[文章编号] 1003－4684(2026)01-0115-08

基于声发射参数分析的钢纤维混凝土弯曲性能研究

姜志炜

(湖北工业大学土木建筑与环境学院，湖北 武汉 430068)

[摘 要] 通过 45 个标准短梁试件四点弯曲试验研究钢纤维混凝土弯曲性能，考察钢纤维类型、体积掺量和长径比对其荷载-挠度曲线和韧性指标的影响。采用声发射技术对其破坏全过程进行实时监测，并基于声发射信号参数分析，深入研究其损伤过程，揭示其破坏机理。研究结果表明：端勾型钢纤维混凝土呈现较优的弯曲性能指标。随着纤维体积掺量和长径比增加，钢纤维混凝土弯曲强度及韧性均不断增强，试件内部累计声发射事件数和剪切裂纹数量也逐步增大，混凝土试件由受拉破坏向受剪破坏演变。端勾型钢纤维混凝土抗开裂性能最优，试件内部剪切裂纹所引起的声发射事件数最多。

[关键词] 钢纤维混凝土；弯曲；声发射；韧性；破坏机理

[中图分类号] TU 528.55 [文献标识码] A

半个世纪以来，钢纤维混凝土以其优异的物理力学性能被广泛应用于房屋、道路、桥梁、隧道衬砌等土木工程与建筑领域。钢纤维的掺入可显著提高混凝土抗拉、抗弯及抗折强度，改善其延性和韧性，增强钢筋与混凝土的粘结性能以及结构和构件的抗震性能和抗疲劳性能等[1-3]。国内外学者对钢纤维混凝土的力学性能影响开展了大量研究，取得了较为丰富的研究成果[4-10]。研究结果表明，对于特定强度的基体混凝土，纤维为主要影响因素。纤维参数如长径比、类型、体积掺量、混杂方式等对混凝土的弯曲强度和韧性具有显著影响[11-14]。明确纤维参数对混凝土性能的影响规律，揭示纤维在微细观尺度下的作用机理可为钢纤维混凝土材料设计和实际工程应用奠定基础。

与此同时，随着科技的快速发展，无损检测技术得以应用于表征微观尺度下混凝土的损伤过程。常见的无损检测技术包括声发射技术、超声波法、红外热像法、CT 扫描和数字图像技术等。然而，超声波法易受混凝土材料本身和钢筋影响；CT 扫描技术需对试样进行切片，无法实现实时监测；红外热像及数字图像技术只能检测混凝土表面损伤发展情况。而声发射技术是以材料内部局部变形为激励，试件内部应变能以弹性波形式释放并被采集系统收集的技术。声发射信号携带着材料本身的物质和力学属性，不同损伤机制具有明显不同的信号特征，可有效识别混凝土材料破坏失效机理[15]。声发射技术操作简单、携带方便，能够实时监测混凝土材料或结构受力过程中的声发射响应，被广泛应用于混凝土材料和结构的损伤监测、损伤识别和损伤评估工作中。如 Farnam 等[16]深入分析了混凝土中基体、骨料及其界面的声发射波形特征，对骨料-基体裂纹和基体裂缝进行了识别。Prem 和 Murthy[17]等研究了钢筋混凝土梁弯曲损伤机制，并将其损伤分为微观裂纹形成、宏观裂纹扩展、钢筋屈服和混凝土破碎等四类。Gostauta 等[18]的研究结果表明声发射技术可识别纤维混凝土中不同的破坏机制，如纤维断裂、基体开裂、纤维脱黏和拔出等。而纤维拔出和滑移将产生较多的声发射事件数[18,19]。基于声发射信号释放过程，钢纤维混凝土的弯曲破坏过程分为峰前阶段、断裂发生段和破坏段，不同阶段的声发射信号拥有显著的不同特征[19]。Aggelis 等[20-22]研究了不同纤维类型的钢纤维混凝土声发射信号特征，表明变形钢纤维在拔出过程中将产生更多的基体裂纹，声发射信号释放数量随着钢纤维体积掺量增加而增多[23-24]。

由上可知，当前钢纤维弯曲性能和破坏过程研究的成果较为丰富，但含不同纤维参数(如纤维类型、体积掺量和长径比)的钢纤维混凝土在弯拉荷载下的细观响应和破坏机理的研究还较少，钢纤维混凝土的力学行为的演化机理未得到合理揭示。为此，本文开展 45 个钢纤维混凝土试件四点弯曲试验，分析纤维类型、体积掺量和长径比对其弯曲性能

[收稿日期] 2023－06－24

[基金项目] 湖北工业大学科研启动基金项目(XJ2022000401)

[第一作者] 姜志炜(2000－)，男，江苏徐州人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为混凝土材料与结构性能。

的影响规律，采用声发射技术实时监测钢纤维混凝土的破坏全过程，并基于声发射信号特征分析，探究钢纤维混凝土在微细观尺度的破坏机制。研究成果对钢纤维混凝土的理论发展和工程应用具有十分重要的意义。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

参考前期研究成果，试验选用三种类型钢纤维：圆直型(straight fiber，S)、端勾型(hooked-end fiber，H)和剪切波纹型(corrugated fiber，C)；四种钢纤维体积掺量为 0.5%、1.0%、1.5%、和 2.0%；三种剪切波纹型钢纤维长径比为 40(small，S)、60(medial，M)和 80(length，L)。设计 15 组共 45 个试件(表 1)。

