

GFRP管约束内含木柱的钢纤维混凝土轴压损伤声发射信号表征

余艳华 周灵杰 谢玉强 黄俊杰

Acoustic emission signal characterization of axial compression damage of steel fiber reinforced concrete containing wood columns confined by GFRP tube

SHE Yanhua, ZHOU Lingjie, XIE Yuqiang, HUANG Junjie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250228.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

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>

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>

玻璃纤维增强聚合物复合材料约束壁式钢管混凝土短柱轴压性能试验

Experiment on axial compression performance of glass fiber reinforced polymer-walled concrete-filled steel tube columns

复合材料学报. 2021, 38(6): 1825–1837 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200827.001>

基于分形理论的玻璃纤维增强树脂复合材料-混凝土组合梁损伤特性

Damage characteristics of glass fiber reinforced polymer-concrete composite beams based on fractal theory

复合材料学报. 2021, 38(6): 1870–1881 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200904.001>

基于声发射技术的非标准自密实混凝土三点弯曲梁动态断裂特性

Dynamic fracture characteristics of non-standard three-point bending self-compacting concrete beams based on acoustic emission

复合材料学报. 2021, 38(2): 630–640 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200608.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

GFRP 管约束内含木柱的钢纤维混凝土轴压损伤声发射信号表征



分享本文

余艳华*, 周灵杰, 谢玉强, 黄俊杰

(长江大学 城市建设学院, 荆州 434023)

摘要: 利用声发射 (Acoustic emission, AE) 技术研究了不同钢纤维体积掺量 (0、1%、1.5% 和 2%) 玻璃纤维增强塑料管 (Glass-fiber reinforced plastic tube, GFRP tube) 约束内含木柱的钢纤维混凝土在轴向荷载作用下的力学性能和损伤演化过程。结果表明, 1.5% 体积掺量的钢纤维为最适掺量, 提高了试件 35.7% 的极限承载力和 4.73% 的位移延性系数; 根据声发射振铃计数特征, 钢纤维的掺入降低了声发射信号强度, 当声发射信号的峰值频段由低频段 (0~100 kHz) 逐渐向高频段 (200~300 kHz) 过度时, 损伤形式从大尺度损伤逐渐转变为小尺度损伤; 声发射 RA-AF 分析法的结果表明, 钢纤维的掺入增加了试件的裂纹数量和扩展的范围, 减小了宏观裂纹的宽度, 提高了剪切裂纹的比例; 建立了基于声发射累积事件数和应力的损伤演化模型, 其参数 m 值越大, 试件脆性越小, 说明该模型可以反映试件损伤演化规律。

关键词: 钢纤维混凝土; GFRP; 木柱; 声发射; 损伤演化模型

中图分类号: TB333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)12-7087-11

Acoustic emission signal characterization of axial compression damage of steel fiber reinforced concrete containing wood columns confined by GFRP tube

SHE Yanhua*, ZHOU Lingjie, XIE Yuqiang, HUANG Junjie

(School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract: In this paper, acoustic emission (AE) technology was used to study the mechanical properties and damage evolution process of steel fiber reinforced concrete- and wood-filled GFRP tubes with different steel fiber volume fractions (0, 1%, 1.5% and 2%) under axial compression. The results showed that the steel fiber with 1.5% volume content was the optimal content, which increased the ultimate bearing capacity of the specimen by 35.7% and the displacement ductility coefficient by 4.73%. According to the characteristics of acoustic emission ringing counts, the addition of steel fibers reduces the intensity of acoustic emission signals. When the peak frequency band of acoustic emission signals gradually transitions from low frequency range (0—100 kHz) to high frequency range (200—300 kHz), the damage form gradually changes from large-scale damage to small-scale damage. The results of RA-AF analysis showed that the incorporation of steel fiber increased the number of cracks and the range of crack propagation, reduced the width of macroscopic cracks and increased the proportion of shear cracks. The damage evolution model based on the cumulative number of acoustic emission events and stress has been established. The larger the parameter m value, the smaller the brittleness of the specimen, indicating that the model can reflect the damage evolution law of the specimen.

Keywords: steel fiber reinforced concrete; GFRP; wood column; acoustic emission; damage evolution model

收稿日期: 2024-12-12; 修回日期: 2025-01-30; 录用日期: 2025-02-20; 网络首发时间: 2025-02-28 13:25:23

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250228.001>

基金项目: 国家自然科学基金 (51408057)

National Natural Science Foundation of China (51408057)

通信作者: 余艳华, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为工程材料和结构检测 E-mail: syh916@126.com

引用格式: 余艳华, 周灵杰, 谢玉强, 等. GFRP 管约束内含木柱的钢纤维混凝土轴压损伤声发射信号表征 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(12): 7087-7097.

SHE Yanhua, ZHOU Lingjie, XIE Yuqiang, et al. Acoustic emission signal characterization of axial compression damage of steel fiber reinforced concrete containing wood columns confined by GFRP tube[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(12): 7087-7097(in Chinese).

混凝土是最常用的土木建筑材料,在服役过程中会受到各种复杂环境因素的影响^[1],使其内部产生裂纹,承载力下降,而硅酸盐水泥作为混凝土重要的组成部分,在工作时会释放大量的二氧化碳污染环境,同时混凝土自重大,给结构安全带来了潜在威胁。这就要求建筑物在具有较好承载力的情况下,还具备耐腐蚀、强度高、质量轻和环保的特性。于是各种轻质、环保、高强度的混凝土复合材料发展了起来^[2-4]。

玻璃纤维增强塑料管 (Glass-fiber reinforced plastic tube, GFRP tube) 因较好的耐腐蚀性、更高的变形性能和更好的冲击性能在土木结构领域应用越来越广泛。同时钢纤维作为一种高刚度、高抗拉强度的材料,将其适量的添加到混凝土中后,钢纤维可以提供裂纹桥接作用,防止混凝土裂纹的生长和扩展,提高其抗冲击、抗拉、抗压、弯曲强度和延性^[5-8]。其次,为克服混凝土自重大和污染环境这些弱点,木材和混凝土材料结合从而形成木-混凝土复合材料,这不仅能减少硅酸盐水泥的用量,降低二氧化碳的排放,还能提高混凝土结构的延性和能量吸收^[9],且在保证与原结构同等承载力的情况下减轻结构自重^[10-11]。因此,综合 GFRP、钢纤维和木材的各个优点,本文设计了 GFRP 管约束内含木柱的钢纤维混凝土的复合材料,分析其力学性能和在受荷过程中的损伤演化情况,为复合材料的应用提供有力的评价。

随着无损技术的发展,声发射 (Acoustic emission, AE) 技术在由钢纤维、木材、纤维增强塑料 (FRP) 和混凝土材料的损伤监测中表现出独特的优势。Banjara 等^[12]通过声发射累积能量、振铃计数和幅值等参数反映了 GFRP 加固混凝土梁在剪切破坏过程中不同类型裂纹的萌生和扩展。Diakhate 等^[13]的研究表明,声发射技术结合有限元分析能够清晰监测木材内部裂纹的扩展情况。此外,这些声发射参数还能用于划分混凝土开裂的不同阶段^[14]。Ren 等^[15]研究了钢纤维含量对钢纤维混凝土在劈裂损伤过程中的声发射信号特征的影响,结果显示,声发射计数和能量与混凝土基体开裂及钢纤维含量密切相关。由于钢纤维在混凝土基体中的受力脱粘与拔出过程类似于钢筋混凝土中钢筋的粘结滑移行为,声发射技术在监测钢筋混凝土中钢筋的受力拔出过程中也展现了显著优势。Zhang 等^[16]利用声发射小波变换研究

