

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0249

聚氯乙烯弹性体静动态力学性能及本构模型*

雷经发^{1,2}, 许孟¹, 刘涛^{1,2}, 宣言¹, 孙虹^{1,2}, 魏展¹

(1. 安徽建筑大学机械与电气工程学院, 安徽合肥 230601;

2. 安徽建筑大学工程机械智能制造安徽省教育厅重点实验室, 安徽合肥 230601)

摘要: 为揭示聚氯乙烯弹性体在静、动态载荷下的力学性能, 采用万能材料试验机和改进的分离式霍普金森压杆实验装置获得了材料在应变率为 0.001、0.01、0.1、1 510、2 260 和 3 000 s⁻¹ 下的应力应变曲线, 并以屈服强度为整形器优选参数, 对比了紫铜、铜版纸和铅等 3 种整形器材料的整形效果。使用修正的 ZWT 非线性黏弹性本构模型描述聚氯乙烯弹性体在静、动态载荷下的力学性能。结果表明: 聚氯乙烯弹性体在静态载荷下具有应变率效应和显著的超弹性特性, 动态载荷下表现出较明显的应变率效应和较强的抗变形能力, 且静动态载荷下的力学行为受应变历史影响较大。3 种整形器材料中铜版纸的整形效果最好。修正后的 ZWT 非线性黏弹性本构模型能够得到统一参数的本构表达式, 且各应变率下的拟合结果与实验结果具有较好的一致性。

关键词: 聚氯乙烯弹性体; 静、动态力学性能; ZWT 非线性黏弹性本构模型; 整形器

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 1301520

文献标志码: A

Static/dynamic mechanical properties and a constitutive model of a polyvinyl chloride elastomer

LEI Jingfa^{1,2}, XU Meng¹, LIU Tao^{1,2}, XUAN Yan¹, SUN Hong^{1,2}, WEI Zhan¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, Anhui, China;

2. Anhui Education Department Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Construction Machinery, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, Anhui, China)

Abstract: In order to reveal the mechanical properties of a polyvinyl chloride elastomer under static and dynamic loading, the stress-strain curves of the polyvinyl chloride elastomer at six different strain rates (0.001, 0.01, 0.1, 1 510, 2 260 and 3 000 s⁻¹) were obtained by using a universal material testing machine and a modified split Hopkinson pressure bar experimental device. The shaping effects of the three shaper materials including copper, coated paper and plumbum were compared by using the yield strength as the optimized parameter of the shapers. It is difficult to obtain a unified parametric constitutive expression directly using the original ZWT nonlinear viscoelastic constitutive model, and the constitutive model is less efficient in describing the mechanical properties of the materials under static and dynamic loading. Therefore, the modified ZWT nonlinear viscoelastic constitutive model was used to describe the mechanical properties of the material under static and dynamic loading. The results show that the polyvinyl chloride elastomer has a strain-rate effect and significant hyperelastic properties under static load. It exhibits a more obvious strain-rate effect and strong resistance to deformation under dynamic loading, and the mechanical behaviors under static and dynamic loading are greatly affected by the strain histories. Coated paper has the best shaping effect among the three shaper materials. The modified ZWT nonlinear viscoelastic constitutive model can obtain

* 收稿日期: 2019-06-25; 修回日期: 2020-07-29

基金项目: 安徽省自然科学基金(1708085ME130); 安徽省高校优秀拔尖人才培养资助项目(gxbjZD2020078); 汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室开放基金(NVHSL-201407)

第一作者: 雷经发(1978—)男, 博士, 教授, rain78828@163.com

通信作者: 刘涛(1984—)男, 博士, 副教授, liutao19841015@163.com

constitutive expressions with uniform parameters, and the fitting results at various strain rates are in good agreement with the experimental results.

Keywords: polyvinyl chloride elastomer; static/dynamic mechanical properties; ZWT nonlinear viscoelastic constitutive model; pulse shaper

聚氯乙烯(PVC)弹性体是一种热塑性合成聚合物,因其低密度、低成本及耐腐蚀等优势被广泛应用于汽车^[1-2]、航空航天^[3]等领域,如用于汽车碰撞实验假人的仿生皮肤材料、航空假人的皮肤材料等。在这些应用场景中,聚氯乙烯弹性体材料制品常会经受冲击载荷作用,而这类材料在冲击载荷作用下的力学行为与其在静载下的力学行为存在很大差异^[4]。揭示聚氯乙烯弹性体的动态力学行为并构建精确的本构模型对于保障产品服役安全意义重大。

