

PC/ABS 在高应变率下的压缩大变形

李阳，王海涛，张云

(华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室，武汉 430074)

摘要：目的 对 PC/ABS 在高应变率下的压缩大变形行为进行实验研究与模拟。方法 在应变率为 $1600\sim5000\text{ s}^{-1}$ ，温度为 293~353 K 的范围内，选用霍普金森压杆获取其在高应变率、高温下的大变形行为；选用 DSGZ 本构模型，模拟 PC/ABS 在高应变率下的大变形。结果 PC/ABS 大变形行为强烈依赖于应变率和温度，屈服应力随应变率增加或温度降低而升高，大变形行为包括弹性、屈服、应变软化和应变硬化。结论 DSGZ 本构可准确模拟 PC/ABS 在高应变率、高温下的大变形行为。

关键词：PC/ABS；高应变率；大变形；本构模型

DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2017.03.005

中图分类号：TG306 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-6457(2017)03-0025-05

Compressive Large Deformation of PC/ABS at High Strain Rates

LI Yang, WANG Hai-tao, ZHANG Yun

(State Key Lab of Material Processing and Die & Mold Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

ABSTRACT: A combined experimental and constitutive investigation has been performed to study the compressive large deformation behavior of the blends of polycarbonate (PC) and acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) at high strain rates. A split Hopkinson pressure bar(SHPB) was used to characterize the large deformation behavior of PC/ABS at high strain rates for high temperatures, the investigated strain rates ranged from 1600 to 5000 s^{-1} , and the investigated temperatures ranged from 293 to 353 K. The experimental results indicate that large deformation behavior of PC/ABS strongly depends on the strain rate and temperature, and the yield stress increases with the increasing strain rate or the decreasing temperature. To predict the large deformation behavior of PC/ABS, the DSGZ constitutive model was employed, and it has been implemented into ABAQUS/Explicit through a user material subroutine VUMAT. In comparison with the experimental results, the DSGZ model can accurately predict the large deformation behavior of PC/ABS at high strain rates for high temperatures.

KEY WORDS: PC/ABS; high strain rate; large deformation; constitutive model

作为聚碳酸酯(PC)与丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)的共混物，PC/ABS 具有高冲击性能、易加工等优良特性，现已被广泛应用于工程领域，尤其是汽车制造业^[1~3]。PC/ABS 结构件在使用过程中，可能会遭受高速撞击，因而研究 PC/ABS 在高应变率下的力学性能意义重大。在研究材料在高应变率下

的大变形时，霍普金森压杆(SPHB)是一种非常有效的工具。用 SHPB 执行压缩实验时，材料的应变率可以达到 10^3 s^{-1} 量级^[4]，足以满足高速撞击的需求。目前 SHPB 已成功地实现了各种各样的聚合物在高应变率下压缩大变形的获取，诸如 PC、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚醚醚酮(PEEK)、PC/ABS^[5~7]。