了冻融环境下钢纤维混凝土的动态劈裂拉伸损伤,发现掺入钢纤维能够有效抑制裂纹扩展。从小波能量分析的角度来看,高频小波能谱系数随着裂纹数量增加而升高,而低频小波能谱系数则相反。邱继生等^[17]基于钢纤维煤矸石混凝土在受压过程中释放的声发射能量,定义了损伤变量并建立了损伤演化模型。研究表明,声发射特性参数与钢纤维煤矸石混凝土内部裂纹的形成、扩展和贯通密切相关,而钢纤维含量直接影响声发射信号的强度。Li 等^[18]通过分形理论分析了钢纤维混凝土的裂纹分形特征,结果显示裂纹分形维数与钢纤维含量呈正相关。较高钢纤维含量的混凝土裂纹群发展得更为广泛且完整,导致混凝土表面更加破碎,砂浆脱落面积更大。因此,钢纤维的掺量对钢纤维复合材料的性能具有至关重要的影响。

本文采用声发射技术对 4 组不同钢纤维掺量的 GFRP 管约束内含木柱的钢纤维混凝土复合材料的轴向压缩损伤过程进行了实时监测,分析了其力学性能、声发射信号特征、裂纹扩展特征和内部损伤程度,并在此基础上建立了基于声发射累积事件数和应力的损伤演化模型,为 GFRP 管约束内含木柱的钢纤维混凝土的损伤评估提供一定依据。

1 试验概况

1.1 原材料

以钢纤维体积含量 (0%、1%、1.5% 和 2%) 为变量制作了 4 组尺寸为 106 mm×106 mm×200 mm 的 GFRP 管约束内含木柱的钢纤维混凝土试件,分别命名为 SF-0, SF-1, SF-1.5 和 SF-2。混凝土采用强度等级为 42.5 MPa 的普通硅酸盐水泥 (诸城市杨春水泥有限公司),细骨料为天然河砂 (粒径 0.15~2 mm, 湖北砂石易建材有限公司),粗骨料为天然碎石 (粒径 5~15 mm, 湖北砂石易建材有限公司),水灰比为 0.52。依据国家标准 GB/T 50107—2010^[19]制作试件,混凝土材料参数见表 1。钢纤维由供应商提供,其尺寸及力学性能参数详见表 2。GFRP 管的截面尺寸为 106 mm×106 mm,高度为 200 mm,壁厚为 3 mm,由瑞康玻璃钢有限公司提供,参数见表 3。木材选自中国东北地区的樟子松,尺寸为 60 mm×200 mm (直径×高度),含水率为 8%~13%,参数如表 4 所示。

1.2 试验制备

为便于试件的制备,设计了若干 300 mm×

表 1 混凝土配合比

Table 1 Mix proportion of core concrete

Specimen ID	Unit weight/(kg·m ⁻³)					
	Water	Cement	Sand	Gravel	Plasticizer	Steel fiber
SF-0	221.3	423.5	810.1	916.5	2.5	0 (0%)
SF-1	228.7	433.2	811.9	901.4	2.5	79.3 (1%)
SF-1.5	237.7	445.6	801.3	892.8	2.5	115.2 (1.5%)
SF-2	245.3	452.2	806.3	880.2	2.5	156.8 (2%)

Notes: SF-1 indicates that the steel fiber volume content is 1%; The values in parentheses represent the volume content of steel fibers.

表 2 钢纤维物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical properties of hooked steel fiber

Dimension	Density/(kg·m ⁻³)	Tensile strength/MPa	Elasticity modulus/GPa	Poisson ratio	
15 mm×Φ2 mm	7.85	2 900	200	0.25	

Note: Φ—Diameter.

表 3 玻璃纤维增强塑料 (GFRP) 管的基本力学性能

Table 3 Basic mechanical properties of glass-fiber reinforced plastic (GFRP) tube

Direction of fiber molding	Elastic modulus/MPa	Tensile strength/MPa	Compressive strength/MPa
Longitudinal direction	14 132	271	120
Lateral direction	9 962	180	120

表 4 木材材料性能

Table 4 Material properties of wood

Density/(kg·m ⁻³)	Elastic modulus/MPa	Tensile strength/MPa	Compressive strength/MPa
0.45	11 000	52	40

300 mm×40 mm 定位试件的木板, 在木板中心处切割了一个与木材直径相同的圆柱形空心部分用于固定木材, 同时在木板相应位置切割了 4 个与木销尺寸相同的孔洞, 试件被放置在定位板中间并对齐, 将木销插入孔洞定位试件, 见图 1(a)~图 1(c)。参照规范 JG/T 472—2015^[20], 钢纤维以多次少剂量均匀分散加入到混凝土中, 将搅拌完成后的钢纤维混凝土倒入模具中并用河北晟兴仪器设备有限公司生产的 HZJ-A 混凝土振动台振实, 见图 1(d)。24 h 后拆除定位板, 并使用河北大宏实验仪器有限公司生产的 HMP-150 打磨机平整表面, 在标准养护条件下养护 28 天。养护完后的试样和具体尺寸见图 1(e) 和图 1(f)。

1.3 试验设备

试验设备由 WAW-1000 B 微机电液伺服万能试验机、DH3816 N 位移采集系统 (上海松顿机械设备有限公司) 和 DS5 声发射采集系统 (北京软岛时代科技) 组成。声发射传感器纵向等距排列在试件两侧, 共 6 个传感器, 压力机左右两侧放置线性差动位移传感器 (LVDT) 用于测定压力机竖向加载位移, 具体见 图 2。测试之前根据 ISO

12713:1998^[21]、ISO 12714:1999^[22] 和 ASTM E976-15^[23] 对 AE 系统进行调整, 为了降低噪音的影响, 通道门限值设为 20 mV, 传感器频率范围为 20~400 kHz, 前置放大器增益为 20~40 dB。

试验加载方式选择轴向位移加载方式, 加载速率保持 0.2 mm/min, 加载过程中同步进行声发射信号采集和 DN3816 N 静态信号采集, 加载装置如图 2 所示。

2 力学性能分析

2.1 荷载-位移曲线分析

图 3 比较了各组试件的轴压荷载位移曲线。可以看出, 各组试件荷载位移曲线趋势相似, 且均出现了 3 个典型区域 (Region1~Region3), 这说明试件内部发生了 3 处明显的破坏, 试件 SF-2 荷载位移曲线出现了多次连续的抖动, 这可能是由钢纤维受力或间断受力引起的。各试件峰值荷载和位移延性系数具体数值如表 5 所示。试件 SF-0、SF-1、SF-1.5 和 SF-2 的峰值荷载分别为 328 kN、402 kN、445 kN 和 404 kN、位移延性系数分别为 3.38、3.48、3.54 和 3.23, 与未掺入钢纤维的试件

