体扩展速率在第 I、第 II 阶段随龄期增加而减小，在第 III、第 IV 阶段则随龄期增加而增大。

2.2 不同钢纤维掺量 SFRC 受压 AE、MS 响应规律

28 天龄期的砂浆试样和不同钢纤维掺量 SFRC 试样单轴压缩试验过程中的应力、AE 及 MS 能量、累计能量历时曲线如图 4、图 5 所示。

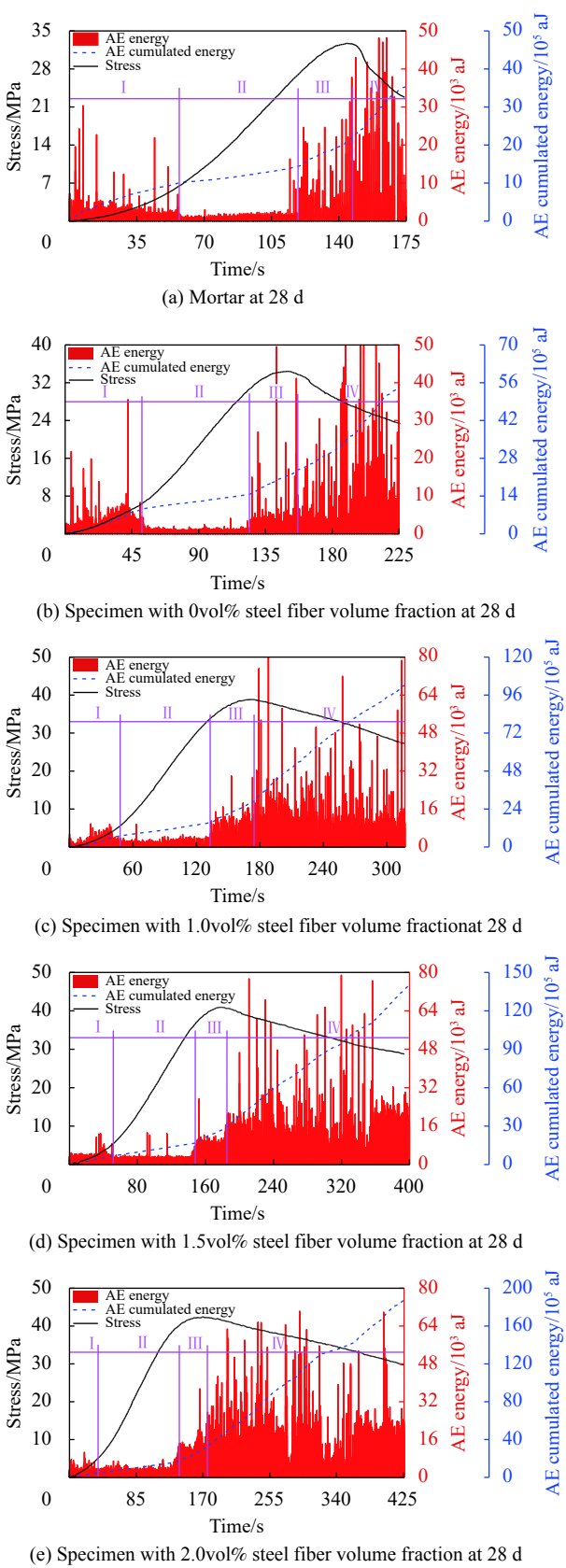


图 4 不同掺量 SFRC 试样应力和 AE 能量历时曲线  
Fig. 4 Duration curves of AE energy and stress for SFRC with different steel fiber volume fractions

