

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.04.039

# 基于声发射技术的钢纤维混凝土受压 损伤本构关系研究

黄彪, 李彪

(武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 通过6组钢纤维混凝土试件轴心受压应力-应变全曲线试验, 得到试件的应力-应变全曲线、声发射撞击数-时间关系曲线和声发射参数, 研究钢纤维参数对混凝土力学行为和声发射特性的影响。结果表明: 随着钢纤维体积掺量和长径比增加, 混凝土峰值应力和峰值应变明显提高, 其韧性和延性得到显著改善; 利用声发射参数分析可区分钢纤维混凝土试件的破坏模式; 随着钢纤维的掺入, 试件由受拉破坏向剪切破坏转变。基于试验数据, 建立了钢纤维混凝土单轴受压损伤本构关系方程, 可为纤维混凝土的工程应用和相关规程的修订提供参考。

**关键词:** 钢纤维混凝土; 应力-应变全曲线; 损伤演化; 本构模型

中图分类号: TU528.572

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)04-0201-08

## Compressive Damage Constitutive Model of Steel Fiber Reinforced Concrete Based on AE Technique

HUANG Biao, LI Biao

(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

**Abstract:** This paper presents an investigation on the effects of steel fiber parameters on the mechanical behavior and acoustic emission (AE) characteristics of steel fiber reinforced concrete (SFRC). The stress-strain curves, AE hits-time relations and AE parameters of specimens were obtained by conducting the uniaxial compressive stress-strain curves test on the SFRC specimens. The results indicate that with the increase of steel fiber volume fraction and aspect ratio, both the peak stress and peak strain are enhanced, and the toughness as well as the ductility of concrete is improved. The fracture modes can be classified by AE parameter analysis. The fracture mode of concrete changes from tensile mode to shear mode with the incorporation of steel fibers. Based on the test results, a uniaxial compressive damage constitutive model of SFRC is established. The proposed model can serve as a reference for the engineering application of SFRC and future refining of relevant technical specification.

**Keywords:** steel fiber reinforced concrete; stress-strain curve; damage evolution; constitutive model

近年来, 钢纤维混凝土以其优越的力学性能, 被广泛应用于工程建设中<sup>[1]</sup>。当钢纤维均匀加入混凝土基体中, 混凝土中形成多向约束系统, 能显著提高混凝土抗拉、抗剪强度, 改善其韧性和延性。姬小祥等<sup>[2]</sup>对铣削型、端钩型和压痕型三种类型钢纤维混凝土的力学性能进行了分析。韩嵘等<sup>[3]</sup>、杨萌等<sup>[4]</sup>对钢纤维混凝土受拉应力-应变关系曲线进行了研

究, 并得到了钢纤维混凝土受拉应力-应变全曲线的数学模型; 高丹盈<sup>[5]</sup>、张晓燕等<sup>[6]</sup>、Bencardino F等<sup>[7]</sup>对钢纤维混凝土受压力学行为进行研究, 并对试验数据进行拟合得到了受压应力-应变全曲线的数学表达式。邓宗成等<sup>[8]</sup>对 SFRC 进行反复加卸载试验, 建立了钢纤维混凝土反复加卸载应力-应变曲线方程及变形计算公式。董毓利等<sup>[9]</sup>基于不可逆

收稿日期: 2018-03-12

修稿日期: 2018-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478367, 51608397); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20130141110044)

作者简介: 黄彪(1993—), 男, 湖南常德人, 硕士研究生, 研究方向为纤维混凝土本构关系。E-mail: 2286039175@qq.com

通讯作者: 李彪(1990—), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 研究方向为纤维混凝土本构关系和钢-混组合结构。E-mail: libiao@whu.edu.cn

热力学理论提出了含损伤的弹塑性内时本构模型,并与试验结果吻合良好。宋玉普等<sup>[10]</sup>在普通混凝土内时损伤本构模型的基础上,引入纤维参数对损伤变量的影响,建立了 SFRC 内时损伤本构模型。王春来等<sup>[11]</sup>和宁喜亮等<sup>[12]</sup>根据 Weibull 统计分布理论和等效应变假定原理得到 SFRC 的损伤本构模型,并基于实验数据对模型的参数进行了拟合。

综上所述,国内外学者对钢纤维混凝土力学行为和本构关系开展了大量研究,取得了重要成果,对钢纤维混凝土的工程应用和发展具有重要作用。但仍存在以下问题:(1) 目前对钢纤维混凝土的研究仍停留在宏观层次,纤维细观桥接作用和滑移机制并未得到很好的揭示;(2) 钢纤维混凝土破坏过程以及混凝土内部微裂纹扩展和损伤演化过程研究较少;(3) 钢纤维混凝土损伤本构关系研究还较少。

