

# 聚丙烯纤维水泥砂浆动态力学特性与本构模型研究

武守锋, 张华

(河海大学 土木工程学院, 南京 210098)

**摘要:** 通过改进的分离式 Hopkinson 压杆试验装置对聚丙烯纤维水泥砂浆进行动态力学性能以及动态损伤本构关系的研究。基于试验结果得到的应力-应变曲线, 对聚丙烯纤维水泥砂浆在不同应变率下的弹性模量、峰值应力和韧度变化规律进行了探讨。根据试验应力-应变曲线的基本特征, 选择引入朱-王-唐本构模型, 并考虑纤维的阻裂作用, 对试验结果进行拟合, 提出了一种新的聚丙烯纤维水泥砂浆动态损伤本构模型。该模型在考虑聚丙烯纤维增强、应变率硬化、损伤软化等因素下, 描述聚丙烯纤维水泥砂浆的动态受力特性。

**关键词:** SHPB 试验技术; 聚丙烯纤维水泥砂浆; 应力-应变曲线; 本构模型

中图分类号: TV432.1; 0348

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)03-0081-05

## Study on dynamic mechanical property and constitutive model of polypropylene fiber cement mortar

WU Shoufeng, ZHANG Hua

(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The paper used the pressure bar test device of improved split Hopkinson to study the dynamic characteristic and dynamic damage constitutive relation for polypropylene fiber cement mortar. Based on the stress-strain curves, it discussed the variation laws of elasticity modulus, peak stress and toughness of polypropylene fiber cement mortar under different strain rates. According to the basic characteristic of stress-strain curves, the paper introduced ZWT constitutive model and considered the crack resistance of fiber to fit the test result, and proposed a new dynamic damage constitutive model of polypropylene fiber cement mortar. The model can describe dynamic stress characteristic of the mortar under the situation of thinking the reinforcing and strain-rate hardening and damage softening of polypropylene fiber.

**Key words:** SHPB experiment technique; polypropylene fiber cement mortar; stress-strain curve; constitutive model

聚丙烯纤维混凝土是由细骨料、粗骨料、水泥以及少量的聚丙烯纤维等材料组成的一种多相非均质的复合材料。由于聚丙烯纤维混凝土具有良好的增强、增韧特性, 大大改善了素混凝土的力学性能, 而在工程建设和防护工程中得到日益广泛的应用。早期关于聚丙烯混凝土的抗冲击耐磨性能的研究主要是利用机械冲击试验得到, 但是并没有考虑到惯性效应, 相关的试验也无法得出应力-应变曲线。所得到的数据(如抗压强度)只能进行相对意义上的比较, 并不能完全了解聚丙烯纤维混凝土的动力特性, 对于聚丙烯纤维混凝土的本构关系尤其是考虑率效应影响下的本构关系尚未给出合理的计算方法。

很久以来, 人们根据大量的试验在宏观研究尺度下, 利用非线性弹性、塑性、断裂损伤力学、内时理

论以及细观力学和统计模型等多种途径进行了广泛的研究, 提出了一系列本构模型。基于热力学内变量理论提出了以试验为基础的经验损伤演化规律<sup>[1]</sup>。考虑材料的细观结构, 将断裂力学、细观力学、弹塑性分析方法应用于微裂纹、微空洞的成核和扩展, 从而建立材料的损伤演化的物理过程<sup>[2]</sup>。为定量地描述这类应变率相关的本构响应, 董毓利等<sup>[3]</sup>通过试验, 在内变量理论的基础上, 建立了考虑不可逆应变响应的损伤本构模型; 陈江瑛等<sup>[4]</sup>利用类似于位错运动的热激活机制, 给出了水泥砂浆的率型损伤演化律; 陈江瑛等<sup>[5]</sup>在朱-王-唐模型的基础上进行推广应用, 建立了具有两个松弛时间的非线性黏弹性本构方程。