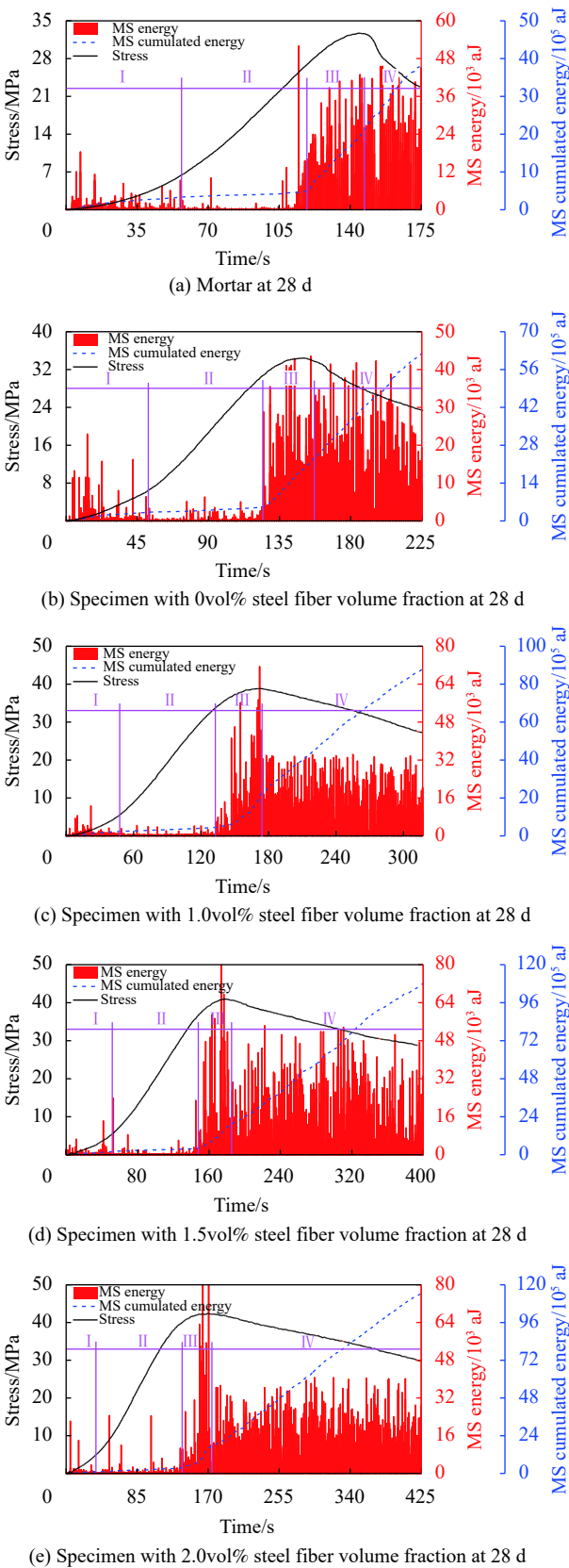


图5 不同掺量 SFRC 试样应力和 MS 能量历时曲线

Fig. 5 Duration curves of MS energy and stress for SFRC with different steel fiber volume fractions

由于振铃变化趋势与能量类似，为节省篇幅，仅列出与能量相关的部分试验结果。

根据应力-应变(位移控制加载，加载速率 0.5 mm/min，横坐标的时间可反映应变)曲线的斜率变化，仍可将砂浆及不同钢纤维掺量 SFRC 受压过程分为裂纹压密、裂纹稳定发育、裂纹急速扩展及峰后破坏 4 个阶段。4 个阶段的 AE、MS 信号变化有下列规律：

(1) 裂纹压密阶段(阶段 I)：此阶段应力约为破坏应力的 0%~25%。整体而言，普通混凝土、砂浆试样及不同体积掺量 SFRC 试样加载过程中 AE、MS 信号均相对较强，但随着钢纤维掺量增加，该阶段 AE、MS 信号强度逐渐减弱；当钢纤维掺量增大至 1.5vol% 后，该阶段 AE 信号强度与第 II 阶段差异较小。随着钢纤维掺量增加，该阶段的 AE、MS 累计能量和累计振铃曲线斜率逐渐变缓，该阶段的时长与达到强度峰值的时长比值逐渐减小；

(2) 裂纹稳定发育阶段(阶段 II)：此阶段应力约为破坏应力的 25%~80%。不同钢纤维掺量的试样、普通混凝土和砂浆试样在加载过程中 AE、MS 信号均稳定在较低的水平。该阶段的累计能量历时曲线斜率和其他阶段相比也最小。随着钢纤维掺量增加，该阶段的时长与达到强度峰值的时长比值逐渐增加；

(3) 纹急速扩展阶段(阶段 III)：应力约为 80%~100%。此阶段，不同试样的 AE、MS 信号均最为剧烈；随着钢纤维掺量增加，该阶段的 AE 累计能量曲线斜率逐渐增大，MS 累计能量曲线的斜率逐渐减小。该阶段的时长与达到强度峰值的时长比值，砂浆、普通混凝土的均比 SFRC 的小，不同钢纤维掺量试样的差别较小；

(4) 峰后破坏阶段(阶段 IV)：此阶段，不同试样持续产生较强的 AE、MS 信号。该阶段的累计能量曲线斜率和能量值均比其他阶段大。

上述结果表明：龄期 28 天、不同钢纤维掺量 SFRC 试样在受压全过程皆有 AE 及 MS 信号产生，AE 响应为“活跃-稳定-活跃”型，而 MS 响应为“平静-活跃”型。监测结果表明，从开始加载至失稳破坏过程中，龄期 28 天、不同钢纤维掺量 SFRC 试样微观裂纹呈“快速扩展-稳定扩展-急速扩展”三阶段特征，而细、宏观裂纹呈“缓慢扩展-急速扩展”两阶段特征。

