DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0858-06

酚醛层压材料的冲击力学行为及本构模型*

侯海周[1],胡毅亭[1],彭金华[1],靳建伟[2]

(1.南京理工大学化工学院,江苏 南京 210094;
2.西安近代化学研究所,陕西 西安 710065)

摘要:为了研究酚醛层压材料的冲击力学行为并获得本构模型,利用万能试验机和整形修正的分离式霍普金森压杆(SHPB)装置,对材料试样进行了应变率范围为 $10^{-3}\sim10^{3}$ s^{-1} 的单轴压缩实验,得到了不同加载应变率下的应力应变曲线,对其在准静态、动态载荷下的压缩破坏机理进行了初步探讨。结果表明,酚醛层压材料具有较强的应变率效应,与准静态(1.67×10^{-3} s^{-1})时相比,在动态载荷(7×10^{2} s^{-1})下,峰值应力增加了约 10 倍;破坏应变减少了约一半;在准静态和动态加载条件下试样力学性能的差异是由于纤维基体界面特性以及不同应变率下破坏模式的不同;采用朱-王-唐本构方程描述了酚醛层压材料力学行为,拟合得到了本构方程的系数,在加载过程中,理论计算值与实验结果吻合较好。

关键词:固体力学;动态压缩;分离式霍普金森压杆;酚醛层压材料;朱-王-唐本构模型;应变率

中图分类号:O347.3　　**国标学科代码**:13015　　**文献标志码**:A

酚醛层压材料是以 PF 树脂为粘合剂,以棉布填料为基材,经过加热加压层压处理后,固化成层压板、管材、棒料等制品,具有耐冲击、耐磨损、减振吸热、抗损伤等性能,且密度适中,越来越多地应用在导弹、火箭、炮弹等零部件生产中。在这些应用中,酚醛层压材料受到冲击载荷作用,而在冲击载荷下材料往往表现出与静态下不同的力学特性。

对高聚物材料在不同加载条件下的力学响应以及本构关系的研究由来已久,孙朝翔等[1]对 PC 材料进行的高应变率动态压缩实验表明其具有明显的应变率相关性,谢中秋等[2]、管公顺等[3]研究了加载应变率对 PMMA 力学性能的影响,并拟合了适用朱-王-唐黏弹性本构方程的参数,王礼立等[4-5]通过测量有机玻璃、聚碳酸酯和环氧树脂等材料黏弹性波特征波速和衰减因子确定了高聚物在高应变率下的动态本构方程,邹广平等[6]研究了整体中空层连复合材料的力学性能,分析了其破坏模式,P. Forquin 等[7]研究了侧面被铜和铝合金包裹的圆柱形有机玻璃试件受轴向压缩时的破坏行为,指出侧向受限有机玻璃的压缩强度对加载应变率具有较高的敏感性。这些研究都能够较好地描述高聚物黏塑性材料在较宽应变率范围内的应力应变关系。

然而目前对酚醛层压材料在不同加载条件下的力学性能以及本构关系的研究尚未见到有公开的报道。为了更好地研究酚醛层压材料在实际使用过程中的变形、断裂等力学性能和损伤破坏机制,并建立符合材料力学性能的本构模型。本文中利用 CMT4254 万能试验机和南京理工大学火箭技术实验室的 SHPB 实验台对酚醛层压材料在准静态和动态加载条件下的轴向压缩性能进行实验研究,得到这种材料本构关系的初步结果,并对材料的力学性能和损伤机制进行讨论。

1　实　验

1.1　试样制备

实验所用试样由 3723 酚醛层压棒料经机械加工而成,试样的公称尺寸为∅13 mm×10 mm,加工时保持试样 2 个端面间良好的垂直度和平行度。

* **收稿日期**:2014-04-18;**修回日期**:2014-10-05

第一作者:侯海周(1979—　),男,博士研究生,工程师,houhaizhou99@163.com。

1.2 实验设备及方案

酚醛层压材料的准静态压缩实验是在 CMT4254 万能试验机上进行的，加载应变率分别为 1.67×10^{-2}、1.67×10^{-3} s^{-1}，每个应变率重复 5 次。

酚醛层压材料的动态压缩实验在 SHPB 实验台进行，加载应变率分别为 7×10^{2}、1.1×10^{3} s^{-1}，每个应变率重复 5 次。为避免入射波和反射波重叠，子弹、入射杆和透射杆的长度分别为 300、1 200、800 mm；为满足试样的横截面积不大于压杆的横截面积，选择在∅16 mm 的 SHPB 实验台上进行，实验装置如图 1 所示。为保证实验结果的可靠性，在 SHPB 实验中作了一些改进：

(1)由于酚醛层压材料的波阻抗较小，因此采用铝杆作为输入和输出的波导杆，可以减少波阻抗不匹配对测试结果的影响。

(2)利用圆形黄铜片加在撞击端作为波形整形器，对入射脉冲进行整形。圆形黄铜片底面直径为 6 mm，厚度为 1 mm。在实验中该波形整形器可以将矩形入射脉冲整形为近似幂函数入射脉冲，拉长入射脉冲上升沿，增加梯形波上升时间，减少弥散效应引起的高频振荡，保证有足够的时间使试样内部应力达到均匀。图 2 是加载应变率为 1.1×10^{3} s^{-1}时的典型波形信号，由图 2 可见，反射波具有一个较长的平缓区，表明在动态压缩的大部分时间内应变率近似恒定。

