DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0769-08

YB-2 航空有机玻璃的应变率和温度敏感性及其本构模型*

史飞飞,索　涛,侯　兵,李玉龙

(西北工业大学航空学院,陕西 西安 710072)

摘要:为了理解和评价 YB-2 航空有机玻璃在极端环境下的动态力学性能,采用电子万能试验机和分离式 Hopkinson 压杆对 YB-2 航空有机玻璃在 218～373 K 温度范围、10^{-3}～3 000 s^{-1} 应变率范围内的压缩力学行为进行了研究,得到了材料的应力应变曲线。结果表明:随着温度的升高,材料的流动应力逐渐减小而破坏应变呈现增大的趋势;温度相同时,材料的流动应力随应变率的增加而增大,破坏应变随应变率的增加而减小。随着应变率的提高,材料的应变软化效应更加剧烈。基于朱-王-唐(ZWT)本构模型,得到了考虑温度效应的本构参数。结果显示,在 8%应变范围内,改进的考虑温度效应的本构模型可以较为理想地表征该材料的应力应变响应。

关键词:固体力学;本构模型;Hopkinson 压杆;YB-2 航空有机玻璃;应变率;温度效应

中图分类号:O347.1　　**国标学科代码**:13015　　**文献标志码**:A

飞机座舱风挡、座舱盖和弦舱材料为高聚物材料,在飞机飞行时需要承受一定的温度和载荷作用。在起飞和着陆时,还有可能会遇到飞鸟的撞击,军用飞机可能在空战中被非爆弹丸或高爆碎片击中,这相当于对这些位置的材料施加一定的高速率载荷。同时,由于飞机在低、高空飞行时,环境温度相差很大,高聚物材料的力学性能受外界温度的影响很大。因此,开展对高聚物材料在高温和高应变率下的力学性能研究具有重要意义。

C. G'Sell 等[1]对聚合物在常应变率下的变形行为进行了研究,发现应变率影响材料的应变硬化现象。陈建桥等[2]、吴衡毅等[3]通过恒应变率的实验对有机玻璃进行了研究,结果表明,在较低应变率下,有机玻璃的力学性能具有明显的应变率相关性。E. M. Arruda 等[4]、O. S. Lee 等[5]分别研究了准静态及中、高应变率下温度和应变率对 PMMA 材料力学性能的影响,发现随着温度的升高,材料的应力应变行为发生了显著变化,同时伴随有热软化现象发生。G. W. Adams 等[6]、Machida 等[7]通过研究温度和应变率对 PC 材料力学性能的影响后发现:温度在 293～338K 之间时,材料变形过程中储存的能量对实验温度的依赖性并不明显。S. M. Walley 等[8]在一定的应变率范围内对一些高聚物材料进行了力学性能测试,解释了在高应变率下由于绝热效应的原因,使得材料出现应变软化行为。索涛等[9-10]对几种航空有机玻璃进行了研究,认为在某一应变率和某一温度下,由于试样内部的微裂纹使得有机玻璃表现出明显的应变软化行为;在相同温度下,随着应变率的升高,有机玻璃的流动应力增大,而破坏应变减小,并建立了考虑温度效应的本构模型。

本文中对 YB-2 航空有机玻璃在不同温度下的准静态和动态力学行为进行系统的研究。分别采用 Hopkinson 分离式压杆和 CSS44100 型电子万能试验机对材料进行初始温度分别为 218、253、293、343、373 K,应变率分别为 0.001、0.1、700、3 000 s^{-1} 下的压缩实验。同时,结合实验数据,基于朱-王-唐模型,拟合考虑应变率效应以及温度效应的本构模型,并给出模型预测和实验所得的应力应变曲线。

* **收稿日期**:2014-11-11;**修回日期**:2015-02-04

基金项目:国家自然科学基金项目(11372256,11272267,11228206,11202168);
高等学校学科创新引智计划项目(B07050)

第一作者:史飞飞(1981—　),女,博士研究生;**通讯作者**:索　涛,suotao@nwpu.edu.cn。

1　实验过程与方法

1.1　导热时间的测定实验

有机玻璃是一种高分子材料，对温度等环境比较敏感。由于聚合体材料的导热系数很低，约是金属的1%，即聚合体的导热系数为0.2 mm/min，试样在加热或冷却的过程中，如果加温或冷却的时间不充分，试样表面温度和心部温度就会不一致，导致实验结果不准确。因此，在涉及温度的实验时，为了确保实验中试样受热均匀和热平衡，从而保证实验数据的准确性，首先测试了YB-2有机玻璃在不同温度下试样表面和试样内部达到相同温度时所需要的时间。实验中，采用正方体试样，边长为10 mm。在试样中心沿着厚度方向钻孔，孔的深度为5 mm。通过孔洞，在试样心部引入一对热电偶。将另外一对热电偶缠绕在试样表面。用密闭的电热炉，对试样进行加热或在密闭的容器中喷洒低温氮气对试样进行冷却。当经过标定的两组热电偶显示的温度相同时，认为试样内部和外部的温度达到了平衡。

