DOI: 10.11883/bzycj-2016-0252

文章编号:1001-1455(2018)02-266-05

一种新形式的钢纤维混凝土冲击动态本构关系及材料参数的确定*

叶中豹[1,2],李永池[1],赵 凯[1],黄瑞源[3],孙晓旺[1],张永亮[1]

(1.中国科学技术大学近代力学系,安徽 合肥 230026;
2.安徽新华学院土木与环境工程学院,安徽 合肥 230088;
3.南京理工大学瞬态物理国家重点实验室,江苏 南京 210094)

摘要:采用∅75 mm 大口径 SHPB 系统进行了钢纤维体积率为 0%、0.75%、1.5%三种混凝土材料动态性能实验,得出了不同钢纤维含量、不同应变率下的材料应力-应变关系曲线,实验结果表明:随着纤维含量及应变率的增加,钢纤维混凝土材料的峰值应变、峰值应力都随之提高,并在峰值应力之后出现应力的应变软化现象。以此实验结果为基础,提出了一种依赖于应变和应变率相关函数的新型非线性黏塑性动态本构关系,并通过对实验曲线的三步逐次最小二乘优选模拟,得到了相应的材料参数。结果表明,该本构关系对实验数据的模拟效果较好。

关键词:钢纤维混凝土;SHPB;应变率效应;动态本构关系

中图分类号:O381 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

在混凝土中添加钢纤维能够抑制裂纹的产生及扩展,因此钢纤维混凝土材料具有耐疲劳、韧性好、抗拉强度高等力学性能,目前钢纤维混凝土已广泛应用于民用及军事上,其动态力学性能的研究更是受到关注。

曹吉星[1]对钢纤维混凝土进行冲击压缩和准静态实验研究,提出了一种适用于钢纤维混凝土改进的 HJC 动态本构模型;严少华等[2]用∅74 mm 的 Hopkinson 压杆装置对钢纤维混凝土进行了动态压缩性能实验研究,得到钢纤维混凝土的动态抗压强度与应变率之间的对数关系;金凤杰等[3]对高温条件下钢纤维混凝土动态压缩进行试验研究,得出高温下钢纤维混凝土动态抗压强度同时存在加载速率强化效应和温度强弱化效应;严少华等[4]用 Hopkinson 压杆对高强钢纤维混凝土进行冲击压缩,得到应变率为 100 s^{-1}下的应力-应变曲线及方程,给出抗压强度与应变率的关系;赵碧华等[5]利用变截面 SHPB 装置对超短钢纤维混凝土进行冲击压缩试验,得出几组不同钢纤维含量、不同应变率下的应力-应变曲线;杜修力等[6]对高强度混凝土进行实验研究得到,在高应变率下,动态应力-应变关系有较明显的应变率硬化效应。

本文中采用∅75 mm 大口径 SHPB 系统对体积率分别为 0%、0.75%和 1.5%三种钢纤维混凝土进行动态压缩实验,绘制不同应变率下的材料应力-应变曲线,分析钢纤维体积率和应变率对混凝土抗压强度的影响,并提出一种新型动态钢纤维混凝土材料本构关系方程。

1 实验试件制备及实验设备

原材料:0213 型微纤维;普通硅酸盐水泥;洗净连续粒径碎石粗骨料;洗净河沙细骨料;SM 高效减水剂;自来水。3 种不同钢纤维体积率混凝土配合比见表 1,其中 φ 为钢纤维体积分数。试件尺寸,实验采用∅75 mm 的 SHPB 实验系统完成。

* **收稿日期**:2016-08-19; **修回日期**:2016-11-30

基金项目:国家自然科学基金项目(11402266,11202206);安徽高等学校省级自然科学重点研究项目(KJ2016A315, KJ2016A316, KJ2017A615);北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室开放课题(KFJJ13-9M)

第一作者:叶中豹(1981—),男,博士研究生,讲师,高级工程师; **通信作者**:赵 凯,kzhao@ustc.edu.cn。

表 1 钢纤维混凝土原料配比

Table 1 Mix proportion of the steel fiber concrete

试件	φ/%	各组分的体积质量/(kg·m^{-3})					
		水泥	细骨料	粗骨料	减水剂	水	钢纤维
A	0	440	834	1018	6.6	158	0
B	0.75	440	834	997	6.6	158	59
C	1.5	440	834	978	6.6	158	117