收稿日期：2017-05-02

基金项目：国家自然科学基金（51125021）

作者简介：李阳（1979—），男，博士，高级工程师，主要研究方向为塑料注射成形及实验技术。

研究表明, 非晶聚合物的大变形行为与应变率和温度相关^[8], 且屈服应力随应变率增加而增加, 或随温度减少而增加。

为模拟聚合物的大变形行为, 大量的本构模型被研发。BPA 模型^[8]作为一个非常经典的物理本构模型, 由麻省理工学院的 Boyce, Parks 和 Argon 提出。在 BPA 模型中, 非晶聚合物必须克服分子间阻力才能发生屈服, 产生塑性流动, 紧接着分子链段会发生重排。在进入大变形前, 聚合物必须克服熵阻力, 使得分子链沿着塑性流动方向进行取向。在 BPA 模型基础上, 大量改进的物理模型被提出来, 以便更加清晰地描述聚合物的大变形, 或更加精确地模拟聚合物在不同应变率的大变形及断裂^[4-5, 9-12]。物理模型可以描述并预测聚合物的大变形, 唯象模型也同样可以。G'SELL 和 JONAS^[13]根据大量的拉伸实验提出了一个唯象本构模型, 准确模拟了聚氯乙烯和高密度聚乙烯在低应变率下的大变形。DUAN 等^[14-15]在前人的基础上, 提出了一个 DSGZ 本构模型。该模型可以准确地刻画 PC, PMMA, ABS 在低应变率下的力学响应。王礼立等^[16]提出了一个粘弹性本构模型, 即 ZWT 本构模型, 可用于模拟聚合物在 $10^{-4} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 范围内的大变形, 之后, 该模型经 WANG 等^[17]改进, 可准确模拟 PMMA 在低、高应变率下的大变形。PC/ABS 在高应变率下的大变形很少研究^[7], 其本构模型也非常少见, 因此, 文中采用霍普金森压杆对 PC/ABS 进行高应变率压缩实验。考虑到 DSGZ 本构可以准确模拟 PC, ABS 的大变形^[14-15], 故选用 DSGZ 本构模拟 PC/ABS 在高应变率下的大变形。

1 实验

为测试 PC/ABS 在高应变率下的大变形, 采用西北工业大学的 SHPB 进行实验, 且 SHPB 配备了一个温控箱, 用于测试 PC/ABS 在高温下的力学性能, 实验装置见图 1。



图 1 霍普金森压杆
Fig.1 Split Hopkinson pressure bar

SHPB 的主要组成为撞击杆、入射杆、透射杆和数据采集系统, 实验样品放在入射杆和透射杆之间。通过调节气压大小, 改变撞击杆的初始速度。当撞击杆撞击入射杆时, 会产生一种弹性应力波, 该应力波会在入射杆中不断传递, 形成入射波。当弹性应力波遇到样品后, 一部分会反射到入射杆, 形成反射波, 另一部分则传递到透射杆中, 形成透射波。利用数据采集系统记录与入射波、反射波、透射波相关的数据, 通过数据分析软件进行处理, 可计算得到名义应变率、名义应力、名义应变, 见式(1)—(3)。

$$\sigma_s(t) = \frac{E_b A_b}{A_s} \varepsilon_t(t) \quad (1)$$

$$\varepsilon_s(t) = -\frac{2C_0}{l_s} \int_0^t \varepsilon_r(\tau) d\tau \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = -\frac{2C_0}{l_s} \dot{\varepsilon}_r(t) \quad (3)$$

式中: $\varepsilon_i(t)$, $\varepsilon_r(t)$, $\dot{\varepsilon}_r(t)$ 分别表示入射应变、反射应变、透射应变; $\sigma_s(t)$, $\varepsilon_s(t)$, $\dot{\varepsilon}_s(t)$ 分别表示名义应力、名义应变、名义应变率; E_b 和 A_b 分别表示杆子的弹性模量和横截面积; A_s 和 l_s 分别表示样品的横截面积和长度; C_0 表示弹性波在杆子中的波速。

得到名义应力、应变后, 再利用式(4)—(5), 计算真实应力 σ_t 和真实应变 ε_t , 其中 σ_e , ε_e 为名义应力、名义应变。

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (4)$$

$$\sigma_t = \sigma_e(1 + \varepsilon_e) \quad (5)$$

在进行 SHPB 实验时, 实验材料选择为沙伯创新公司的 PC/ABS, 型号为 C1200HF, 实验样品为圆柱形, 直径为 12.2 mm, 高度为 6.20 mm, 样品通过全电动注塑机注塑成形。测试前, 样品需在常温下放置 3 d, 以便消除残余应力。共做了 7 组实验, 包括 5 组常温实验 (实验 1—3 和 6—7, 温度为 293 K) 和 2 组高温实验 (实验 4—5, 温度分别为 323, 353 K), 实验 1—7 的应变率分别为 1600, 2450, 3000, 3000, 3000, 3900, 5000 s^{-1} 。每组实验至少需重复 3 次, 以保证实验数据的重复性。