声发射是材料变形、裂纹开裂及扩展过程的伴生现象<sup>[13-18]</sup>,并且声发射过程与力学过程密切相关。通过测量和分析钢纤维混凝土在受力过程中发出的声发射信号,可推断结构内部的破坏,并识别损伤的大小。严伟洋等<sup>[19]</sup>对各应力水平下斜长花岗岩的声发射事件活动规律进行了研究,结果表明声发射事件累计计数可以很好描述岩石受压破坏的全过程。Ohstu M 等<sup>[20-21]</sup>采用声发射撞击数和声发射信号幅值对混凝土结构的损伤程度进行评估。Grosse C 等<sup>[22]</sup>和 Mcliskey G C<sup>[23]</sup>等考虑不同声发射信号达到时间不同对混凝土结构中的损伤进行定位。Finck F 等<sup>[24]</sup>和 Ohstu M 等<sup>[25]</sup>利用声发射对混凝土的破坏机理进行了研究,可以通过声发射信号区分混凝土的破坏模式。

本文在国家自然科学基金(51478367,51608397)的资助下,通过钢纤维混凝土单轴受压试验,并采用声发射系统同步采集加载过程中的声发射信号,深入分析了纤维对混凝土力学行为以及声发射参数的影响,基于试验数据,建立了钢纤维混凝土单轴受压本构关系方程。

## 1 试验概况

### 1.1 原材料与配合比

根据《普通混凝土配合比设计规程》<sup>[26]</sup>(JGJ 55—2011)和《纤维混凝土结构技术规程》<sup>[27]</sup>(CECS38:2004)设计 C40 混凝土。钢纤维混凝土的材料为:P.O 42.5 普通硅酸盐水泥;碎石(粒径为 5 mm~25 mm);河砂(细度模数为 2.7);聚羧酸高效减水剂(减水率 20%)。钢纤维的物理力学性能见

表 1,混凝土基体配合比见表 2。

表 1 钢纤维物理力学性能

纤维名词	编号	长径比 l/d	等效直径 /mm	钢纤维类型	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	抗拉强度 /MPa
钢纤维	SFA	30	0.833	碳钢 剪切型	7.8	≥600
	SFB	60	0.667			
	SFC	80	0.625			

表 2 混凝土基体配合比

不同材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )					水灰比
水泥	河砂	碎石	水	减水剂	
417	724	1086	175	2.1	0.42

### 1.2 试件制作与养护

参考课题组前期研究成果和相关规程建议,确定试验中钢纤维体积掺量为 1.0%、1.5%、2.0%,长径比为 30、60、80。共设计 6 组 18 个钢纤维混凝土试件,包括 5 组钢纤维混凝土试件和一组普通混凝土试件。试件主要参数见表 3。

本文试验采用棱柱体试件,试件的尺寸为 150 mm×150 mm×300 mm。参考《钢纤维混凝土试验方法》<sup>[28]</sup>(CECS 13—1989)进行本文试验试件的制备。试件浇筑时,同批次制作 6 个边长为 150 mm 的立方体试块,28 d 龄期后,按《普通混凝土力学性能试验方法标准》<sup>[29]</sup>(GB/T 50081—2002)测试其立方体抗压强度和劈裂抗拉强度,试验结果见表 3。

表 3 钢纤维混凝土的力学性能

组号	试件编号	钢纤维体积率 /%	长径比	立方体抗压强度 /MPa	劈裂抗拉强度 /MPa
1	NF	—	—	47.53	2.75
2	SFB05	0.50	60	50.09	3.61
3	SFA15	1.50	30	52.64	4.22
4	SFB15	1.50	60	52.91	4.47
5	SFC15	1.50	80	53.75	4.49
6	SFB20	2.00	60	57.92	4.67

### 1.3 试验装置及加载制度

试验测试系统由电液伺服岩石力学测试系统 INSTRON 1346 和 PCI-2 声发射信号采集系统组成。试件加载在 INSTRON1346 万能试验机上进行。测试过程中,在试件高度方向上布置一个量程为 5 mm 的电子位移计,用于量测试件在加载过程中产生轴向变形;在横向方向上布置两个量程为 2.5 mm 的电子位移计,用于量测试件在加载过程中产生的横向

变形。

试验中采用2个声发射探头(Nano30)对声发射信号进行采集,探头频率分布为100 kHz~400 kHz,幅值范围为0~100 dB。试验过程中记录的声发射参数有:通道号、到达时间、幅值、持续时间、上升时间、振铃计数、上升计数、能量和撞击数等。

本试验参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)<sup>[29]</sup>实施,加载过程中采用位移控制加载方式,加载速度为0.005 mm/s,直至试件破坏。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 破坏过程与破坏形态

