文章编号:1007-9629(2025)12-1216-10

GFRP管约束钢纤维混凝土短柱的声发射参数分析

佘艳华*, 黄俊杰, 周灵杰
(长江大学 城市建设学院,湖北 荆州 434023)

摘要:为研究钢纤维掺量对玻璃纤维增强塑料(GFRP)管约束钢纤维混凝土(SFRC)短柱在轴向压缩荷载下力学性能的影响,用声发射(AE)技术监测了核心混凝土的损伤演化规律。结果表明:随着钢纤维掺量从0%增加至1.8%,试件的峰值荷载和位移延性增大,最大增幅分别为31.55%、15.60%;通过AE能量的演化趋势可以将试件的轴压过程分为3个阶段,其中AE能量在裂纹发展阶段表现最活跃,并出现Kaiser效应;随着加载过程的进行和钢纤维掺量的增加,剪切裂纹占比逐渐增大,利用上升时间/幅度-振铃计数/持续时间(RA-AF)可以定量表征核心混凝土的破坏特征;b值的演化特征可以反映混凝土的破裂过程,裂纹发展阶段b值的下降趋势可以作为试件破裂失稳的重要前兆信息,当b值达到最小值且趋于稳定时,试件发生极限破坏。

关键词:钢纤维混凝土;玻璃纤维增强塑料管;损伤演化;声发射;力学性能
中图分类号:TU528 **文献标志码**:A **doi**:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.12.006

Analysis of Acoustic Emission Parameters of GFRP Tube Confined Steel Fiber Reinforced Concrete Short Columns

*SHE Yanhua**, *HUANG Junjie*, *ZHOU Lingjie*
(School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract: To investigate the influence of steel fiber content on the mechanical properties of glass fiber reinforced polymer(GFRP) tube confined steel fiber reinforced concrete(SFRC) short columns under axial compression, acoustic emission(AE) technology was employed to monitor the damage evolution of the core concretes. The results show that as the steel fiber content increases from 0% to 1.8%, the peak load and displacement ductility of specimens increase, with the maximum increments reaching 31.55% and 15.60% respectively. The axial compression process of the specimens can be divided into three distinct stages based on AE energy evolution trends. AE energy is the most active in the crack development stage, and the Kaiser effect appears. With the progress of the loading process and the increase of steel fiber content, the proportion of shear cracks gradually increases, and the rise time/amplitude-count/duration(RA-AF) can be used to quantitatively characterize the failure characteristics of the core concretes. The evolution characteristics of b value can reflect the fracture process of concretes. The downward trend of the b value in the crack development stage can be used as important precursor information for the fracture and instability of the specimens. When the b value reaches the minimum and tends to be stable, the specimens undergo ultimate failure.

Key words: steel fiber reinforced concrete; glass fiber reinforced polymer tube; damage evolution; acoustic emission; mechanical property

---

收稿日期:2025-01-03; 修订日期:2025-04-18
基金项目:住房与城乡建设部科技项目(2021-K-086);岩土力学与工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGME22028)
第一作者(通讯作者):佘艳华(1982—),女,湖北公安人,长江大学副教授,硕士生导师,博士。E-mail:syh916@126.com

钢纤维混凝土（SFRC）是在普通混凝土中随机分布短钢纤维形成的复合材料[1]，钢纤维能桥接裂缝并抑制其扩展，改善混凝土的抗拉强度和变形能力。SFRC的抗弯和抗冲击性能均优于传统混凝土，广泛应用于桥梁、建筑和防护工程等领域[2]。

纤维增强复合材料（FRP）凭借高强度和耐久性，在结构工程中的应用日益增多[3-4]，尤其是玻璃纤维增强复合材料（GFRP）。受钢管混凝土组合结构启发，学者们提出用GFRP管替代钢管来提高结构耐久性[5]，将钢纤维混凝土与GFRP约束混凝土结合，开发高性能组合结构体系，该体系力学性能优势显著。

在工程应用中，GFRP管约束钢纤维混凝土（GSFRC）受压时的损伤演化特性至关重要。在长期服役过程中，核心混凝土的微观损伤和GFRP管的开裂会影响整体承载力与耐久性[6]，因此准确评估损伤演化对优化设计和维护意义重大。材料断裂时微裂纹的萌生、扩展会释放应力波，产生声发射（AE）现象[7]。AE技术作为无损监测手段，已广泛应用于混凝土[8]、岩石[9]和FRP[10]等领域，可有效反映材料破坏过程中的能量释放和损伤演化[11]，还可识别裂缝的萌生、扩展及贯通过程[12]，分析混凝土的断裂韧度、抗裂能力及延性变化等[13-15]。研究表明，钢纤维可有效提高材料的延性与韧性，并影响其AE特性[16-19]。

基于此，本文利用AE技术实时监测不同钢纤维掺量的GSFRC短柱轴压过程，从力-声耦合角度分析试件的力学性能和AE特性，评估GFRP管约束下核心混凝土的损伤特征，为实际工程结构的损伤评估和安全维护提供理论依据，提升GSFRC的应用潜力。

1　试验

1.1　原材料

胶凝材料为P·O 42.5普通硅酸盐水泥；减水剂选用粉末状聚羧酸系高效减水剂；细骨料采用级配良好的天然河砂；粗骨料采用连续级配的砾石。粗骨料和细骨料的基本物理性能见表1。钢纤维（SF）选用冷拔端钩型镀铜钢纤维，材质为低碳钢，其基本性能指标由生产厂家提供，长L为13 mm，直径d为0.2 mm，长径比λ为65，拉伸强度f_t≥2 850 MPa。GFRP管为南京经略复合材料有限公司生产的拉挤型GFRP管，其力学性能见表2。

表1　粗骨料和细骨料的基本物理性能

Table 1　Basic physical properties of coarse and fine aggregates

Aggregate	Apparent density/(kg·m^{-3})	Bulk density/(kg·m^{-3})	Water absorption(by mass)/%	Crushing index(by mass)/%
Coarse aggregate	2 671.5	1 387.2	0.92	2.87
Fine aggregate	2 411.3	1 135.9	8.64	13.57