2 本构模型

2.1 DSGZ 本构模型

DSGZ 本构模型见式(6)。

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = K \left\{ f(\varepsilon) + [i(\dot{\varepsilon}, T) - f(\varepsilon)] \exp[j(\dot{\varepsilon}, T)\varepsilon] \right\} h(\dot{\varepsilon}, T) \quad (6)$$

其中,

$$f(\varepsilon) = (\exp(-C_1\varepsilon) + \varepsilon^{C_2})(1 - \exp(-\alpha\varepsilon)) \quad (7)$$

$$h(\dot{\varepsilon}, T) = \dot{\varepsilon}^m \exp(a/T) \quad (8)$$

$$i(\dot{\epsilon}, T) = \frac{\varepsilon \exp \left[1 - \left(\frac{\varepsilon}{C_3 h(\dot{\epsilon}, T)} \right) \right]}{C_3 h(\dot{\epsilon}, T)} \quad (9)$$

$$j(\dot{\epsilon}, T) = \ln[g(\dot{\epsilon}, T) - C_4] \quad (10)$$

式(7)呈现了应变硬化大变形; 式(8)描述了变形的应变率相关性和温度相关性, $g(\dot{\epsilon}, T)$ 函数表示为 $h(\dot{\epsilon}, T)$ 函数的无量纲形式; 式(9)描述了屈服应力的漂移行为; 式(10)表示计算值逐渐趋于稳态; $K, C_1, C_2, C_3, C_4, m, a, \alpha$ 是本构的材料参数。根据 DUAN 等^[14]给出的参数计算方法, 得到 PC/ABS 的本构模型材料参数, 其中 $C_1=-1.324, C_2=1.984, m=0.0854, a=232.2$ K, $K=35.81$ MPa·ms^m, $C_3=0.0379$ ms^m, $C_4=3.58$, $\alpha=22.26$ 。

2.2 应力应变更新算法

应变张量 ε 、应变增量张量 $\Delta\varepsilon$ 的计算见式(11)–(12)。

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (11)$$

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon^e + \Delta\varepsilon^p \quad (12)$$

根据胡克定律, 应力张量 σ , 计算见式(13)–(14), 其中, σ^{tr} 为试探应力张量, 即假设材料变形为纯弹性变形所得到的预测应力, tr 为矩阵的迹。

$$\sigma = \sigma^{tr} - 2\mu\Delta\varepsilon^p \quad (13)$$

$$\sigma^{tr} = \lambda \text{tr}(\varepsilon^e + \Delta\varepsilon) I + 2\mu(\varepsilon^e + \Delta\varepsilon) \quad (14)$$

根据流动法则, 可得塑性应变增量张量 $\Delta\varepsilon^p$:

$$\Delta\varepsilon^p = \frac{3}{2} \Delta\varepsilon^p \frac{\sigma'}{\sigma_e} \quad (15)$$

其中, 等效塑性应变增量 $\Delta\varepsilon^p$ 可表示为如下双点积形式:

$$\Delta\varepsilon^p = \sqrt{\frac{2}{3} \Delta\varepsilon^p : \Delta\varepsilon^p} \quad (16)$$

$\Delta\varepsilon^p$ 的增量 $d\Delta\varepsilon^p$ 表示为:

$$d\Delta\varepsilon^p = \frac{\sigma_e^{tr} - 3\mu\Delta\varepsilon^p - \sigma_y}{3\mu + H} \quad (17)$$

其中, $H = \frac{\partial\sigma_y}{\partial\Delta\varepsilon^p} + \frac{\partial\sigma_y}{\partial\varepsilon^p}$, σ_y 即为 DSGZ 本构中的 σ 。利用牛顿迭代法, 计算每一步长结束后的 $\Delta\varepsilon^p$ 。最后, 利用式(18)–(20), 分别计算出塑性应变增量张量 $\Delta\varepsilon^p$ 、弹性应变增量张量 $\Delta\varepsilon^e$ 和应力张量 σ 。

$$\Delta\varepsilon^p = \frac{3}{2} \Delta\varepsilon^p \frac{\sigma'}{\sigma_e} = \frac{3}{2} \Delta\varepsilon^p \frac{\sigma^{tr}}{\sigma_e^{tr}} \quad (18)$$

$$\Delta\varepsilon^e = \Delta\varepsilon - \frac{3}{2} \Delta\varepsilon^p \frac{\sigma^{tr}}{\sigma_e^{tr}} \quad (19)$$

$$\sigma = \frac{\sigma^{tr}}{\sigma_e^{tr}} \sigma_y + \frac{1}{3} \text{tr}(\sigma^{tr}) I \quad (20)$$