目前,开展分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)实验已成为测试材料动态力学行为的重要手段,但对于聚氯乙烯弹性体这类软质材料,使用传统 SHPB 实验装置进行测试仍存在较多问题,如透射信号弱^[5]、加载过程中难以保证试件内的应力均匀分布及难以实现恒定应变率加载^[6-7]等。针对这些问题,常见的改进措施有替换压杆材料、选用灵敏度更高的传感器及采用波形整形器等。然而不同软质材料间的力学特性存在差异,实验时仍需根据具体材料特性对 SHPB 实验装置进行优化。

近年来,关于聚合物材料的动态本构模型研究较多^[8-12],其中,ZWT(朱-王-唐)非线性黏弹性本构模型可描述聚合物材料动态载荷下的力学行为,应用较广泛^[13-16]。但聚合物材料动态载荷下的应变率敏感性较强,使得原始 ZWT 非线性黏弹性本构模型的模型参数常难以恒定。本文中,采用万能材料试验机和改进的 SHPB 实验装置开展聚氯乙烯弹性体的静态压缩实验,并对 SHPB 实验中整形器材料进行优选。最后以原始 ZWT 非线性黏弹性本构模型为基础构建聚氯乙烯弹性体的动态本构模型。

1 实验材料及过程

1.1 实验材料

本文中准静态压缩实验试件尺寸为 $\varnothing 29 \text{ mm} \times 12.5 \text{ mm}$,动态压缩实验试件尺寸^[6]为 $\varnothing 8 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。所用聚氯乙烯弹性体的制备过程简述如下:首先,将聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)100份、增塑剂(邻苯二甲酸二辛酯 DOP、邻苯二甲酸二丁酯 DBP)80~120份、复合热稳定剂2~4份进行初混合并搅拌40 min至均匀;其次,进行抽真空脱泡获得备用料;最后,将备用料预热后,浇注注入热模具中并模压成型($180 \text{ }^\circ\text{C}$, 70~90 min),待物料塑化成型后,冷却脱模获得制品,所有试件为同一批次。所得到的聚氯乙烯弹性体试件邵氏硬度为(57±5)HA。

1.2 实验过程

1.2.1 准静态压缩实验

采用万能材料试验机对聚氯乙烯弹性体试件进行应变率为0.001、0.01和 0.1 s^{-1} 的准静态压缩实验,加载的最大应变为0.3,实验时添加引伸计,对每种应变率的加载实验均重复3组有效实验,实验在室温($20 \text{ }^\circ\text{C}$)下完成。

1.2.2 动态压缩实验

聚氯乙烯弹性体的动态实验在杆径为14.5 mm的 SHPB 实验装置上进行。该装置如图1所示,入射杆和透射杆的长均为1 000 mm,撞击杆和吸收杆的长均为300 mm。为使实验数据准确可靠,对常规 SHPB 实验装置作如下改进:为增强实验时的透射信号,所有杆件材料均选用硬质铝杆,同时采用半导体应变片^[5](型号为 TP-5,灵敏度系数为 110 ± 5.5 ,采用对臂半桥连接)采集透射应变信号;为延长入射波的上升前沿,消除弥散效应,同时获取恒定应变率加载的实验波形,在入射杆杆端添加适当整形器以改变入射波形。

碰撞加载时,撞击杆先撞击整形器,使得整形器发生塑性变形后将变形的加载波传入入射杆,即通

过整形器的塑性变形来改变入射波形^[17]。可见, 整形器塑性变形特征是改变入射波形的主要因素之一, 而整形器材料屈服强度直接影响其塑性变形特征, 因此将材料的屈服强度作为整形器的优选参数。选取 3 种典型材料作为聚氯乙烯弹性体 SHPB 实验的整形器, 分别为紫铜、铜版纸和铅, 相应的材料参数见表 1。通过撞击实验, 得到 3 种整形器材料的实验波形, 如图 2 所示。

表 1 整形器材料参数

Table 1 Parameters of the pulse shaper material

整形器 材质	整形器尺寸	屈服强度/ MPa	撞击速度/ (m·s ⁻¹)
紫铜	∅ 10 mm×0.6 mm	70.0	8.12
铜版纸	10 mm×10 mm×0.6 mm (双层厚)	5.95	8.10
铅	∅ 10 mm×0.6 mm	5.0	7.99