表2　GFRP管的力学性能

Table 2　Mechanical Properties of GFRP tube

Direction	Elastic modulus/MPa	Yield strength/MPa	f_t/MPa
Longitudinal direction	41.2	350.5	650.8
Lateral direction	8.5	130.6	32.3

1.2　配合比设计

以钢纤维掺量φ_{SF}（体积分数）为变量，设置φ_{SF}为0%、0.6%、1.2%、1.8%，设计了4组GSFRC短柱试件（每组3个试件），试件尺寸为ϕ100×200 mm，其中GFRP管的厚度T为4 mm。核心混凝土的配合比及立方体抗压强度f_{cu}见表3。

表3　核心混凝土的配合比及立方体抗压强度

Table 3　Mix proportions and cube compressive strength of core concretes

Specimen	Mix proportion/(kg·m^{-3})						f_{cu}/MPa
	Cement	Water	Coarse aggregate	Fine aggregate	SF	Water reducer	
SF-0	337.0	180.0	1 030.0	842.0	0	2.7	33.2
SF-0.6	337.0	180.0	1 030.0	842.0	47.1	2.7	34.8
SF-1.2	337.0	180.0	1 030.0	842.0	94.2	2.7	35.7
SF-1.8	337.0	180.0	1 030.0	842.0	141.3	2.7	36.3

1.3　试件制备

试件制备步骤为：（1）将拉挤型GFRP管置于预先制作的木模具中，同时封闭管底防止漏浆；（2）按配合比将钢纤维、骨料及水泥加入混凝土搅拌机，搅

拌3 min使钢纤维均匀分散，随后加入减水剂水溶液，继续搅拌3 min；(3)将混合料倒入GFRP管中，在振动台上振捣1 min以保证混凝土密实；(4)用刮刀刮除多余混合料并抹平表面，随后用塑料膜覆盖养护；(5)每组配合比制备3个尺寸为150 mm×150 mm×150 mm的混凝土立方体试件，共12个，用于测试混凝土基本力学性能；(6)试件养护28 d后拆除模具，对短柱顶面进行磨平处理，确保混凝土与GFRP管端部齐平，使加载时受力均匀。

1.4 试验设备和数据采集

加载设备示意图见图1。由图1可见：整个试验设备主要由加载系统、AE系统和位移采集系统3个部分组成；加载系统采用WAW-1000B型微机电液伺服万能试验机，按照GB/T 50152—2012《混凝土结构试验方法标准》进行。试验前需要进行预加载，以检查仪器工作状态，并确保混凝土和GFRP管端部与加载设备端板接触良好，避免加载初期试件局部受力。正式加载采用位移控制方式，加载速率为0.01 mm/s。当荷载降至峰值荷载P_u的0.75($0.75P_u$)或GFRP管出现严重屈曲断裂时，判定试件破坏并终止加载。

AE系统采用DS5-8B型动静态声发射一体机，由AE分析仪、放大器和传感器组成，AE传感器布置位置见图2。正式试验前，根据声发射相关测试标准ISO 12713—1998 *Non-destructive Testing-Acoustic Emission Inspection-Primary Calibration of Transducers*, ISO 12714—1999 *Non-destructive Testing-Acoustic Emission Inspection-Secondary Calibration of Acoustic Emission Sensors* 和ASTM E976-15(2021) *Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response*，对AE系统进行调试和相应的参数设置。断铅试验参