1.2　低应变率实验

低应变率压缩实验在CSS44100型电子万能试验机上进行，压缩试样为直径6 mm、长4 mm的圆柱体，如图1所示。两种低应变率分别为0.1、0.001 s^{-1}，温度分别为218、253、293、343、373 K。实验前将压头降温或加热至相对应的实验温度后对试验机进行空压，得到位移随着压力变化关系，以此标定试验机刚度，用于消除试样位移测量中试验机位移的影响。低温通过液氮循环获得，高温实验采用电阻丝加热法对试样进行加热，并用一个与试样相连的热电偶测量和显示温度，通过电磁继电器的通断控制温度，使之保持在实验值的±5 ℃误差范围内。

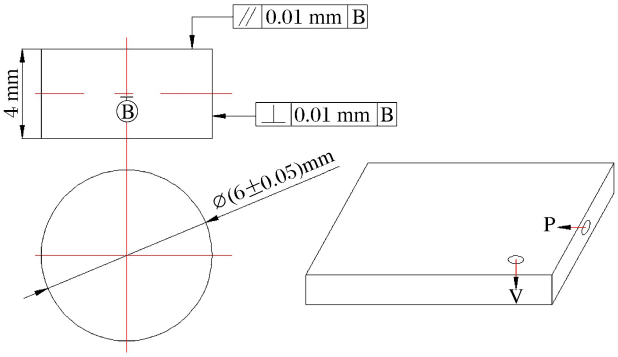

图1　试样尺寸图和试样的不同取向

Fig. 1　Sample dimensions and its cutting directions

1.3　高应变率实验

700、3 000 s^{-1}时的高应变率压缩实验是在一套直径12.7 mm的分离式Hopkinson压杆上进行的，压杆所用材料为马氏体时效钢(18Ni(C250))，实验装置见图2。采取同低应变率下相同的试样。利用

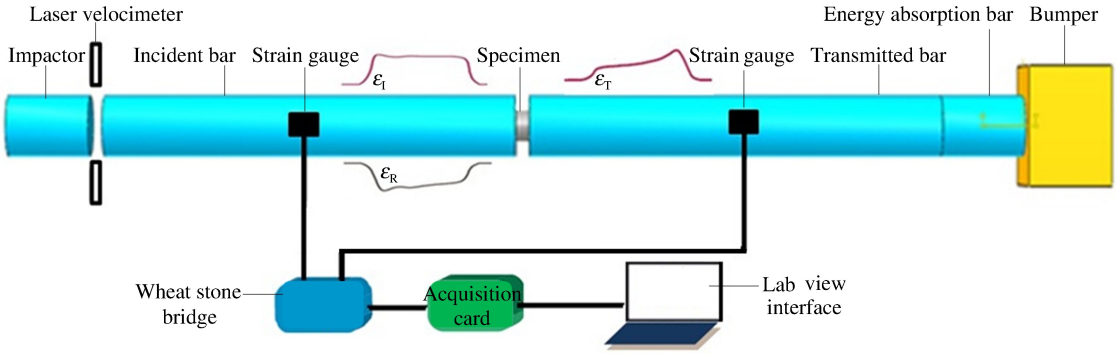

图2　分离式Hopkinson压杆示意图

Fig. 2　Schematic drawing of split Hopkinson pressure bar

撞击杆撞击入射杆产生的应力波对放置于入射杆和透射杆之间的试样进行加载；通过粘贴在两根杆子上与惠斯通电桥相连接的应变片采集输出的电压信号；利用超动态应变仪和高频数据采集系统记录到实测波形，并根据一维应力波原理可以得到材料的应力应变关系。高低应变下低温和高温的获得采用相同的方法。