由图4、图5可看出：在试件破坏前AE、MS均出现突增(第III阶段开始)。不同钢纤维掺量SFRC试样和普通混凝土、砂浆试样MS能量突增点的出现时间与峰值应力对应时间点的比值(时间比)如图6所示。

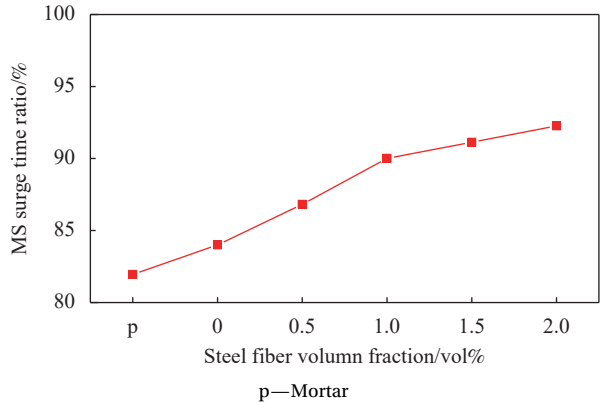


图6 SFRC 试样 MS 突增点的时间比与钢纤维掺量关系  
Fig. 6 Relationship between MS surge time ratio and steel fiber volume fraction for SFRC

可以看出：MS 能量突增点的时间比，SFRC>普通混凝土>砂浆；随着钢纤维掺量增加，SFRC 受压过程中的 MS 能量突增点的时间比逐渐增大，但掺量超过 1.0vol% 后，增大速率降低。上述结果表明：混凝土掺入钢纤维可抑制细、宏观裂纹的加速扩展，并延迟破坏时间，该抑制作用随钢纤维掺量的增加而增强。

对 28 天龄期砂浆及不同钢纤维掺量 SFRC 试样的试验结果进行统计，以普通混凝土为基准进行归一化处理，得出受压各阶段的归一化 AE、MS 能率和振率，如图7和图8所示。

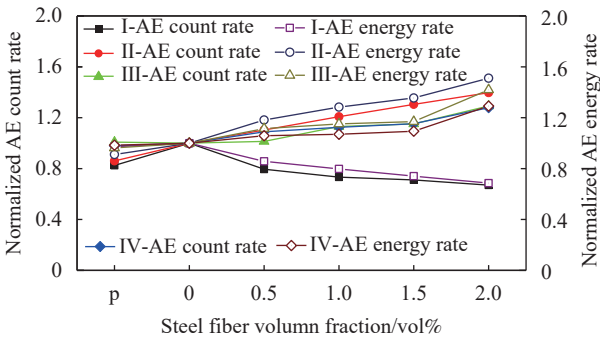


图7 SFRC 试样归一化 AE 能率及振率与钢纤维掺量关系  
Fig. 7 Relationship between normalized AE energy rate, counts rate and steel fiber volume fraction for SFRC

可以看出：砂浆受压 4 个阶段的 AE 能率、振率均低于素混凝土；砂浆受压第 I 阶段的 MS 能率及振率均低于素混凝土，第 II 阶段的 MS 振率低

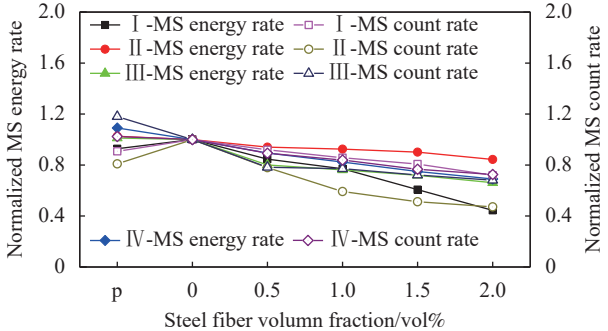


图8 SFRC 试样归一化 MS 能率及振率与钢纤维掺量关系  
Fig. 8 Relationship between normalized MS energy rate, counts rate and steel fiber volume fraction for SFRC

于素混凝土而能率略高于素混凝土，第 III、IV 阶段的 MS 能率及振率均高于素混凝土。钢纤维掺量不超过 2.0vol% 时，除第 I 阶段的 AE 能率及振率随钢纤维掺量的增加而减小外，其余 3 个阶段均随钢纤维掺量的增加而增大；4 个阶段的 MS 能率、振率均随钢纤维掺量的增加而减小。

AE、MS 监测结果表明：随着钢纤维掺量的增加，试样内部单条微观裂纹或细、宏观裂纹的扩展受钢纤维抑制的情况下，除压密阶段(第 I 阶段)的试样微观裂纹的整体扩展速率减小外，其余 3 个阶段微观裂纹的整体扩展速率均增大，但 4 个阶段细、宏观裂纹的整体扩展速率均降低，钢纤维的掺入抑制了细、宏观裂纹的扩展。