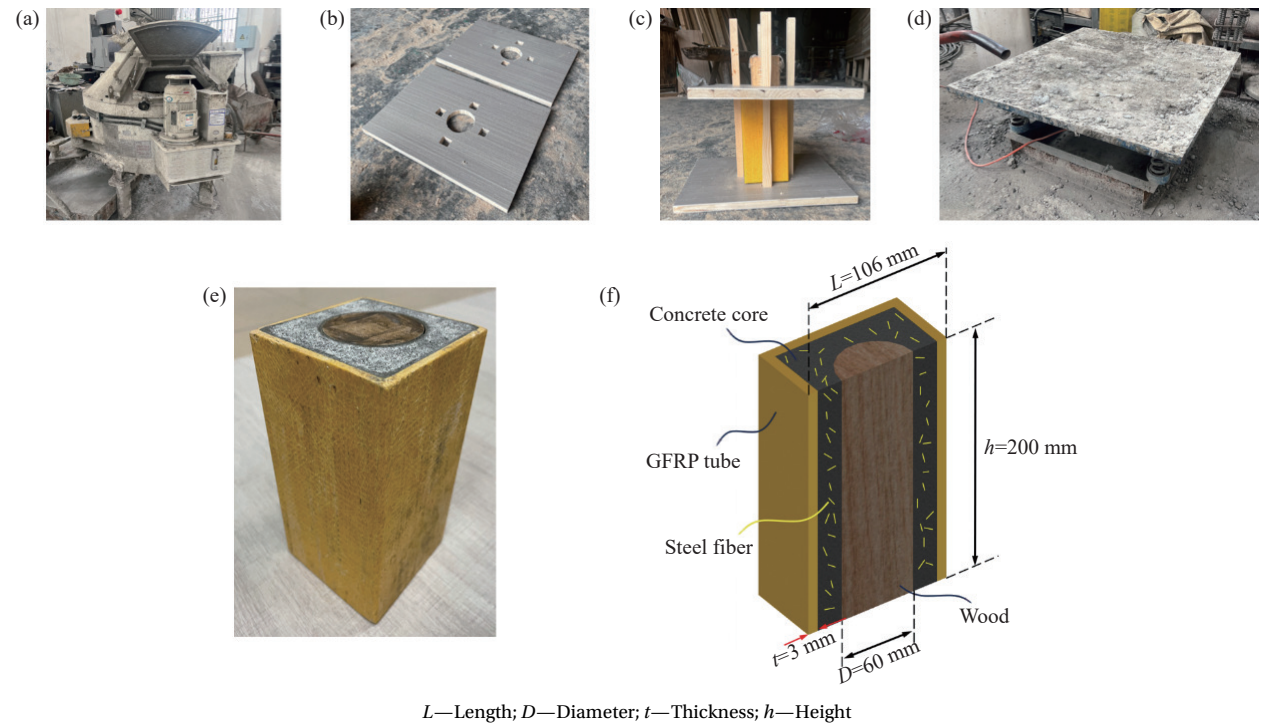


图1 试件的制备: (a) 混凝土搅拌机; (b) 定位板; (c) 试件的固定; (d) 振动台; (e) 试验前的试样; (f) 试件的尺寸

Fig. 1 Preparation of specimen: (a) Concrete mixer; (b) Positioning board; (c) Fixation of specimen; (d) Shaking table; (e) Specimen before testing; (f) Size of specimen

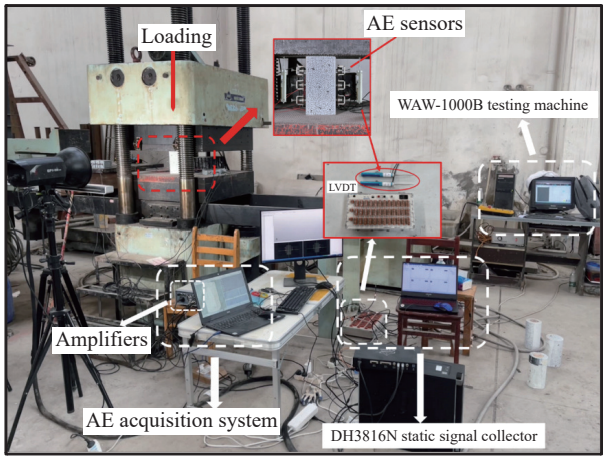


图2 加载装置

Fig. 2 Loading equipment

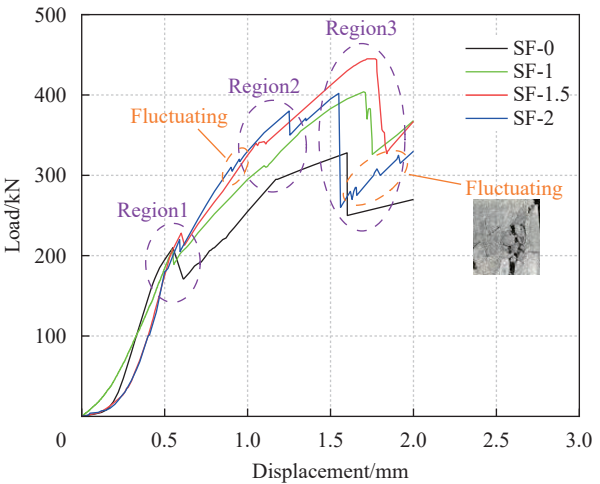


图3 不同钢纤维含量混凝土试件轴向荷载-位移曲线

Fig. 3 Axial load-displacement curves of concrete specimens with different steel fiber contents

表5 不同钢纤维含量混凝土试件峰值荷载和位移延性系数

Table 5 Peak load and displacement ductility coefficient of concrete specimens with different steel fiber contents						
Specimen	Peak load/kN	$\Delta y/mm$	$\Delta u/mm$	μ	Increase of peak load/%	
SF-0	328	0.47	1.59	3.38	0	
SF-1	402	0.49	1.71	3.48	22.6	
SF-1.5	445	0.50	1.77	3.54	35.7	
SF-2	404	0.48	1.55	3.23	23.2	

Notes: Δy —Displacement of concrete specimens under peak load; Δu —Displacement when the load drops to 0.75 peak load; μ —Displacement ductility coefficient.

SF-0 相比, 钢纤维体积掺量为 1%、1.5% 和 2% 的试件峰值荷载分别提高了 22.6%、35.7% 和 23.2%, 钢纤维体积掺量为 1%、1.5% 位移延性系数比未掺入钢纤维的试件相比分别提高了 2.96% 和 4.73%, 钢纤维体积掺量为 2% 位移延性系数降低了 4.44%。

通过以上分析可知, 1.5% 的钢纤维掺量的试件峰值荷载和位移延性系数最高, 且提升幅度最大, 与其相比, 2% 的钢纤维掺量的试件力学性能反而降低了。可见, 适量钢纤维的掺入可以提高试件的极限承载力和延性, 而过量掺入则会适得其反, 导致宏观破坏的提前。因为掺入钢纤维能够在混凝土基体中形成不规则但致密的空间结构, 强化试件抗压性能, 提高结构延性, 所以延缓了试件的破坏, 但当钢纤维掺量达到一定程度后, 如继续提高掺量会使得纤维产生团聚现象, 导致纤维难以均匀分布, 这将会降低纤维混凝土密实度, 导致试件的极限承载力下降, 增大试件脆性破坏的可能性。综上所述, 钢纤维体积掺量为 1.5% 时, 单轴压缩性能最优。

2.2 破坏形式分析

试件整体和内部混凝土的破坏形式如图 4 所示, 可以看出试件整体的破坏特征均表现为 GFRP 管边缘断裂, GFRP 管中部与混凝土分离、鼓曲。加载过程中均能听到明显的破坏声, 相比于试件 SF-0, 其他 3 组试件的破坏声音明显减小, 且加载过程中还会出现持续低声。各试件具体破坏形式的差异主要体现在内部混凝土, 试件 SF-0 出现 3 条较宽的裂纹, 试件 SF-1 表现出相同数量的裂纹, 但裂纹宽度小于试件 SF-0, 而试件 SF-1.5 和 SF-2 的裂纹数量则明显增加, 宽度明显减