3 实验结果与模拟结果的对比

PC/ABS 在温度为 293 K 下的工程应变率和真应变的曲线见图 2, 可知, 工程应变率曲线基本上平行于真应变轴, 说明工程应变率在加载期间基本保持恒定, 因此, PC/ABS 在高应变率下的力学行为可用霍普金森压杆精确地表征。

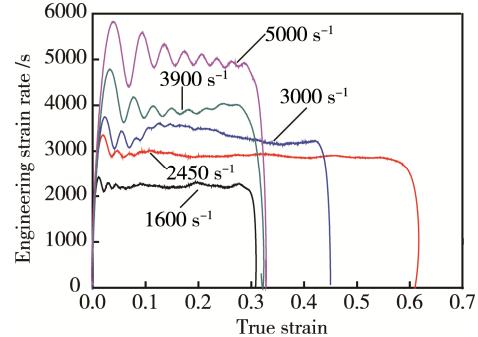


图 2 PC/ABS 常温(293 K)下的工程应变率和真应变的曲线
Fig.2 Curves between the engineering strain rates and true strain of PC/ABS at room temperature

PC/ABS 在不同温度、不同应变率下的真应力和真应变的关系曲线见图 3。可知, PC/ABS 的大变形由弹性、屈服、应变软化和应变硬化 4 部分组成, 力学行为显示了强烈的应变率、温度相关性, 且屈服应力随应变率增加或温度降低而升高。

PC/ABS 在高应变率、高温下力学行为的模拟结

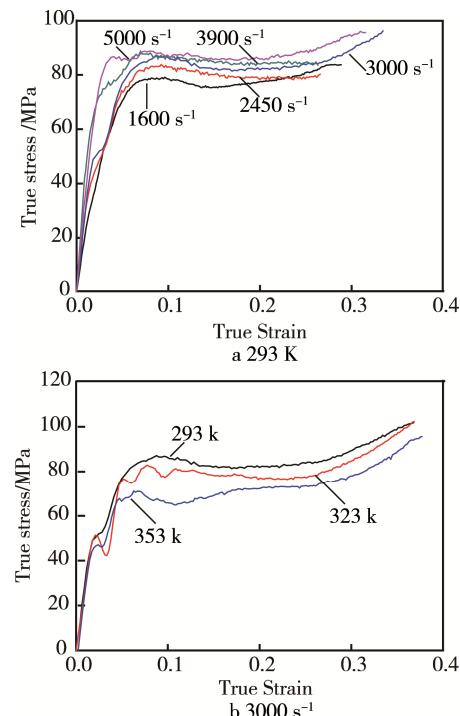


图 3 PC/ABS 在不同温度、不同应变率下压缩的真应力和真应变曲线
Fig.3 Curves between the compressive true stress and strain of PC/ABS at high strain rates

果与实验结果见图4。显然, DSGZ本构可以准确描述PC/ABS在高应变率下的大变形,包括非线弹性、屈服、应变软化和应变硬化变形,而且可以准确模拟

PC/ABS在 $1600\sim5000\text{ s}^{-1}$ 应变率范围内以及293~353 K温度范围内的大变形,因此,PC/ABS在高应变率、高温下的大变形可用DSGZ本构精确模拟。