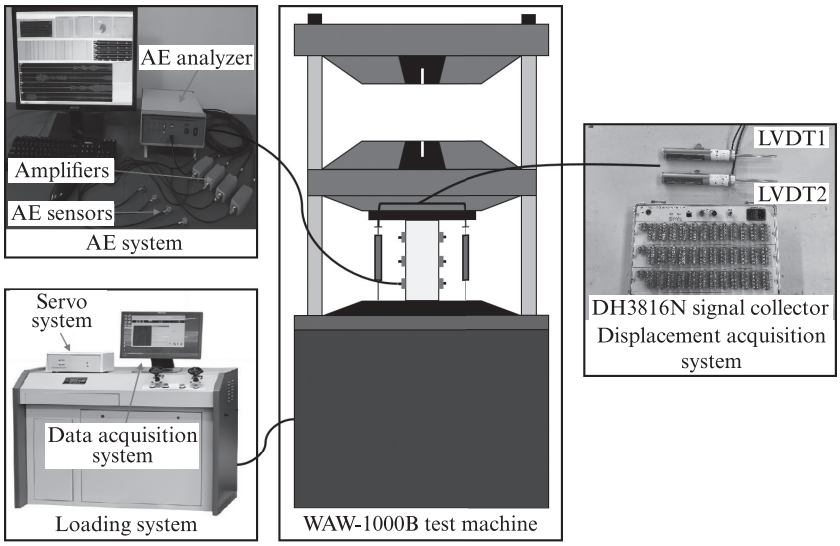


图1 加载设备示意图

Fig. 1 Schematic of loading equipments

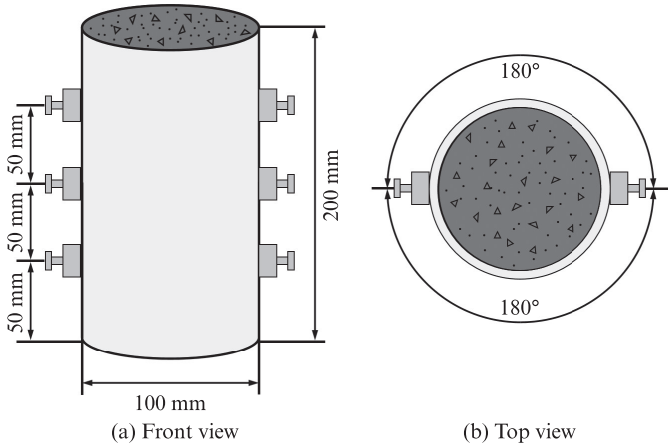


图2 AE传感器布置位置

Fig. 2 AE sensors layerout positions

数设置：在距传感器30、150 mm处各进行10次断铅操作，记录断铅幅度并取平均值作为传感器灵敏度数值，确保各传感器灵敏度差值不超过4 dB。环境噪音测试参数设置：以试验机空载噪声水平为基准，设定检测门限为40 dB（噪声峰值的1.5～2.0倍）。放大器增益设置：为避免信号失真并确保检测到初始低能量AE信号，将放大器增益设置为40 dB[20]。结合试验环境及相关研究[21]，试验主要AE参数见表4。位移采集系统由DH3816N型信号采集仪和2个线性差动变压器组成，采样频率设置为1 Hz。为确保所有设备同步采集数据，在启动试验机的同时触发AE系统和位移采集系统。混凝土在压缩作用下的破坏模式包括拉伸破坏和剪切破坏。在AE特征参数中，上升时间/幅度-振铃计数/持续时间（RA-AF）与材料的破坏模式密切相关，因此可以利用RA-AF值来区分混凝土的裂纹类型。

表4　试验主要AE参数

Table 4　Main AE parameters of test

Threshold/dB	Amplifier gain/dB	Sampling frequency/kHz	Peak definition time/μs	Hit definition time/μs	Hit lockout time/μs
40	40	1 000	300	600	1 000

2　结果与分析

2.1　力学特性分析

2.1.1　荷载-位移曲线

试件的荷载-位移曲线见图3。由图3可见：(1)钢纤维掺量对试件峰值荷载有一定影响，但各组试件的曲线变化趋势基本保持一致，大致可以分为3个加载阶段。(2)以试件SF-0.6为例，*OA*段为初始压密阶段，曲线呈下凹状，主要由试件中的原始孔隙和缺陷闭合所致；*AB*段为裂纹发展阶段，荷载和位移呈良好的线性关系；*BC*段为极限破坏阶段，荷载达到峰值后，核心混凝土急剧开裂，拉挤型GFRP管发生脆性破坏，曲线骤降，试件达到极限破坏状态。(3)试件SF-0.6、SF-1.2和SF-1.8的荷载在峰值荷载前出现小幅下降，表明此时核心混凝土内部已萌生裂纹，但钢纤维的掺入使裂纹发展更充分，延缓了极限破坏的发生。

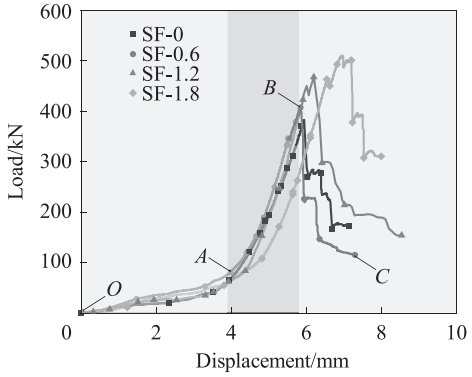


图3　试件的荷载-位移曲线

Fig. 3　Load-displacement curves of specimens

2.1.2　峰值荷载和位移延性系数

为进一步量化钢纤维掺量对GSFRC短柱力学性能的影响，选取试件的峰值荷载P_u和位移延性系数μ（P_u对应的位移Δ_u和0.80P_u时对应的位移Δ_y的比值）作为主要力学性能指标，结果见表5。由表5可见：试件的峰值荷载和位移延性系数均随着钢纤维掺量的提高而增大；与试件SF-0相比，掺钢纤维试件的峰值荷载和位移延性系数最大值分别提高31.55%、15.60%。

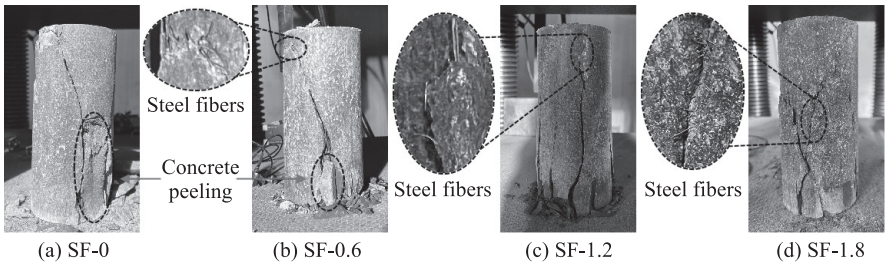
核心混凝土的破坏形态见图4。由图4可见：试件SF-0和SF-0.6破坏后主裂纹较少，主要以单一贯通裂纹为主，并伴随部分混凝土的剥落；试件SF-1.2和SF-1.8在整个轴压损伤过程中裂纹发展更充分，且因钢纤维的拉结作用，试件的破坏形态更加完整。

总体而言，钢纤维的掺入能限制混凝土裂纹扩展。当混凝土基体开裂后，其内部界面发生相对滑移形成主裂纹，而钢纤维可在裂纹表面形成桥接，在一定程度上缓解裂纹快速扩展，使核心混凝土仍具有一定的承载能力和变形能力。因此，当核心混凝土的钢纤维掺量在1.8%以内时，试件的峰值荷载和位移延性系数均随着钢纤维掺量的增加而增大。结合文献[22]可知，当钢纤维掺量超过1.8%时，过多的钢纤维可能增大混凝土内部孔隙率、降低流动性，进而降低试件的力学性能。

表5　试件的峰值荷载和位移延性系数

Table 5　Results of peak load and displacement ductility factor

Specimen	Δ_u/mm	Δ_y/mm	μ	P_u/kN
SF-0	5.93	5.42	1.09	383.18
SF-0.6	5.83	5.16	1.13	408.14
SF-1.2	6.21	5.22	1.19	467.23
SF-1.8	7.17	5.69	1.26	504.09