图1为各试件破坏形态。

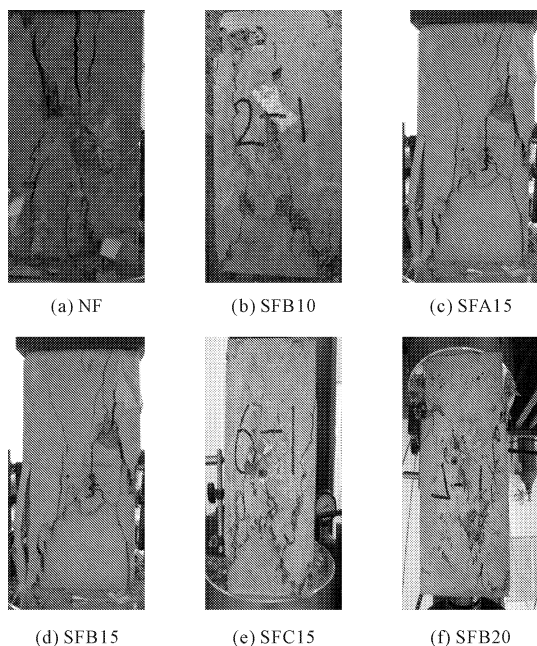


图1 各试件破坏形态

试验结果表明,普通混凝土的破坏为脆性破坏。试件破坏时主裂纹较宽,界面清晰,细裂纹少,开展速度快,在加载过程中试件突然断裂。加载初期,试件只发生弹性变形,随着荷载增加,竖向微裂纹出现,荷载继续增加,裂纹不断扩展,最后形成贯通裂缝,试件破坏。对于钢纤维混凝土试件,加载过程中出现的裂纹细而多,发展缓慢,逐渐延伸,最后试件经过一个裂缝持续缓慢发展的过程后断裂。随着钢纤维体积掺量增加和长径比提高,试件产生的裂缝变细,试件的韧性和延性得到提高。这是因为对于钢纤维混凝土,当试件在荷载作用下基体发生破坏,

产生裂纹之后,横跨裂缝两端的钢纤维会形成桥接作用,延缓裂缝的衍生、扩展和连接贯通。桥接在裂缝两端的钢纤维在被拔出的过程中会消耗大量能量,使钢纤维混凝土试件的破坏呈现出延性特征。

### 2.2 应力-应变全曲线

根据钢纤维混凝土轴心受压荷载-变形全过程曲线,结合在试验过程中对试块破坏形态的观察,将SFRC轴心受压应力-应变曲线分为四个阶段:弹性阶段(OA)、裂缝稳态扩展阶段(AB)、裂缝失稳扩展阶段(BD)以及破坏阶段(D以后)。如图2所示。

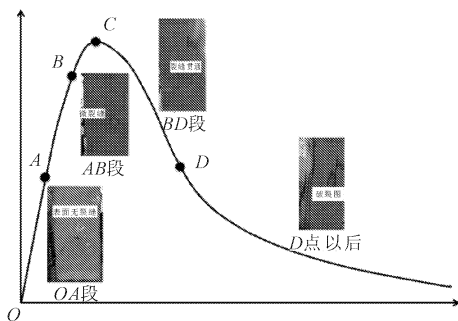


图2 典型SFRC轴心受压应力-应变全曲线

图3为典型各混凝土试件轴心受压应力-应变全曲线。与普通混凝土试件相比,钢纤维混凝土试件应力-应变曲线上升段与普通混凝土无太大差别,但下降段曲线比普通混凝土更平缓,表现出更好的韧性和延性。并且随着钢纤维体积掺量增加,试件的韧性和延性提高(见图3(a))。分析原因是:钢纤维在SFRC受压破坏的过程中,通过钢纤维与混凝土基体间的粘结、滑移以及拔出,吸收了大量能量,体积掺量越大,钢纤维拔出滑移需要耗散的能量越多;固定体积掺量,长径比更高的钢纤维混凝土试件应力-应变曲线下降段更平缓,表现出更好的韧性和延性(见图3(b))。分析原因是:长径比更高的钢纤维在混凝土基体中与混凝土锚固时产生的锚固长度更大,拔出过程中需要的拔出力越大,吸收的能量越多。

### 2.3 基于声发射参数的损伤机理分析

声发射是固体内部的缺陷或潜在缺陷,在外部条件作用下而自动发声。通过布置在材料表面的传感器接收声发射信号,对声发射信号进行分析,便可判断材料的物理状态。由于声发射信号来自材料内部缺陷本身,不同的缺陷会产生不同的声发射信号,因此用声发射法可以判断缺陷的性质。典型声发射波形图见图4。