2 实验结果及分析

2.1 导热时间的测定

图 3(a)和(b)为加热或者冷却温度与保温时间的曲线以及不同的实验温度所需最短时间值。可以看出图 3(a)中，当经过一定时间后，无论是高温加热还是低温冷却，试样内部和外部的温度达到一致，记录加热或冷却的时间，就得到了该温度下试样内外温度达到平衡所需的时间。从图 3(b)可以看出，低温冷却试样内外温度平衡所需时间比高温时所需时间要短，随着温度的逐渐升高，平衡所需时间呈现逐渐变短的趋势。当温度高于有机玻璃的玻璃化转变温度后，平衡时间变长。但如果温度继续升高，平衡所需的时间几乎相同。

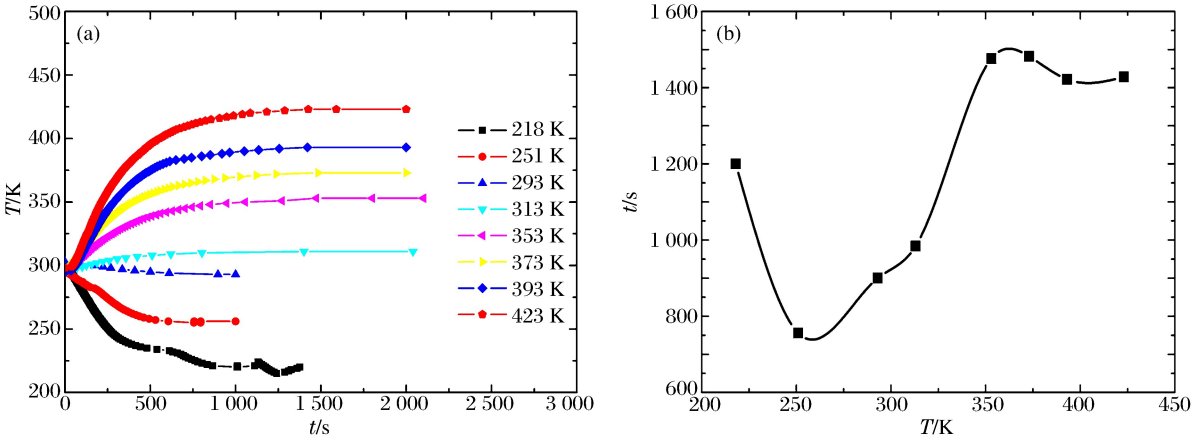

图 3 不同温度下保温时间曲线和保温所需最小时间

Fig. 3 Time-temperature curves and minimum times at different temperatures

2.2 低应变率和高应变率压缩实验

YB-2 航空有机玻璃有别于定向有机玻璃，是未经过取向的高聚物，分子链段的排列是随机的，因此理论上材料体现出各向同性。在开始实验之前，为了测试该材料的各向性能，首先对其进行了考虑方向性的准静态压缩实验。试样分别取自于垂直于板材和平行于板材两个方向，见图 1。实验结果(见图 4)表明：沿 2 个方向取样所测出的应力应变曲线基本吻合，这说明材料力学各向同性。在后续的实验中采用的试样沿 V 方向取样。

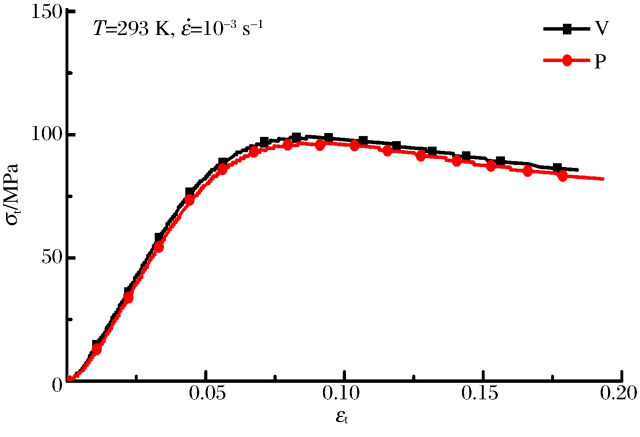

图 4 不同取向试样的真实应力应变曲线

Fig. 4 True strain-stress curves in two directions

图 5 给出了在不同温度下试样的真实应力应变曲线。可以看出，高分子材料的力学性能强烈依赖于温度和应变率。图 5(a)中，当应变率为0.001 s^{-1}时，随着温度的升高，材料的弹性模量呈现降低的趋势，屈服强度减小，塑性变形能力增加。在其余的 3 种应变率下(见图 5(b)～(d))，材