水泥砂浆为构成混凝土的基底材料, 同时又可

收稿日期: 2013-04-17; 修回日期: 2013-05-02

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2010B04014)

作者简介: 武守锋(1987-), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事纤维混凝土动态性能研究。

以视为典型的混凝土材料。同混凝土材料相比较,水泥砂浆材质要相对均匀,其动态力学试验更容易实现。因此,本文采用直径为 74 mm 的大尺寸 SHPB 试验装置对掺入少量短切聚丙烯纤维的水泥砂浆进行了动态力学性能试验。根据试验结果,对聚丙烯纤维水泥砂浆试件在不同应变率下的弹性模量、峰值应力和韧度等性能进行了分析。根据试验应力-应变曲线的基本特征,引入朱-王-唐(即 ZWT)本构模型,并考虑纤维的阻裂作用,提出了一种新的动态损伤本构关系,对试验结果进行拟合,确定适合聚丙烯水泥砂浆本构模型的合理性。

## 1 动态力学性能试验

### 1.1 SHPB 试验设备

SHPB 试验装置的原型最早是 B. Hopkinson 在 1914 年提出的,英国著名力学专家 Kolshy<sup>[6]</sup>在此基础上提出分离式 Hopkinson 压杆(简称 SHPB)技术,将试件放在两段压杆的中间,Kolshy 对此具有革命性意义,改进后的 SHPB 试验装置能够测量复杂材料(如金属、混凝土、岩石、复合材料以及泡沫材料等)在  $10^1 \sim 10^4$  高应变率下动态力学性能。是测定材料在  $10^1 \sim 10^4$  应变率下动态力学性能的主要装置。典型的 SHPB 试验装置如图 1 所示。SHPB 试验装置主要包括气枪、圆筒、撞击杆、入射杆和透射杆以及测速仪、超动态应变仪、瞬态波形存储器 and 数据处理系统等。试验时试件放置在入射杆与透射杆之间,通过加速的质量块撞击或炸药爆轰产生加速脉冲冲击试件,子弹撞击试件的速度可由测速器确定,入射杆和透射杆上均贴有应变片来记录波形,波形经过超动态应变仪进行放大之后被瞬态波形存储器记录。利用这一装置能够得到各材料在冲击荷载作用下的应力-应变曲线

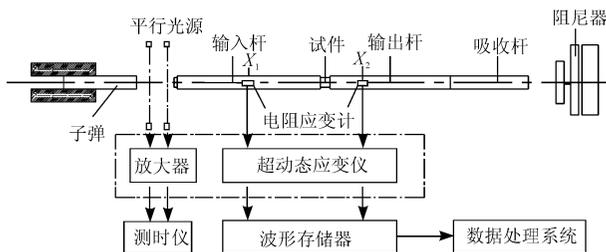


图 1 SHPB 装置示意图

本文中的试验设备将采用河海大学结构试验室的  $\phi 74$  mm 变截面分离式霍普金森压杆,试验装置如图 2。采用直锥变截面  $\phi 74$  mm 的 SHPB 杆,材质为 45# 钢,杨氏模量  $E = 200$  GPa,泊松比  $\nu = 0.3$ 。



图 2  $\phi 74$  mm 变截面 SHPB 试验装置

### 1.2 试件的制作

试验采用的聚丙烯纤维是南京润方建筑技术工程有限公司提供的润方改性聚丙烯束状单丝纤维,伸长率为 15% ~ 25%,长度为 12 mm,直径为 20 ~ 48  $\mu\text{m}$ ;水泥采用海螺牌 32.5 级硅酸盐水泥;砂选用江砂,过筛后粒径控制在 0 ~ 3 mm 之间;水为自来水;未使用外加剂。试验中采用水灰比为 0.5 的水泥砂浆,本文所用聚丙烯纤维水泥砂浆的各原材料用量如表 1 所示。