表 1 试件设计及基本强度

编号	纤维类型	体积掺量/%	纤维长径比	f_c/MPa	f_{st}/MPa
PC	—	—	—	47.53	2.75
S05	圆直型	0.5	60	49.35	3.24
S10		1.0		51.44	3.79
S15		1.5		53.21	3.95
S20		2.0		52.25	4.12
H05	端勾型	0.5	60	50.76	3.61
H10		1.0		51.92	3.96
H15		1.5		53.65	4.47
H20		2.0		53.05	4.67
CM05	波纹型	0.5	60	50.09	3.44
CM10		1.0		51.75	3.94
CM15		1.5		52.91	4.28
CM20		2.0		52.92	4.44
CS15		1.5	40	52.64	4.02
CL15		1.5	80	52.75	4.39

根据《钢纤维混凝土试验方法》(CECS 13-2009)，试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm。采用 60L 强制式搅拌机进行试件制备，具体步骤及过程为：1)将水泥和河砂倒入搅拌机中，干拌3 min；2)加入水及减水剂，搅拌 3 min；3)加入碎石和钢纤维，搅拌 5 min 后装入塑料模具；4)在振动台上振捣 3～5 min，使混凝土密实成型；5)浇筑后的混凝土试件在室温阴凉处静置 24 h 后进行脱模，随后放入温度为 20±3 ℃、湿度为 95%的标注养护室内养护。

1.2 材料性能

根据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55-2011)和《纤维混凝土结构设计规程》(CECS 38：2004)设计 C40 基体混凝土。其主要组成成分为：42.5 普通硅酸盐水泥，优质河砂(细度模数为 2.7)、天然碎石(粒径 5～20 mm)、聚羧酸高效减水剂(减水率≥20%)。基准混凝土配合比设计结果为 m(水泥)：m(水胶比)：m(河砂)：m(碎石)=1：0.42：1.74：2.60。

按照《钢纤维混凝土试验方法》(CECS 13-89)对在温度 20±3℃、湿度 95%以上的环境中养护 28 d的立方体试块进行立方体抗压强度(f_c)和劈裂抗拉强度(f_{st})试验，试验结果见表 1。所选用的三种常见钢纤维类型包括圆直型、端勾型、波纹型，与混凝土均有较高相容性，其物理和力学性能指标见表 2。其中圆直型钢纤维为镀铜微丝，圆柱状，两端平直，与混凝土间主要为化学粘胶着力和较小摩擦力；端勾型钢纤维为圆柱状，但纤维两端存在弯勾，与混凝土间存在化学胶着力、摩擦力和端勾产生的机械咬合力；波纹型钢纤维上存在多个连续的挤压波纹，与混凝土间除化学胶着力和摩擦力外，还有波纹引起的机械咬合力。

表 2 钢纤维物理和力学性能参数

编号	类型	密度/(kg·m^{-3})	长度/mm	长径比	E_r/GPa	f_t/MPa	特征形貌
S	圆直型	7.9	12	60	200	1300	
H	端勾型	7.9	30	60	200	1195	
CS		7.9	30	40	200	1100	
CM	波纹型	7.9	45	60	200	1100	
CL		7.9	60	80	200	1100	

1.3 加载方案及量测

在 RTM-301 岩石测试系统上进行四点弯曲试验，试验机最大荷载为 1000 kN。每次正式加载开始前，先进行一次预加载，荷载约为 10%峰值荷载。试验采用位移控制加载模式，加载速率为 0.12 mm/min。加载过程中的荷载和位移由测试系统自动采集。为捕捉试件在加载过程中的裂缝发展过程，试验过程中，采用 6 个型号为 Nano30(频域范围为 100～400 kHz)的声发射探头在试件表面进行三维空间定位，声发射信号数据由美国物理公司生产的 PCI-2 声发射信号采集系统自动采集和存储。为避免环境对声发射信号采集的影响，正式加载开始前，先采用断铅(pencil lead breaking，PLB)试验测试系统稳定性，并得到系统稳定时的声发射信号参数设置(表 3)。试验加载装置和声发射测试系统见图 1。

表 3　声发射信号采集系统参数设置

参数名称	单位	参数设置值
前置放大增益	dB	40
阈值	dB	40
峰值定义时间	μs	50
撞击定义时间	μs	200
撞击闭锁时间	μs	300
最大持续时间	ms	100
波速	mm/s	4 260 000
事件定义值	DU	250
事件锁闭值	DU	500
衰减率	dB/mm	0.25

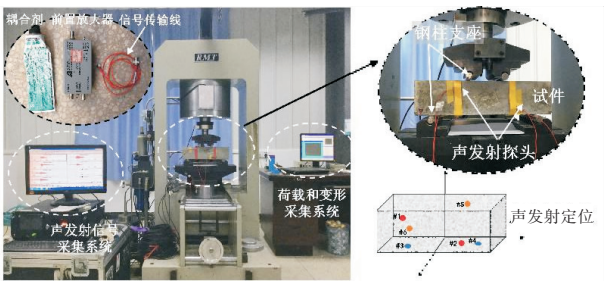
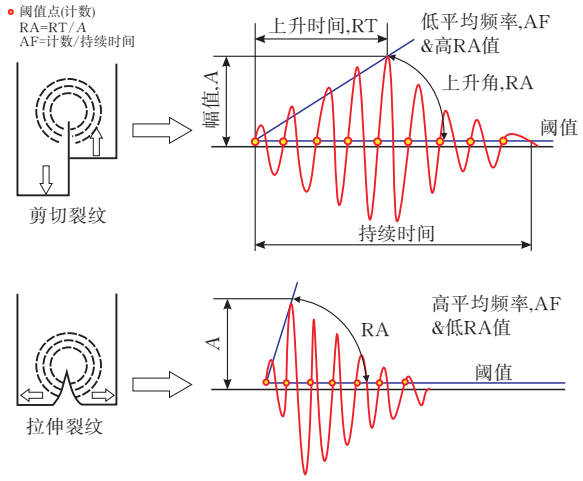