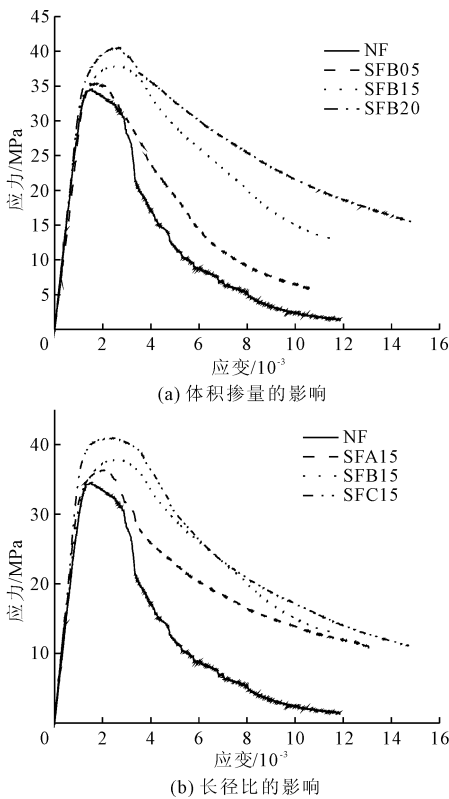


图 3 不同 SFRC 试件轴心受压应力 - 应变曲线

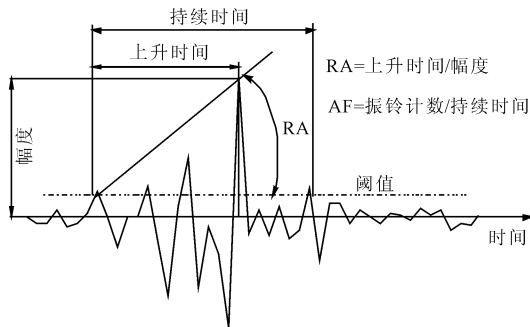


图 4 典型的声发射波形图

### 2.3.1 撞击数

图 5 反映了试件 1 在单调加载过程中,力和声发射撞击数与时间的关系。试件 2—试件 6 力和声发射撞击数与时间的关系与试件 1 相似。据图 5 分析可知:加载初期,声发射撞击数较少,增长速度缓慢;在出现贯通的斜裂缝(即图 5 中的  $D$  点)之后,声发射撞击数在短时间内突然迅速增加;随后声发射撞击数逐渐趋于平缓。由于声发射是材料在变形或破坏过程中局部能量以应力波释放而产生的现象,因此可根据撞击数随时间的发展过程分析钢纤维混凝土试件内部损伤发展过程。当试件处于弹性阶段以及裂缝发展阶段,破坏大多是由于混凝土基体间裂缝的开展,钢纤维桥接在裂缝之间,延缓裂缝的扩展,因此破坏时释放的能量较少,能量释放率较

低;当到达  $D$  点时,试件表面形成贯通斜裂缝,并伴随有表面混凝土剥落,桥接在裂缝间的钢纤维受力拉紧,并随着荷载增加不断拔出,处于拉紧状态的钢纤维拔出过程十分短暂,会释放出大量能量,因此声发射撞击数突然显著增加。

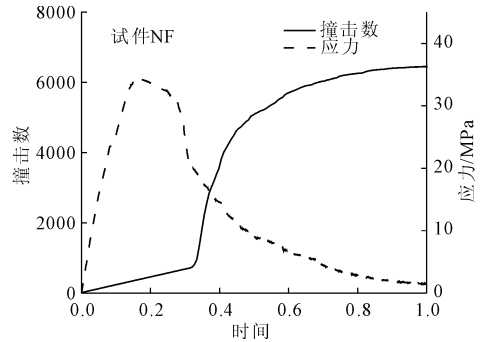


图 5 试件 1 的力与声发射撞击数的时间历时

图 6 为不同试件声发射撞击数与时间的关系曲线。从图中可以看出:

(1) 在加载初期,各个试件无明显区别,且撞击数都增加缓慢。由此可知在加载初期,钢纤维并未发挥作用,荷载由混凝土基体承担,钢纤维混凝土与普通混凝土无明显差别,并且此阶段试件内部微裂缝扩展缓慢,断裂能释放较少,因此撞击数发展较为平缓。

(2) 钢纤维混凝土试件的撞击数突增时间点迟于普通混凝土,这说明钢纤维混凝土贯通裂缝的形成时间晚于普通混凝土。因为钢纤维混凝土开始产生裂纹以后,钢纤维会发挥桥接作用,阻止了裂缝的进一步扩展,使其贯通裂缝的形成要迟于普通混凝土。由此可以看出钢纤维能延缓混凝土裂缝的开展。

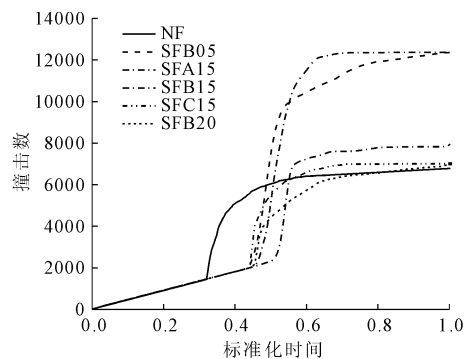


图 6 不同试件声发射撞击数与时间的关系

### 2.3.2 RA 和 AF

已有研究<sup>[22-23]</sup>表明,声发射参数 RA(上升角)值和 AF(平均频率)的相对关系可以用来区分混凝土不同的破坏模式。RA 定义为上升时间和波形幅