(a) SF-0 (b) SF-0.6 (c) SF-1.2 (d) SF-1.8

图4 核心混凝土的破坏形态

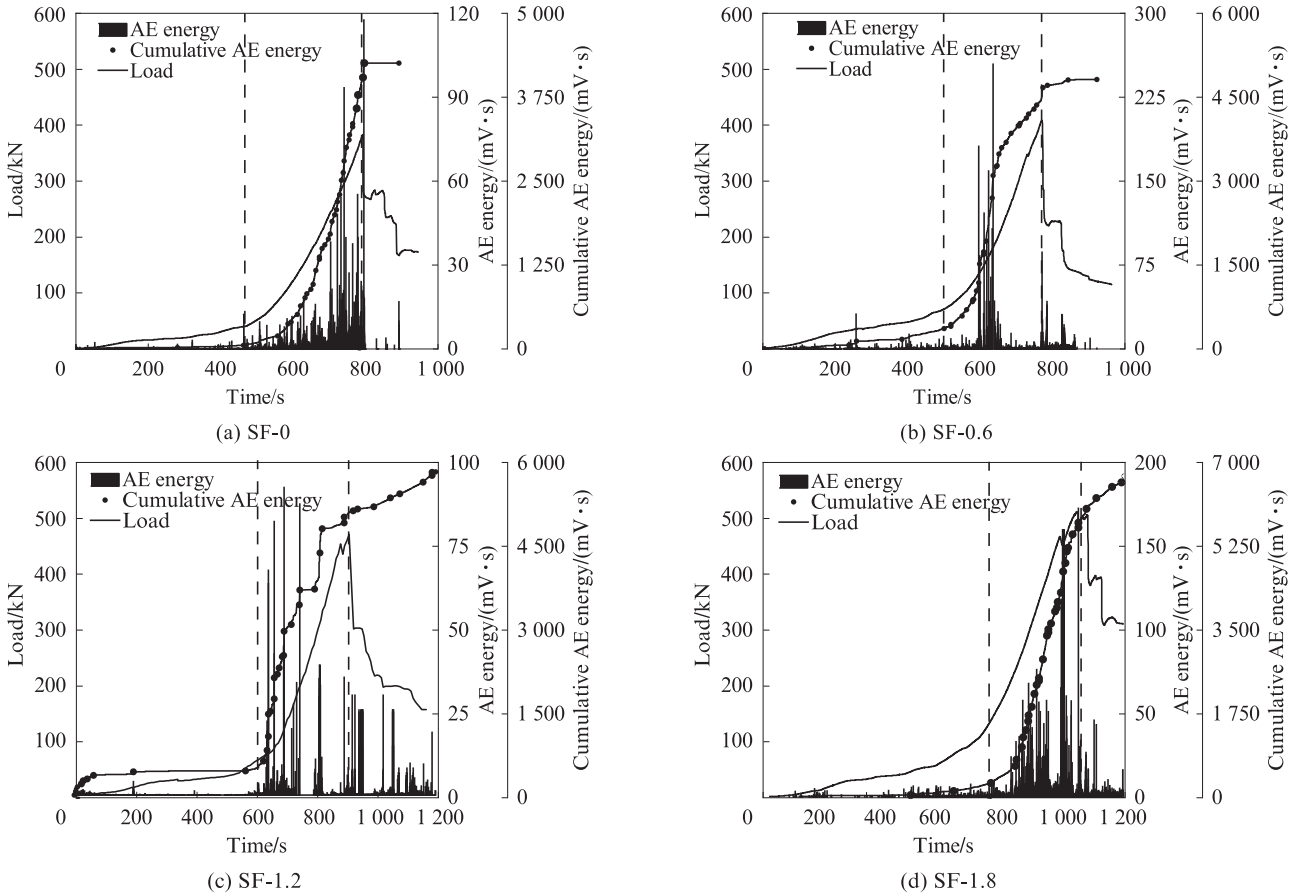
Fig. 4 Failure forms of core concretes

2.2 AE参数分析

2.2.1 能量演化特征

AE信号特征与材料在损伤过程中内部裂纹的形成和扩展密切相关,可反映不同荷载水平下的损伤演化过程。常见AE参数包括AE能量、振铃计数等。其中,AE能量为单次声发射事件信号波形的电压-时间曲线包络线积分值,表征声发射事件释放的能量,直接反映裂纹扩展释放的弹性应变能大小,能量值越高表明裂纹扩展越剧烈[23];振铃计数为AE信号波形超过预设阈值的振荡脉冲次数,与材料内部瞬态破裂速率及断裂尺度呈正相关,常用于量化损伤事件的累积频次[24]。由于AE能量可直接量化裂纹扩展释放的弹性应变能总量,更敏感地反映宏观损伤剧烈程度与力学性能的强关联性;而振铃计数仅统计事件频次且易受噪声干扰,难以区分能量强度差异,故本节聚焦AE能量表征核心混凝土的损伤特征。

荷载和AE能量随时间的演化特征见图5。由图5可见,不同钢纤维掺量GSFRC短柱的AE特征基本一致,结合荷载-时间曲线可将试件损伤过程大致分为3个阶段,各阶段AE信号特征如下:(1)阶段Ⅰ(初始压密阶段) 在加载初期,AE能量值在低幅值范围内波动,AE累计能量曲线几乎与时间轴平行,无明显变化。此阶段少量AE能量源于原始缺陷或



(a) SF-0 (b) SF-0.6

(c) SF-1.2 (d) SF-1.8

图5 荷载和AE能量随时间的演化特征

Fig. 5 Evolution characteristics of load and AE energy over time

孔隙在低荷载水平下的闭合。(2)阶段Ⅱ(裂纹发展阶段)　当荷载增至0.20P_u时，AE能量值逐渐增大并达到峰值，AE累计能量曲线显著上升。此阶段由于荷载增大和GFRP管的约束作用，混凝土开始变形并萌生微裂纹。随着核心混凝土横向变形的增大，拉挤型GFRP承受的环向应力超过其极限承载力而开裂，并因聚合物材料的不可逆变形产生Kaiser效应[25]。(3)阶段Ⅲ(极限破坏阶段)　当加载至峰值荷载时，AE能量值骤降并趋于稳定，AE累计能量曲线斜率明显减小。此时试件抗压强度达到极限，微裂纹尖端累积的应变能释放，混凝土内部发生大量相对滑移，微裂纹迅速扩展贯通形成宏观裂纹。同时，GFRP管表面的微裂纹沿轴向发展成竖向贯通裂纹，试件发生极限破坏。在峰值荷载后，核心混凝土和GFRP管不再产生新裂纹，AE能量信号主要来源于钢纤维的断裂。