图 1　四点弯曲试验和数据采集系统

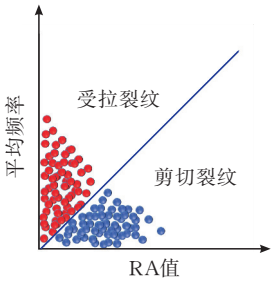
2　试验结果及分析

2.1　荷载-挠度曲线

2.1.1　弯曲破坏全过程　常用的声发射参数包括撞击数、事件数、计数、幅值、能量、平均频率等，详细参数定义见图 2。



(a)参数定义



(b)裂纹分类

图 2　声发射参数定义及裂纹分类示意

其中，撞击数为系统对超过门槛值并不断在一个系统通道中累积的声发射信号的累积计数；事件数为由一个或几个撞击鉴别所得声发射事件的个数，用于声发射源的活动性和定位集中度评价；振铃计数为一次声发射事件撞击传感器产生的电信号，其电压值超过门槛电压的振荡次数；幅值为声发射撞击信号波形最大振幅，单位为 mV；能量为声发射撞击信号波形包络线所围面积；上升角 RA 值是上升时间与幅值的比值；平均频率 AF 值是计数与持续时间的比值。对于不同裂纹类型，声发射信号的 RA 值和平均频率显示不同的变化规律，见图 2b。同时，为了对裂纹进行精确捕捉，试验中采用六个声发射探头进行空间定位，基于声发射三维空间定位，可直观反映试件内部裂纹扩展过程。

图 3 为典型试件(H15)弯曲荷载-挠度全曲线。曲线大致可分为三段[23]，具体为：随着轴向位移增加，荷载基本呈线性增长，试件表面第一条裂纹出现时，荷载小幅度陡降，定义为初裂 A 点；随着位移增加，曲线到达峰值 B 点；峰值过后，曲线逐渐下降，出现软化现象，并在 C 点后偏向时间轴，为拐点；在 D 点后基本平直，定义为收敛点。根据 CECS 13:2009《纤维混凝土试验方法标准》，图 3 中 Ω_k 指的是 OAHI 围成的曲线面积，H 点选取曲线 BC 间凹凸性发生变化的拐点。

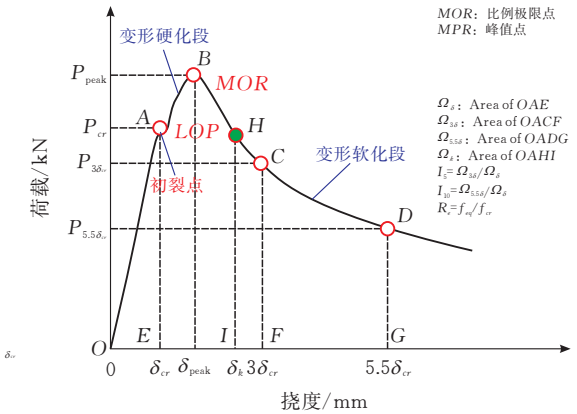


图 3　典型试件荷载-挠度曲线及相关参数定义

典型试件声发射释放过程随荷载变化趋势见图 4，图中包含了累计声发射事件数随加载时间的变化趋势。由图 4 可见，在 OA 段累计声发射事件数随着时间呈现缓慢上升趋势；在 AB 段累计声发射事件数随着时间呈现陡增趋势；在 AB 段累计声发射事件数随着时间呈现陡增趋势；在 B 点后累计声发射事件数随着时间呈现逐渐增长趋势，但增长速度逐渐减缓，与 AB 段相比增长速度明显缓慢许多。