料呈现相似的趋势。在室温及以下的高应变率时，材料的破坏应变随着温度的升高而增大，此时，材料为玻璃体呈现出典型的脆性破坏形式，这是因为在低温高应变率下，材料处于玻璃态，且加载时间非常短暂，材料的分子结构没有足够的时间发生弛豫，因而断裂特性表现为脆性；而当实验温度在材料的玻璃化转变温度(90 ℃)附近时，材料处于高弹态，其承载能力急剧下降，变形能力增强，不再呈现脆性破坏，这是由于分子结构的活化能降低、自由体积增大，因此受力后分子结构中的链段运动更加容易[11]。

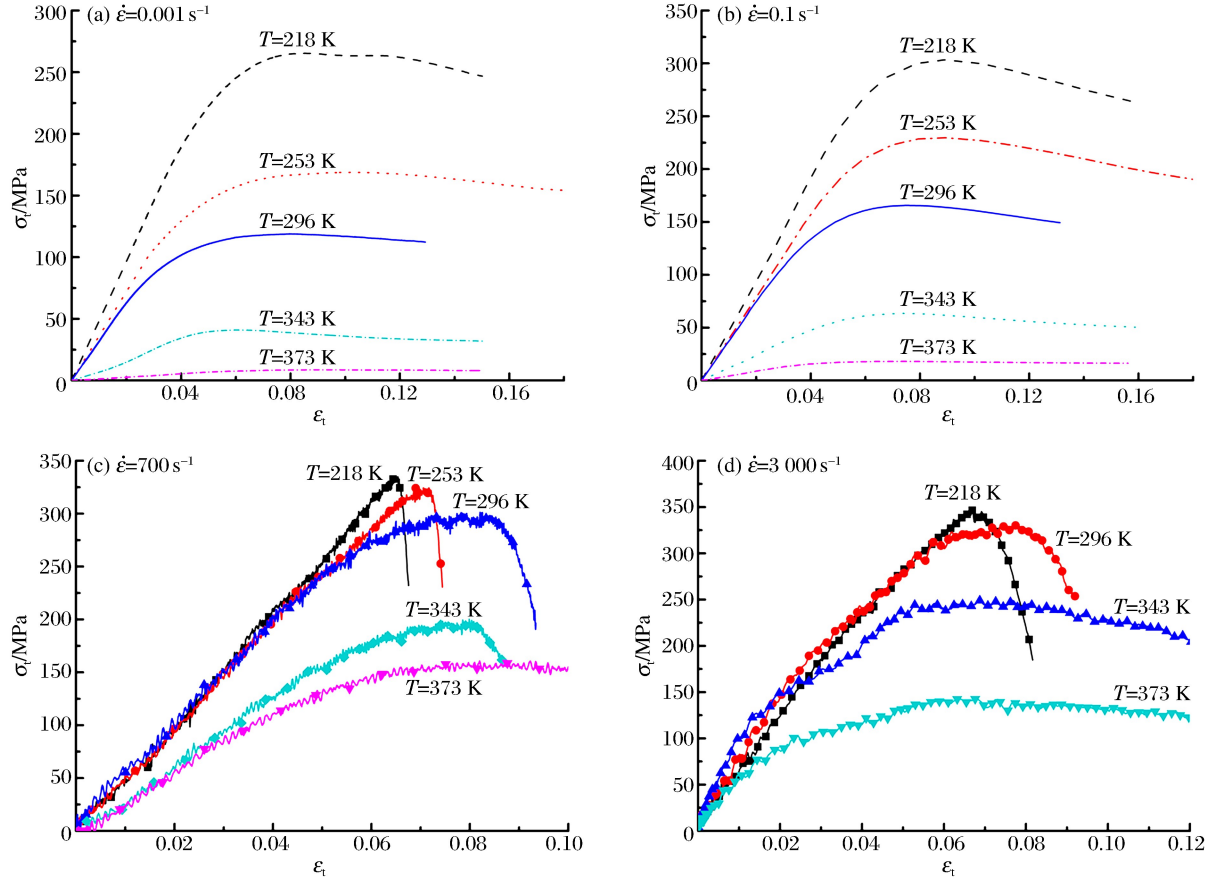

图 5 不同温度下的真实应力应变曲线

Fig. 5 True strain-stress curves at different temperatures

图 6 给出了同一温度下不同应变率时的应力应变曲线。在 218 K 时(见图 6(a))，应变率对材料的弹性模量和屈服应力的影响并不明显，但屈服应力仍呈现随应变率升高而升高的趋势，破坏应变则反之。当温度升高时(见图 6(b)～(d))，应变率对材料的弹性模量的影响逐渐变大，屈服应力以及破坏应变呈现同 218K 时相似的趋势。4 种应变率下，材料均出现不同程度的应变软化。低应变率时，由于加载脉冲宽度有限，材料在实验中并未发生破坏。已有研究结果[12]表明：低温时，聚合物处于玻璃态，分子链的链段被冻结发生松弛的时间是无穷大，此时，加载速率(即应变率)的改变对聚合物材料变形的影响作用非常微弱，表现为弹性模量对应变率的不敏感；而在高温时，聚合物处于高弹态，其变形实际上是一种强迫高弹形变的过程，分子链的链段已经被激活，并且分子链的链段运动受到松弛时间的影响非常大。由于应变率的变化对松弛时间的影响很大，因此在高温时弹性模量对应变率较为敏感。