3 SFRC 受压各阶段裂纹扩展规律及机制

AE 信号是由 SFRC 内部微观裂纹萌生、扩展，裂纹附近颗粒在其平衡位置附近振动引起的，主要反映材料破裂微观过程。随着应力水平提高，SFRC 内部微观裂纹扩展、交叉贯通，形成细观和宏观裂纹，试样局部空间位置发生突变，使整个试样以相近的幅值和较低频率振动，产生 MS 信号<sup>[5, 11-14]</sup>。因此，分析 AE、MS 信息，可揭示材料内部裂纹发展规律及其机制。在前述龄期及钢纤维掺量对 SFRC 受压各阶段 AE、MS 信号响应规律和裂纹扩展影响分析的基础上，对它们间的形成机制分析如下：

(1) 随着龄期增加，混凝土试样的孔隙率下降<sup>[24]</sup>；体积掺量不超过 2.0vol% 时，钢纤维掺入后，试样硬化收缩减小，原始微观裂纹减少<sup>[25]</sup>。在上述因素的共同作用下，SFRC 受压第 I 阶段(裂纹压密阶段)的微观裂纹及细、宏观裂纹整体扩展速率随龄期(或钢纤维掺量)的增加而降低，表现为 AE、MS 的能率、振率均随龄期(或钢纤维掺



量)增加而减小。

由于粗骨料与砂浆浆体容易形成界面过渡区,加载时,试样内部界面过渡区中的微观裂纹比砂浆基体和粗骨料中的微观裂纹更易于发生扩展<sup>[26-27]</sup>,因此,砂浆压密阶段(第Ⅰ阶段)的微观裂纹整体扩展速率低于素混凝土,表现为砂浆第Ⅰ阶段的AE、MS能率及振率均低于素混凝土。

(2)在试样原始裂纹及新萌生裂纹扩展方面,试样单轴受压产生的裂纹类型主要为张开型(Ⅰ型)和滑开型(Ⅱ型)。以Ⅰ型裂纹为例,根据混凝土断裂损伤力学<sup>[28]</sup>,Ⅰ型裂纹的应力强度因子 $K_I$ 计算方法如下式所示:

$$K_I = Y\sigma_n \sqrt{\pi a} \tag{1}$$

式中: $\sigma_n$ 为名义拉应力; $a$ 为裂纹半长; $Y$ 为形状系数。

根据双 $K$ 断裂准则,当裂纹尖端应力强度因子达到起裂断裂韧度 $K_{Ic}^{ini}$ 时,裂纹起裂;当裂纹尖端应力强度因子大于 $K_{Ic}^{ini}$ 且小于失稳断裂韧度 $K_{Ic}^{un}$ 时,裂纹稳定发育;当裂纹尖端应力强度因子大于或等于 $K_{Ic}^{un}$ 时,裂纹失稳扩展。当Ⅰ型裂纹开始失稳扩展时,对应的应力如下式所示:

$$\sigma_n = \frac{K_{Ic}^{un}}{Y \sqrt{\pi a}} \tag{2}$$

随着龄期增加, SFRC 试样的 $K_{Ic}^{un}$ 增大<sup>[29]</sup>,孔隙孔径减小,原生裂纹尺寸也随之减小<sup>[24]</sup>。由式(2)可知,龄期越早,裂纹失稳扩展时应力水平越低。此外,低龄期的 SFRC 试样,凝胶与钢纤维表面的接触点较少<sup>[30]</sup>,钢纤维增韧阻裂作用不足。在上述两个因素的共同作用下,与低龄期试样相比,高龄期试样压密阶段(第Ⅰ阶段)中不同尺度裂纹的整体扩展速率相对较低,且具有明显的裂纹稳定发育阶段(第Ⅱ阶段)。因此,高龄期 SFRC 试样受压第Ⅰ、第Ⅱ阶段的 AE、MS 信号明显比低龄期的弱,且有比低龄期试样更加明显的第Ⅱ阶段(AE、MS 信号更低,该阶段的时长占比更长)。

SFRC 受压破坏过程中,钢纤维与基体共同抵抗变形破裂<sup>[1]</sup>。当钢纤维间距小于微观裂纹长度时,钢纤维较高的抗拉强度抑制了裂缝的进一步扩展和细、宏观裂纹的形成。当钢纤维间距大于微观裂纹长度时,微观裂纹扩展遇到纤维后,裂纹扩展方向改变或跨越钢纤维生成细小而密集的裂纹场<sup>[25]</sup>,试样进入“假塑性区”,导致细、宏观裂纹失稳扩展前, SFRC 试件衍生出比普通混凝土