试件采用人工搅拌的方法制作成型,将聚丙烯纤维水泥砂浆浇注在 30 cm  $\times$  30 cm  $\times$  120 cm 的钢模中。试件的浇注和养护均按规范要求进行,经标准养护一个月后开展试验。为保证试件中骨料、纤维的均匀,减少试件不平整度对试验结果的影响,采用  $\phi 74$  mm 的取芯机将试件取芯切片并采用试验室双面磨光机打磨端面,尽量保证两个平面平行,试件表面平整光滑,光滑度达到 0.2 丝。动态试验的试件尺寸为 74 mm  $\times$  32 mm。其中,考虑到数据的变异性,每种条件下试样的个数都为 3 个,以免个别试验失败导致结果不客观,同时起到数据的相互校核作用。

表 1 聚丙烯纤维水泥砂浆的原材料用量  $\text{kg}/\text{m}^3$

聚丙烯纤维掺量	水泥	砂	水
0	600	1200	300
0.9	600	1200	300
1.2	600	1200	300
1.5	600	1200	300

### 1.3 试验工况设计

聚丙烯纤维水泥砂浆的动态力学性能与本身的材料参数以及试验加载条件有关。本文考察一定水灰比下应变率以及纤维的掺加等对聚丙烯纤维水泥砂浆动态力学性能的影响。试验工况设计时要分别考虑到应变率、聚丙烯纤维掺量等因素。水泥砂浆试件的水灰比为 0.5;由于进行 SHPB 试验时是通过控制子弹的速度来考虑应变率的影响,而子弹的速

度是由充气气压值决定的,因此试验工况设计时设定不同的气压值来考察应变率对材料力学性能的影响;根据已有经验,实际工程中常用的聚丙烯纤维掺量为 $0.6 \sim 1.5 \text{ kg/m}^3$ ,试验工况选取聚丙烯纤维掺量为 $0、0.9、1.2、1.5 \text{ kg/m}^3$ 的聚丙烯纤维水泥砂浆进行冲击试验。聚丙烯纤维水泥砂浆的试验工况如表2所示。

1.4 试验结果及力学性能分析

1.4.1 试验结果 对试验结果进行整理和归类,将每小组的试件所得结果进行平均,即每3个试件得出一条曲线。得到不同应变率下不同纤维含量的试件的应力-应变曲线(限于本文篇幅列出两种纤维掺量下的应力-应变曲线,如图3所示,其中 $V_f$ 为聚丙烯纤维掺量)。本次试验中将应力-应变曲线峰值作为材料的强度值,从图3可以看出,相同纤维掺量的试件在不同应变率作用下强度存在差异,但是应力随应变的发展趋势相似。随着应变率的增长,材料的强度呈上升趋势。图中还可以看出聚丙

烯纤维水泥砂浆试件在初始阶段,应力随应变呈线性增长,当应力达到某一值之后,应力随应变增长反而下降,证明试件在达到荷载峰值甚至未达到荷载峰值前就发生破坏。

表2 聚丙烯纤维水泥砂浆 SHPB 试验工况

水灰比	纤维掺量	气压	试样个数	编号	
0.5	0	0.35	3	1	
		0.40	3	2	
		0.45	3	3	
		0.50	3	4	
		0.55	3	5	
	0.9	0.40	3	6	
		1.2	0.30	3	7
			0.35	3	8
	1.5	0.40	0.40	3	9
			0.45	3	10
			0.50	3	11
0.40			3	12	