同时，为深入探究试件在弯曲荷载下的破坏机理和纤维增强机理，对弯曲荷载-挠度曲线的关键点(A、B、C、D 点)的声发射信号特征(能量、幅值)及特

性(RA 值、平均频率)及声发射定位结果进行深入分析,结果见图 4、图 5 和图 6。

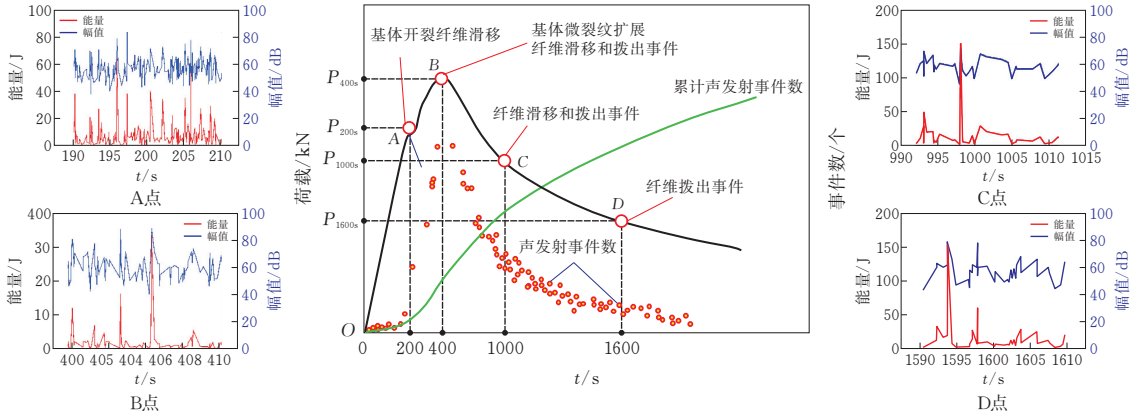


图 4　典型试件声发射事件数和累计声发射事件数

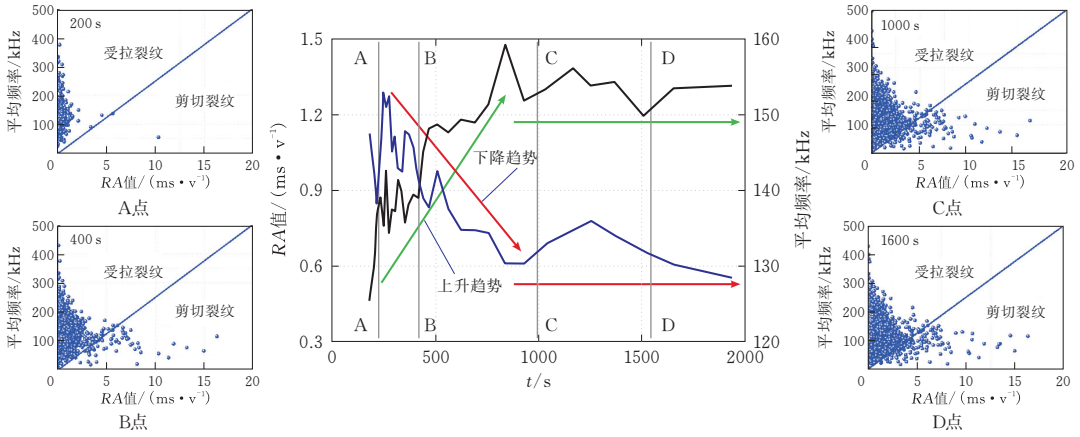


图 5　加载过程中声发射 RA 值和平均频率变化过程

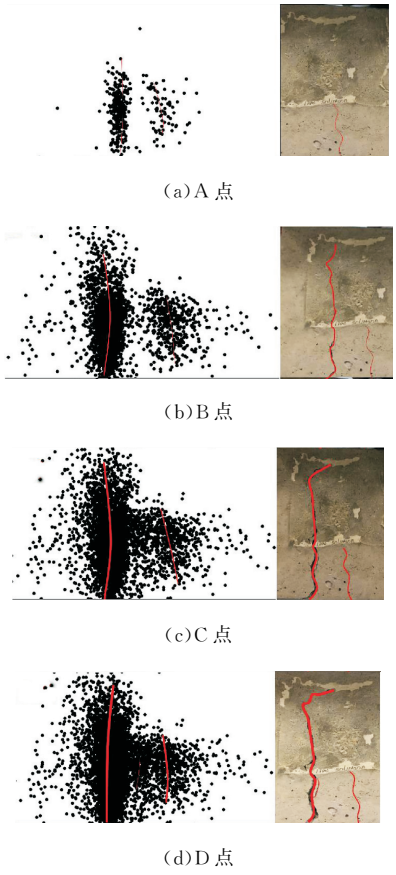


图 6　试件破坏过程中的声发射定位及宏观破坏过程

声发射信号释放的多少取决于声发射事件数。信号强度是指声发射信号的能量,平均幅值是指信号的平均振幅。信号强度与平均幅值呈正相关。平均幅值反映声发射信号的振幅,裂缝的大小影响声发射信号的幅值,通常来说裂缝越大,声发射信号的平均幅值越大。平均幅值也反映了裂缝演化速度,一般来说裂缝的活动性越大,声发射信号的平均幅值也会越大。结合荷载-挠度曲线及声发射信号分析结果,可将其弯曲破坏全过程总结为四大阶段:

1)弹性段(OA 段):荷载与挠度呈线性关系。试件内部微裂纹等未达到开裂荷载。声发射事件数接近于 0,声发射事件数增加缓慢,无明显声发射信号释放。到达 A 点时,试件表面出现第一条微裂缝,声发射事件数陡增,释放频率密集,此时信号强度基本低于 80 J,平均幅值约为 55 dB。此时 RA 值很小,平均频率较大,主要为受拉裂纹。定位图图 6 中红色散点数分布零星且零散,试件表面有一条较细的裂纹由试件底部向上开裂演化。本阶段初现微裂缝。

2)微观裂纹扩展段(AB 段):随着轴向位移增加,曲线呈现出非线性特征,出现变形硬化。声发射信号持续释放,在 B 点达到峰值,此时信号强度基

本高于 80 焦耳，其平均幅值略高于 AB 段。由图 5 可以看出，由 A 点到 B 点，平均频率出现显著减小趋势，RA 值则略微增大，试件内部剪切裂纹明显增多。由图 6 可知，试件表面裂缝持续演化，裂缝宽度不断增大，主裂缝周边的微小裂缝逐步扩展和汇聚，但未与宏观主裂缝交叉。本阶段信号强度及平均幅值较 OA 段增大，这是由于裂缝持续演化，裂缝宽度拓展增大，裂缝的演化速度增加。