土更多的微观裂缝<sup>[31]</sup>。因此, SFRC 试样受压第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ阶段的微观裂纹整体扩展速率随钢纤维掺量的增加而增大,细、宏观裂纹整体扩展速率则随钢纤维掺量的增加而减小。表现为第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ阶段的 AE 振率、能率随钢纤维掺量的增加而增大,但 MS 振率、能率随钢纤维掺量的增加而减小。

砂浆均质度较高,内部微观裂纹易于沿原裂纹壁面进一步扩展并交汇贯通形成主破裂面,新产生的微观裂纹相对较少。素混凝土由于粗骨料的存在,裂纹容易在骨料-浆体界面或砂浆浆体内产生,在扩展过程中遇到粗骨料则被迫改变扩展方向,同时产生更多的新微观裂纹<sup>[27]</sup>。表现为受压第Ⅲ、Ⅳ阶段,砂浆的 AE 能率、振率低于素混凝土,但 MS 能率、振率高于素混凝土。

4 基于声震的 SFRC 主破裂前兆及判据

在材料和混凝土配比相同的条件下,龄期和钢纤维掺量是影响 SFRC 力学性能的最主要因素。前述试验分析表明, SFRC 试样受压破裂各阶段的 AE 和 MS 能率、振率等均与龄期和钢纤维掺量密切相关。因此,可选取它们中与临近破坏密切相关的参数作为 SFRC 主破裂的前兆特征指标,并根据该指标随时间的变化率提出相应裂纹失稳扩展判据。限于篇幅,本文仅列出典型试样分析如下。

4.1 SFRC 裂纹失稳扩展前兆特征

AE、MS 信号分别反映了脆性材料破裂过程中微观裂纹和细、宏观裂纹的发育情况<sup>[5,11-14]</sup>。SFRC 失稳前常伴随细、宏观裂纹的大量出现。基于此,提出加载至 $t$ 时刻的 MS 累计能量与声震累计总能量之比 $\alpha_t$ ,计算如下:

$$\alpha_t = \frac{\sum_0^t E_{ms}}{\sum_0^t E_{ae} + \sum_0^t E_{ms}} \times 100\% \tag{3}$$