小。通过分析试件整体和内部混凝土的破坏形式表明, 钢纤维的掺入对试件整体的破坏形式影响不大, 其差异主要体现在内部混凝土裂纹的数量和尺度, 钢纤维的掺入传递了局部应力, 降低了损伤程度, 减小了试件宏观裂纹的宽度, 增加了微裂纹的数量。

3 声发射信号特征分析

3.1 AE 振铃计数特征

声发射特征参数与材料内部损伤密切相关, 声发射振铃计数、能量等特征参数能够表征钢纤维混凝土、木材和 GFRP 复合材料的受力损伤过程。

图 5 为试件过程中的荷载、振铃计数和累积振铃计数关系图, 从图中可看出所有试件的参数变化曲线均表现出相同的趋势, 并出现了声发射信号突增的 3 个特征区域 (A、B、C)。因此可将试件的损伤过程用 3 个标志事件来描述, 分别为混凝土开裂、木材开裂和 GFRP 管断裂。

从图 5 可知, 试件在受压初期产生少量声发射信号, 表现为较低的振铃计数。这主要是由于试验机压头与试件接触时的摩擦及对试件原始缺陷的挤压所致。随着初始缺陷被压实, 声发射信号逐渐活跃。当荷载加载至 A 点附近时, 振铃计数达到第一个峰值, 同时可听见明显的开裂声。其中, 试件 SF-0 的开裂声最为显著, 振铃计数峰值也最高 (试件 SF-0、SF-1、SF-1.5 和 SF-2 的最大振铃计数值分别为 371×10^2 、 15.8×10^2 、 1.9×10^2 和 16.8×10^2)。这表明, 钢纤维的加入优化了混凝土内部结构, 抑制了微裂纹的产生, 从而降低了声发射信号强度。然而, 当钢纤维体积掺量达到 2% 时, 振铃计数反而增加, 可能是由于钢纤维过量导致的结团现象降低了钢纤维与混凝土的界面粘结力, 增加了声发射信号强度。这一规律不仅体现在 A 点的声发射信号强度变化上, 在试件的整个损伤过程中, 声发射信号强度的整体变化趋势也类似。此外, 通过结合荷载-位移曲线可以推测, A 点所在的绿色区域可能发生了混凝土的初始开裂。

在第一个宏观开裂事件结束后, 振铃计数趋于平缓, 表明裂纹进入缓慢扩展阶段。直到荷载加载至 B 点, 荷载-位移曲线出现转折点, 振铃计数达到第二个峰值。这表明试件内部出现了新的宏观裂纹。然而, 与第一个峰值相比, 第二个峰

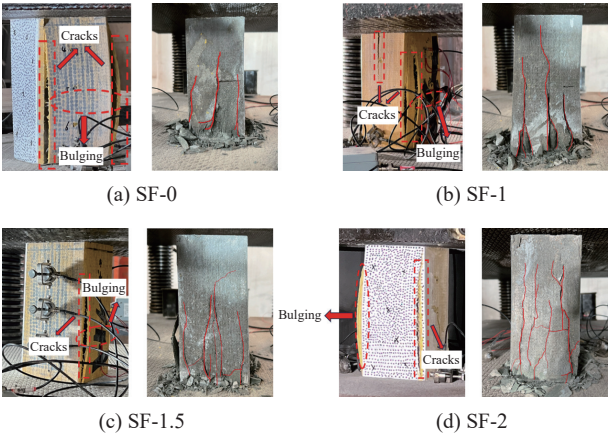


图 4 不同钢纤维含量混凝土试件整体和内部混凝土的破坏形式
Fig. 4 Failure modes of the whole and internal concrete of concrete specimens with different steel fiber contents

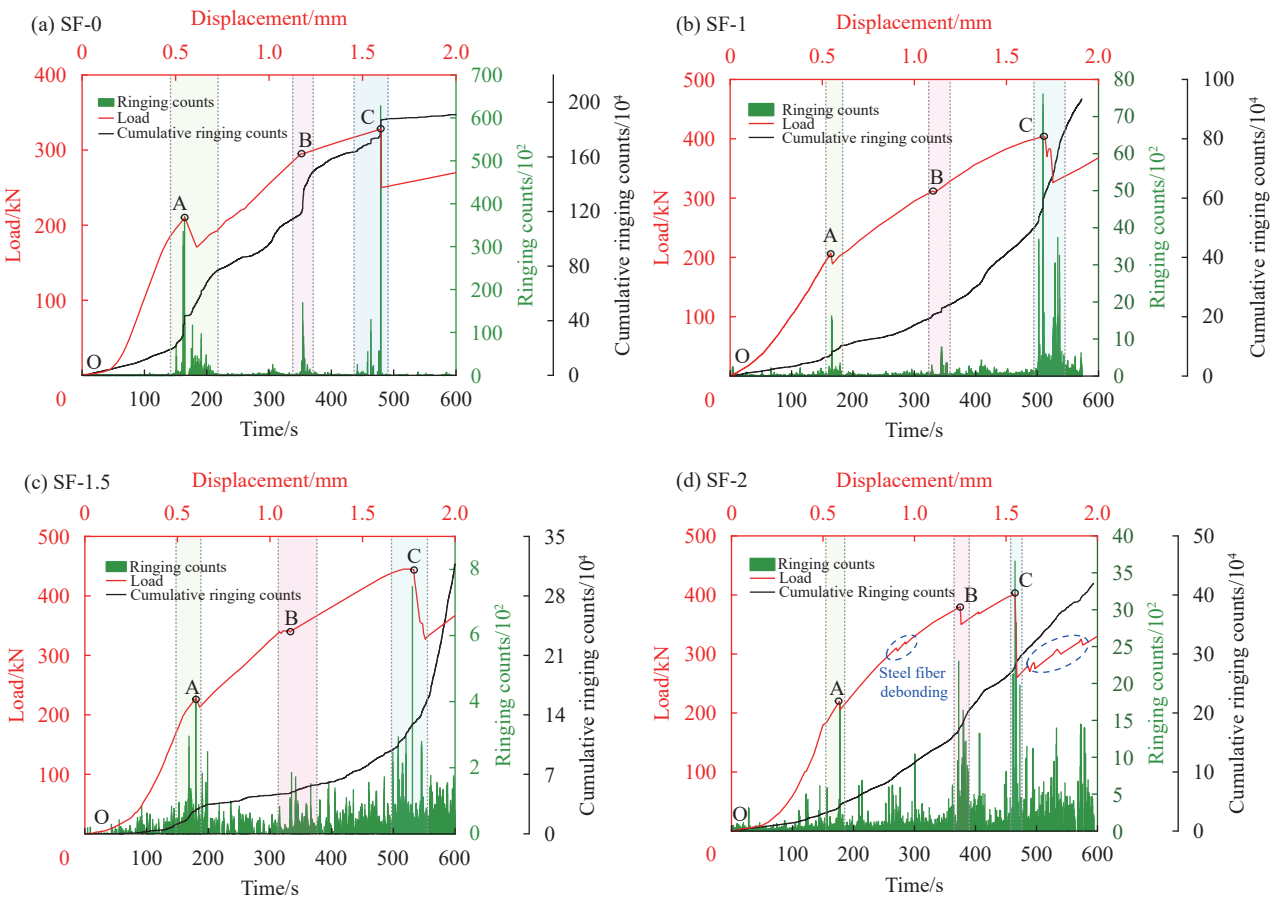


图5 不同钢纤维含量混凝土试件荷载和振铃计数随时间和位移的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of load and ringing counts with time and displacement of concrete specimens with different steel fiber contents