由图5还可见，AE累计能量(4 218.63～6 731.18 mV·s)随钢纤维掺量增加呈显著上升趋势，且其AE能量浪涌分布与损伤模式密切相关。在阶段Ⅱ，低钢纤维掺量试件SF-0和SF-0.6因纤维阻裂能力不足，微裂纹快速贯通形成单一主裂纹，导致能量浪涌集中且幅值高；而高钢纤维掺量试件SF-1.2和SF-1.8通过钢纤维桥接作用分散应力，延缓了宏观裂纹的形成，使AE能量释放更均匀且幅值较低[26]。在阶段Ⅲ，低钢纤维掺量试件因脆性断裂，应变能骤减导致AE能量浪涌稀疏；高钢纤维掺量试件则由于纤维拉断及基体剪切变形持续释放能量，浪涌仍较活跃，这使得AE累计能量随纤维掺量增加呈逐渐上升的趋势[27]。综上可见，钢纤维掺量通过调控裂纹扩展路径与能量耗散机制，显著影响了AE能量浪涌的时空分布特征。

2.2.2　RA-AF分布特征与破坏模式

RA-AF裂纹分类示意图见图6。由图6可见，拉伸裂纹与剪切裂纹对应的RA与AF呈现差异化分布特征：拉伸裂纹通常表现为高AF、低RA(突发型信号)，反映裂纹快速扩展和高频能量释放；剪切裂纹则呈现低AF、高RA(连续型信号)，对应裂纹界面摩擦滑移和低频能量耗散。本文选用JCMS-III B5706模型[28]，将RA-AF分布图的对角线作为拉伸-剪切裂纹的分界线。

图7为试件在不同损伤阶段RA-AF的分布图，其展示了试件在损伤过程中的裂纹占比，二者结合分析能很好地反映核心混凝土的裂纹演化情况。由图7可见：(1)在阶段Ⅰ，RA-AF分布较为均匀，拉伸裂纹与剪切裂纹占比接近。说明此阶段混凝土与