3）宏观裂纹扩展段（BC 段）：峰值过后，试件弯曲荷载显著降低，出现变形软化。试件表面仅有一条自下而上贯穿整个试件截面的主裂缝（图 6）。声发射信号释放数量显著减少，信号能量分布不均匀，仅有少量信号的信号强度高于 25 焦耳，其平均幅值低于 60 dB。此外，RA 值持续增大，平均频率持续减小，试件内部由纤维滑移和拔出引起的剪切裂纹数量显著增多。本阶段信号强度及平均幅值相比 AB 段大幅减小，这是由于裂缝在 AB 阶段演化速度大、拓展宽度大，声发射测得的平均幅值较大。然而随着时间的推移，在 BC 段裂缝的演化速度及裂缝的拓展减弱，导致声发射的平均幅值减小。

4）破坏收敛段（C 点后）：C 点过后，曲线偏向时间轴，试件表面主裂缝持续扩展，周边有局部细小裂纹产生。声发射事件数释放量降低，信号幅值和信号强度与 C 点差别较小，平均频率和 RA 值趋于稳定，声发射信号主要由剪切裂纹控制产生。本阶段信号强度及平均幅值与 C 点差别较小，这是由于裂缝的扩展及加深已经逐渐达到了某种临界点，停止了进一步的变化。在这种情况下，声发射测得的幅值可能会随着时间的推移逐渐减小，因为裂缝的变化逐渐趋于停止。

2.1.2　纤维参数的影响　图 7 为纤维类型对试件荷载-挠度曲线的影响。由图 7 可知，钢纤维类型对试件初裂前荷载-挠度曲线的影响较小，不同类型纤维的试件曲线基本重合。这是由于在试件初裂前，试件处于弹性阶段，内部产生的拉应力还未达到混凝土基体的开裂强度，试件内部无微裂缝萌生和发展，试件强度仅与材料基体相关，纤维未产生明显作用。因此，试件的荷载-挠度曲线在初裂前阶段基本重合。当纤维体积掺量为 0.5%时，纤维类型对试件峰值荷载几乎没有影响。这是由于在纤维体积掺量较低时易分散不均匀，且裂纹处起桥接作用的钢纤维数量较少，各类型纤维无法充分发挥其各自抗裂性能。但随着纤维体积掺量增加，端勾型钢纤维混凝土强度最高、峰后延性最好，波纹型其次，而圆直钢纤维性能最差。这主要是由于钢纤维与基体的粘结性能引起的。研究表明[24]，波纹型钢纤维拉拔荷载最大，耗能能力最强，而圆直钢纤维最差。端勾型钢纤维具有锚固端钩，增加了钢纤维与混凝土的锚固效果，以及钢纤维与混凝土之间的摩擦力、阻力，增强混凝土的弯曲强度和延性；且相同纤维体积掺量时，端勾型纤维数量仅次于圆直型纤维，可提供较强的抗拉强度。与之相反，圆直型钢纤维两端平直，与混凝土的粘结强度较低，其增强效果有限，混凝土的弯曲强度和峰后延性相对较差。相比之下，波纹型钢纤维与基体的机械咬合力虽然能够提高钢纤维与混凝土的粘结性能，但相同掺量下，其数量最少，所提供的抗拉强度有限，因此端勾型钢纤维混凝土的弯曲强度延性相对较差，但优于圆直型钢纤维混凝土。但钢纤维体积掺量较低时（如 0.5% 和 1.0%），裂纹处起桥接作用的钢纤维数量较少，纤维承载开裂荷载能力较小，因此纤维类型的影响不大。

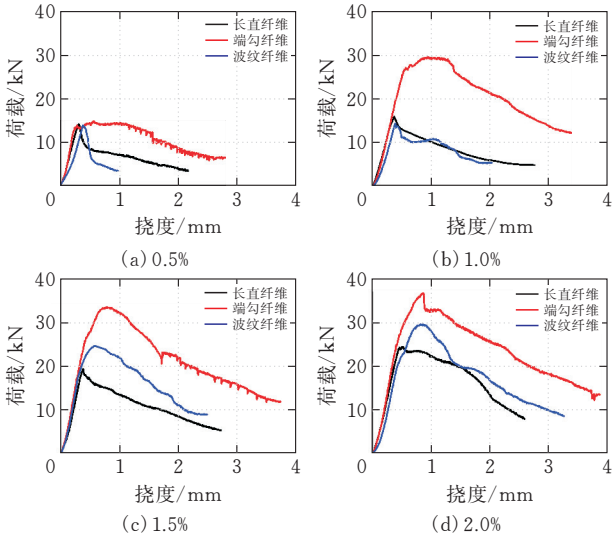
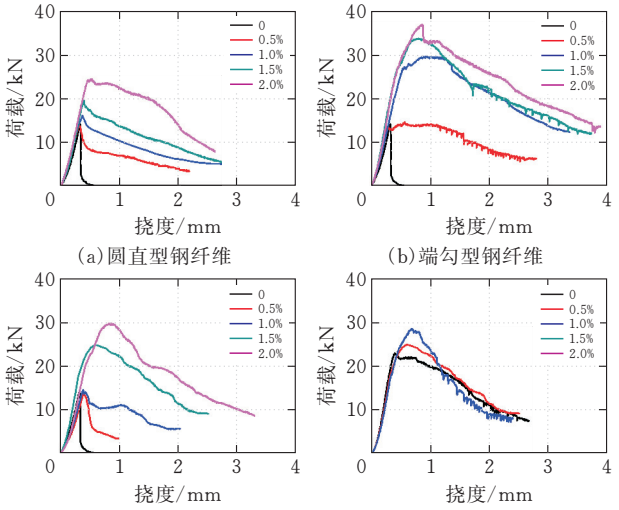