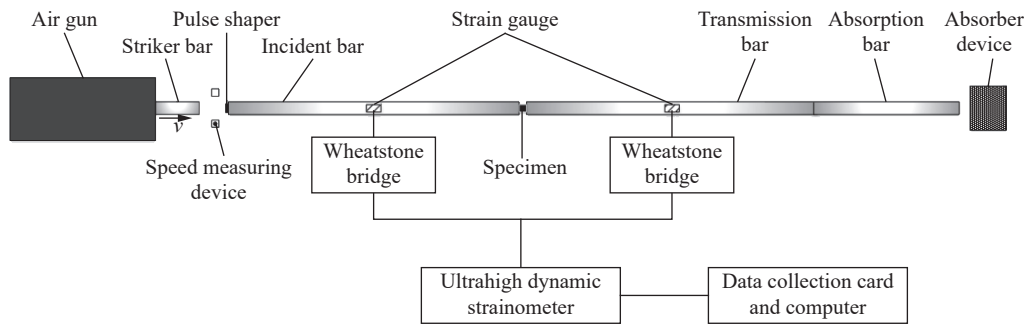


图 1 SHPB 装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the SHPB setup

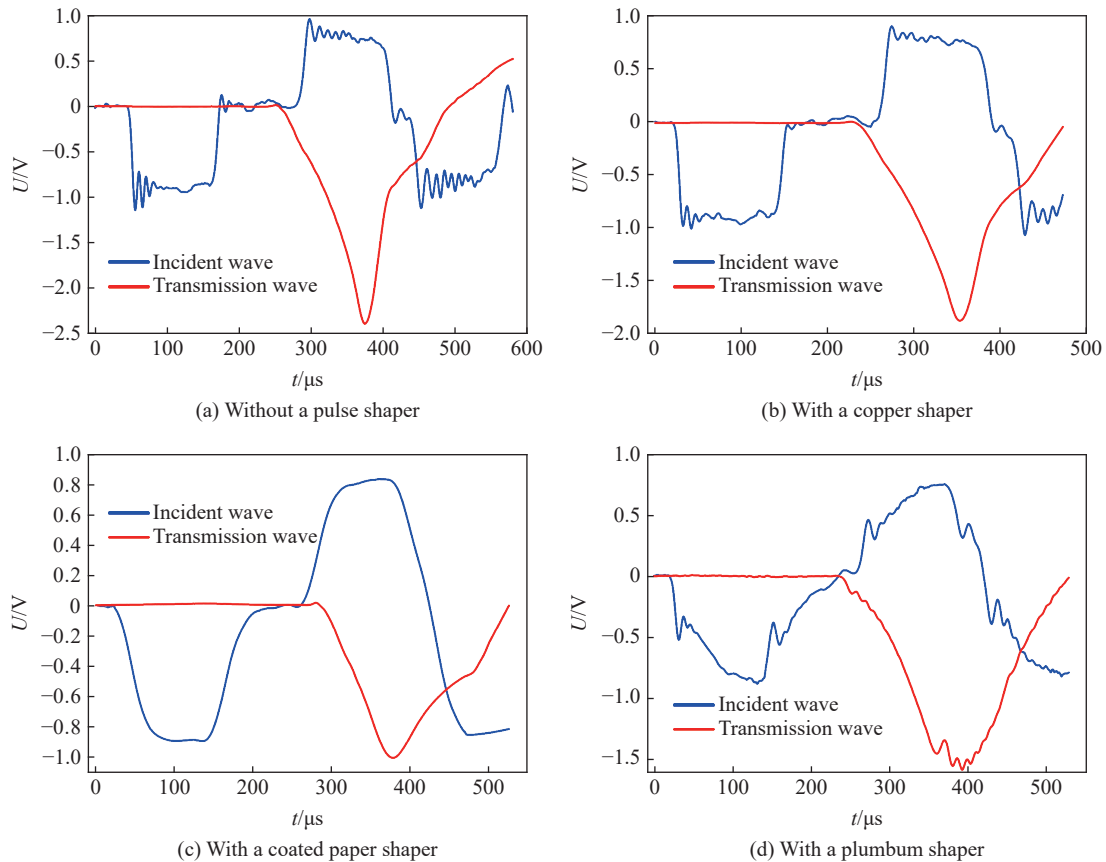


图 2 未使用整形器和使用不同材质的整形器所得的波形

Fig. 2 Waveforms without and with pulse shapers made by different materials

图2可见,未加整形器的实验波形具有较严重的弥散效应且入射波的上升前沿较短,所得实验数据不可靠。采用整形器后,不同整形器材料的整形效果也不相同。紫铜做整形器时,弥散效应未得到有效消除且入射波的上升前沿也未能得到有效延长;铜版纸做整形器时,弥散效应得到消除,入射波的上升前沿也得到有效地延长,同时其反射波形近似为平台波,即实现了恒应变率加载;铅做整形器时,实验波形出现严重变形,所得实验数据难以反映材料的动力学性能。由此可知3种整形器中铜版纸的整形效果最好。