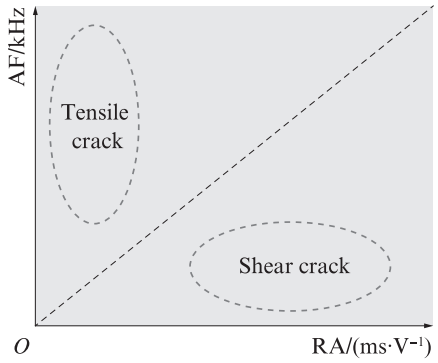


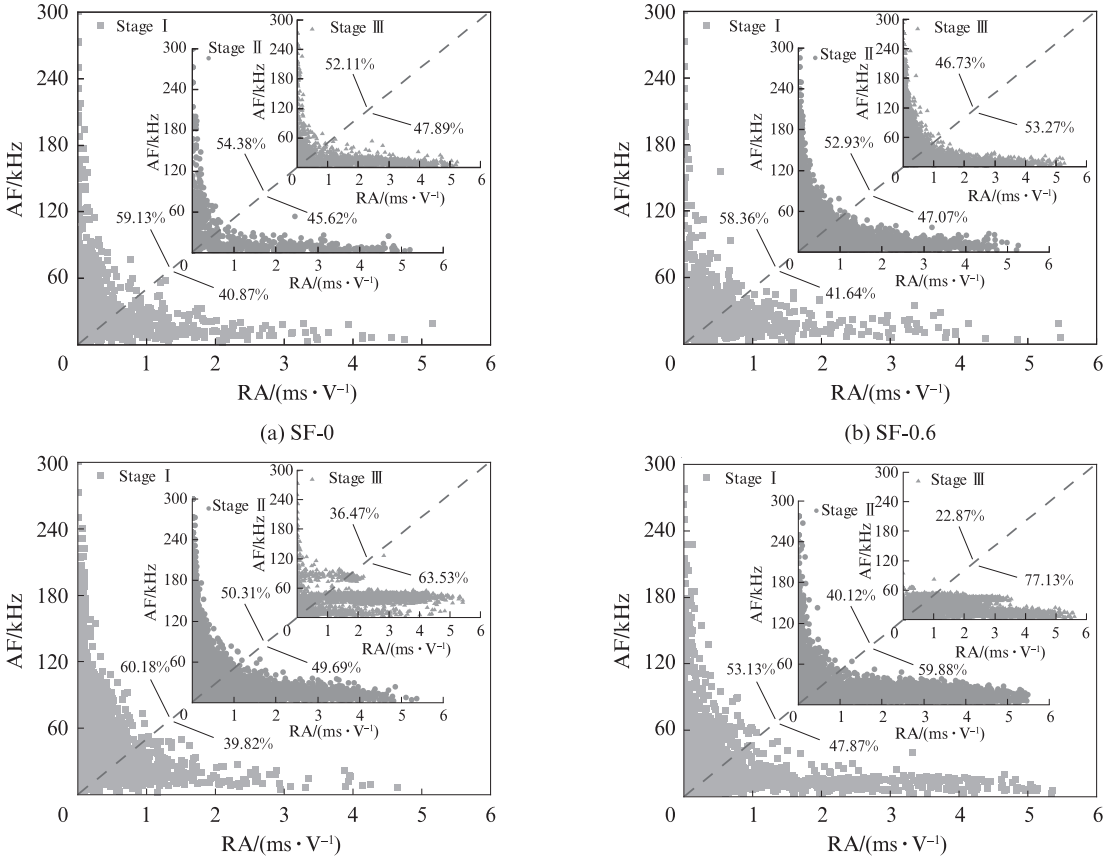
图6　RA-AF裂纹分类示意图

Fig. 6　Crack differentiation by RA-AF

GFRP管处于压缩配合状态，裂纹发展均匀稳定，拉伸裂纹和剪切裂纹并存，且以拉伸裂纹为主。(2)当加载至阶段Ⅱ时，RA-AF的分布更为密集，同时伴随大量低RA和高AF信号的产生。这一变化印证了该阶段混凝土内部开始萌生大量裂纹，且裂纹类型由拉伸裂纹逐渐向剪切裂纹过渡。此外，随着钢纤维掺量的增加，试件中剪切裂纹的占比增加。这一现象表明，钢纤维的桥接作用改变了裂纹尖端的应力场分布。纤维与基体间的界面脱黏和拔出过程会诱发局部剪切变形，同时纤维对主裂纹的约束作用迫使裂纹分叉或偏转，从而导致剪切裂纹的占比增加[29]。(3)当加载至阶段Ⅲ后，混凝土裂纹迅速交汇贯通，形成宏观裂纹，试件发生极限破坏。此阶段中，随着钢纤维掺量的增大，剪切裂纹逐渐占据主导地位。其中，试件SF-0的拉伸裂纹和剪切裂纹比接近1∶1，而试件SF-1.8约为1∶4。这种差异源于钢纤维的随机分布增强了混凝土的协同变形能力。高纤维掺量试件中，纤维网络分布更为密集，主裂纹扩展时需要克服更多纤维的桥接阻力，导致裂纹扩展路径曲折化，能量耗散机制也由拉伸断裂主导转变为剪切摩擦主导[30]。即使在试件破坏后，仍能持续产生剪切裂纹，这表明钢纤维在裂纹尖端处继续承受剪应力，有效延缓了混凝土基体的完全分离。

基于上述分析可知，虽然裂纹在加载初期由拉应力主导，但随着荷载的增加，钢纤维的桥接作用促使裂纹扩展模式发生转变。通过RA-AF分布特征可进一步量化这一过程：在低钢纤维掺量试件中，RA值随荷载增长呈现缓慢上升趋势，表明剪切裂纹占比逐步增加；而在高钢纤维掺量试件中，RA值在阶段Ⅱ即出现陡升，反映纤维的早期抗剪贡献显著改变了裂纹演化路径。此外，钢纤维的掺入不仅提高了基体的抗拉和抗剪能力，还能通过裂纹尖端处的应力重分布诱导微裂纹多向扩展，从而抑制单一贯穿式拉伸裂纹的形

成,并促使能量以“X”或“Y”型剪切裂纹形式释放。核心混凝土的实际破坏模式(见图8)与上述现象基本吻合,说明RA-AF分布特征能够准确有效地反映混凝土的裂纹演化情况和破坏模式。



(a) SF-0 (b) SF-0.6

(c) SF-1.2 (d) SF-1.8

图7 试件在不同损伤阶段RA-AF的分布图

Fig. 7 Distribution of RA-AF of specimens at different damage stages

(a) SF-0 (b) SF-0.6 (c) SF-1.2 (d) SF-1.8

图8 核心混凝土的实际破坏模式

Fig. 8 Actual failure modes of core concretes

2.3 *b*值特征

*b*值理论最初由Gutenberg和Richter提出,用于地震活动[31],其计算式为:

$$\lg N = a - bM \tag{1}$$

式中:M为地震的震级;N为震级大于或等于M的地震次数;a和b均为常数。

材料的损伤是伴随着AE活动的,声信号的传播是基于与地震波相似的原理。因此,在声发射领域中,计算b值时可用AE振幅代替震级:

$$\lg N' = a - b\left(\frac{A_{\mathrm{dB}}}{20}\right) \tag{2}$$

式中:A_{dB}为AE事件的振幅;N'为振幅大于A_{dB}的AE事件数。

b值可用于表征AE事件震级尺度分布的比例关系,衡量材料内部损伤过程中不同震级破裂事件的相对数量,是分析和判定材料破裂前兆信息的有效手段。b值的变化特征具有特定的物理意义:b值增大,表明小尺度破裂事件所占比例增加;b值减小,则意味着大尺度破裂增多;b值在小范围内波动,代表材料内部渐进式稳定扩展的过程;而b值发生大幅度突然变化,意味着出现突发式失稳破坏。

b值的演化特征见图9。由图9可见:在阶段Ⅰ,

b值维持在较高水平，表明此阶段混凝土开始出现低能量事件，以微裂纹为主；随着时间的推移，b值呈现缓慢降低的趋势，此时试件的损伤由阶段Ⅰ向阶段Ⅱ过渡；当损伤过程进入到阶段Ⅱ时，b值呈上下波动状态，表明混凝土内部发生缓慢微破裂，微裂纹处于渐进式稳定扩展状态；此外，b值在峰值荷载前出现骤降，这属于裂纹突发式改变，意味着试件内部产生高能量事件，因此可将该阶段b值的骤降作为试件的破裂前兆；当加载至峰值荷载时，b值快速下降且密集出现，表明前期产生的微裂纹不断发展聚集，并形成大尺度贯通裂纹，高能量事件持续发生，试件已处于失稳破坏状态；由于钢纤维掺量不同，试件b值的变化规律仍然存在一些差异；试件在裂纹发展阶段b值均会发生波动，但是波动幅度随着钢纤维掺量的增加而逐渐减小。这是因为钢纤维掺量越高，混凝土内部微裂纹的发展就越稳定，产生裂纹时释放的能量也更稳定，因此b值在裂纹发展阶段的波动更小。