图 7　钢纤维类型对荷载-位移曲线的影响

图 8a－c 为含不同钢纤维体积掺量的混凝土试件荷载-挠度曲线。从图中可以看出，普通混凝土试件出现开裂时，荷载出现陡降，下降幅度约为峰值荷载的 80%。而纤维混凝土试件则出现明显的硬化段和软化段。这是由于钢纤维的掺入使得混凝土具有更好的弯曲强度和延性。钢纤维在混凝土中能够形成一个三维的纤维网状结构，可有效控制和减缓开裂的发展，从而提高混凝土的抗裂性能。随着纤维体积掺量越大，试件峰值强度和峰后延性越好，曲线与坐标轴包络的面积也越大，耗能能力越强。波纹型钢纤维长径比对试件荷载-挠度曲线的影响见图 8d。由图可知，纤维的长径比对曲线的峰前段影响小，对峰后影响较大。当钢纤维长径比为 60 时，试件延性最好。这是由于在峰前段，裂缝宽度较小，纤维均未被拔出，纤维均可起到裂缝桥接作用，因此峰前的影响较小；但峰值过后，混凝土的抗拉强度主要由钢纤维数量和粘结力决定。相同体积掺量时，

纤维长径比越大，钢纤维数量越少，粘结力越小，但此时纤维的总表面积增大，纤维与混凝土之间的摩擦力增大，黏结力增加，相互作用力增大。因此，纤维长径比存在最优值。基于本文试验结果，当长径比为 60 时，试件延性最好。

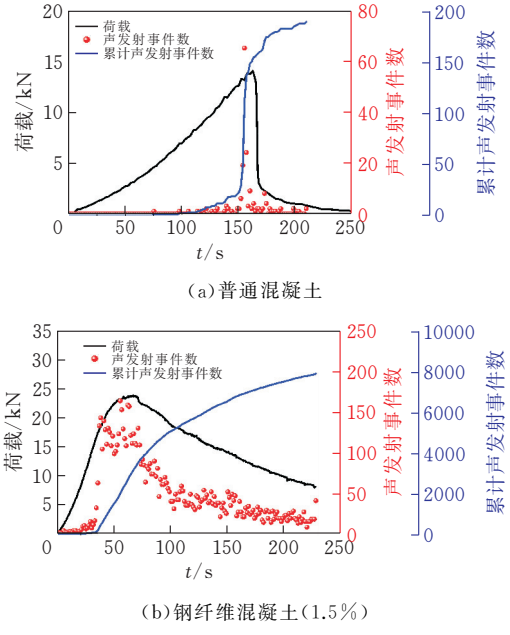


(a)圆直型钢纤维 (b)端勾型钢纤维

(c)波纹型钢纤维掺量 (d)波纹型钢纤维长径比

图 8 钢纤维体积掺量和长径比对荷载-位移曲线的影响

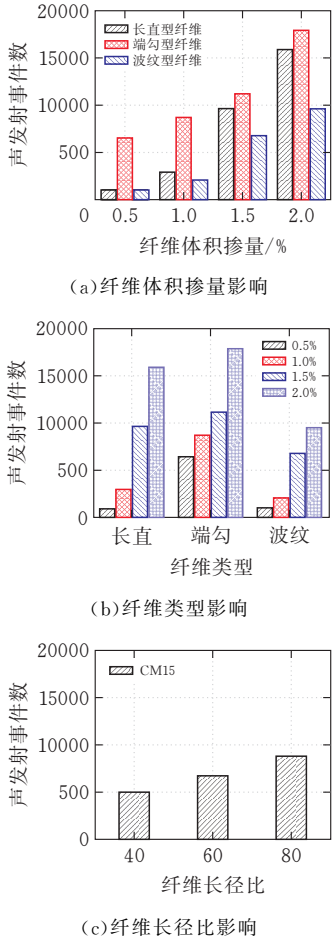
采用声发射事件数描述其破坏过程，并统计了其累计声发射事件数，见图 9 和图 10。从图 9 可以看出，普通混凝土峰值后荷载陡降为 0 kN，仅有极少数声发射信号产生。但钢纤维混凝土(CM15)达到开裂荷载后有大量声发射信号释放。其主要原因是普通混凝土中声发射信号源主要为基体开裂、骨料-基体界面开裂和骨料断裂，但钢纤维混凝土中还有纤维滑移和拔出引起的事件数，且剪切裂纹数量增多。此外，由于普通混凝土试件的脆断，声发射信号释放时间较短(仅约为 230 s)，而钢纤维混凝土释放时间则较长，约为 1400 s。由此可以看出，纤维滑移和拔出在钢纤维混凝土总声发射信号数量中占据较大比重，尤其是开裂后阶段。随着钢纤维体积掺量和长径比增加，不同钢纤维类型的试件的累计声发射事件数均不断增加，这主要是由于较大纤维掺量和较长钢纤维引起了较多的纤维滑移和拔出事件数。对于不同的变形钢纤维类型，端勾型钢纤维混凝土声发射事件数最多，而圆直钢纤维则对应的最少，这主要与变形钢纤维与基体混凝土界面粘性性能和粘结机理有关。研究表明，钢纤维类型对其与基体混凝土拉拔性能具有显著影响。当埋置长度相同时，波纹型钢纤维粘结强度、峰值滑移和耗能能力均最大，圆直型钢纤维则最弱。研究表明，钢纤维与混凝土基体粘结强度由化学胶着力、纤维滑移摩擦力和机械咬合力组成[7]。对于圆直型钢纤维，只有化学胶着力和摩擦力两种；对于变形钢纤维，机械咬合力则发挥较大作用。