式中: $\alpha_t$ 为 $t$ 时刻的 MS 能量占比; $E_{ae}$ 、 $E_{ms}$ 分别为声发射和微震能量。

以 25 s 时间间隔计算 AE 的能率及振率、MS 的能率及振率及 MS 能量占比 $\alpha_t$ ,典型代表试样受压过程中的计算结果如图 9 所示。

可以看出: SFRC 试样裂纹失稳扩展前, AE 的能率及振率、MS 的能率及振率及 MS 能量占比

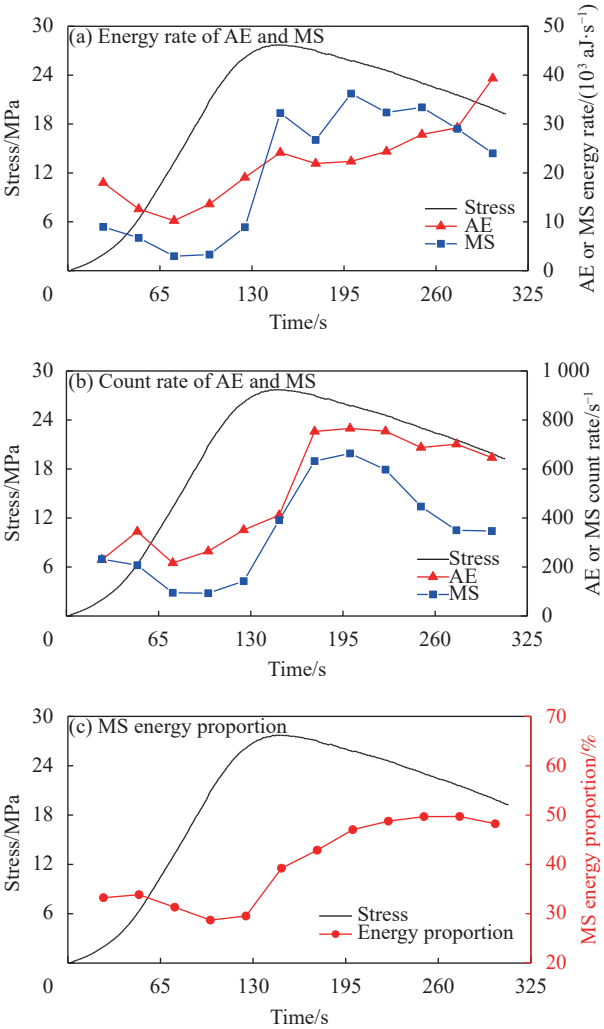


图9 龄期7天、掺量0.5vol%SFRC 试样的失稳前兆特征

Fig.9 Precursor index of SFRC with 0.5vol% steel fiber volume fraction at 7 days

$\alpha_t$ 均出现明显的陡增现象，可作为 SFRC 的失稳破坏前兆。

表 5 SFRC 试样不同特征指标变化的临界值

Table 5 Critical values of different characteristic indexes for SFRC

Age-volume fraction	AE critical value $\kappa_{un}$		MS critical value $\xi_{un}$		MS energy proportion $\varsigma_{un}$
	Energy rate	Count rate	Energy rate	Count rate	
3 d-0.5vol%	—	—	—	—	1.08
7 d-0.5vol%	1.33	1.22	2.70	1.53	1.03
28 d-0.5vol%	1.56	1.62	2.31	1.69	1.07
28 d-mortar	2.16	1.99	15.65	3.61	1.49
28 d-0vol%	1.62	1.96	3.89	1.77	1.24
28 d-1.0vol%	2.35	3.32	4.66	5.04	1.14
28 d-1.5vol%	1.53	1.31	3.44	2.52	1.08
28 d-2.0vol%	2.30	2.72	3.44	5.08	1.21

5 结论

(1) 钢纤维/混凝土 (SFRC) 单轴压缩过程中的

4.2 SFRC 受压裂纹失稳扩展判据

3 类特征指标 (AE 的能率和振率、MS 的能率和振率及 MS 能量占比) 的数值陡增可作为 SFRC 进入裂纹失稳扩展阶段的预警指标。可根据 3 类指标随时间的变化，提出 SFRC 裂纹失稳扩展判据：

AE判据： $\kappa_t \geq \kappa_{un}$  (4)

MS判据： $\xi_t \geq \xi_{un}$  (5)

能量占比判据： $\varsigma_t \geq \varsigma_{un}$  (6)

式中： $\kappa_t$ 、 $\xi_t$ 、 $\varsigma_t$ 分别为加载到  $t$  时的 3 类指标数值与加载过程中稳定值 (该指标在裂纹稳定发育阶段的数值) 的比值； $\kappa_{un}$ 、 $\xi_{un}$ 、 $\varsigma_{un}$ 分别为裂纹失稳扩展时 3 类指标变化的临界值。

当 3 类指标随时间的变化达到相应临界值，可判定 SFRC 进入裂纹失稳扩展阶段。本文把该临界值取值为指标突增时数值与稳定时数值的比值，根据试验结果，计算 3 类指标变化的临界值，如表 5 所示。

基于本文的研究结论，提出利用 AE、MS 监测技术对普通混凝土、SFRC 受载裂纹状态评估的建议如下：

(1) 普通混凝土、SFRC 结构的监测预警可采用 AE、MS 等监测技术。根据监测得到的能量、振铃值变化，结合本文得出的主要结论可对结构的损伤情况、变形破坏所处阶段、裂纹失稳扩展预警等进行分析 and 评判；

(2) 监测构件内部细、宏观裂纹时，应使用 MS 前兆指标，监测构件内部微观裂纹时，应使用 AE 前兆指标。如果同时采用 AE、MS 进行监测，宜优先采用 MS 能量占比  $\alpha_t$  作为前兆指标，它对龄期较早的试件也适用。

裂纹发展依次可分为裂纹压密、裂纹稳定发育、裂纹急速扩展和峰后破坏 4 个阶段，各阶段均有

声发射(AE)和微震(MS)信号产生。龄期超过7天的试样,微观裂纹呈“快速扩展-稳定扩展-急速扩展”三阶段特征,而细、宏观裂纹呈“缓慢扩展-急速扩展”两阶段特征。

(2)随着龄期增加,裂纹压密和裂纹稳定发育阶段的AE、MS能率和振率逐渐减小;裂纹急速扩展阶段、峰后破坏阶段的AE、MS能率和振率逐渐增加。AE、MS监测结果表明,SFRC微观裂纹及细、宏观裂纹的整体扩展速率,在裂纹压密和裂纹稳定发育阶段随龄期增加而降低,在急速扩展和峰后破坏阶段随龄期增加而增大。

(3)钢纤维/掺量不超过2.0vol%的SFRC,除裂纹压密阶段外,其余3个阶段的AE能率、振率均随钢纤维掺量的增加而增大;4个阶段的MS能率和振率均随钢纤维掺量的增加而减小;MS能量突增点的时间比则随钢纤维掺量的增加逐渐增大。AE、MS监测结果表明,随着钢纤维掺量增加,除裂纹压密阶段微观裂纹整体扩展速率减小外,其余3个阶段的微观裂纹整体扩展速率均增大,但受载破坏全过程中的细、宏观裂纹整体扩展速率均降低;钢纤维的掺入主要作用在于抑制细、宏观裂纹的产生和加速扩展,并延迟SFRC的破坏时间。

(4)SFRC失稳前,AE和MS能率、振率、MS能量占比均会出现明显陡增现象,可作为SFRC的失稳前兆;提出了基于AE及MS的SFRC裂纹失稳扩展判据。

参考文献:

[1] 张秀芝,毕梦迪,刘同军,等. 钢纤维混凝土中纤维分布特性影响因素研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(8): 1732-1742.  
ZHANG Xiuzhi, BI Mengdi, LIU Tongjun, et al. Research progress in factors affecting fiber distribution in steel fiber concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(8): 1732-1742(in Chinese).