值的振铃计数显著降低。这是由于木材作为一种延性材料，其破坏时的声发射信号强度低于脆性较大的素混凝土。由此推测，B点所在的红色区域可能为木材的开裂现象。然而，对于掺入过量钢纤维的试件，这一规律变得不明显。这可能归因于以下两点：其一，钢纤维的过量掺入改变了试件各部分材料的受力特性，导致振铃计数和力学性能的变化；其二，即使试验木材均来自同一批次树木，其天然缺陷仍可能引起力学性能的差异。

随着加载继续进行，GFRP管开始出现明显的鼓屈现象，但尚未完全开裂。此阶段振铃计数变得密集，但未超过前两个峰值，表明试件内部发生了大量小尺度损伤事件，如钢纤维振动及脱粘现象^[24]。这些小裂纹逐渐扩展并合并，最终形成宏观裂纹。当荷载达到C点时，可清晰观察到GFRP管的断裂，此时振铃计数的第三个峰值产生。在GFRP管断裂后，掺入过量钢纤维的试件(如SF-2)还出现了钢纤维断续受力、拔出及脱粘

现象，从而产生了振铃计数密集高峰。通过上述分析可见，钢纤维的掺量对试件内部损伤过程及声发射信号的演化具有显著影响。合理掺量的钢纤维可有效改善材料性能，而过量掺入则可能带来不利影响。

3.2 声发射峰值频率特征

峰值频率是指声发射频域波形中最大振幅对应的频率，是通过每个声发射信号进行快速傅里叶变换(Fast Fourier transform, FFT)分析所提取到的^[25]，它可以反应材料损伤过程中裂纹的类型、大小和规模。一般来说，大尺度损伤或大裂纹对应低频信号，小尺度损伤或小裂纹对应高频信号。图6为各组试件峰值频率统计学箱形图，用于描述数据的分散情况，基于峰值频率的范围，将其分为3个峰值频段：低频段(0~100 kHz)、中频段(100~200 kHz)和高频段(200~300 kHz)。

从图中可以看出，各试件的箱形图的四分位间距逐渐变宽，箱体中位数偏向两端，其中试件SF-0的四分位间距最窄，试件SF-1.5的四分位间

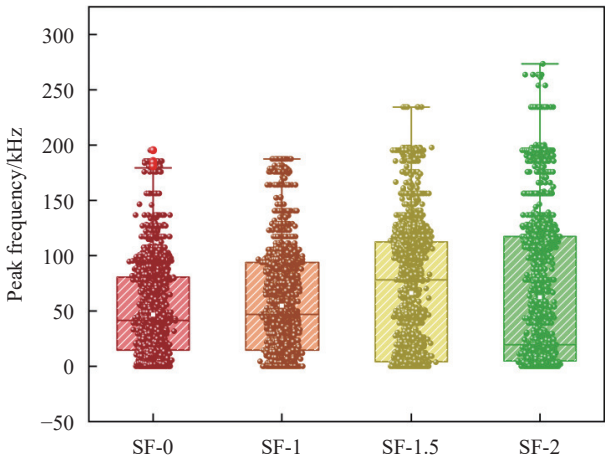


图 6 不同钢纤维含量混凝土试件峰值频率统计学箱形图

Fig. 6 Peak frequency statistics box plot of concrete specimens with different steel fiber contents

距最宽，这表明数值总体呈现偏态分布特征，而试件 SF-1.5 的声发射数据点的分布具有更高的离散程度。随着钢纤维掺入量的增加，箱形图的数据分布逐渐向更高的上四分位点和更长的上盒线移动和转变，即高峰值频段信号逐渐增多，低峰值频段信号分布减少，并逐渐向中高峰值频段过渡，这与 Li 等^[26] and Behnia 等^[27] 的研究结果相似。根据峰值频率特征研究发现未掺钢纤维的试件为大尺度损伤，掺入不同含量钢纤维试件的为小尺度损伤。这是由于未掺钢纤维的试件局部会产生宏观裂纹导致发生脆性破坏，而掺入不同含量钢纤维试件由于钢纤维传递了局部应力使得混凝土产生了大量的二次裂纹，其产生的声发射高频信号是由钢纤维的变形、摩擦和脱粘所引起的，且掺量越多现象越明显。

3.3 声发射 RA-AF 值特征

上升时间-振铃计数 (RA-AF) 组合分析是一种基于日本建筑规范 JCMS-Ⅲ B5706^[28] 的方法，被广泛应用于混凝土内部裂纹类型的识别，其统计分析结果可作为定量判断宏观断裂机制的指标。其中，AF/RA 的比值被定义为 k ，当 $AF/RA < k$ 时，表现为高 RA 和低 AF 的信号被定义为剪切裂纹；而低 RA 和高 AF 的信号则对应拉伸裂纹。根据 Li 等^[18] 和 Ohno 等^[29] 的建议， k 值选择 80 较为合适。

图 7 展示了 RA-AF 值随时间变化的三维分布图，采用 k 值为斜率的分界线划分裂纹类型，并计算了不同裂纹类型的比例以及混凝土的破坏特征。试件 SF-0、SF-1、SF-1.5 和 SF-2 的剪切裂纹比例分别为 26.4%、28.4%、31.1% 和 32.2%。各组

试件的 RA 和 AF 值主要集中在 $0\sim5\text{ ms}\cdot\text{V}^{-1}$ 和 $0\sim400\text{ kHz}$ 范围内。从图 7(a) 和图 7(b) 的对比中可以看出，钢纤维的掺入减少了以拉伸裂纹为特征的蓝色数据点数量，促使裂纹类型向以剪切裂纹为特征的数据点偏移。图 7(a)~图 7(c) 还表明，数据点在加载早期的分布数量逐渐减少，而整体分布向加载末期偏移。当钢纤维掺量达到 2% 时，数据点的分布趋于均匀。

以上结果表明，钢纤维的掺入推迟了裂纹的出现时间，提高了剪切裂纹的比例，并使断裂模式逐渐向复合型断裂转变。这种变化与纤维与基体之间的摩擦、脱粘及拔出效应密切相关。当钢纤维的体积掺量达到 2% 时，剪切裂纹比例的提升趋势有所减缓，这是由于钢纤维过多可能发生团聚，降低基质密度，从而增加拉伸裂纹的比例。在破坏特征方面，未掺钢纤维的试件 SF-0 和掺 1% 钢纤维的试件 SF-1 均产生了 3 条较宽的主裂纹，此时钢纤维对大裂纹的抑制效果和对剪切裂纹比例的提升尚不显著。而当钢纤维掺量提高至 1.5% 时，裂纹形式发生明显改变，试件表面产生了 5 条较窄的主裂纹，同时部分微裂纹向侧面延伸形成剪切裂纹。当掺量达到 2% 时，裂纹宽度进一步减小，裂纹数量增多，微裂纹向侧面延伸的现象更加明显。