(a)普通混凝土

(b)钢纤维混凝土(1.5%)

图 9 典型试件在加载过程中声发射事件数



(a)纤维体积掺量影响

(b)纤维类型影响

(c)纤维长径比影响

图 10 不同纤维参数下钢纤维混凝土累计声发射事件数

2.2 弯曲韧性

韧性是评估混凝土材料和结构耗能能力的重要指标之一。参考《钢纤维混凝土试验方法标准》(CECS 13:2009)，采用三种韧性指标研究钢纤维混凝土的耗能性能，其中，Ω_8为初裂挠度时荷载-挠度

曲线与坐标轴围成的面积，定义为初裂韧性；$\Omega_{3\delta}$为3倍初裂挠度时荷载-挠度曲线与坐标轴的面积，$\Omega_{5,5\delta}$则对应于5倍初裂挠度时所计算的面积，具体参数定义详见图3。不同纤维参数的钢纤维混凝土弯曲韧性计算结果见表4。此外，采用两个韧性指标和一个韧性比率分析钢纤维混凝土的弯曲韧性性能(图3)，其计算方法为：

$$I_5 = \Omega_{3\delta}/\Omega_{\delta} \tag{1}$$

$$I_{10} = \Omega_{5.5\delta}/\Omega_{\delta} \tag{2}$$

$$R_e = f_{eq}/f_{cr} \tag{3}$$

式中，I_5、I_{10}为韧性指数；R_e为韧性比率；f_{eq}为等效弯曲强度，f_{cr}为初裂强度，MPa。

表4　不同纤维参数的钢纤维混凝土弯曲韧性指标

样本	韧性			韧性指数		韧性比
	Ω_{δ}	$\Omega_{3\delta}$	$\Omega_{5,5\delta}$	I_5	I_{10}	R_e
PC	1.379	—	—	—	—	0.092
S05	1.687	6.493	10.806	3.849	6.405	0.536
S10	1.965	10.012	16.984	5.095	8.643	0.710
S15	2.218	12.382	21.555	5.582	9.718	0.739
S20	3.757	20.940	37.912	5.574	10.091	0.919
H05	2.034	9.769	17.003	4.803	8.359	0.880
H10	5.619	30.534	53.334	5.434	9.491	0.910
H15	6.981	41.127	69.363	5.891	9.936	0.921
H20	8.029	47.693	86.255	5.940	10.743	0.926
CM05	1.424	5.486	—	3.853	—	0.247
CM10	1.603	8.730	15.346	5.446	9.573	0.671
CM15	3.015	18.650	32.905	6.186	10.914	0.914
CM20	4.173	27.665	46.872	6.630	11.232	0.955
CS15	2.246	14.412	27.255	6.417	12.135	0.876
CL15	5.012	25.587	36.796	5.105	7.342	0.722

由表可知，各韧性指标随着钢纤维掺量增加而增大，尤其在峰后阶段。与弯曲荷载和挠度变化规律相似，当钢纤维体积掺量为0.5%时，初裂韧性随纤维参数变化不大。而随着纤维掺量增加，初裂韧性变化显著。当纤维掺量大于1.0%时，端勾型钢纤维混凝土韧性指标最高，圆直型钢纤维混凝土最小。当钢纤维掺量为0.5%和1.0%时，圆直型钢纤维混凝土的变形和耗能能力略高于波纹型钢纤维，而钢纤维体积掺量大于1.0%时，波纹钢纤维混凝土弯曲性能则优于圆直型纤维混凝土。端勾型钢纤维混凝土表现出最优的弯曲性能。

3　结论

1)钢纤维混凝土弯曲破坏全过程可大致分为弹性段、微裂纹扩展段、宏观裂纹扩展段和收敛段等四个阶段。试件表面出现第一条微裂缝时，声发射事件数出现陡增，信号来源均为基体混凝土开裂。随着位移荷载增加，曲线呈现非线性，声发射信号释放在峰值荷载处达到峰值，试件内部由纤维滑移引起的剪切裂纹明显增多。峰值过后，曲线出现变形软化现象，声发射信号数量显著减少。在收敛段，试件表面主裂缝在荷载作用下持续扩展，事件数释放量降低，声发射信号主要由剪切裂纹控制引起。

2)钢纤维显著改善了混凝土的弯曲性能。随着钢纤维体积掺量和长径比增加，弯曲强度、变形性能和韧性、声发射事件数和剪切裂纹数均不断增大。端勾型钢纤维混凝土表现出最优的弯曲性能，产生较多的声发射事件数、定位散点数和剪切裂纹数。当钢纤维掺量低于1.0%时，波纹型钢纤维混凝土弯曲韧性低于圆直钢纤维混凝土，但随着钢纤维体积掺量增加，则完全相反；声发射响应结果与此变化规律一致。

[参 考 文 献]

[1] BRANDT A M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering[J]. Composite Structures, 2008, 86: 3-9.