2 不同钢纤维含量、不同应变率下的应力-应变曲线

采用三波校核法[7]处理 SHPB 实验数据，作出相应工程应力-应变曲线并自动计算峰值附近的平均应变率，不同钢纤维含量、不同应变率下的应力-应变曲线见图 1。可以看出，随着纤维含量及应变率的增加，钢纤维混凝土材料的峰值应变，峰值应力都随之提高，并在峰值应力之后出现应力的应变软化现象。

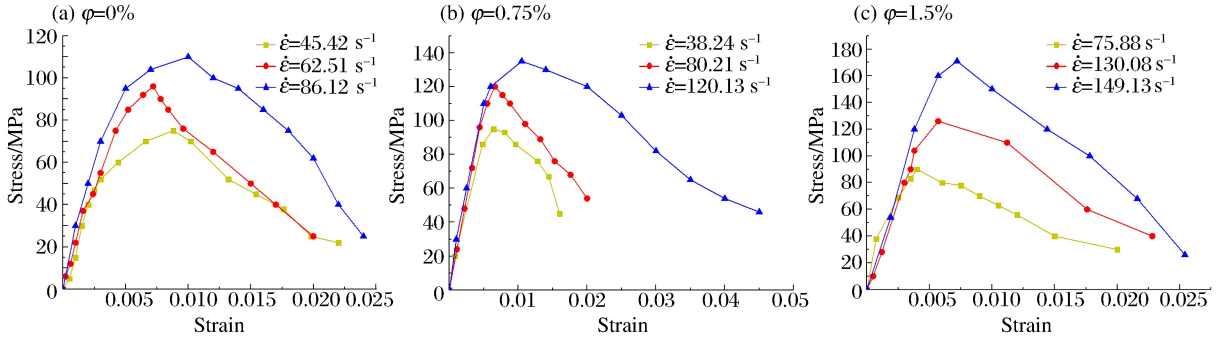


图 1 应力应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curve

3 本构关系的建立及参数的确定

图 1 的 3 组实验曲线显示，不同纤维含量下的混凝土的应力-应变曲线，都存在应力对应变依赖的非线性行为，而且不同应变率下的应力-应变曲线的非线性行为存在着比较明显的相似性，因此引入 2 个独立的影响材料力学行为的因子 $f(\varepsilon)$和 $k(\dot{\varepsilon})$，即将钢纤维混凝土的本构关系一般地表示成：

$$\sigma = f(\varepsilon)k(\dot{\varepsilon}) \tag{1}$$

式中：σ 为应力；ε 为应变；$f(\varepsilon)$表示材料在某一特定参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0^*$ 下的应力-应变关系，它描述了材料的非线性行为；$k(\dot{\varepsilon})$则表示材料的应变率相关效应。下面将通过对系列实验曲线的逐次拟合，来确定函数 $f(\varepsilon)$和 $k(\dot{\varepsilon})$的形式和其中的材料参数值。

第一步，确定非线性效应函数 $f(\varepsilon)$及其中的材料参数。取函数 $f(\varepsilon)$为含有若干参数的某种形式，并取 $\dot{\varepsilon}_0^* = 45.42\ \mathrm{s}^{-1}$作为参考应变率，设 $k(\dot{\varepsilon}_0^*) = 1.0$，则可从钢纤维含量为 0%的素混凝土试件在应变率 $\dot{\varepsilon} = 45.42\ \mathrm{s}^{-1}$条件下的实验曲线出发，通过对实验曲线的最优拟合建立 $f(\varepsilon)$。考虑到实验曲线本身存在着一定的离散性，为提高 $f(\varepsilon)$及的适用范围，将其取成如下的四次多项式形式：

$$f(\varepsilon) = a_1\varepsilon + a_2\varepsilon^2 + a_3\varepsilon^3 + a_4\varepsilon^4 \tag{2}$$

式中：参数 a_1、a_2、a_3、a_4 可通过对图 1(a)中应变率 $\dot{\varepsilon} = 45.42\ \mathrm{s}^{-1}$的实验曲线进行拟合得到，结果如表 2 所示。系数 a_1 代表的是材料的初始切线模量，其余参数则刻画了材料的高阶非线性行为。图 2 是实验和拟合曲线的对比，可以看出拟合效果较好。因此式(1)可以表达为：

$$\sigma = (a_1\varepsilon + a_2\varepsilon^2 + a_3\varepsilon^3 + a_4\varepsilon^4)k(\dot{\varepsilon}) \tag{3}$$

第二步，确定不同钢纤维含量混凝土在不同应变率下的应变率因子 $k(\dot{\varepsilon})$的值。从式(3)出发，对图 1 中各实验曲线进行优选拟合，即可得出 $k(\dot{\varepsilon})$的值，如表 3 所示。图 3 给出了部分实验曲线的拟合结