综上所述，RA-AF 值分析的裂纹类型与混凝土实际破坏特征吻合良好。钢纤维的掺入有效减少了试件的宏观裂纹宽度，提高了剪切裂纹比例，显著改善了裂纹分布和破坏模式。

3.4 声发射事件数损伤模型

通过上述分析可以看出，声发射参数与试件的损伤过程密切相关，试件在轴压过程中的损伤程度与裂纹数量和尺度有关，为评估 GFRP 管约束内含木柱的钢纤维混凝土准脆性材料开裂过程的多尺度性，建立了基于声发射事件数的损伤演化模型。

引入损伤参数 D :

$$D = 1 - \frac{S_e}{S} = \frac{S_d}{S}$$
 (1)

$$S = S_e + S_d$$
 (2)

式中： S_e 为当应力为 σ 时的试件未产生损伤的面积 (mm^2)； S_d 为当应力为 σ 时的试件产生损伤的面积 (mm^2)； S 为试件的初始面积 (mm^2)。损伤参数 D 越大，表明损伤越严重， $D=0$ 表示试件没有

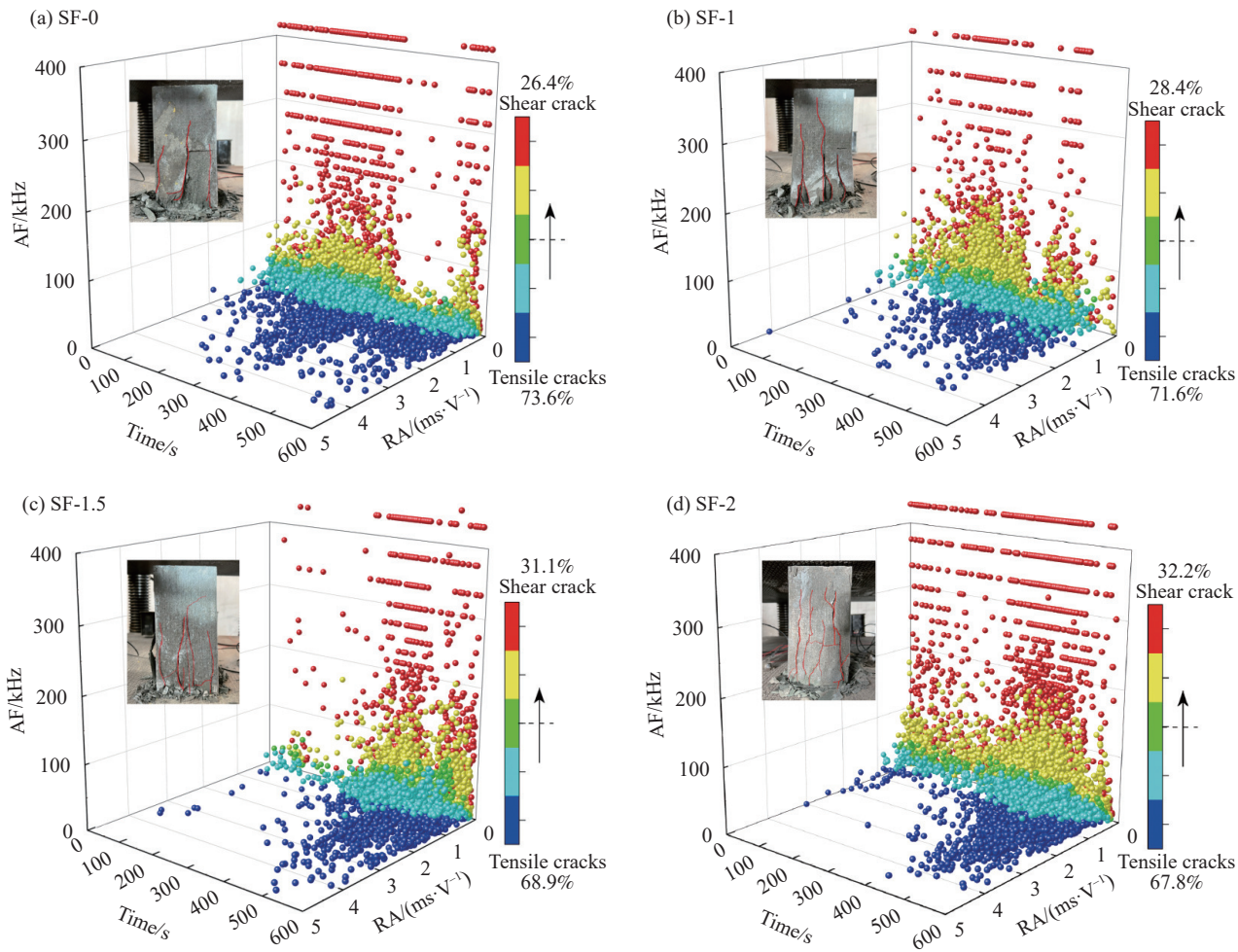


图7 不同钢纤维含量混凝土试件上升时间-振铃计数(RA-AF)值随时间变化三维图

Fig. 7 Three-dimensional figures of rise time-ringing count (RA-AF) value changing with time of concrete specimens with different steel fiber contents

发生损伤， $D=1$ 表示试件完全破坏。

假定 C_m 为整个加载过程中的声发射总累积事件数， C_d 为单位面积所释放的声发射累积事件数，则有：

$$C_d = \frac{C_m}{S} \tag{3}$$

将应力为 σ 、损伤面积为 S_d 时的声发射累积事件数表示为

$$C = S_d C_d = S_d \frac{C_m}{S} \tag{4}$$

将 (4) 代入 (1) 得到损伤参数和事件数的关系：

$$D = \frac{C}{C_m} \tag{5}$$

在损伤统计理论中，钢纤维混凝土被认为是由许多具有不同断裂概率的微元组成的复合材料，其在受力过程中的断裂概率函数可以用 Weibull 函数来描述^[30]。假设应力与声发射事件数之间的

关系符合双参数 Weibull 函数^[31]，建立单轴压缩荷载过程中概率密度函数和应力之间的关系：

$$C(\sigma) = f(\sigma) = \frac{m}{\theta} \left(\frac{\sigma}{\theta} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\theta} \right)^m \right] \tag{6}$$

式中： $f(\sigma)$ 为 Weibull 分布的概率密度函数； θ 为尺度参数； m 为形状参数。

损伤参数 D 可以表示为

$$\frac{dD}{d\sigma} = C(\sigma) \tag{7}$$

对式 (7) 进行积分得到应力 σ 时的 Weibull 累积分布函数，即损伤演化方程：

$$D = \int_0^\sigma C(\sigma) d\sigma = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\theta} \right)^m \right] \tag{8}$$

将 (8) 代入 (5) 得到应力 σ 时的声发射累积事件数：

$$C = C_m - C_m \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\theta} \right)^m \right] \tag{9}$$

利用式 (8)、(9) 对不同钢纤维掺量下试件的

应力和相应的声发射事件数进行拟合,拟合结果如图 8 所示, Weibull 模型损伤参数及损伤演化方程在表 6 列出, 损伤演化曲线如图 9 所示。由图可知, Weibull 累计分布函数与试验数据的拟合效果良好, 拟合度均在 0.97 以上, 钢纤维的掺入增加了声发射事件数, 增大了 m 的数值, 值得注意的是, 当掺量为 1.5% 时, m 值增加的幅度最大, 当掺入为 2% 时, m 值反而减小。