值的比值的比值,平均频率定义为振铃计数和持续时间的比值。不同的破坏形式会产生不同的波形,受拉破坏会导致材料内部瞬间产生体积变化,内部能量主要以纵波的形式释放,此种波形有更高的幅值、更高的频率以及更快的传播速度,因此上升时间短;当发生剪切破坏时,虽仍有一部分能量以纵波形式释放,但大多数能量仍以横波形式传播,频率更低、速度更慢,因此上升时间更长。故当发生剪切破坏时,AF 较低,RA 值较高;当发生受拉破坏时,AF 较高,RA 值较低,如图 7 所示。

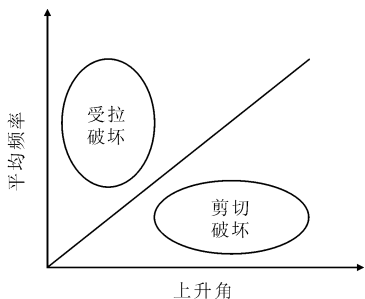


图 7 破坏模式分类

由各个试件加载过程中声发射参数 RA 值与 AF 的关系可知,所有试件的 AF 值大多分布在 0 ~ 100 KHz 之间,RA 值大多分布在 0 ~ 1 400 ms/V 之间,试件的破坏兼顾受拉破坏与剪切破坏。对于普通混凝土,试验点绝大多数集中在图中对角线左上区域,即 RA 值较小,AF 值较大的区域,因此普通混凝土在加载过程中发生的破坏属于受拉破坏,;对于钢纤维混凝土,试验点在右下区域(即 RA 较大,AF 较小的区域)也有大量分布,说明钢纤维混凝土在加载过程中发生的破坏既有受拉破坏,也有剪切破坏。

### 3 单轴受压损伤本构关系

#### 3.1 损伤理论

对于含损伤的材料,由于内部的微裂隙和微孔洞的存在,实际承载能力会有所降低。设其无损状态时的横截面面积为  $A$ ,损伤区的总面积为  $A_d$ ,损伤后的有效承载面积减少为  $\bar{A}$ 。为描述损伤,引入损伤变量:

$$D = \frac{A - \bar{A}}{A} = \frac{A_d}{A} \quad (1)$$

对于完全无损状态,  $D = 0$ ; 对于完全丧失承载能力的状态,  $D = 1$ 。

根据 Lemaitre 提出的应变等价原理,受损材料的本构关系可以通过无损材料的名义应力得到,即

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\bar{\sigma}}{E} = \frac{\sigma}{(1 - D)E} \quad (2)$$

即

$$\sigma = (1 - D)E\epsilon \quad (3)$$

式中:  $E$  为无损时的初始弹性模量;  $\epsilon$  为应变。

#### 3.2 损伤变量

材料声发射是其内部损伤(微裂隙和微孔洞)产生和发展的结果,与材料的损伤变量、本构关系等之间存在必然联系<sup>[30]</sup>,因此可以用声发射参数分析损伤演化规律,从而建立材料的损伤本构模型。

考虑一无初始损伤的材料,若整个截面  $A$  破坏时累积的声发射振铃计数为  $N_m$ ,则单位面积微元破坏时的声发射率为

$$n_v = \frac{N_m}{A} \quad (4)$$

则当断面破坏(损伤)面积达  $A_d$  时,累积的声发射振铃计数为

$$N = n_v A_d = N_m \frac{A_d}{A} \quad (5)$$

由式(1)和式(5)可知,声发射振铃计数与损伤变量之间存在以下关系,即

$$D = \frac{N}{N_m} \quad (6)$$

对于混凝土、岩石等准脆性材料,损伤演化规律常可采用形状变量如应变  $\epsilon$  表示为

$$dD = \begin{cases} f(\epsilon)d\epsilon & (\epsilon = \zeta, d\epsilon > 0) \\ 0 & (\epsilon < \zeta, d\epsilon < 0) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $f(\epsilon)$  为为损伤演化函数;  $\zeta$  为一可变的损伤应变门阈值。

对于单调加载,假设初始损伤条件为  $D = \epsilon = \zeta = 0$ ,并且条件  $\epsilon > \zeta$  与  $d\epsilon > 0$  总成立,则由式(6)和式(7)可得

$$D = \frac{N}{N_m} = F(\epsilon) = \int_0^\epsilon f(\epsilon)d\epsilon \quad (8)$$