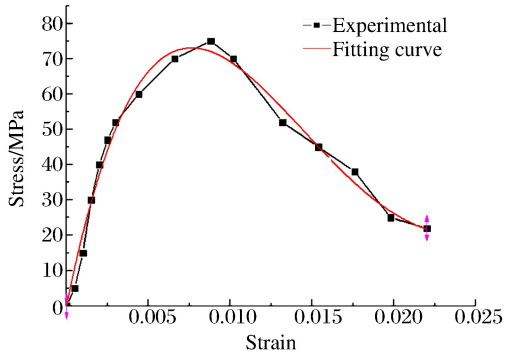


图 2 实验拟合曲线

Fig. 2 Experimental and fitting curves

表 2 式(2)拟合参数

Table 2 Fitting parameters in Eq. (2)

φ/%	a_1/GPa	a_2/TPa	a_3/TPa	a_4/TPa
0	22.9	−2.28	76.5	−828

果。由图 3 可以看到,式(3)及表 2 所给出的拟合参数 a_i 不但可以很好地刻画钢纤维含量为 0%、应变率为 45.42 s^{-1}的实验曲线,同时也可用来刻画其他钢纤维含量和其他应变率下试件的应力应变-曲线,所不同的只是现在 $k(\dot{\varepsilon})\neq1$,而是有着不同的数值,如表 3 所示。图 3 的拟合曲线和实验曲线的一致程度充分说明,采用表 2 中的 a_i 和表 3 中的 $k(\dot{\varepsilon})$值,利用式(3)描述不同纤维含量的钢纤维混凝土的动态应力应变关系是合适的。

表 3 拟合结果

Table 3 Fitting results

φ/%	$\dot{\varepsilon}$/s^{-1}	$k(\dot{\varepsilon})$	φ/%	$\dot{\varepsilon}$/s^{-1}	$k(\dot{\varepsilon})$	φ/%	$\dot{\varepsilon}$/s^{-1}	$k(\dot{\varepsilon})$
0	45.42	1.00	0.75	38.24	1.28	1.5	75.68	1.14
0	62.51	1.18	0.75	82.21	1.56	1.5	130.08	1.70
0	86.12	1.60	0.75	120.13	1.99	1.5	149.13	2.25