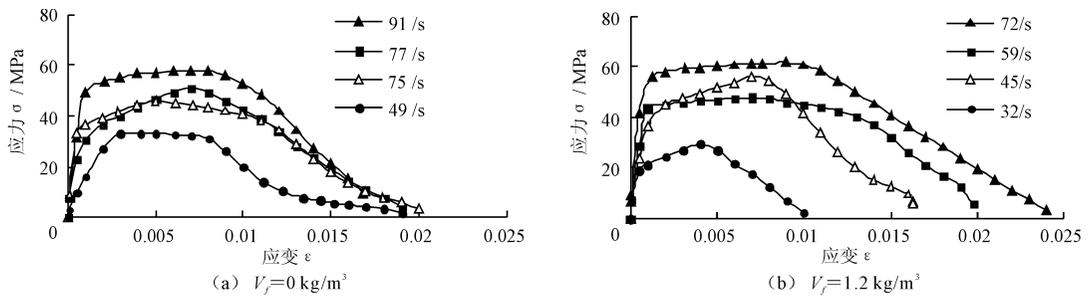


图3 不同应变率下聚丙烯纤维水泥砂浆的应力-应变曲线

1.4.2 弹性模量 弹性模量 $E$ <sup>[7]</sup>一般是指应力-应变曲线弹性阶段的斜率,常见的有初始模量、割线模量、切线模量和混合模量等多种方式<sup>[8]</sup>。本文采用割线模量,以 $0.7 \epsilon_b$ ( $\epsilon_b$ 为峰值应变)所对应的应力、应变来计算弹性模量。根据试验曲线,得出弹性模量-应变率曲线,如图4所示。

由图4可知,在应变率为 $20/s \sim 100/s$ 下,聚丙烯纤维水泥砂浆及水泥砂浆的弹性模量整体随着应变率的增大而增大,而纤维掺量为 $1.2 \text{ kg/m}^3$ 的聚丙烯纤维水泥砂浆的弹性模量较水泥砂浆弹性模量高,且掺入纤维的水泥砂浆弹性模量增长较规律,而水泥砂浆弹性模量较不规律。聚丙烯纤维水泥砂浆弹性模量较水泥砂浆高,这是因为聚丙烯纤维的掺入能够提约束裂缝的发展,耗散较多的能量,使得试件的弹性模量提高。

1.4.3 峰值应力<sup>[9]</sup> 从图5可看出,在动态荷载下,聚丙烯纤维水泥砂浆与水泥砂浆的峰值应力随

着应变率的增大,两者整体都呈增长趋势,并且聚丙烯纤维水泥砂浆的峰值应力要大于水泥砂浆的。这说明水泥砂浆中掺入适量的纤维是可以提高水泥砂浆的冲击强度的。这是因为水泥砂浆内掺入聚丙烯纤维能够减少试件微裂缝的数量,同时纤维随机杂乱的分布在水泥凝胶体的和骨料间将限制微裂缝的发展,降低了微裂缝的扩展速度,而此时能量的扩散迫使水泥砂浆的应力提高。

1.4.4 韧度 材料的韧性 $R$ 是指材料在一定荷载作用下表现出的变形能力,是材料延性和强度的综合表现,也是材料动态力学性能的重要指标,韧性可以定义为材料或结构从加载到失效为止吸收能量的能力。韧性不仅与材料强度有关,而且还取决于材料破坏时的变形量,表现在应力-应变曲线上为应力-应变曲线围成的面积值。为研究聚丙烯纤维水泥砂浆的材料韧度,对上述应力-应变曲线所包围的面积进行计算,所得结果如图6所示。