图 7 为不同应变率时温度-应力峰值曲线。当实验温度为 218 K 时，不同应变率下试样的应力峰值差值较小。随着温度的升高，应力峰值的差值变大，在室温时应力峰值的差值达到最大。随后，该差值又逐渐变小。这表明：在室温时材料的应变率敏感性达到最强。在高应变率加载下，应变率对材料应力峰值的影响逐渐弱化。

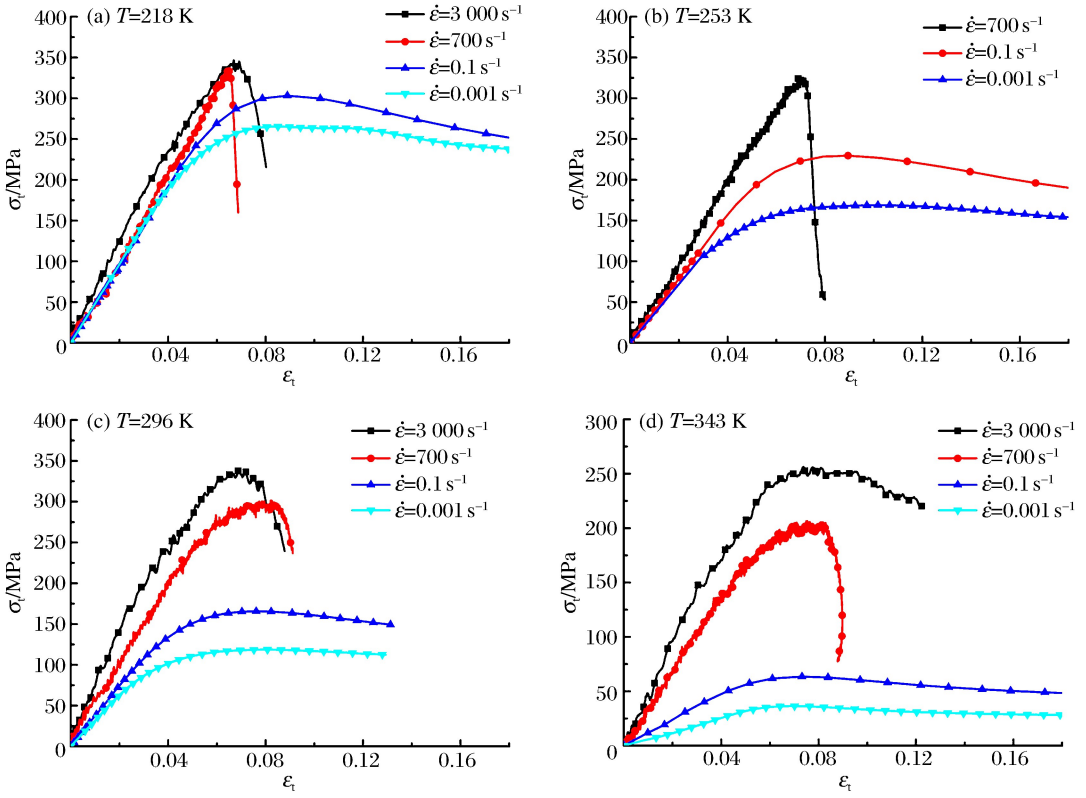

图 6 不同应变率下的真实应力应变曲线

Fig. 6 True strain-stress curves at different strain rates

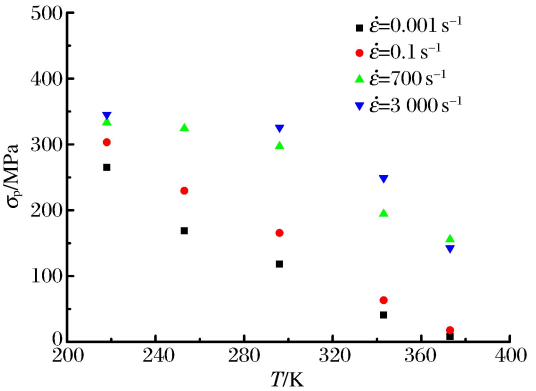

图 7 温度-应力峰值曲线

Fig. 7 Temperature-peak stress curves

3 YB-2 有机玻璃的本构模型

朱兆祥等[13]对典型工程塑料进行的一系列研究发现：在变形小于 8%，应变率在 $10^{-4}\sim10^{3}$ s^{-1} 范围内，朱-王-唐模型(ZWT)可以较好地描述高聚物材料的本构模型。该模型描述如下：