[2] 赵人达,赵成功,原元,等. UHPC中钢纤维的应用研究进展[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 1-22.  
ZHAO Renda, ZHAO Chenggong, YUAN Yuan, et al. Research progress on application of steel fiber in ultra high performance concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(8): 1-22(in Chinese).

[3] 刘善军,张艳博,吴立新,等. 混凝土破裂与渗水过程的红外辐射特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 53-58.  
LIU Shanjun, ZHANG Yanbo, WU Lixin, et al. Infrared radiation feature of concrete during fracturing and water seepage process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 53-58(in Chinese).

[4] 刘贞堂,李学龙,李忠辉,等. 单轴压缩下混凝土孔洞内壁表面电位特征[J]. 煤炭学报, 2014, 39(S2): 372-377.  
LIU Zhentang, LI Xuelong, LI Zhonghui, et al. Electric potential of the hole wall of concrete under uniaxial compression[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S2): 372-377(in Chinese).

[5] 赖于树,熊燕,程龙飞. 混凝土受载试验全过程声发射特性研究与应用[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(3): 380-386.  
LAI Yushu, XIONG Yan, CHENG Longfei. Study of characteristics of acoustic emission during entire loading tests of concrete and its application[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(3): 380-386(in Chinese).

[6] RUSCH H. Physical problems in testing of concrete[J]. Zement-Kalk-Gips (Wiesbaden), 1959, 12 (1): 1-9.

[7] SOULIOTI D, BARKOULA N M, PAIPETIS A, et al. Acoustic emission behavior of steel fibre reinforced concrete under bending[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(12): 3532-3536.

[8] AGGELIS D G. Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters[J]. Mechanics Research Communications, 2011, 38(3): 153-157.

[9] 王金贵,张苏. 水泥材料静爆拉伸破裂微震显现特征[J]. 土木工程学报, 2017, 50(11): 18-23, 56.  
WANG Jingui, ZHANG Su. Characteristics of micro-seismic signals during static cracking process of cement mortar[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(11): 18-23, 56(in Chinese).

[10] 马克,庄端阳,唐春安,等. 基于微震监测的大岗水电站高拱坝廊道裂缝形成原因研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(7): 1608-1617.  
MA Ke, ZHUANG Duanyang, TANG Chun'an, et al. Study on formation causes of gallery cracks in Dagangshan high arch dam based on microseismic monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(7): 1608-1617(in Chinese).

[11] CARPINTERI A, LACIDOGNA G, MANUELLO A, et al. Mechanical and electromagnetic emissions related to stress-induced cracks[J]. Experimental Techniques, 2012, 36(3): 53-64.

[12] JIANG R, DAI F, LIU Y, et al. Frequency characteristics of acoustic emissions induced by crack propagation in rock tensile fracture[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(4): 2053-2065.

[13] WANG Z, NING J, REN H. Frequency characteristics of the released stress wave by propagating cracks in brittle materials[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2018, 96: 72-82.

[14] SCHIAVI A, NICCOLINI G, TARIZZO P, et al. Acoustic emissions at high and low frequencies during compression tests in brittle materials[J]. Strain, 2011, 47(s2): 105-110.

[15] 张艳博,梁鹏,田宝柱,等. 花岗岩灾变声发射信号多参量耦合分析及主破裂前兆特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,