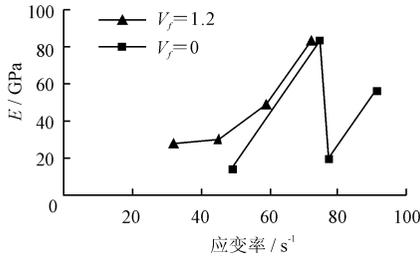


图4 弹性模量 - 应变率关系曲线

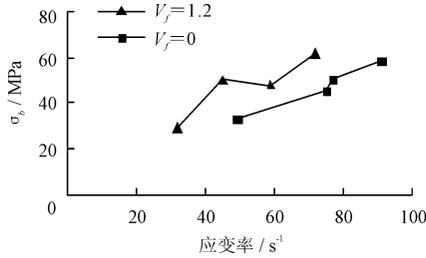


图5 峰值应力 - 应变率关系曲线

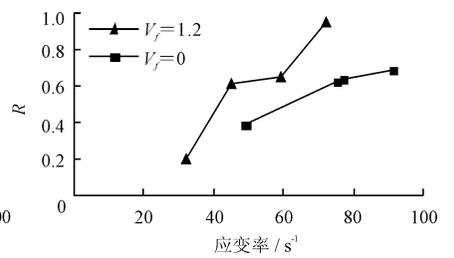


图6 韧度 - 应变率关系曲线

由图6可以看出,两组曲线的韧度都随着应变率的增大而增大。这主要是因为随着应变率的增大,试件产生的裂纹数越多,所需的能量相应增大,所以韧度随着应变率的增大而提高。而纤维水泥砂浆的韧度要高于水泥砂浆的韧度,是因为聚丙烯纤维起着阻碍裂纹产生的作用,故比水泥砂浆破坏所需能量更大,韧度则相应提高。由此可得,相同应变率下,聚丙烯纤维混凝土的韧度比水泥砂浆的大,故聚丙烯纤维的增韧效果较明显,且聚丙烯纤维水泥砂浆和水泥砂浆的韧度都具有应变率效应。

## 2 聚丙烯纤维水泥砂浆动态本构关系研究

根据试验得到的应力 - 应变曲线,分析其基本特征,引入朱 - 王 - 唐(即ZWT)本构模型,并考虑纤维的阻裂作用,提出了一种适合聚丙烯行为为水泥砂浆的动态损伤本构关系,并对试验数据进行拟合,确定该聚丙烯水泥砂浆的本构模型的合理性。

朱 - 王 - 唐动态损伤本构模型<sup>[10]</sup>是一种应变率敏感的非线性黏弹性和计及损伤的本构关系的力学模型。动态作用下,ZWT动态损伤本构模型通过在模型中并联两个不同松弛时间的Maxwell体对水泥砂浆的强度和模量进行拟合。其中松弛时间为 $\varphi_1$ 的Maxwell体用于描述低应变率时的粘弹响应,松弛时间为 $\varphi_2$ 的Maxwell体则可用于描述高应变率的粘弹响应。

### 2.1 粘弹性动态本构模型

不计损伤的变形可用标准线性固体模型表示,其积分形式为<sup>[11]</sup>:

$$f(\varepsilon) = E_0\varepsilon + E_1 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_1}\right) d\tau + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau \quad (1)$$

式中: $E_0$ 为对应的弹性常数。 $E_1$ 和 $\theta_1$ 分别是低频Maxwell体的弹性常数和特征时间, $E_2$ 和 $\theta_2$ 分别是高频Maxwell体的弹性常数和特征时间, $\varepsilon$ 为应变,

$\dot{\varepsilon}$ 为应变率。

### 2.2 连续损伤参量

试件的破坏是以微裂纹等内部损伤的发展为前导的,因此引入损伤内参量 $D$ ,当 $D = 0$ 时,表示材料没有损伤;当 $D = 1$ 时,表示材料完全丧失承载能力。水泥砂浆是一种多相复合材料,其内部存在强度不同的微缺陷,考虑到在加载过程中的损伤是连续的,采用Weibull<sup>[12]</sup>分布描述该类材料的损伤过程,即损伤内参量 $D$ 可取为:

$$D = \begin{cases} 0 & \varepsilon \leq \varepsilon_{th} \\ 1 - \exp\left[-\frac{(\varepsilon - \varepsilon_{th})^m}{a}\right] & \varepsilon > \varepsilon_{th} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $m$ 、 $a$ 为材料常数,与聚丙烯体积含量,长径比,混凝土强度以及应变率有关; $\varepsilon_{th}$ 为材料损伤累计的阈值应变<sup>[13]</sup>。一般 $\varepsilon_{th}$ 为 $0.7 \sim 0.9 \varepsilon_b$ , $\varepsilon_b$ 为应力峰值所对应的应变值。