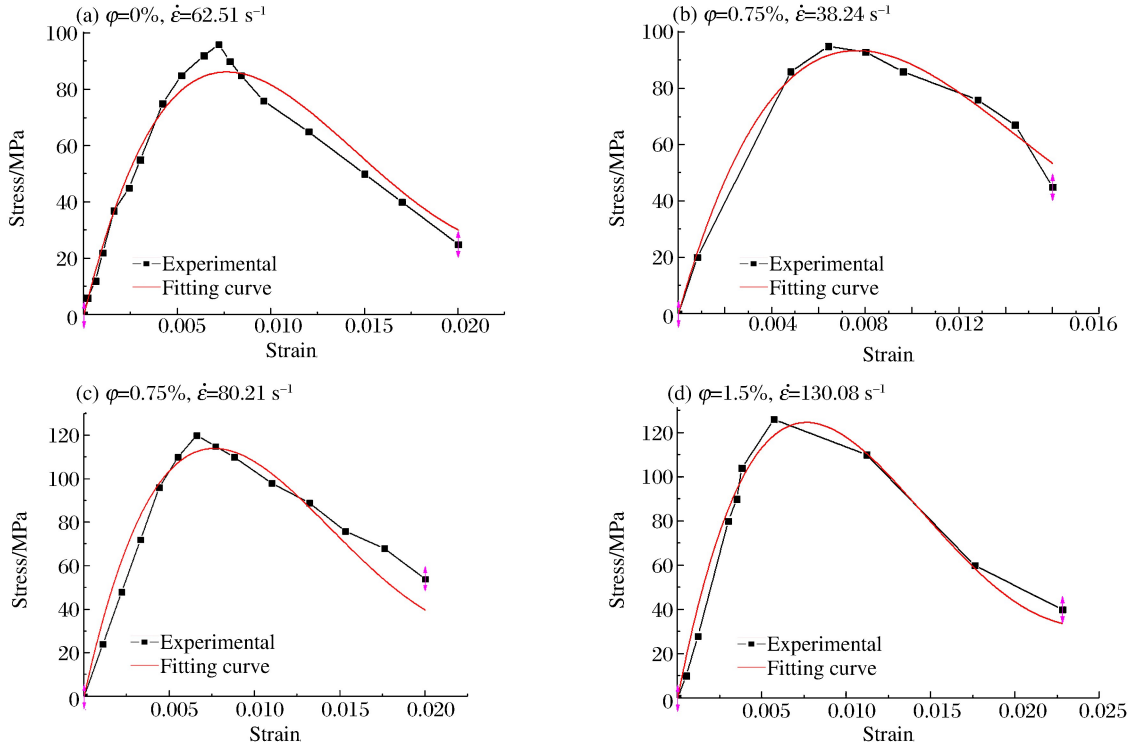


图 3 不同条件下的实验和拟合曲线

Fig. 3 Experimental and fitting curves under different conditions

进一步考察表 3 中的 $k(\dot{\varepsilon})$可以发现,当纤维含量确定时,$k(\dot{\varepsilon})$随应变率的提高而提高,这是材料应变率增强效应的必然结果,同时我们还注意到,随着钢纤维含量的增加,$k(\dot{\varepsilon})$也略有提高,这说明 $k(\dot{\varepsilon})$同时还隐含了材料的纤维增强效应。因此严格说来,$k(\dot{\varepsilon})$不但包含了应变率的影响,还包含了纤维含量的影响。

然而仅仅通过特定条件下的 $k(\dot{\varepsilon})$ 来表征材料的本构关系显然是不完善的，也是不科学的。因此，需要对 $k(\dot{\varepsilon})$ 的函数形式作进一步探讨。

第三步，确定应变率效应函数 $k(\dot{\varepsilon})$ 的具体形式。作为尝试，假定 $k(\dot{\varepsilon})$ 为应变率的二次型自然对数函数，即设

$$k(\dot{\varepsilon}) = c_0 + c_1 \ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0^*) + c_2 \ln^2(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0^*) \tag{4}$$

式中：$\dot{\varepsilon}_0^*$ 为参考应变率，$\dot{\varepsilon}_0^* = 45.42\ \mathrm{s}^{-1}$。利用(3)式和表 2 所给出的拟合参数 a_i，对每一组钢纤维含量混凝土试件的实验曲线进行数值拟合，可得到(4)式中的系数 c_0、c_1、c_2，如表 4 所示。显然不同纤维含量下的系数 c_i 是不同的。由式(4)可以看出，c_0 表示的是参考应变率下材料的应变率因子值。由表 4 还可以看到，c_0 随纤维含量的提高而提高，这和钢纤维混凝土的强度随纤维含量的增加而提高的实验结果相一致。

表 4 式(4)拟合参数

Table 4 Fitting parameters in Eq. (4)

φ/%	c_0	c_1	c_2
0	1.0	0.21	1.14
0.75	1.3	0.10	0.64
1.5	3.4	−7.00	5.10

由以上可得钢纤维混凝土动态本构关系的一般形式：

$$\sigma = (a_1\varepsilon + a_2\varepsilon^2 + a_3\varepsilon^3 + a_4\varepsilon^4)[c_0 + c_1 \ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0^*) + c_2 \ln^2(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0^*)] \tag{5}$$

式(5)的物理意义在于，它将钢纤维混凝土的动态本构关系拆分为 2 个独立的因子 $f(\varepsilon)$ 和 $k(\dot{\varepsilon})$：$f(\varepsilon)$ 给出的是材料的非线性应力应变行为，可以通过拟合实验曲线中的任何一条被设定为参考应变率的曲线而获得；$k(\dot{\varepsilon})$ 则刻画了材料的应变率效应，它可以通过拟合不同纤维含量和不同应变率下的系列实验曲线获得。函数 $f(\varepsilon)$ 和其中的材料参数 a_i 对不同钢纤维含量都适用的事实说明，不同钢纤维含量混凝土的非线性特性是相似的，而钢纤维含量的影响主要体现在材料的应变率效应上。另外，需要注意的是应变率因子中的系数 c_i 隐含了纤维含量的影响，不同纤维含量的实验曲线有不同的 c_i。倘若能从更多的实验曲线中获取纤维含量对系数 c_i 的影响关系，得到系数 c_i 随纤维含量的变化而变化的规律，并给出其具体形式，那么式(5)就是完整而又理想的钢纤维混凝土的动态本构方程了，这是本文后续研究中所要致力解决的问题。