采用改进后的 SHPB 实验装置对聚氯乙烯弹性体进行动态压缩实验。实验时,通过控制撞击杆的撞击速度来获得不同应变率下的应力应变曲线,且每种应变率下的动态压缩实验均重复3组有效实验,实验在室温(20℃)下完成。

2 实验结果与分析

通过准静态压缩实验得到应变率为0.001、0.01和0.1 s⁻¹的应力应变曲线(本文中所述应力应变均为工程应力应变)如图3所示,图中3种应变率下的应力应变曲线均呈现凹向上的非线性变化规律,即应力随应变的增大而加速升高,表明聚氯乙烯弹性体低应变率下的力学行为受应变历史的影响较大。同时还发现在应变小于5%时,3种应变率下的应力无显著变化,而随着应变的增大,应力呈现出随应变率升高而升高的趋势,表明静态载荷下聚氯乙烯弹性体具有应变率效应。卸载后采用二次元测量仪测量试件尺寸,发现试件实验前后尺寸变化不到1%,表明聚氯乙烯弹性体具有显著的超弹性特性。

图4为聚氯乙烯弹性体在0.001、1 510、2 260和3 000 s⁻¹应变率下的应力应变曲线,其中0.001 s⁻¹应变率下的应力应变曲线作为静态参考曲线。从图4可见,聚氯乙烯弹性体在高应变率下的应力应变曲线的变化趋势与其在低应变率下的应力应变曲线的变化趋势相似,即应力随应变的增大而呈现非线性升高的趋势,且通过对比发现高应变率下聚氯乙烯弹性体应力应变曲线的非线性程度增大,表明高应变率下聚氯乙烯弹性体的抗变形能力增强。同时对比3种高应变率下的应力应变曲线可发现,随着应变率的升高,应力增幅加大,表明高应变率下聚氯乙烯弹性体具有明显的应变率效应。

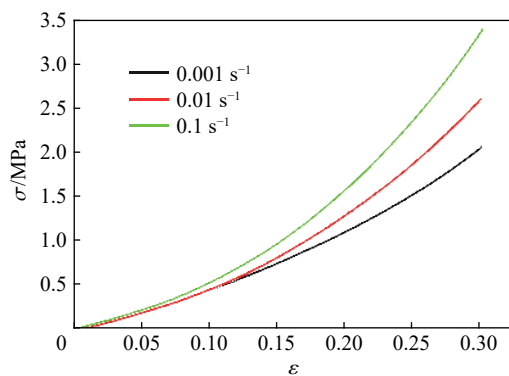


图3 聚氯乙烯弹性体准静态压缩应力应变曲线
Fig. 3 Quasi-static compressive stress-strain curves of the PVC elastomer

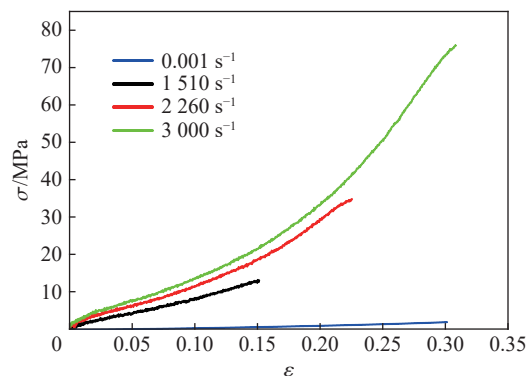


图4 聚氯乙烯弹性体静、动态压缩应力应变曲线
Fig. 4 Static and dynamic compressive stress-strain curves of the PVC elastomer

3 本构模型及参数确定

3.1 原始 ZWT 非线性黏弹性本构模型

ZWT 非线性黏弹性本构模型常用于描述材料在宽应变率范围下的力学行为,相应的模型如图5所示,本构表达式如下:

$$\sigma = E_0 \varepsilon + \alpha \varepsilon^2 + \beta \varepsilon^3 + E_1 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_1}\right) d\tau + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau \quad (1)$$

由图 5 可知, ZWT 非线性黏弹性本构模型是由一个非线性弹簧和两个 Maxwell 单元组成。其中非线性弹簧对应式(1)中的前 3 项, 用于描述材料的非线性弹性响应, E_0 、 α 和 β 为其弹性常数。两个 Maxwell 单元分别对应式(1)中的第 4 项和第 5 项, 用于描述材料的黏弹性响应, 且第 1 个积分项用于材料低应变率加载下的黏弹性响应, E_1 和 θ_1 分别为其弹性常数和松弛时间, 第 2 个积分项是用于描述材料高应变率加载下的黏弹性响应, E_2 和 θ_2 分别为其弹性常数和松弛时间。当材料受到低应变率加载时, 高应变率所对应的 Maxwell 单元始终处于松弛状态, 对应表达式为:

$$\sigma = E_0\varepsilon + \alpha\varepsilon^2 + \beta\varepsilon^3 + E_1 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_1}\right) d\tau \quad (2)$$