### 2.3 聚丙烯纤维水泥砂浆动态损伤本构模型

依据ZWT动态损伤本构模型,采用Weibull分布描述损伤参量,对聚丙烯纤维水泥砂浆进行拟合。作出如下假设<sup>[14]</sup>:在损伤区,聚丙烯纤维起着一定的阻裂作用<sup>[9]</sup>,设它在压应力下的承载力为 $r$ , $r = Dk$ , $k$ 为承载力系数,聚丙烯纤维水泥砂浆的本构方程如下所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = E_0\varepsilon + E_1\theta_1\dot{\varepsilon}\left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\theta_1}\right)\right] + E_2\theta_2\dot{\varepsilon}\left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\theta_2}\right)\right] \\ \sigma = (1-D)\left\{E_0\varepsilon + E_1\theta_1\dot{\varepsilon}\left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\theta_1}\right)\right] + E_2\theta_2\dot{\varepsilon}\left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\theta_2}\right)\right]\right\} + Dk \end{array} \right. \quad (3)$$

### 2.4 试验曲线与本构拟合对比

通过SHPB试验装置对纤维水泥砂浆进行高应变率加载,得到冲击荷载下的应力 - 应变曲线。根据本构模型式(3)对试验曲线进行拟合,得出各材料参数及拟合参数如表3所示。每条曲线对应一组

拟合参数,再通过对比各组拟合参数,总结出应变率、纤维参量对这些参数的影响规律。

试验得到的应力-应变曲线和利用本构模型拟合的到的应力-应变曲线对比如图7所示。从图7

可看出,拟合曲线跟试验曲线非常接近,证明了我们的假设是成立的,说明了本文提出的聚丙烯行为水泥砂浆的本构方程(3)的合理性。

表3 聚丙烯纤维水泥砂浆本构拟合参数

编号	水灰比	纤维含量	应变率	kg/m <sup>3</sup> , l/s, GPa, s									
				$E_0$	$E_1$	$E_2$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$m$	$a$	$k$	$\varepsilon_{th} (10^{-3})$	
a	0.5	0	77	6.3	63.1	14.6	0.00568	1.10	0.82971	0.01172	0	0.89	
b	0.5	0.9	75	9.4	61.0	13.8	0.00527	2.20	0.9270	0.00540	5.60	1.25	
c	0.5	1.2	72	11.6	62.9	14.7	0.00575	2.76	0.9970	0.00460	7.80	1.40	
d	0.5	1.5	70	13.6	68.1	24.76	0.00521	2.71	1.0100	0.00440	11.20	2.10	
e	0.5	1.2	32	12.2	20.6	9.30	0.00050	0.005	1.4400	0.00055	3.42	0.70	

从表3拟合所得参数可以看出,随着应变率的增加,用来描述与应变率无关的弹性模量  $E_0$  随应变率的增加而基本保持不变,这与本构模型中的含义完全一致,但随纤维参量的增加而显著增加。 $E_1, E_2$  都随着应变率的增加而增大, $\varphi_1, \varphi_2$  也随着应变率的增加而显著增大,这表明了应变率响应越来越明显。随着应变率的增加, $a$  较快增长, $m$  略有减小,表明了损伤演化速度随着应变率的增加反而降低,这与高应变率下裂缝来不及扩展理论是一致的。 $E_1, E_2, \varphi_1, \varphi_2, a, m$  随纤维掺量的增加而增加较小,表明

纤维掺量对试件的应变率相应影响不大。同样可以看出,损伤演化速度随着纤维掺量的增加反而显著减小,表明纤维抑制了砂浆中裂缝的发展; $\varepsilon_{th}$  定义为应力应变曲线初始弹性段末端的应变值,因此  $\varepsilon_{th}$  的大小反映出材料弹性段的长短随应变率的变化,从表中的结果可以看出,应变阈值随着纤维参量的增加而增加,随着应变率的增加而增加,即材料延性增大。随着纤维率的增加,应变率的提高,承载力系数  $k$  也随之增加<sup>[15]</sup>。