一般来说, θ 和 m 的数值与试件的脆性密切

相关, m 值越大, 试件脆性越小, 本文表现出同样的特征, 钢纤维的掺入增大了 m 的数值, 增加了累积事件数, 这说明, 钢纤维传递了局部应力, 削弱了试件的局部损伤, 减小了试件宏观裂纹的数量和宽度, 增加了微裂纹的数量, 降低了整体损伤程度, 使得试件的脆性更小, 但过多地掺入钢纤维反而会降低 m 值, 即增大试件的脆性, 这与前文的研究结论一致, 1.5% 钢纤维参量为最优掺量。

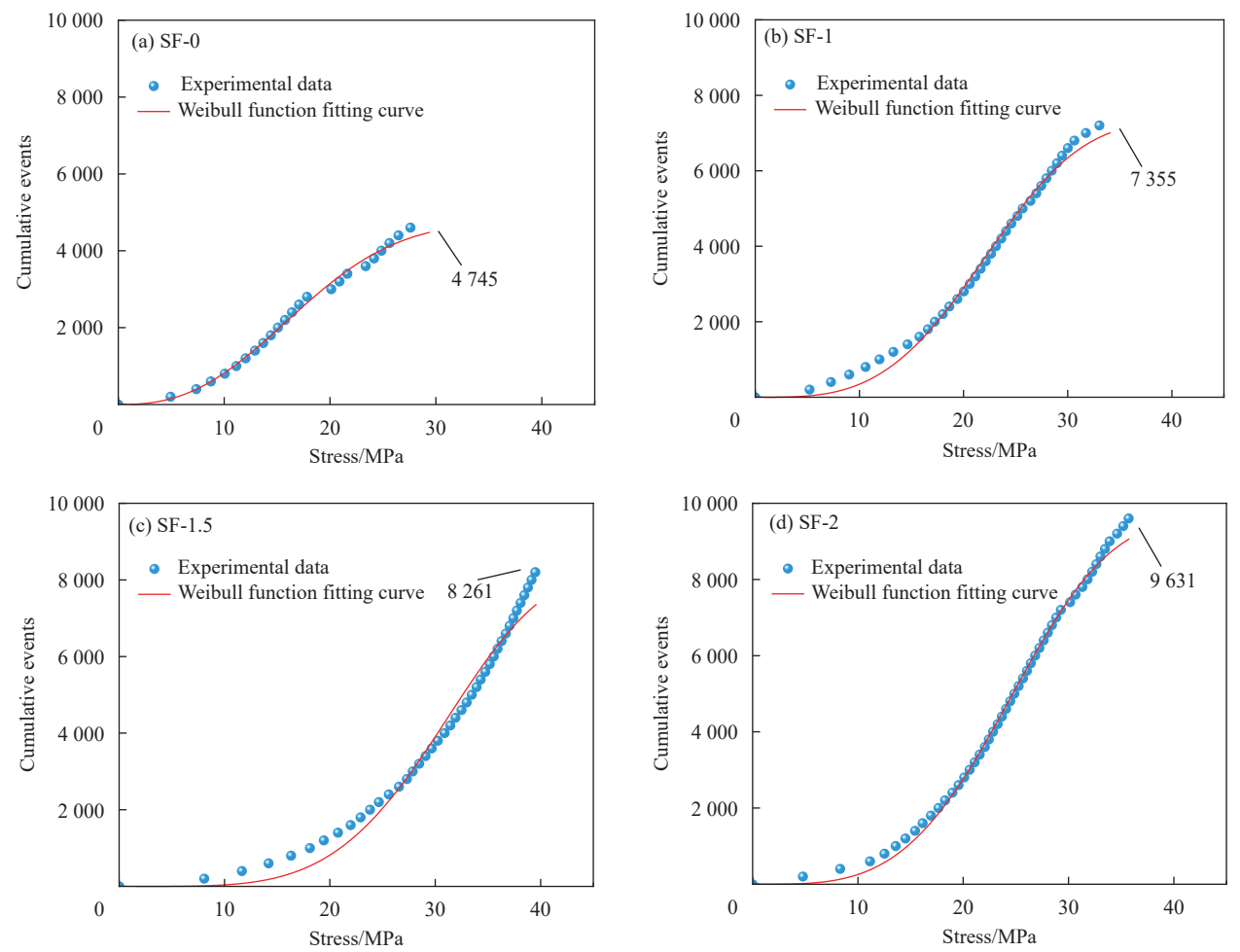


图 8 不同钢纤维含量混凝土试件声发射 (AE) 累积事件数拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of AE cumulative event number of concrete specimens with different steel fiber contents

表 6 不同钢纤维含量混凝土试件 Weibull 损伤模型参数和损伤演化方程

Specimen	θ	m	R^2	D
SF-0	19.340 7	2.523 1	0.992 83	$1-\exp(-(x/19.340\ 7)^{2.523\ 1})$
SF-1	24.514 3	3.386 1	0.991 76	$1-\exp(-(x/24.514\ 3)^{3.386\ 1})$
SF-1.5	33.143 0	4.477 2	0.979 17	$1-\exp(-(x/33.143\ 0)^{4.477\ 2})$
SF-2	26.899 1	3.654 8	0.996 54	$1-\exp(-(x/26.899\ 1)^{3.654\ 8})$

Notes: θ —Scale parameter; m —Shape parameter; R^2 —Goodness of fit; D —Damage parameter.

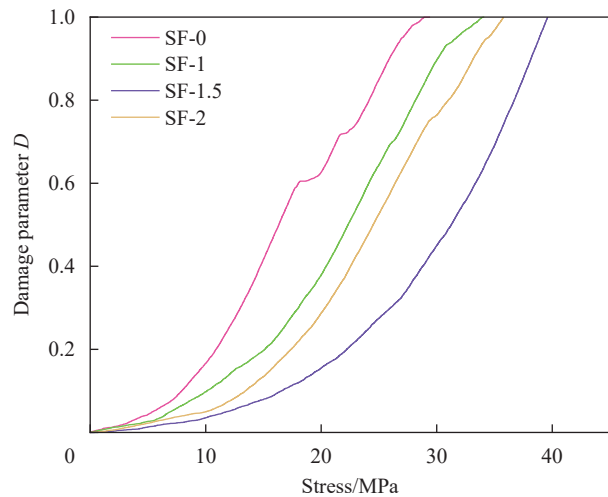


图9 不同钢纤维含量混凝土试件损伤演化曲线

Fig. 9 Damage evolution curves of concrete specimens with different steel fiber contents

4 结论

对玻璃纤维增强塑料 (GFRP) 管约束内含木柱的钢纤维混凝土试件进行了单轴压缩试验。以不同钢纤维体积掺量 (0、1%、1.5% 和 2%) 为变量, 基于声发射技术研究了试件的力学性能、损伤特征和裂纹扩展, 该研究可为一种耐腐蚀和轻质高强的新型复合材料的应用提供参考价值, 主要结论如下:

(1) 适量钢纤维的掺入可以提高试件的极限承载力和延性, 但过量掺入不仅会适得其反, 还会导致宏观破坏的提前, 1.5% 体积掺量的钢纤维为最适掺量, 提高了试件 35.7% 的极限承载力和 4.73% 的位移延性系数。

(2) 根据声发射 (AE) 振铃计数特征, 将试件的损伤分别为混凝土开裂、木材开裂和 GFRP 管断裂过程, 且钢纤维的掺入可以降低声发射信号强度。

(3) 将试件损伤过程中的声发射峰值频率划分为低频段 (0~100 kHz)、中频段 (100~200 kHz) 和高频段 (200~300 kHz), 钢纤维的掺入使得峰值频段由低频段逐渐向高频段过度, 损伤形式从大尺度损伤逐渐转变为小尺度损伤。