[2] YAZICI S, AREL H S. The effect of steel fiber on the bond between concrete and deformed steel bar in SFRCs[J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 299-305.

[3] 徐礼华，邓方茜，徐浩然，等. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报，2016，49(01)：3-13.

[4] SWAMY R N, MANGAT P S. Influence of fiber geometry on the properties of steel fiber reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1974, 4(03): 451-465.

[5] SOROUSHIAN P, BAYASI Z. Fiber-type effects on the performance of steel fiber reinforced concrete[J]. ACI Materials Journal, 1991, 88(02): 129-134.

[6] YAZICI S, INAN G, TABAK V. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(06): 1250-1253.

[7] 赵健，廖霖，张帆，等. 钢纤维混凝土弯曲性能和纤维分布试验研究[J]. 建筑材料学报，2020，23(04)：838-845.

[8] LEE J H. Influence of concrete strength combined with fiber content in the residual flexural strengths of fiber reinforced concrete[J]. Composite Structures, 2017, 168: 216-225.

[9] DONG J K, NAAMAN A E, EI-TAWIL S. Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites[J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(10): 917-928.

[10] PAJAK M, PONIKIEWSKI T. Flexural behavior of

self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 397-408.

[11] 王力,徐礼华,邓方茜,等. 波纹型钢纤维-混杂纤维混凝土界面黏结性能[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(04): 866-874.

[12] YOO D Y, KIM S, PARK G J, et al. Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced cement composites [J]. Composite Structures, 2017, 174: 375-388.

[13] 方圣恩, 张培辉, 洪华山. 纤维混凝土梁受弯试验及开裂弯矩计算公式[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(04): 567-574.

[14] WU Z, SHI C, HE W, et al. Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete [J]. Construction and building materials, 2016, 103: 8-14.

[15] 陈兵, 姚武, 张东, 等. 混凝土梁破坏机制的声发射特性实验研究[J]. 建筑材料学报, 2001, 04: 332-338.

[16] FARNAM Y, GEIKER M R, BENTZ D, et al. Acoustic emission waveform characterization of crack origin and mode in fractured and ASR damage concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2015, 60: 135-145.

[17] PREM P R, MURTHY A R. Acoustic emission monitoring of reinforced concrete beams subjected to four-point bending [J]. Applied Acoustics, 2017, 117: 28-38.

[18] GOSTAUTAS R S, RAMIREZ G, PETERMAN R J, et al. Acoustic emission monitoring and analysis of glass fiber-reinforced composites bridge decks [J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10 (06): 713-721.

[19] WU K, CHEN B, YAO W. Study on the AE characteristics of fracture process of mortar, concrete and steel-fiber-reinforced concrete beams[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30: 1495-1500.

[20] AGGELIS D G, SOULIOTI D V, et al. Influence of fiber chemical coating on the acoustic emission behavior of steel fiber reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34: 62-67.

[21] AGGELIS D G, SOULIOTI D V, et al. Monitoring of the mechanical behavior of concrete with chemically treated steel fibers by acoustic emission[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 1255-1260.

[22] AGGELIS D G, SOULIOTI D V, et al. Acoustic emission characterization of the fracture process in fibre reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25: 4126-4131.

[23] 东南大学、天津大学、同济大学. 混凝土结构上册:混凝土结构设计原理(第 6 版)[M]. 上海:中国建筑工业出版社,2016.

[24] 冯峥,李传习,李海春,等. 超高性能混凝土湿接缝界面粘结性能[J]. 硅酸盐学报,2021, 49(11): 2393-2403.

[25] 赵一鹤,孙振平,穆帆远,等. 钢纤维对 UHPC 拉伸性能及其拔出行为的影响[J]. 建筑材料学报,2021, 24(02): 276-282.

Investigation on the Flexural Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Based on Acoustic Emission Parametric Analysis

JIANG Zhiwei

(*School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: Forty-five standard beam specimens are tested using four-point bending tests. The effect of fiber type, volume fraction and aspect ratio on the flexural behaviors of steel fiber reinforced concrete (SFRC) is investigated. The failure process of specimens is monitored by Acoustic emission (AE) technique simultaneously. The damage process and failure mechanism are deeply analyzed based on AE parametric analysis. The results showed that hooked-end SFRC owns the best flexural properties. The peak load, deflection and toughness of concrete increase with increasing fiber volume fraction and aspect ratio. It is noted from AE results that the cumulative AE events, shear cracks and AE source location points mainly induced by fiber pull-out and sliding increase with the increase of fiber volume fraction and aspect ratio. The failure mode of concrete changes from tensile cracks shear cracks with increasing fiber volume fraction. Hooked-end SFRC has the largest AE events, shear cracks and the amount of scatter points for all the four fiber volume fractions.

Keywords: steel fiber reinforced concrete; flexure; acoustic emission; toughness; failure mechanism

[责任编校: 裴 琴]