而当材料受到高应变率加载时, 低应变率所对应的 Maxwell 单元则无法实现松弛响应, 对应表达式为:

$$\sigma = (E_0 + E_1)\varepsilon + \alpha\varepsilon^2 + \beta\varepsilon^3 + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau \quad (3)$$

由于本文实验的加载率可近似看作恒应变率加载, 因此式(2)和式(3)可分别写为:

$$\sigma = E_0\varepsilon + \alpha\varepsilon^2 + \beta\varepsilon^3 + E_1\theta_1\dot{\varepsilon} \left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\theta_1\dot{\varepsilon}}\right)\right] \quad (4)$$

$$\sigma = (E_0 + E_1)\varepsilon + \alpha\varepsilon^2 + \beta\varepsilon^3 + E_2\theta_2\dot{\varepsilon} \left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\theta_2\dot{\varepsilon}}\right)\right] \quad (5)$$

依据式(4)和式(5)拟合聚氯乙烯弹性体低应变率和高应变率下的实验数据, 相应参数见表 2, 拟合结果见图 6。

图 6 可见, 由 ZWT 非线性黏弹性本构模型拟合得到的曲线与实验曲线间的吻合效果较好, 说明 ZWT 非线性黏弹性本构模型可用于描述聚氯乙烯弹性体在低应变率或高应变率下的力学行为。然而, 从表 2 可以看出, 不同应变率下 ZWT 非线性黏弹性本构模型的参数值难以恒定, 无法使用统一表达式来描述聚氯乙烯弹性体的力学行为, 直接应用该模型过程较复杂。

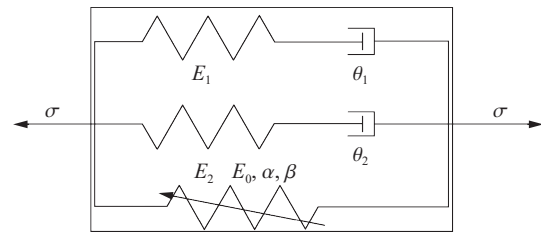


图 5 ZWT 模型

Fig. 5 The ZWT model

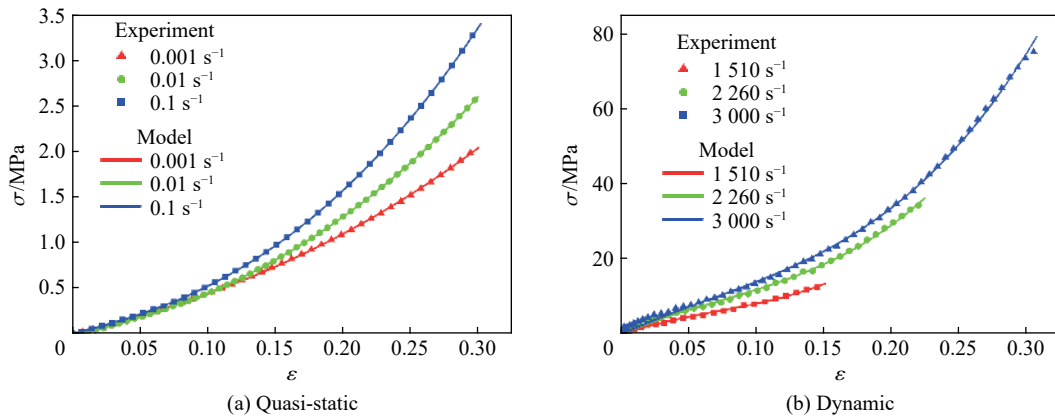


图 6 应力应变曲线与本构拟合

Fig. 6 Comparison between predicted and experimental stress-strain curves

表 2 拟合参数值
Table 2 Fitted parameters

$\dot{\varepsilon}/s^{-1}$	E_0 or $(E_0+E_1)/MPa$	α/MPa	β/MPa	E_1 or E_2/MPa	θ_1 or θ_2/s	相关系数平方 R^2
0.001	3.14	7.619	10.97	0.419 7	2 117	0.999 9
0.01	2.854	14.86	15.15	6.664×10^{-9}	5.933×10^{-9}	1
0.1	2.924	17.98	31.19	1.32	0.177 5	1
1 510	-81.4	-748.8	3 580	202.7	134.6	0.995 5
2 260	138.2	-669.9	3 100	17.1	9 552	0.997 3
3 000	90.1	-517.9	2 650	75.64	77.58	0.998 6