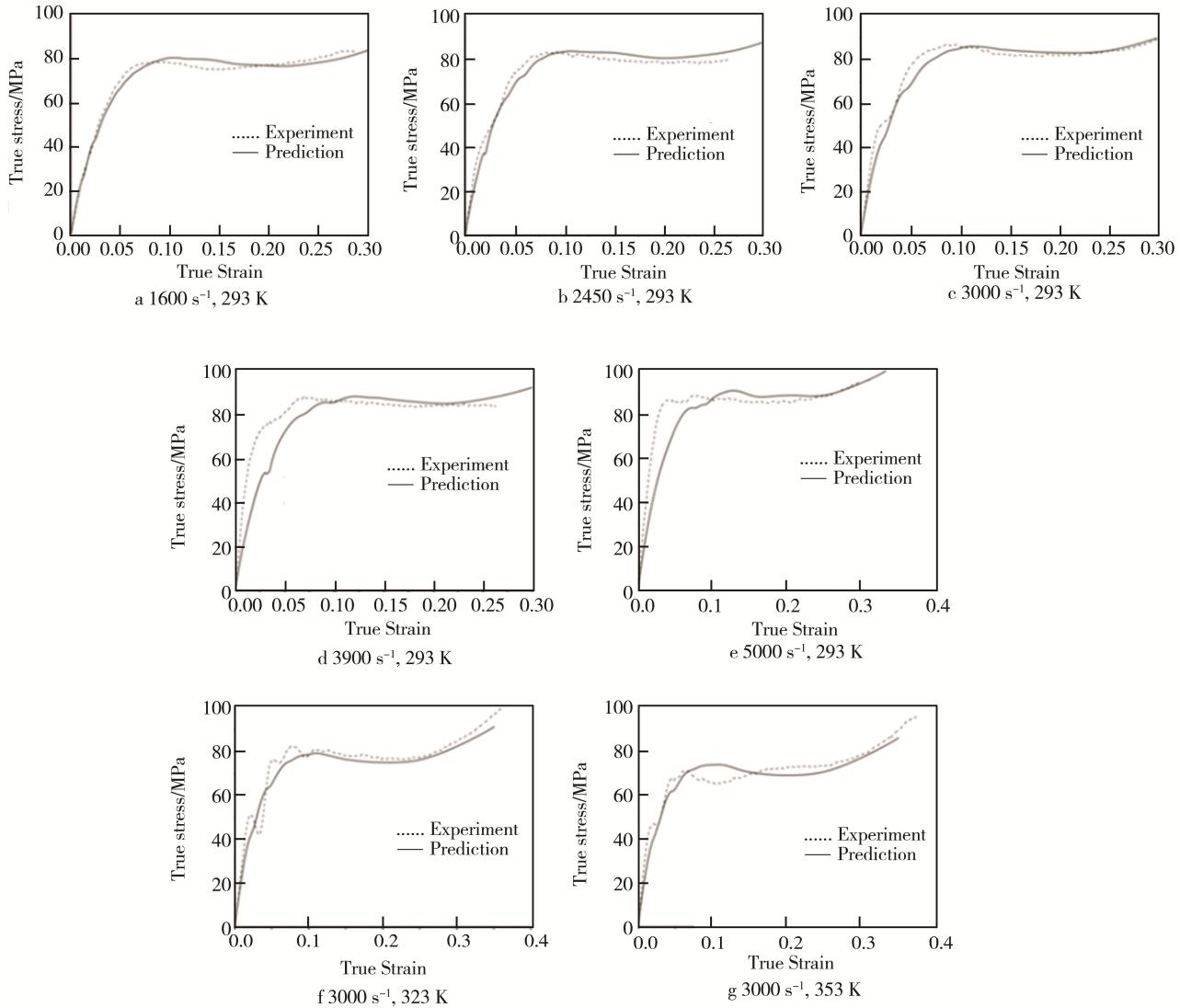


图4 PC/ABS在高应变率、高温下的大变形实验结果与模拟结果的对比
Fig.4 Comparison between experimental and predicted results of the large deformation of PC/ABS

4 结论

调查了PC/ABS在高应变率、高温下的压缩大变形力学行为,发现其力学行为强烈依赖于应变率和温度,屈服应力随应变率增加或温度降低而升高,大变形由弹性、屈服、应变软化和应变硬化4部分组成,采用DSGZ本构模拟其大变形时,发现DSGZ本构可准确模拟PC/ABS在高应变率、高温下的大变形。

参考文献:

- [1] WILDES G, KESKKULA H, PAUL D. Fracture Characterization of PC/ABS Blends: Effect of Reactive Compa-

tibilization, ABS Type and Rubber Concentration[J]. Polymer, 1999, 40(25): 7089—7107.