(4) 声发射 RA-AF 分析法的结果表明, 钢纤维的掺入增加了裂纹数量和扩展的范围, 减小了宏观裂纹的宽度, 提高了剪切裂纹的比例。

(5) 建立的基于声发射累积事件数和应力的损伤演化模型可以反映试件损伤演化规律, 该模型服从双参数 Weibull 分布, 钢纤维的掺入降低了

损伤程度, 其参数 m 值越大, 试件脆性越小。

参考文献:

- [1] PAUL S C, VAN ZIJL G P A G, ŠAVIJA B. Effect of fibers on durability of concrete: A practical review[J]. *Materials*, 2020, 13(20): 4562.
- [2] WU Z, WANG X, IWASHITA K, et al. Tensile fatigue behaviour of FRP and hybrid FRP sheets[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2010, 41(5): 396-402.
- [3] USMAN M, FAROOQ S H, UMAIR M, et al. Axial compressive behavior of confined steel fiber reinforced high strength concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 230: 117043.
- [4] GHANBARI-GHAZIJAANI T, WU J H, NG C-T. Plastic buckling and axial crushing of concrete-filled steel tubes: Usage of multiple wood blocks[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 150: 106487.
- [5] 崔大顺, 王利民, 薛辉庭, 等. 冲击荷载作用下纤维混凝土动态劈裂试验与分析[J]. *振动与冲击*, 2024, 43(16): 219-226.
CUI Dashun, WANG Limin, XUE Huiting, et al. Dynamic splitting test and analysis of fiber reinforced concrete under impact load[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 43(16): 219-226(in Chinese).
- [6] 丁大伟, 郭子涵, 张伟, 等. 粉煤灰和钢纤维对超高性能混凝土抗冲磨性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43(10): 3585-3594.
DING Dawei, GUO Zihan, ZHANG Wei, et al. Effects of fly ash and steel fiber on impact wear resistance of ultra-high performance concrete[J]. *Bulletin of Silicate*, 2019, 43(10): 3585-3594(in Chinese).
- [7] 黄云超, 高丹盈, 房栋, 等. 高强钢筋钢纤维高强混凝土梁受弯裂缝宽度影响系数的概率分布与取值建议[J]. *建筑结构学报*, 2024, 45(11): 131-140, 188.
HUANG Yunchao, GAO Danying, FANG Dong, et al. Probability distribution and value suggestion of influence coefficient of bending crack width on high strength reinforced steel fiber high strength concrete beams[J]. *Journal of Building Structures*, 2024, 45(11): 131-140, 188(in Chinese).
- [8] 胡浩聪, 刘娟红, 王金安. 纤维增强混凝土韧性及声发射特征分析[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(3): 1209-1219.
HU Haocong, LIU Juanhong, WANG Jin 'an. Analysis of toughness and acoustic emission characteristics of fiber reinforced concrete[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(3): 1209-1219(in Chinese).
- [9] AZANDARIANI M G, GHANBARI-GHAZIJAANI T, MOHEBKHAH A, et al. Concrete- and timber-filled tubes under axial compression—Numerical and theoretical study[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 44: 103231.
- [10] STUCKI S, KELCH S, MAMIE T, et al. High-performance timber-concrete-composites with polymer concrete and

- beech wood[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 411: 134069.
- [11] GHANBARI-GHAZIJAHANI T, AZANDARIANI M G, VIMONSATIT V, et al. Experiments and design of concrete-filled steel tubes with timber chips under axial compression[J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 186: 110679.
- [12] BANJARA N K, SASMAL S, SRINIVAS V. Investigations on acoustic emission parameters during damage progression in shear deficient and GFRP strengthened reinforced concrete components[J]. *Measurement*, 2019, 137: 501-514.
- [13] DIAKHATE M, ANGELLIER N, PITTI R M, et al. On the crack tip propagation monitoring within wood material: Cluster analysis of acoustic emission data compared with numerical modelling[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 156: 911-920.
- [14] 刘昶宏. 基于声发射技术的钢筋混凝土锈致损伤全过程研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
- LIU Changhong. Research on the whole process of rust-induced damage of reinforced concrete based on acoustic emission technology[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2020(in Chinese).
- [15] REN H, LI T, NING J, et al. Analysis of damage characteristics of steel fiber-reinforced concrete based on acoustic emission[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 148: 107166.
- [16] ZHANG H, JI S S, LIU H, et al. Research on dynamic splitting tensile damage characteristics of steel fiber reinforced concrete under freeze-thaw cycle environment based on AE[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 84: 108490.
- [17] 邱继生, 潘杜, 关斌, 等. 钢纤维煤矸石混凝土受压损伤声发射特性试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(10): 3338-3342.
- QIU Jisheng, PAN Du, GUAN Xiao, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of steel fiber coal gangue concrete under compression damage[J]. *Bulletin of Silicate*, 2018, 37(10): 3338-3342(in Chinese).
- [18] LI H, LI X, FU J, et al. Experimental study on compressive behavior and failure characteristics of imitation steel fiber concrete under uniaxial load[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 399: 132599.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 混凝土强度检验评定标准: GB/T 50107—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for evaluation of concrete compressive strength: GB/T 50107—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010(in Chinese).
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢纤维混凝土: JG/T 472—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Steel fiber reinforced concrete: JG/T 472—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015(in Chinese).
- [21] ISO. Non-destructive testing—Acoustic emission inspection—Primary calibration of transducers: ISO 12713:1998[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1998.
- [22] ISO. Non-destructive testing—Acoustic emission inspection—Secondary calibration of acoustic emission sensors: ISO 12714:1999[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1999.
- [23] American Society of Testing Materials. Standard guide for determining the reproducibility of acoustic emission sensor response: ASTM E976-15 (2021)[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.
- [24] WU Y F, YUN Y, WEI Y, ZHOU Y. Effect of predamage on the stress-strain relationship of confined concrete under monotonic loading[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2014, 140(12): 04014093.
- [25] 王创业, 常新科, 杜晓娅. 不同尺寸砂岩破坏全过程声发射主频分析[J]. *矿业工程*, 2019, 39(6): 10-14.
- WANG Chuangye, CHANG Xinke, DU Xiaoya. Main frequency analysis of acoustic emission in the whole process of failure of sandstone of different sizes[J]. *Mining and Metallurgy Engineering*, 2019, 39(6): 10-14(in Chinese).
- [26] LI J, LI Z, CHEN J, et al. Assessment of the bond-slip behavior of rebar in fiber-reinforced self-compacting lightweight aggregate concrete via the acoustic emission technique[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 89: 109054.
- [27] BEHNIA A, CHAI H K, GHASEMIGOL M, et al. Advanced damage detection technique by integration of unsupervised clustering into acoustic emission[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 210: 212-227.
- [28] Federation of Construction Materials Industries. Monitoring method for active cracks in concrete: JCMS-III B5706 [S]. Tokyo: Federation of Construction Materials Industries, 2003.
- [29] OHNO K, OHTSU M. Crack classification in concrete based on acoustic emission[J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(12): 2339-2346.
- [30] CHEN B, LIU J. Experimental study on AE characteristics of three-point-bending concrete beams[J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(3): 391-397.
- [31] FAGHIHKHORASANI F, KABIR M Z, NAJAFABAD M A, et al. Predicting compressive stress-strain curves of structural adobe cubes based on acoustic emission (AE) hits and Weibull distribution[J]. *International Journal of Structural Integrity*, 2019, 10(6): 766-791.