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

式中：E_0、α 和 β 为材料的弹性常数。2 个积分项分别用来描述低应变率和高应变率下的黏弹性响应，E_1、θ_1 和 E_2、θ_2 分别是所对应的 Maxwell 单元的弹性常数和松弛时间。

为描述温度对材料的影响，索涛等[10]对朱-王-唐模型进行修正，并分别对 4 种航空有机玻璃实验所

得的真实应力应变曲线进行拟合，实验与模型预测的曲线吻合较好。修正的模型中加入的温度效应项，其形式为 $f(\varepsilon,T)/f_0(\varepsilon,T_0)$，它随温度的升高而减小，随应变的增大而增大。改进后的模型描述为：

$$\sigma(\varepsilon,\dot{\varepsilon},T)=\sigma(\varepsilon,\dot{\varepsilon})\,f(\varepsilon,T)/f(\varepsilon,T_0) \tag{2}$$

$$f(\varepsilon,T)=a(\varepsilon)\exp\left[b(\varepsilon)T\right] \tag{3}$$

式中：$\sigma(\varepsilon,\dot{\varepsilon})$ 为式(1)对应的温度和应变率下得到的应力值，T_0 为选定的参考温度。

根据公式(1)～(3)可得到温度影响项的表达式：$b(\varepsilon)=[\ln\sigma(\varepsilon,\dot{\varepsilon},T)-\ln\sigma(\varepsilon,\dot{\varepsilon},T_0)]/(T-T_0)$，由实验数据拟合以多项式 $b(\varepsilon)=a\varepsilon^2+b\varepsilon+c$ 给出。

基于该模型，以 293 K 作为参考温度，针对 YB-2 试样，经过拟合实验曲线得到常温时的 6 个参数：$E_0=3.26$ GPa、$\alpha=-20.12$ GPa、$E_1=2.4$ GPa、$\theta_1=0.205$ s、$E_2=2.622$ GPa、$\theta_2=6$ μs。

在此基础上，采用最小二乘法拟合可以得到 YB-2 航空有机玻璃温度效应影响项中 $b(\varepsilon)$ 的估计表达式为：

$$b(\varepsilon)=0.642\,9\,\varepsilon^2-0.133\,6\varepsilon-0.004 \tag{4}$$

对于拟合参数优度的评估，我们将对回归参数的方差和置信区间进行分析。根据实验结果，对公式(4)中各系数的方差和置信区间的分析如下：假定置信系数为 0.95，计算得出拟合函数的方差和置信区间见表 1。

表 1 温度影响项中各系数的方差和置信区间

Table 1 Variances and confidence intervals of the coefficients for thermo-item

参数	方差	置信区间
a	0.381 131	(0.527 425, 1.273 1)
b	0.009 826	(−0.235 72, −0.103 88)
c	0.000 295	(−0.004 56, −0.003 54)