- [2] ELMAGHOR F, ZHANG L, FAN R, et al. Recycling of Polycarbonate by Blending with Maleic Anhydride Grafted ABS[J]. Polymer, 2004, 45(19): 6719—6724.
- [3] SOHN J I, LIM S T, PARK S H, et al. Effect of a Reactive-type Flame Retardant on Rheological and Mechanical Properties of PC/ABS Blends[J]. Journal of Materials Science, 2003, 38(7): 1485—1491.
- [4] CAO K, WANG Y, WANG Y. Experimental Investigation and Modeling of the Tension Behavior of Polycarbonate with Temperature Effects From Low to High Strain Rates[J]. International Journal of Solids and Structures, 2014, 51(13): 2539—2548.

- [5] MULLIKEN A D, BOYCE M C. Mechanics of the Rate-dependent Elastic-plastic Deformation of Glassy Polymers From Low to High Strain Rates[J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(5): 1331—1356.
- [6] RAE P, BROWN E, ORLER E. The Mechanical Properties of Poly(Ether-Ether-Ketone) (PEEK) with Emphasis on the Large Compressive Strain Response[J]. Polymer, 2007, 48(2): 598—615.
- [7] YIN Z N, WANG T J. Deformation of PC/ABS Alloys at Elevated Temperatures and High Strain Rates[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 494(1): 304—313.
- [8] BOYCE M C, PARKS D M, ARGON A S. Large Inelastic Deformation of Glassy Polymers, Part I: Rate Dependent Constitutive Model[J]. Mechanics of Materials, 1988, 7(1): 15—33.
- [9] ARRUDA E M, BOYCE M C. A Three-dimensional Constitutive Model for the Large Stretch Behavior of Rubber Elastic Materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1993, 41(2): 389—412.
- [10] WU P D, GIESSEN E V D. On Neck Propagation in Amorphous Glassy Polymers Under Plane Strain Tension[J]. International Journal of Plasticity, 1995, 11(3): 211—235.
- [11] SAFARI K H, ZAMANI J, FERREIRA F J, et al. Constitutive Modeling of Polycarbonate during High Strain Rate Deformation[J]. Polymer Engineering & Science, 2013, 53(4): 752—761.
- [12] HOLOPAINEN S. Modeling of the Mechanical Behavior of Amorphous Glassy Polymers Under Variable Loadings and Comparison with State-of-the-art Model Predictions[J]. Mechanics of Materials, 2013, 66: 35—58.
- [13] G'SELL C, JONAS J J. Determination of the Plastic Behaviour of Solid Polymers at Constant True Strain Rate[J]. Journal of Materials Science, 1979, 14(3): 583—591.
- [14] DUAN Y, SAIGAL A, GREIF R, et al. A Uniform Phenomenological Constitutive Model for Glassy and Semicrystalline Polymers[J]. Polymer Engineering & Science, 2001, 41(8): 1322—1328.
- [15] DUAN Y, SAIGAL A, GREIF R, et al. Analysis of Multiaxial Impact Behavior of Polymers[J]. Polymer Engineering & Science, 2002, 42(2): 395—402.
- [16] 王礼立, 朱锡雄, 施绍裘, 等. 鸟撞高速飞机风挡若干问题的冲击动力学研究[J]. 航空学报, 1991, 12(2): 27—33.
WANG Li-li, ZHU Xi-xiong, SHI Shao-qiu, et al. An Impact Dynamics Investigation on Some Problems in Bird Strike on Windshields of High Speed Aircrafts[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1991, 12(2): 27—33.
- [17] WANG J, XU Y, ZHANG W. Finite Element Simulation of PMMA Aircraft Windshield Against Bird Strike by Using a Rate and Temperature Dependent Nonlinear Viscoelastic Constitutive Model[J]. Composite Structures, 2014, 108: 21—30.