式中:  $F(\epsilon)$  为概率分布函数。

对于不同损伤机制,损伤演化函数  $f(\epsilon)$  可选择不同形式。宁喜亮等<sup>[12]</sup>考虑混凝土微元强度服从 Weibull 分布,张明等<sup>[30-31]</sup>建议采用对数正态概率密度函数描述准脆性材料微元的损伤演化规律。本文考虑采用对数正态分布来描述混凝土的损伤演化规律,即

$$f(\epsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \zeta \epsilon} \exp\left\{-\frac{[\ln(\epsilon/b)]^2}{2\zeta^2}\right\} \quad (9)$$

$$F(\epsilon) = \int_0^\epsilon f(x)dx =$$

$$\int_0^\epsilon \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi} \zeta x} \exp\left\{-\frac{[\ln(x/b)]^2}{2\zeta^2}\right\} \right\} dx = \Phi\left[\frac{\ln(\epsilon/b)}{\zeta}\right] \quad (10)$$

式中:  $\Phi$  为标准正态概率分布函数; 参数  $b$  为尺度参数;  $\zeta$  为材料的非均匀度。将式(10)代入式(8), 得到

$$D = \frac{N}{N_m} = \Phi\left[\frac{\ln(\varepsilon/b)}{n}\right] \quad (11)$$

式(11)中参数  $b$  与参数  $n$  为未知参数。通过单

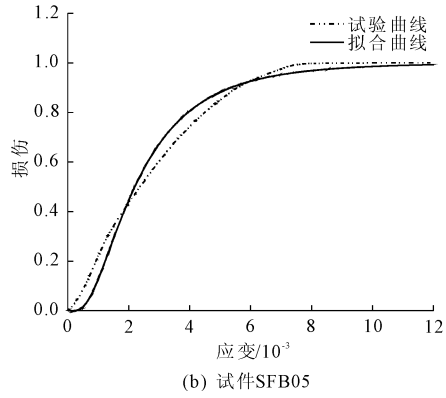
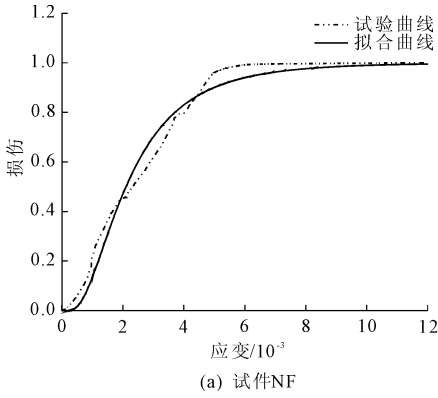


图 8 各试件在单轴受压条件下损伤变量与应变的关系

表 4 单轴受压下钢纤维混凝土损伤本构模型参数

试件编号	钢纤维体积分率/%	长径比	纤维特征参数 $\lambda$	初始弹模 /MPa	$b$ 值	$n$ 值
NF	—	—	0.00	32	0.0021	0.6754
SFB05	0.50	60	0.30	31	0.0022	0.6937
SFA15	1.50	30	0.45	32	0.0022	0.7681
SFB15	1.50	60	0.90	32	0.0023	0.8475
SFC15	1.50	80	1.20	34	0.0024	0.8401
SFB20	2.00	60	1.20	35	0.0023	0.9092

$\lambda$ :

$$\lambda = \rho l/d \quad (12)$$

式中:  $\rho$  为钢纤维的体积掺量;  $l/d$  为钢纤维的长径比。

(1) 参数  $b$  与纤维特征参数  $\lambda$  的关系。上述结果已有不同试件对应的  $b$  值, 则可得不同纤维特征参数  $\lambda$  对应的  $b$  值, 其对应关系如图 9(a) 所示。

对试验数据进行拟合, 可得参数  $b$  与纤维特征参数  $\lambda$  之间的关系:

$$b = 0.000189\lambda + 0.00213 \quad (13)$$

为准确量化钢纤维的影响, 引入纤维特征参数

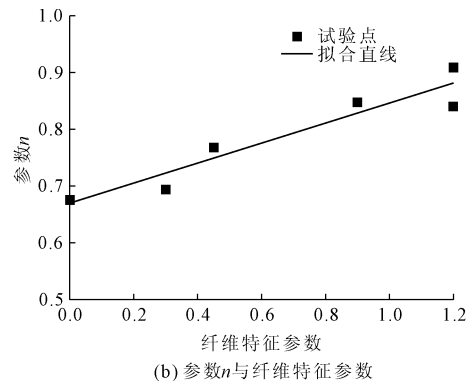
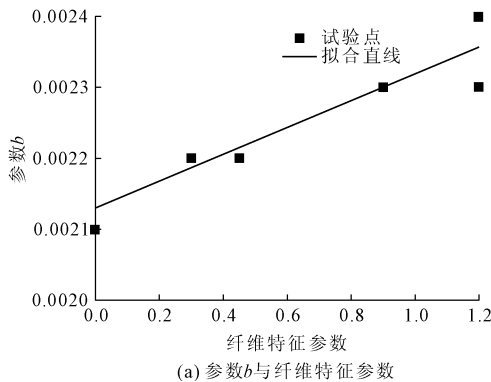