(3)在试样的两个端面涂抹润滑油，以减小试样和波导杆端面之间的摩擦。

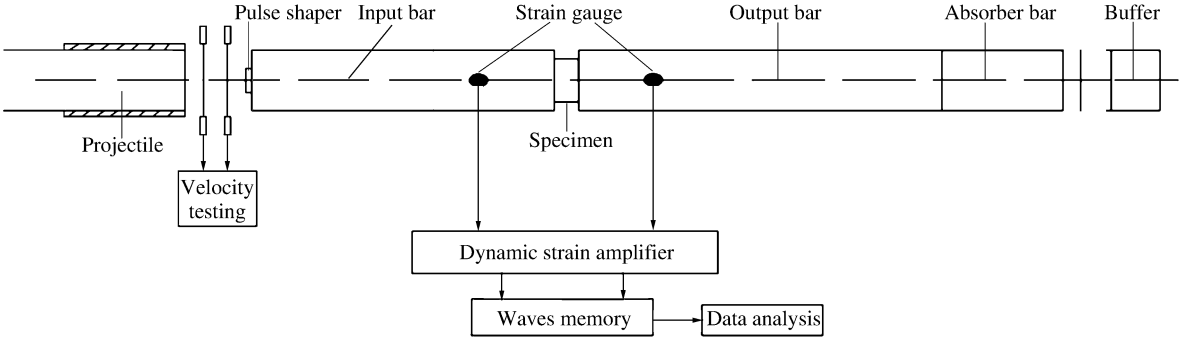

图 1 SHPB 装置

Fig. 1 SHPB device

借助于入射杆和透射杆上粘贴的应变片，经超动态应变仪和数据采集处理系统，将波形测量并记录下来，实验中典型的波形如图 2 所示。实验结果表明，利用铝杆作为波导杆进行酚醛层压材料冲击压缩实验方案是可行的。根据波导杆上记录的信号，利用二波法[8]计算的酚醛层压材料在高应变率下的应力应变曲线如图 3 所示。

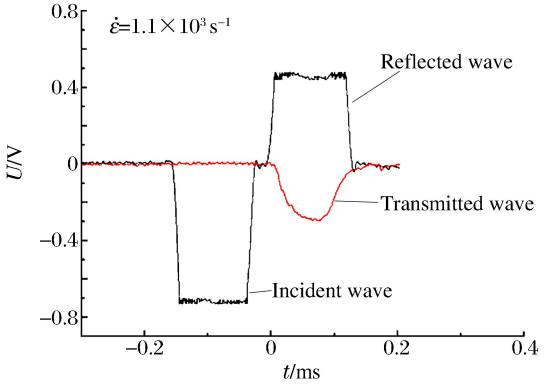

图 2 冲击实验的典型波形

Fig. 2 Typical waveform of impact experiment

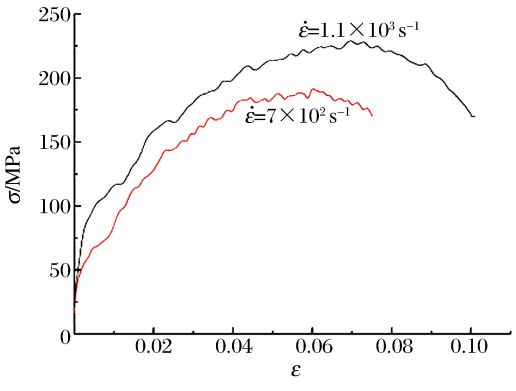

图 3 动态压缩下不同应变率的应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of impact experiment at high speed

2 结果与讨论

2.1 应力应变曲线讨论

图 4 是酚醛层压材料在准静态加载条件下的应力应变曲线，由图 3～4 可见，随着应变率的增加，破坏应变减小，峰值应力增加。在准静态加载条件下，应力应变曲线在开始阶段呈线性增加，变形为弹性或近似弹性，随着载荷的增加，变形增大，直至逐渐进入屈服阶段，屈服阶段之后，材料的应力增加缓慢而应变不断增加，呈现出明显的塑性变形。总体来说，在准静态载荷下，酚醛层压材料的应力应变曲线具有明显的伪塑性、非线性特征。

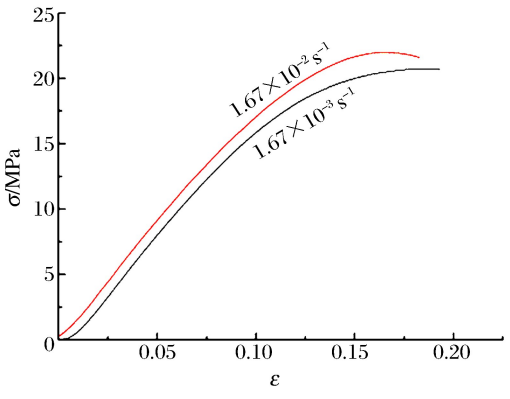

图 4 准静态压缩下不同应变率下的应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of impact experiment at low speed