3.2 ZWT 模型的修正

为解决上述问题,依据聚氯乙烯弹性体低应变率和高应变率下的力学特性对原始 ZWT 非线性黏弹性本构模型进行修正。

由聚氯乙烯弹性体低应变率下的应力应变曲线可知,聚氯乙烯弹性体低应变率下的力学性能不仅受应变率的影响,而且还受其应变历史的影响,因此可用 $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ 作为其修正项,修正项中的第 1 个变量表示应变历史的影响因子,第 2 个变量表示应变率的影响因子。修正形式如下:

$$\sigma = \left\{ E_0 \varepsilon + \alpha \varepsilon^2 + \beta \varepsilon^3 + E_1 \theta_1 \dot{\varepsilon} \left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\theta_1 \dot{\varepsilon}}\right) \right] \right\} f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) \quad (6)$$

同时又由于低应变率所对应的应变率值较小,因此对于修正项 $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ 的具体形式可参照 Johnson-Cook 模型的形式,引入一参考应变率,即 $f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, \dot{\varepsilon}_0)$ 。

而相较于低应变率,高应变率下聚氯乙烯弹性体的应力应变曲线的非线性程度更高,因此可对 ZWT 非线性黏弹性本构模型中用于描述材料非线性弹性响应的前 3 项引入一应变率相关项 ($f(\dot{\varepsilon})$) 予以修正。相应的修正形式如下:

$$\sigma = f(\dot{\varepsilon}) \left[(E_0 + E_1) \varepsilon + \alpha \varepsilon^2 + \beta \varepsilon^3 \right] + E_2 \theta_2 \dot{\varepsilon} \left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\theta_2 \dot{\varepsilon}}\right) \right] \quad (7)$$

确定了低应变率和高应变率下 ZWT 模型的修正形式后,利用实验数据,参照式(6)~(7)的修正形式拟合确定聚氯乙烯弹性体低应变率和高应变率下本构关系的具体表达式。聚氯乙烯弹性体低应变率下 ZWT 模型的修正表达式为:

$$\sigma = \left\{ 3.14 \varepsilon + 7.619 \varepsilon^2 + 10.97 \varepsilon^3 + 888.29 \dot{\varepsilon} \left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{2 117 \dot{\varepsilon}}\right) \right] \right\} \left[1 + 0.419 3 \varepsilon \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] \quad (8)$$

式中:参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0$ 取 $0.001 s^{-1}$ 。

聚氯乙烯弹性体高应变率下 ZWT 模型的修正表达式为:

$$\sigma = \left(-10.18 + 5.249 |\dot{\varepsilon}|^{0.1} \right) \left(85.3 \varepsilon - 667.8 \varepsilon^2 + 2780 \varepsilon^3 \right) + 55.06 \dot{\varepsilon} \left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{1.547 \dot{\varepsilon}}\right) \right] \quad (9)$$

式中: $|\dot{\varepsilon}|$ 为一无量纲量,数值上与对应的应变率值相等。公式(8)、(9)的拟合结果见图 7 和表 3。

由图 7 和表 3 可看出,低应变率和高应变率下的修正模型拟合得到的曲线和实验曲线间具有较好的一致性,表明本文对于描述聚氯乙烯弹性体静态载荷下力学行为的 ZWT 模型的修正方式是可行的。为进一步说明两种修正后的 ZWT 模型的适用性,使用应变率为 0.005 、 $1 310$ 和 $1 890 s^{-1}$ 的实验曲线对这两种修正后的 ZWT 模型进行验证,所得结果见图 8 和表 4。

表 3 修正后的 ZWT 模型的拟合结果

Table 3 The fitting result of the modified ZWT model			
$\dot{\varepsilon}/s^{-1}$	相关系数平方 R^2	$\dot{\varepsilon}/s^{-1}$	相关系数平方 R^2
0.001	0.999 9	1 510	0.997 3
0.01	0.998 3	2 260	0.993 0
0.1	0.997 4	3 000	0.996 1