- 2016, 35(11): 2248-2258.
- ZHANG Yanbo, LIANG Peng, TIAN Baozhu, et al. Multi parameter coupling analysis of acoustic emission signals of granite disaster and the precursor characteristics of the main rupture[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(11): 2248-2258(in Chinese).
- [16] 中国工程建设标准化协会. 纤维混凝土试验方法标准: CECS 13—2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- Construction Standard (Recommended) of the People's Republic of China. Standard test methods for fiber reinforced concrete: CECS 13—2009[S]. Beijing: China Planning Press, 2010(in Chinese).
- [17] 朱旻, 陈湘生, 王雪涛. 盾构隧道衬砌结构性能演化分析与思考[J]. *工程力学*, 2022, 39(3): 33-50.
- ZHU Min, CHEN Xiangsheng, WANG Xuetao. Analysis and thinking on structural performance evolution of shield tunnel lining[J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(3): 33-50(in Chinese).
- [18] 刘新荣, 祝云华, 李晓红, 等. 隧道钢纤维喷射混凝土单层衬砌试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(8): 2319-2323.
- LIU Xinrong, ZHU Yunhua, LI Xiaohong, et al. Experimental research on single-layer tunnel lining of steel fiber shotcrete[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8): 2319-2323(in Chinese).
- [19] 余睿, 范定强, 孙美娟, 等. 钢纤维掺量及其3D空间结构对超高性能混凝土性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(11): 2313-2321.
- YU Rui, FAN Dingqiang, SUN Meijuan, et al. Effects of steel fibre content and 3D network on performance of ultra-high performance concrete[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(11): 2313-2321(in Chinese).
- [20] 交通部公路科学研究所. 公路水泥混凝土路面施工技术规范: JTGF 30—2003[S]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- Ministry of Communications Highway Scientific Research Institute. Technical specification for construction of highway cement concrete pavement: JTGF 30—2003[S]. Beijing: China Communications Press, 2003(in Chinese).
- [21] 中华人民共和国行业标准编写组. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Specification for mix proportion design of ordinary concrete: JGJ 55—2010[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011(in Chinese).
- [22] 蔡向荣, 徐世烺. UHTCC单轴受压韧性的试验测定与评价指标[J]. *工程力学*, 2010, 27(5): 218-224.
- CAI Xiangrong, XU Shilang. Experimental measurement and evaluation indexes of toughness properties for UHTCC under uniaxial compression[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(5): 218-224(in Chinese).
- [23] 郭庆华, 邵保平, 李志伟, 等. 混凝土声发射信号频率特征与强度参数的相关性试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(4): 1482-1488.
- GUO Qinghua, XI Baoping, LI Zhiwei, et al. Experimental research on relationship between frequency characteristics of acoustic emission and strength parameter in concrete[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(4): 1482-1488(in Chinese).
- [24] 刘鹏, 余志武, 陈令坤. 养护龄期对水泥混凝土性能和微观结构的影响[J]. *建筑材料学报*, 2012, 15(5): 717-723.
- LIU Peng, YU Zhiwu, CHEN Lingkun. Influence of curing age on properties and microstructure of concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2012, 15(5): 717-723(in Chinese).
- [25] 张虎. 自密实钢纤维轻骨料混凝土的早期性能与损伤分析[J]. *材料导报*, 2017, 31(20): 124-128.
- ZHANG Hu. Early capability and damage analysis of self-compacting, steel-fiber-reinforced light weight aggregate concrete[J]. *Materials Reports*, 2017, 31(20): 124-128(in Chinese).
- [26] 吴胜兴, 王岩, 沈德建. 混凝土及其组成材料轴拉损伤过程声发射特性试验研究[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(7): 21-27.
- WU Shengxing, WANG Yan, SHEN Dejian. Experimental study on acoustic emission characteristics of the damage process of concrete and its components under uniaxial tension[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(7): 21-27(in Chinese).
- [27] 李冬, 金洵, 杜修力, 等. 混凝土I-型细观断裂模型及其在材料层次尺寸效应中的应用[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(2): 48-61.
- LI Dong, JIN Liu, DU Xiuli, et al. Concrete mode-I meso-scale fracture model and its application in analysis of size effect at material level[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(2): 48-61(in Chinese).
- [28] 李庆斌. 混凝土断裂损伤力学[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 50-66.
- LI Qingbin. Fracture damage mechanics of concrete[M]. Beijing: Science Press, 2017: 50-66(in Chinese).
- [29] 管俊峰, 李庆斌, 吴智敏, 等. 现场浇筑大坝混凝土断裂参数与等效成熟度关系研究[J]. *水利学报*, 2015, 46(8): 73-81.
- GUAN Junfeng, LI Qingbin, WU Zhimin, et al. Relationship between fracture parameters with an equivalent maturity of site-casting dam concrete[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(8): 73-81(in Chinese).
- [30] 吴林妹, 史才军, 张祖华, 等. 钢纤维对超高性能混凝土干燥收缩的影响[J]. *材料导报*, 2017, 31(23): 58-65.
- WU Linmei, SHI Caijun, ZHANG Zuhua, et al. Effects of steel fiber on drying shrinkage of ultra high performance concrete[J]. *Materials Reports*, 2017, 31(23): 58-65(in Chinese).
- [31] 张廷毅, 高丹盈, 王宝庭. 三点弯曲下钢纤维高强混凝土张开位移[J]. *水利学报*, 2010, 41(10): 1193-1200.
- ZHANG Tingyi, GAO Danying, WANG Baoting. Opening displacement of steel fiber reinforced high strength concrete under three-point bending[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(10): 1193-1200(in Chinese).