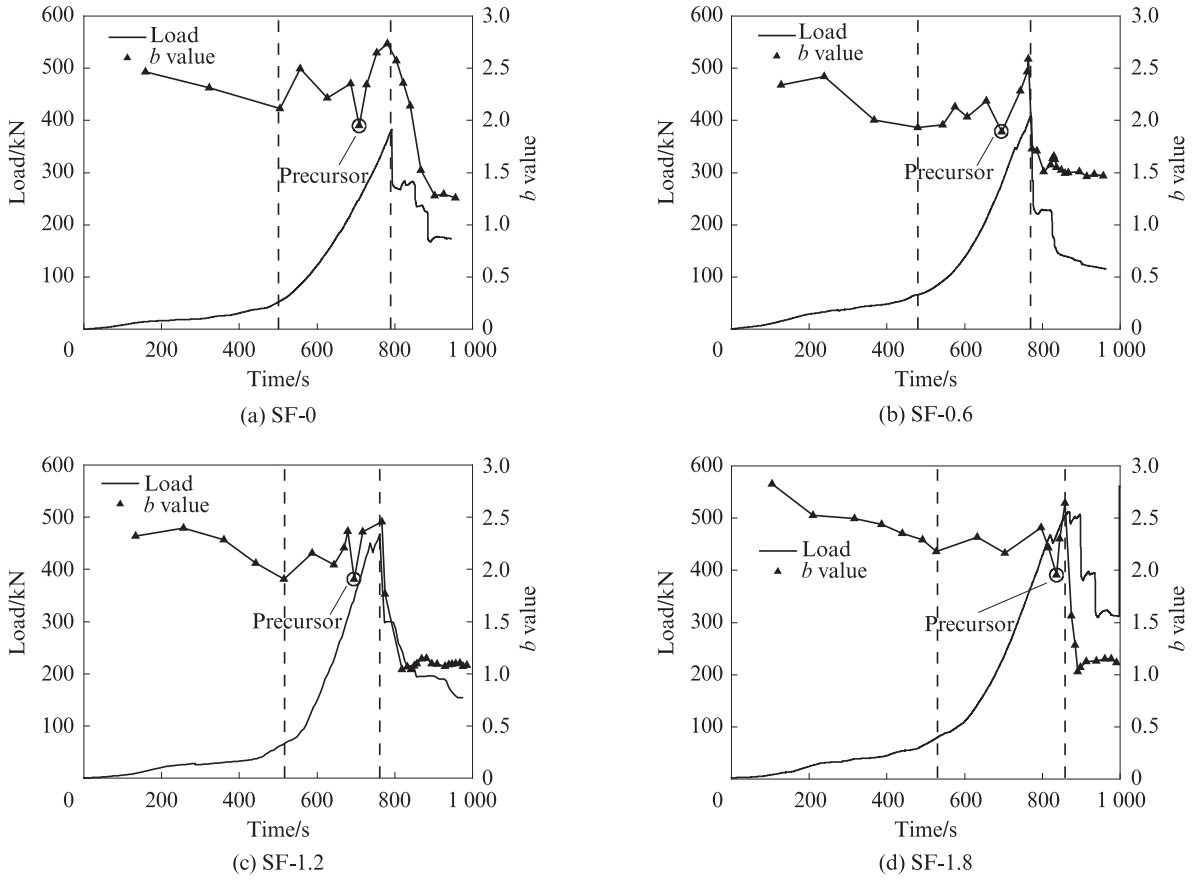


图9　b值的演化特征

Fig. 9　Evolution characteristics of b value

综上所述，b值的演化特征能有效反映试件的损伤过程，裂纹发展阶段b值的下降趋势可以作为试件破裂失稳的重要前兆信息。但是，受限于统计方式，b值往往是某一时间段的平均结果，无法精确对应每个时刻，但b值的总体变化趋势仍能反映试件的损伤规律。

3　结论

（1）当钢纤维掺量在1.8%以内时，掺量的增加能够改善GSFRC短柱的力学性能。随着钢纤维掺量从0%提高到1.8%，GSFRC短柱的峰值荷载和位移延性系数分别提高了31.55%、15.60%，同时核心混凝土的破坏形态也更完整。这主要是因为钢纤维的掺入可改善核心混凝土的脆性，延缓裂纹扩展，在一定程度上提高试件的承载能力和变形能力。

（2）结合荷载-时间和AE能量演化特征，可以将试件的损伤过程划分为初始压密、裂纹发展和极限破坏3个阶段。其中，AE能量在裂纹发展阶段表现最为活跃。同时，AE能量浪涌与核心混凝土的损伤模式密切相关。

（3）通过RA-AF分布特征可以看出，拉伸破坏和剪切破坏在3个损伤阶段同时存在；随着加载过程的进行，剪切裂纹占比逐渐增多，拉伸裂纹占比逐渐减小。此外，钢纤维掺量的增加会促使剪切裂纹占

比增大,改变混凝土基体的破坏模式。在极限破坏阶段,试件SF-0的拉伸裂纹和剪切裂纹比值接近1:1,而试件SF-1.8的这一比值为1:4。

(4)b值的演化特征能够反映混凝土的破裂过程,裂纹发展阶段b值的下降趋势可作为试件破裂失稳的重要前兆信息。当b值达到最小值且趋于稳定时,试件发生极限破坏。

参考文献:

[1] PENG S, WU B, DU X Q, et al. Study on dynamic splitting tensile mechanical properties and microscopic mechanism analysis of steel fiber reinforced concrete[J]. Structures, 2023, 58:105502.

[2] 张斌, 胡红松, 杨朱金. 方钢管超高强钢纤维混凝土柱轴压性能研究[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(5):547-554.
ZHANG Bin, HU Hongsong, YANG Zhujin. Axial compressive behavior of ultra-high-strength steel fiber-reinforced concrete-filled square steel columns[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(5):547-554.(in Chinese)

[3] 王佳, 徐颖, 杨荣周, 等. 碳纤维布约束下水泥砂浆动态力学及能量特征[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(4):344-352.
WANG Jia, XU Ying, YANG Rongzhou, et al. Dynamic mechanics and energy properties of cement mortar with CFRP confines[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(4):344-352.(in Chinese)

[4] 杜常博, 朱明皓, 易富, 等. 玄武岩纤维表面改性对混凝土力学性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(7):573-579.
DU Changbo, ZHU Minghao, YI Fu, et al. Effect of basalt fiber surface modification on mechanical properties of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(7):573-579.(in Chinese)

[5] HUI C, LI Y G, ZHOU Z Y, et al. Behavior of concrete-filled GFRP tube columns under cyclic axial compression [J]. Construction and Building Materials, 2021, 294:123566.

[6] HUANG D M, LIU Z Z, LIU P, et al. Research on eccentric compressive behavior of steel fiber reinforced recycled concrete-filled GFRP tube columns[J]. Composite Structures, 2022, 301:116179.