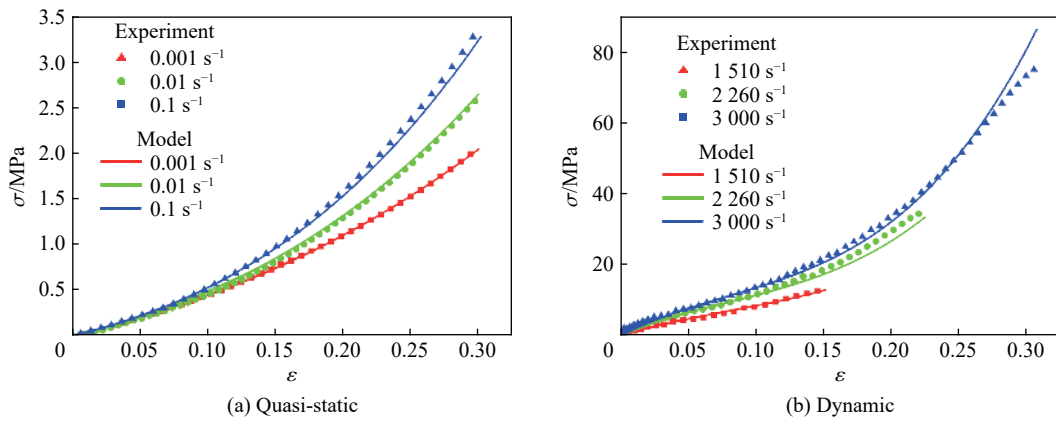


图 7 修正后的 ZWT 本构拟合与应力应变曲线

Fig. 7 Comparison between stress-strain curves and the fitting curves of the modified ZWT model

图 8 和表 4 的结果验证了这两种修正后的 ZWT 模型的适用性, 说明这两种修正后的 ZWT 模型能够较好地描述聚氯乙烯弹性体静动态下的力学性能, 可为聚氯乙烯弹性体材料静动态载荷下的应用提供模型基础, 同时也可为其他聚合物材料在静动态载荷下的应用提供参考。

4 结 论

(1) 对聚氯乙烯弹性体进行了应变率为 0.001、0.01 和 0.1 s⁻¹ 的低应变率压缩实验, 实验结果表明, 低应变率下聚氯乙烯弹性体的力学行为为受应变历史的影响较大, 且具有应变率效应和显著的超弹性特性。

(2) 采用改进的分离式霍普金森压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 实验装置对聚氯乙烯弹性体进行了应变率为 1 510、2 260 和 3 000 s⁻¹ 的动态压缩实验, 以材料的屈服强度为整形器优选参数比较了紫铜、铅和铜版纸对聚氯乙烯弹性体的 SHPB 实验的整形效果, 发现铜版纸的整形效果最好。聚氯乙烯弹性体的动态实验结果表明, 聚氯乙烯弹性体高应变率下抗变形能力远高于低应变率, 且高应变率下聚氯乙烯弹性体的应变率效应更明显。

(3) 针对原始 ZWT 非线性黏弹性本构模型在描述聚氯乙烯弹性体各应变率下模型参数值不恒定的问题, 本文依据聚氯乙烯弹性体低应变率和高应变率下的力学特性修正了原始 ZWT 非线性黏弹性本构模型, 修正后的 ZWT 非线性黏弹性本构模型能够较好地描述聚氯乙烯弹性体的力学行为, 并提高了 ZWT 非线性黏弹性本构模型的应用效率。

参考文献:

[1] BERNARD C A, BAHLOULI N, WAGNER-KOCHER C, et al. Multiscale description and prediction of the thermomechanical behavior of multilayered plasticized PVC under a wide range of strain rate [J]. *Journal of Materials Science*, 2018, 53(20): 14834–14849. DOI: 10.1007/s10853-018-2625-5.

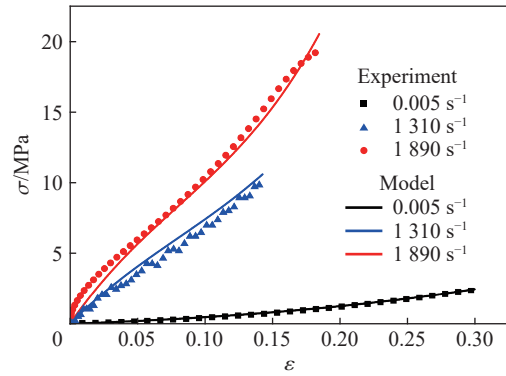


图 8 修正后 ZWT 模型的拟合曲线与验证数据对比
Fig. 8 Comparison between the verification data and the experimental curves of the modified ZWT model

表 4 修正后的 ZWT 模型的验证结果

$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	相关系数平方 R^2
0.005	0.997 1
1 310	0.988 7
1 890	0.996 3