图 8 给出了拟合结果与实验结果的比较。不难看出，图 8(a)～(c)中拟合曲线同实验曲线吻合较

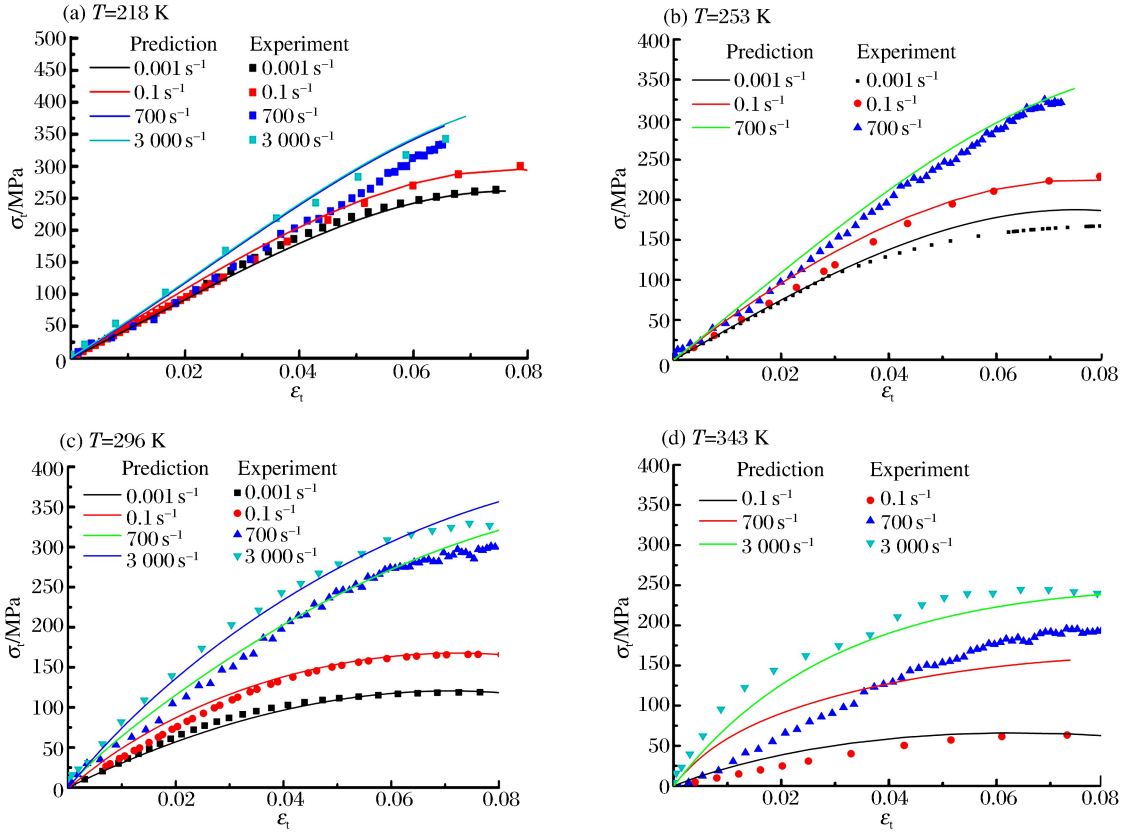

图 8 修正的 ZWT 模型拟合结果与实验结果的比较

Fig. 8 Comparison of prediction using modified ZWT model with experimental results

好；对于图 8(d)，拟合曲线和实验曲线有较大差异，这是因为在 PMMA 的热变形温度(70 ℃)左右时，材料将开始发生玻璃态与高弹态之间的相态转变。而 ZWT 模型主要用来描述材料的黏弹性行为，因此在拟合 343 K 下材料的变形行为时表现出较大的误差。总体来说，改进后的 ZWT 模型可以较好的描述一定温度范围内材料的非线性黏弹性力学行为。

4 结 论

通过对 YB-2 航空有机玻璃的研究得出以下结论：

(1)YB-2 有机玻璃的力学性能强烈依赖于应变率和温度：在低应变率下，随着温度的升高，材料的弹性模量和流动应力逐渐减小，弹性变形能力降低，塑性变形能力增加；在高应变率下，材料的流动应力随着温度的升高逐渐减小，破坏应变随着温度的升高而增大。在室温及以下时，材料为玻璃体，呈现出典型的脆性破坏，弹性模量对应变率不敏感；当实验温度在材料的玻璃化转变温度附近时，高应变率下材料破坏不再呈现脆性破坏，弹性模量对应变率较为敏感。

(2)随着应变率的升高，材料的流动应力显著升高，但破坏应变减小。在室温时，材料的应变率敏感性达到最强。在高应变率下，材料的屈服强度受应变率的影响逐渐弱化。

(3)加入温度效应的 ZWT 模型能够较好地拟合应变范围在 8%以内的实验曲线，但由于模型中未考虑损伤以及高分子高温下自由体积和复杂的分子链运动的影响，因而不能较准确地描述应变软化以及大应变时的应变硬化现象。

参考文献：

[1] G'Sell C, Jonas J J. Determination of the plastic behavior of solid polymer at constant true strain rate[J]. Journal of Materials Science, 1979,14(3):583-591.

[2] 陈建桥，李铁萍，李之达，等. 有机玻璃本构关系研究[J]. 机械科学与技术，2006，25(3)：371-374.
Chen Jian-qiao, Li Tie-ping, Li Zhi-da, et al. Experimental research on the constitutive relationship of PMMA[J]. Mechanical Science and Technology, 2006,25(3):371-374.