图 9 纤维特征值对损伤本构关系的影响

(2) 参数  $n$  与纤维特征参数的关系。根据上述结果可得不同纤维特征参数  $\lambda$  对应的  $n$  值, 其对应关系如图 9(b) 所示。对试验数据进行拟合, 可得参数  $n$  与纤维特征参数  $\lambda$  之间的关系为:

$$n = 0.17635\lambda + 0.66996 \quad (14)$$

将式(13)、式(14)代入式(11)中可得含纤维特征参数  $\lambda$  的钢纤维混凝土的损伤变量表达式

$$D = \frac{N}{N_m} \Phi\left[\frac{\ln\left(\frac{\varepsilon}{0.000189\lambda + 0.00213}\right)}{0.17635\lambda + 0.66996}\right] \quad (15)$$

### 3.3 本构方程

将上述式(15)的结果代入式(3), 可得

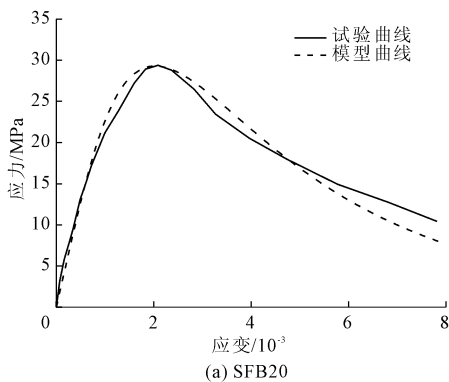
$$E\varepsilon(1-D) = E\varepsilon\left[1 - \Phi\left[\frac{\ln\left(\frac{\varepsilon}{0.000189\lambda + 0.00213}\right)}{0.17635\lambda + 0.66996}\right]\right]$$

(16)

上式即为采用对数概率密度函数作为损伤演化函数得到的钢纤维混凝土单轴受压损伤本构方程。式中,  $E$  为钢纤维混凝土各试件初始弹性模量。

### 3.4 模型验证

选取曲线原点到 30% ~ 40% 极限强度点直线段的斜率为初始弹性模量<sup>[32]</sup>, 计算结果见表 4。将表 4 中的参数代入式(16), 即可得损伤本构方程表



示的理论曲线。

为了验证上述提出的损伤本构方程的普适性, 本文采用文献[11]中钢纤维混凝土的试验参数代入式(16), 将根据模型得到应力 - 应变曲线绘于图 10 中, 将模型曲线与试验测得的应力 - 应变曲线进行对比。可以看出, 建立的模型能很好地预测钢纤维混凝土的应力 - 应变曲线。

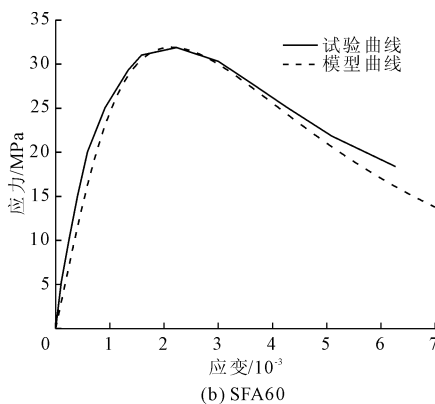


图 10 宁喜亮钢纤维混凝土试件试验曲线与理论曲线对比

## 4 结 论

(1) 钢纤维具有提高混凝土峰值强度, 阻止裂缝开展的作用; 钢纤维混凝土破坏呈现明显的延性特征。

(2) 钢纤维体积掺量和长径比会影响 SFRC 单轴受压力学行为。体现在: ① 钢纤维的掺入会提高试件的峰值强度和峰值应变; ② 长径比相同, 体积掺量越高, 试件的峰值强度和峰值应变越高, 延性和韧性越好; ③ 体积掺量相同, 长径比越大, 试件的峰值强度和峰值应变越高, 延性和韧性越好。

(3) 可以用声发射反映试件破坏过程和区分材料的破坏形式。在贯通裂缝形成前, 材料释放的能力较少, 声发射撞击数增加缓慢, 形成贯通裂缝时, 材料释放大能量, 声发射撞击数突然显著增加; 当材料发生受拉破坏时, 声发射 RA 值较小, AF 值较大; 当材料发生剪切破坏时, 声发射 RA 值较大, AF 值较小。

(4) 基于试验数据, 以对数正态分布函数作为损伤演化函数, 提出了 SFRC 单轴受压损伤本构模型, 可为钢纤维混凝土工程应用和相关规程的修订提供参考。

### 参考文献:

[1] 刘永胜, 王肖钧, 金 铤, 等. 钢纤维混凝土力学性能和

本构关系研究[J]. 中国科技大学学报, 2007, 37(7): 717-723.

[2] 姬小祥, 张 帆, 邵景干, 等. 不同类型钢纤维混凝土力学性能室内试验分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(5): 168-172.