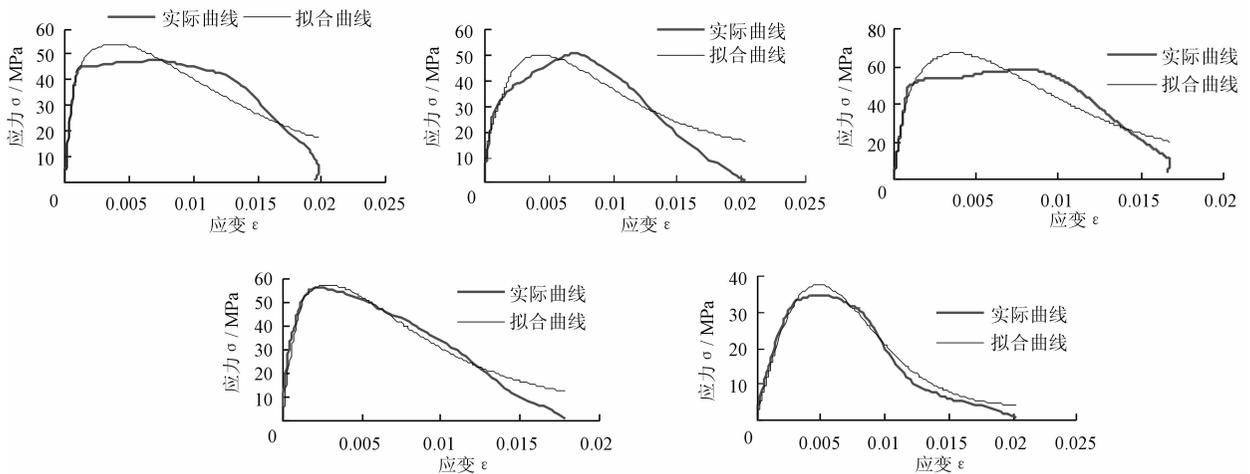


图7 实测应力-应变曲线与拟合结果对比

### 3 结 语

(1) 水泥砂浆的弹性模量整体随着应变率的增大而增大,且掺入聚丙烯纤维的水泥砂浆的弹性模量较水泥砂浆有所提高。

(2) 聚丙烯纤维具有明显的增强增韧效应。试验表明,聚丙烯纤维水泥砂浆的峰值应力与韧度具有应变率效应,随着应变率的增大而呈增长趋势。

(3) 本文提出的损伤本构模型,采用分段表述,能较好的描述单轴状压缩态下不同聚丙烯纤维含量水泥砂浆的力学特性与损伤发展过程。根据本文研究,损伤演化速度随着应变率和纤维掺量的增加而降低,聚丙烯承载力系数随着应变率和纤维掺量的增加而增加。