[3] 吴衡毅，马钢，夏源明. PMMA 低、中应变率单向拉伸力学性能的实验研究[J]. 实验力学，2005，20(2)：193-197.
Wu Heng-yi, Ma Gang, Xia Yuan-ming. Experimental study on mechanical properties of PMMA under unidirectional tensile at low and intermediate strain rates[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005,20(2):193-197.

[4] Arruda E M, Boyce M C, Jayachandran R. Effects of strain rate, temperature and thermomechanical coupling on the finite strain deformation of glassy polymers[J]. Mechanics of Materials, 1995,19:193-212.

[5] Lee O S, Kim M S. Dynamic material property characterization by using split Hopkinson pressure bar(SHPB) technique[J]. Nuclear Engineering and Design, 2003,226(2):119-125.

[6] Adams G W, Farris R J. Latent energy of deformation of bisphenolapolycarbonate[J]. Journal of Polymer Science, 1988,26(2):433-445.

[7] Machida T, Lee D. Deep drawing of polypropylene sheets under different heating conditions[J]. Polymer Engeering & Science, 1988,28(7):405-412.

[8] Walley S M, Field J E, Pope P H, et al. A study of the rapid deformation behavior of a range of polymers[J]. Philosphical Transactions of the Royal Society of London: A, 1989,328:783-811.

[9] 索涛，李玉龙，刘元镛. 温度、应变率对航空 PMMA 压缩力学性能的影响研究[J]. 材料科学与工程学报，2006，24(4)：547-550.
Suo Tao, Li Yu-long, Liu Yuan-yong. Study on temperature and strain rate effects on mechanical behavior of aeronautical PMMA[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2006,24(4):547-550.

[10] Suo T, Li Y L, Yu H, et al. Temperature effect on the mechanical behavior of acrylic polymers under quasi-static and dynamic loading[J]. Jounal of Shanghai Jiaotong University, 2004,38:89-95.

[11] 焦剑，雷渭媛. 高聚物结构、性能与测试[M]. 北京：化学工业出版社，2003：438-444.

[12] 何曼君，张红东，陈维孝，等. 高分子物理[M]. 上海：复旦大学出版社，2007：105-198.

[13] 朱兆祥,徐大本,王礼立.环氧树脂在高应变率下的热粘弹性本构方程和时温度等效性[J].宁波大学学报:理工版,1988,1(1):58-68.
Zhu Zhao-xiang, Xu Da-ben, Wang Li-li. Thermoviscoelastic constitutive equation and time-temperature equivalence of epoxy resin at high strain rates[J]. Journal of Ningbo University: Natural Science & Engineering Edition, 1988,1(1):58-68.

Strain rate and temperature sensitivity and constitutive model of YB-2 of aeronautical acrylic polymer

Shi Fei-fei, Suo Tao, Hou Bing, Li Yu-long
(*School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an* 710072, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: To investigate dynamic mechanical performances of YB-2 aeronautical polymer used as the aircraft windshield in extreme mechanical environments, we performed uniaxial compression tests on cylindrical samples, using an Instron servo hydraulic axial testing machine and the compression Hopkinson bar at strain rates ranging from 10^{-3} s^{-1} to 3 000 s^{-1} and at initial temperatures ranging from 218 K to 373 K, and obtained the true strain stress curves. Our results indicate that the Young's modulus and flow stress decrease as the temperature increases, while the fracture strain tends to increase as the temperature increases. At the same temperature, it was found the flow stress increases with the rising strain rate, and the strain softening effect was also observed to be more acute with the increasing strain rates. Based on the ZWT model, the parameters of a prediction model that takes temperature into consideration has been gained. The predictions are in good agreement with experimental results in the strain range of 8%.

Key words: solid mechanics; constitutive model; Hopkinson bar; YB-2 aeronautical polymer; strain rate; temperature

(责任编辑　曾月蓉)

本刊关于学术不端的声明

本刊注重原创性的学术成果,拒绝学术不端。学术不端包括剽窃(含观点或文字剽窃)、过度引用、伪造、一稿多投和重复发表等。

近年来,学术不端现象时有发生。学术不端损害了期刊形象和读者利益,极大地扰乱了编辑部的正常工作。为此,本刊郑重声明:稿件一经核实存在学术不端,立即终止稿件流程,在我刊网站公布相关信息(如作者姓名和单位等),通报相关学术期刊和作者单位,并保留向作者追究各种损失(含经济赔偿等)的权利。

爆炸与冲击

2015 年 11 月 25 日