[7] 黄俊杰, 佘艳华, 张鹤凡, 等. CFRP加固木柱的轴压损伤性能试验研究[J]. 复合材料学报, 2024, 41(9):5110-5124.
HUANG Junjie, SHE Yanhua, ZHANG Hefan, et al. Experimental study on axial compressive damage performance of CFRP-reinforced wood columns[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(9):5110-5124.(in Chinese)

[8] LI S L, HOU S T, WU G M, et al. Damage pattern recognition of concrete hollow slab with analysis of different AE monitoring positions[J]. Applied Acoustics, 2024, 219:109916.

[9] DU K, LUO X Y, LIU M H, et al. Understanding the evolution mechanism and classification criteria of tensile-shear cracks in rock failure process from acoustic emission (AE) characteristics[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 296:109864.

[10] OLIVEIRA T L L, ZITOUNE R, ANCELOTTI J A C, et al. Smart machining:Monitoring of CFRP milling using AE and IR [J]. Composite Structures, 2020, 249:112611.

[11] 李猛, 潘喜利, 刘翔, 等. 基于AE和DIC监测的不同裂纹木构件损伤规律研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2024, 44(4):174-185.
LI Meng, PAN Xili, LIU Xiang, et al. Study on monitoring the damage law of wood components with different cracks based on AE and DIC[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Science), 2024, 44(4):174-185.(in Chinese)

[12] WANG Z L, NING J G, REN H L. Intelligent identification of cracking based on wavelet transform and artificial neural network analysis of acoustic emission signals[J]. Insight-Non-Destructive Testing & Condition Monitoring, 2018, 60(8):426-433.

[13] 范向前, 葛菲. 基于声发射技术的早龄期混凝土断裂性能[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(2):153-160.
FAN Xiangqian, GE Fei. Fracture performance of early-age concrete based on acoustic emission measurement [J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(2):153-160.(in Chinese)

[14] YANG L Y, XIE H Z, ZHANG D B, et al. Acoustic emission characteristics and crack resistance of basalt fiber reinforced concrete under tensile load [J]. Construction and Building Materials, 2021, 312:125442.

[15] 赵秋红, 董硕, 谢萌. 钢纤维增强地聚物再生混凝土单轴受压全曲线试验[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(11):255-265.
ZHAO Qiuhong, DONG Shuo, XIE Meng. Experiments on stress-strain curve of steel fiber reinforced geopolymer recycled concrete under uniaxial compression [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(11):255-265.(in Chinese)

[16] LI B, XU L H, SHI Y C, et al. Effects of fiber type, volume fraction and aspect ratio on the flexural and acoustic emission behaviors of steel fiber reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 181:474-486.

[17] LI D S, CHEN Z, FENG Q M, et al. Damage analysis of CFRP-confined circular concrete-filled steel tubular columns by acoustic emission techniques[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(8):085017.

[18] 刘鑫, 杨鼎宜, 刘廉, 等. 温度-恒载耦合作用下钢纤维混凝土损伤时变规律及其声发射响应[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(1):24-30.
LIU Xin, YANG Dingyi, LIU Lian, et al. Time-varying law and acoustic emission response of steel fiber reinforced concrete under temperature-constant load coupling action [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(1):24-30.(in Chinese)

[19] MA G, WU C, HWANG H J, et al. Crack monitoring and damage assessment of BFRP-jacketed concrete cylinders under compression load based on acoustic emission techniques [J]. Construction and Building Materials, 2021, 272:121936.

[20] HUANG J J, SHE Y H, HE J M. Effect of CFRP winding modes on axial compressive damage performance of wood components [J]. Construction and Building Materials, 2024, 426:136148.

[21] LIU Y, CAO S G, DU S Y, et al. Impact of water saturation on the deterioration of mechanical properties and damage mechanisms of sandstone composites[J/OL]. Nondestructive Testing and

Evaluation: 1-28 [2025-01-03]. https://doi. org/10.1080/10589759.2024.2449492.

[22] HUANG D M, LIU Z Z, MA W T, et al. Steel fiber-reinforced recycled aggregate concrete-filled GFRP tube columns: Axial compression performance [J]. Construction and Building Materials, 2023, 403:133143.

[23] LI K S, LUAN Y Q, ZHANG J P, et al. Experimental study on mechanical behavior, AE response and energy evolution of fissure-filled sandstone from mine roadway under conventional triaxial compression [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2024, 130:104334.

[24] SU G S, HUANG L, QIN Y Z, et al. Experimental study of the "AE quiet period" on the eve of brittle failure in hard rock[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 162:108391.

[25] XARGAY H, RIPANI M, FOLINO P, et al. Acoustic emission and damage evolution in steel fiber-reinforced concrete beams under cyclic loading[J]. Construction and Building Materials, 2021, 274:121831.

[26] GAO D, WANG L, MA W. Flexural tensile property and damage evolution of hooked-end steel fiber reinforced concrete with low fiber dosage and concrete strength [J]. Journal of Building Engineering, 2025, 99:111680.

[27] TAN J K, WANG M S, WANG Y H, et al. Effects of steel fibre volume fraction on the mechanical behaviour and damage index evolution of steel fibre-reinforced concrete [J]. Alexandria Engineering Journal, 2025, 122:109-129.

[28] NEJATI H R, NAZERIGIVI A, IMANI M, et al. Monitoring of fracture propagation in brittle materials using acoustic emission techniques-A review[J]. Computers and Concrete, 2020, 25: 15-27.

[29] TAYFUR S, ALVER N, ABDI S, et al. Characterization of concrete matrix/steel fiber de-bonding in an SFRC beam: Principal component analysis and *k*-mean algorithm for clustering AE data[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 194:73-85.

[30] NAADIA T, GUECIOUER D. Optimization of steel fiber-reinforced self-compacting concrete with tuff powder[J]. Construction and Building Materials, 2025, 474:140759.

[31] XIAO W J, WAN H P, ZHANG D M, et al. Study on the failure process of surrounding rock of arch roadway after high temperatures: Insights from surrounding rock fracture and the corresponding acoustic response[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 162:106616.