- ored wastewaters [J]. Journal of Taiwan Institute Chemical Engineers, 2012,43(2):282-290.
- [3] Mohan N, Balasubramanian N, Basha CA. Electrochemical oxidation of textile wastewater and its reuse [J]. Journal of Hazard Materials, 2007,147(1-2):644-651.
- [4] Zaroual Z, Azzi M, Saib N, Chainet E. Contribution to the study of electro-coagulation mechanism in basic textile effluent [J]. Journal of Hazard Materials, 2006,131(1-3):73-78.
- [5] Kobya M, Bayramoglu M, Eyvaz M. Techno-economical evaluation of electro-coagulation for the textile wastewater using different electrode connections [J]. Journal of Hazard Materials, 2007,148(1-2):73-78.
- [6] Can O T, Kobya M, Demirbas E, et al. Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation [J]. Chemosphere, 2006,62(2):181-187.
- [7] Demirel B, Yenigun O, Onay T T. Anaerobic treatment of dairy wastewaters [J]. Process Biochemistry, 2005,40(8):2583-95.
- [8] Zongo I, Leclerc J E, Maïga H A, et al. Removal of hexavalent chromium from industrial wastewater by electrocoagulation: A comprehensive comparison of aluminium and iron electrodes [J]. Separation Purification Technology, 2009,66(1):159-166.
- [9] Mouedhen G, Feki M, Wery MDP, et al. Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process [J]. Journal of Hazard Materials, 2008,150(1):124-135.
- [10] Daneshvar N, Ashassi-Sorkhabi H, Tizpar A. Decolorization of orange II by electrocoagulation method [J]. Separation Purification Technology, 2003,31(2):153-162.
- [11] 梁耀开,王汉道. 铁炭微电解法处理印染废水的试验研究[J], 广东轻工职业技术学院学报. 2003,9(3):9-20.
- [12] Daneshvar N, Khataee A R, Ghadim A R A, et al. Decolorization of C. I. acid yellow 23 solution by electrocoagulation process: investigation of operational parameters and evaluation of specific electrical energy consumption (SEEC) [J]. Journal of Hazard Materials, 2007,148(3):566-572.
- [13] Phalakornkule C, Polgumhang S, Tongdaung W, et al. Electrocoagulation of blue reactive, red disperse and mixed dyes, and application in treating textile effluent [J]. Journal of Environmental Management, 2010,91(4):918-926.
- [14] Zhu J, Wu F, Pan X, et al. Removal of antimony from antimony mine flotation wastewater by electrocoagulation with aluminum electrodes [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011,23(7):1066-1071.

(上接第85页)

#### 参考文献:

- [1] Mohamed A R, Hansen W. Micromechanical modeling of concrete sponse under static loading Part1: Model development and validation [J]. ACI Materials Journal. 1999,96(2):196-203.
- [2] Weibull W. A statistical theory of the strength of materials[C] // . Proceeding of Royal Swedish Institute Engineering reseach. Stockholm, Sweden, 1993,1-50.
- [3] 董毓利,谢和平,赵鹏. 不同应变率下混凝土受压全过程的试验研究[J]. 水利学报,1997,28(7):72-77.
- [4] 陈江瑛,黄旭升,王礼立. 水泥砂浆的率型损伤演化[J]. 中国矿业大学学报,1998,27(2):189-191.
- [5] 陈江瑛,王礼立. 水泥砂浆的率型本构方程[J], 宁波大学学报,2000,13(2):1-5.
- [6] Kolsky H. Wave propagation effects and fracture [J]. Mechanical properties at high rates of strain [C] // . Proceedings of the Conference, Oxford, England, United Kingdom,1974.4.
- [7] 黄瑞源,王志亮,李永池,等. 钢纤维混凝土力学特性与本构模型研究[J]. 低温建筑技术,2009,(8):32-34.
- [8] 严少华,钱七虎,孙伟,等. 碳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.
- [9] 刘永胜,王肖钧,金挺,等. 碳纤维混凝土力学性能和本构关系研究[J]. 中国科学技术大学学报,2007,37(7):717-723.
- [10] 胡时胜,王道荣,刘剑飞. 混凝土材料动态力学性能的试验研究[J]. 工程力学,2001,18(5):115-118.
- [11] 陈建康,黄筑平. 含二相粒子流变材料的损伤理论 [M]. 长春:吉林科技出版社,2002.
- [12] Belytschko T, Lu Y Y, Gu L. Element-free Galerkin method [J]. J Numer Mech Eng., 1994,37:229-256.
- [13] 董毓利,谢和平,李世平. 砼受压损伤力学本构模型的研究[J]. 工程力学,1996,13(1):44-53.
- [14] 刘永胜,徐冬梅,张成均. 超短碳纤维混凝土动态力学性能研究[J]. 混凝土,2006(7):21-23.
- [15] 张华,李飞,陆峰,等. 冲击荷载下聚丙烯纤维混凝土动态性能试验研究[J]. 特种结构,2012,29(1):10-14.