4　结　论

(1)对不同钢纤维含量的混凝土材料开展了动态性能实验研究，得出了不同钢纤维含量、不同应变率下的钢纤维混凝土的应力-应变曲线。实验结果表明：随着纤维含量及应变率的提高，钢纤维混凝土材料的峰值应变、峰值应力都随之提高，并在峰值应力之后出现应力的应变软化现象。(2)从实验曲线出发，将应变和应变率作为 2 个独立的因子，提出了一种物理概念较为清晰，拟合过程相对简洁的适用于钢纤维混凝土的新型非线性粘塑性动态本构关系，并通过对实验曲线的拟合，给出了相应的材料参数。(3)本文中所提出的本构关系及材料参数只适用于材料的中、高应变率范围，而不适用于低应变率的准静态情况。鉴于本次实验对不同钢纤维含量完成较少，它们对材料本构行为的影响尚隐含于应变率因子 的系数里，进一步揭示纤维含量对材料性能的影响是本文后续研究的重点。

参考文献：

[1]　曹吉星. 钢纤维混凝土的动态本构模型及其有限元方法[D]. 成都：西南交通大学，2011.

[2]　严少华，钱七虎，孙伟. 钢纤维高强混凝土单轴压缩下应力-应变关系[J]. 东南大学学报，2001，31(2)：77-80.
YAN Shaohua，QIAN Qihu，SUN Wei. Stress-strain relationship of high-strength steel fiber reinforced concrete in compression[J]. Journal of Southeast University，2001，31(2)：77-80.

[3] 金凤杰,许金余,范飞林,等.钢纤维混凝土的高温动态强度特性[J].硅酸盐通报,2013,32(4):110-114.
JIN Fengjie, XU Jinyu, FAN Feilin, et al. Strength property of steel fiber reinforced concrete at elevated temperature[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013,32(4): 110-114.

[4] 严少华,李志成,王明洋,等.高强钢纤维混凝土冲击压缩特性试验研究[J].爆炸与冲击,2002,22(3):237-241.
YAN Shaohua, LI Zhicheng, WANG Mingyang, et al. Dynamic compressive behaivour of high-strength steel fiber reinforced concrete[J]. Explosion and Shock Waves, 2002,22(3):237-241.

[5] 赵碧华,刘永胜.超短钢纤维混凝土的 SHPB 试验研究[J].混凝土,2007(8):55-57.
ZHAO Bihua, LIU Yongsheng. Impact compressive experiment of spur-short steel fiber reinforced concrete by SHPB[J]. Concrete, 2007(8):55-57.

[6] 杜修力,窦国钦,李亮,等.纤维高强土的动态力学性能试验研究[J].工程力学,2011,28(4):138-144.
DU Xiuli, DOU Guoqin, LI Liang, et al. Exepeimental study on dynamic mechanical properties of fiber reinforced high strength concrete[J]. Engineering Mechanics, 2011,28(4):138-144.

[7] 尚兵,胡时胜,姜锡权.金属材料 SHPB 实验数据处理的三波校核法[J].爆炸与冲击,2010,30(4):429-432.
SHANG Bing, HU Shisheng, JIANG Xiquan. A three-wave coupling method for data treatment in SHPB experiments with metal samples[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(4):429-432.

A new impact dynamic constitutive relation of steel fiber reinforced concrete and the determination of material parameters

YE Zhongbao[1,2], LI Yongchi[1], ZHAO Kai[1], HUANG Ruiyuan[3],
SUN Xiaowang[1], ZHANG Yongliang[1]

(1. *Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei* 230026, *Anhui, China*;
2. *College of Civil and Environmental Engineering, Anhui Xinhua College, Hefei* 230088, *Anhui, china*;
3. *National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, china*)

Abstract: In the present study we carried out the dynamic compression experiments of steel fiber reinforced concrete with the fiber volume ratios of 0%, 0.75% and 1.5% using the ∅75 mm large-diameter split Hopkinson pressure bar experimental system to obtain the stress-strain curves at different strain rates. The experimental results show that with the increase of the fiber content and the strain rate, both the peak strain and the peak stress of the steel reinforced concrete rise higher, and the strain softening is observed after the peak stress. Based on the assumption that there are two independent factors controlling the dynamic behavior of the steel fiber reinforced concrete, one related to the strain to indicate the nonlinear stress-strain behavior and the other related to the strain rate to express the strain rate effect, a new type of the dynamic nonlinear viscoplastic constitutive equation was proposed. The details concerning how to get the equation and the material parameters were discussed thoroughly. The experiment curves were fitted using the least squares optimization numerical simulations. Good agreement between the numerical simulations and the experiment curves was achieved, thereby concluding that the new constitutive relation proposed is perfect for steel fiber reinforced concrete.

Keywords: steel fiber reinforced concrete (SFRC); SHPB; strain rate effect; dynamic constitutive relation

(责任编辑 王小飞)