- [2] JHA N K, NACKENHORST U, PAWAR V S, et al. On the constitutive modelling of fatigue damage in rubber-like materials [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2019, 159: 77–89. DOI: 10.1016/j.ijssolstr.2018.09.022.
- [3] KIDD T H, ZHUANG S, RAVICHANDRAN G. In situ mechanical characterization during deformation of PVC polymeric foams using ultrasonics and digital image correlation [J]. *Mechanics of Materials*, 2012, 55: 82–88. DOI: 10.1016/j.mechmat.2012.08.001.
- [4] 刘高冲, 金涛, 陈圣家, 等. 聚氨酯弹性体静动态加载条件下力学性能的研究 [J]. *材料导报*, 2017, 31(S1): 315–318.
LIU G C, JIN T, CHEN S J, et al. Study on mechanical properties of polyurethane elastomer under static/dynamic loading conditions [J]. *Materials Review*, 2017, 31(S1): 315–318.
- [5] 王宝珍, 胡时胜. 猪后腿肌肉的冲击压缩特性实验 [J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(1): 33–38. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)01-0033-06.
WANG B Z, HU S S. Dynamic compression experiments of porcine ham muscle [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(1): 33–38. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)01-0033-06.
- [6] 王宝珍, 胡时胜. 猪肝动态力学性能及本构模型研究 [J]. *力学学报*, 2017, 49(6): 1399–1408. DOI: 10.6052/0459-1879-17-238.
WANG B Z, HU S S. Research on dynamic mechanical response and constitutive model of porcine liver [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49(6): 1399–1408. DOI: 10.6052/0459-1879-17-238.
- [7] SONG B, CHEN W N, GE Y, et al. Dynamic and quasi-static compressive response of porcine muscle [J]. *Journal of Biomechanics*, 2007, 40(13): 2999–3005. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2007.02.001.
- [8] NAIK N K, SHANKAR P J, KAVALA V R, et al. High strain rate mechanical behavior of epoxy under compressive loading: experimental and modeling studies [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(3): 846–854. DOI: 10.1016/j.msea.2010.10.099.
- [9] SNEDEKER J G, NIEDERER P, SCHMIDLIN F R, et al. Strain-rate dependent material properties of the porcine and human kidney capsule [J]. *Journal of Biomechanics*, 2005, 38(5): 1011–1021. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2004.05.036.
- [10] 马赛尔, 许进升, 童心, 等. 高密度聚乙烯单轴拉伸力学性能及本构关系研究 [J]. *中国塑料*, 2016, 30(4): 88–92. DOI: 10.19491/j.issn.1001-9278.2016.04.015.
MA S E, XU J S, TONG X, et al. Research on uniaxially tensile mechanical properties and constitutive model of high density polyethylene [J]. *China Plastics*, 2016, 30(4): 88–92. DOI: 10.19491/j.issn.1001-9278.2016.04.015.
- [11] GUO H, GUO W G, AMIRKHZI A V, et al. Experimental investigation and modeling of mechanical behaviors of polyurea over wide ranges of strain rates and temperatures [J]. *Polymer Testing*, 2016, 53: 234–244. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2016.06.004.
- [12] JIANG J, XU J S, ZHANG Z S, et al. Rate-dependent compressive behavior of EPDM insulation: experimental and constitutive analysis [J]. *Mechanics of Materials*, 2016, 96: 30–38. DOI: 10.1016/j.mechmat.2016.02.003.
- [13] 孙紫建, 王礼立. 高应变率大变形下的聚丙烯/尼龙共混高聚物损伤型本构特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(6): 492–497. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)06-0492-06.
SUN Z J, WANG L L. The constitutive behavior of PP/PA polymer blends taking account of damage evolution at high strain rate and large deformation [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(6): 492–497. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)06-0492-06.
- [14] XU X, GAO S Q, ZHANG D M, et al. Mechanical behavior of liquid nitrile rubber-modified epoxy resin: experiments, constitutive model and application [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 151: 46–60. DOI: 10.1016/j.ijmesci.2018.11.003.
- [15] LIU K, WU Z L, REN H L, et al. Strain rate sensitive compressive response of gelatine: experimental and constitutive analysis [J]. *Polymer Testing*, 2017, 64: 254–266. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2017.09.008.
- [16] 周海霞, 李世鹏, 谢侃, 等. HTPB 推进剂宽泛应变率下黏弹性本构模型研究 [J]. *固体火箭技术*, 2017, 40(3): 325–329, 396. DOI: 10.7673/j.issn.1006-2793.2017.03.010.
ZHOU H X, LI S P, XIE K, et al. Research on the viscoelastic constitutive model of HTPB propellant over a wide range of strain rates [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2017, 40(3): 325–329, 396. DOI: 10.7673/j.issn.1006-2793.2017.03.010.
- [17] 卢芳云, CHEN W, FREW D J. 软材料的 SHPB 实验设计 [J]. *爆炸与冲击*, 2002, 22(1): 15–19.
LU F Y, CHEN W, FREW D J. A design of SHPB experiments for soft materials [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, 22(1): 15–19.

(责任编辑 张凌云)