[3] 韩 焱, 赵顺波, 曲福来. 钢纤维混凝土抗拉性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(11): 63-67.

[4] 杨 萌, 黄承逵. 钢纤维高强混凝土轴拉性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 55-61.

[5] 高丹盈. 钢纤维混凝土轴压应力 - 应变全曲线的研究[J]. 水利学报, 1991(10): 43-48.

[6] 张晓燕, 曹晨杰, 孙 丽, 等. 钢纤维混凝土轴压应力 - 应变曲线试验研究[J]. 混凝土, 2013(5): 24-27.

[7] Bencardino F, Rizzuti L, Spadea G, et al. Stress-strain behavior of steel fiber-reinforced concrete in compression[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(3): 255-2630.

[8] 邓宗才, 孙成栋. 钢纤维混凝土在低周反复荷载下力学性能的研究[J]. 工程力学, 2001, 18(3): 105-110.

[9] 董毓利, 樊承谋. 钢纤维混凝土本构关系的研究[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1993, 26(2): 86-92.

[10] 宋玉普, 赵国藩, 彭 放, 等. 钢纤维混凝土内时损伤本构模型[J]. 水利学报, 1995(6): 1-7.

[11] 王春来, 徐必根, 李庶林, 等. 单轴受压状态下钢纤维混凝土损伤本构模型研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 151-154.

[12] 宁喜亮, 丁一宁. 钢纤维对混凝土单轴受压损伤本构

- 模型的影响[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(2): 214-220.
- [13] 陈忠辉, 傅宇方, 唐春安. 岩石破裂声发射过程的围压效应[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(1): 65-70.
- [14] 陈 勉, 陈治喜, 金 衍. 用斜井岩芯的声发射效应确定深层地应力[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 18(3): 311-314.
- [15] 陈静曦. 裂纹扩展速度监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(4): 425-428.
- [16] 纪洪广, 贾立宏, 李造鼎. 混凝土材料单轴拉伸时声发射机理探讨[J]. 东北大学学报(自然科学版), 1995, 16(6): 568-572.
- [17] 纪洪广, 蔡美峰. 混凝土材料断裂的声发射自相似性识别特征[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 157-160.
- [18] 纪洪广, 张天森, 蔡美峰, 等. 混凝土材料损伤的声发射动态检测试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 165-168.
- [19] 严伟洋, 赵其华, 韩 刚, 等. 常规三轴压缩下斜长花岗岩声发射分维特征分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(1): 140-144.
- [20] Ohstu M. Quantative AE techniques standardized for concrete structures[J]. Advanced Materials Research, 2006, 13-14: 183-192.
- [21] Shiotani T, Ohstu M, Ikeda K. Detection and evaluation of AE waves due to rock deformation[J]. Construction and Building Materials, 2001, 15(5/6): 235-246.
- [22] Grosse C, Reinhardt H, Dahm T. Localization and classification of fracture types in concrete with quantitative acoustic emission measurement techniques[J]. Independent Non-destructive Testing and Evaluation, 1997, 30(4): 223-230.
- [23] Mclasley G C, Glaser S D. Temporal evolution and 3D locations of acoustic emission produced from drying shrinkage of concrete[J]. Journal of Acoustic Emission, 2007, 25(1): 52-57.
- [24] Finck F, Yamanouchi M, Reinhardt H W, et al. Evolution of mode I failure of concrete in splitting test using acoustic emission techniques[J]. International Journal of Fracture, 2003, 124(3/4): 139-152.
- [25] Ohstu M. Simplified moment tensor analysis and unified decomposition of AE source: application in situ hydrofracturing test[J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96(B4): 6211-6221.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.
- [27] 中国工程建设标准化协会. 纤维混凝土结构技术规程: CECS 38—2004[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- [28] 中国工程建设标准化协会. 钢纤维混凝土试验方法: CECS 13—1989[S]. 北京: 中国计划出版社, 1989.
- [29] 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [30] 张 明, 李仲奎, 杨 强, 等. 准脆性材料声发射的损伤模型及统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2493-2501.
- [31] 张 明, 李仲奎, 苏 霞. 准脆性材料弹性损伤分析中的概率体元建模[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4282-4288.
- [32] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.

(上接第 163 页)

- [11] 刘俊雄, 张大军, 刘锦伟, 等. 某岩质边坡稳定性分析及支护方案优化设计[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(6): 94-98.
- [12] 杜朋召, 刘 建, 韩志强, 等. 基于复杂结构精细描述的岩质高边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(S1): 393-398.
- [13] 刘 强, 胡 斌, 蒋海飞, 等. 基于强度折减法的露采边坡稳定性分析[J]. 金属矿山, 2013(5): 49-52.
- [14] 郑颖人, 赵尚毅, 李安洪, 等. 编著. 有限元极限分析法及其在边坡中的应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 24-26.
- [16] 张倬元, 王士天, 王兰生, 编著. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 2016.