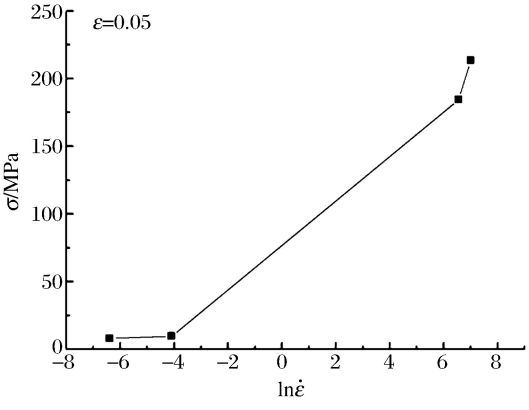

图 5 应力-自然对数应变率的曲线

Fig. 5 Stress-logarithmic strain curve

在动态载荷(7×10^{2} s^{-1})下，与准静态(1.67×10^{-3} s^{-1})时相比，酚醛层压材料的峰值应力和破坏应变有着明显的变化，其中峰值应力从约 21 MPa 提高到约 221 MPa，增加了约 10 倍；破坏应变从约 0.16减少到约 0.078，减少了约一半。

图 5 是试样在应变为 0.05 时的应力-自然对数应变率曲线，该图直观地揭示了酚醛层压材料具有应变率硬化效应，对应变率较为敏感。当应变率为 1.67×10^{-3}、1.67×10^{-2}、7×10^{2}、1.1×10^{3} s^{-1}时，对应的应力峰值约为 21、22、221、228 MPa，表明酚醛层压材料的应力具有较强的应变率效应。

2.2 宏观破坏模式分析

图 6(a)是实验前的试样，图 6(b)、(c)分别是应变率为 1.67×10^{-3}、1.67×10^{-2} s^{-1}时压缩后的典型试样，在准静态压缩过程中，试样的承载能力达到最大后逐渐降低，表现出塑形破坏的特点。酚醛层压材料在压缩过程中，试样和波导杆端面接触处随着载荷的增加，产生应力集中，形成初始裂纹源，当裂纹扩展到达纤维基体界面时，纤维基体的脱黏使扩展到界面处的裂纹在界面处发生偏转，造成酚醛层压材料在压缩时易于发生沿试样径向的层状破坏，试样整体未发生分离，仍保持较好的完整性，其损伤主要集中在边缘位置。

图 6(d)、(e)分别是应变率为 7×10^{2}、1.1×10^{3} s^{-1}时压缩后的典型试样，试样的加载面和侧面均有不同程度的破坏。在加载过程中，试样和波导杆端面接触产生的应力集中造成初始裂纹源，加载面纤维层之间由于裂纹的扩展而层裂。试样的侧面破坏是由于纤维的分离，层与层之间的纤维束未对准而发生相对的滑移，产生剪切作用，剪切载荷超过纤维的拉伸强度时，纤维断裂，分离的纤维被挤出，因断裂而长度尺寸不等的棉布纤维束清晰可见。表现为在动态加载条件下，试样发生明显的剪切破坏和层间分离，破坏具有明显的劈裂特征，即剪切角较小，而小的剪切角往往使材料具有较高的应力。此外，材料在动态载荷下整体劈裂破坏意味着在损伤过程中有更多的微裂纹形核并扩展，这减轻了局部的应力集中，消耗了更多的能量，从而使酚醛层压材料的承载能力得以改善，最终导致材料在动态载荷下具有更高的峰值应力，即在动态载荷下，纤维基体间界面的脱黏、滑移、拔脱变得更加困难，相对准静态载荷时的破坏应变减小。

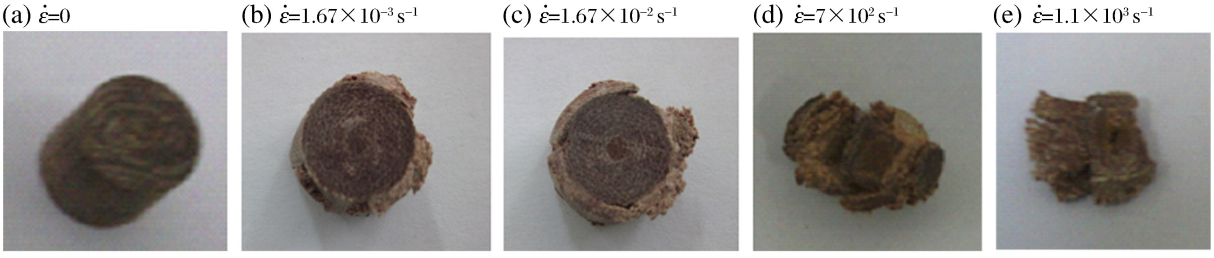

图 6 宏观破坏模式

Fig. 6 Macroscopic failure mode at different strain rates

2.3 本构模型

高分子聚合材料宏观力学性能是分子微观运动的表现，从高分子聚合材料变形的微观机制来看，具有高交联度网状结构的酚醛层压材料，其内部运动单元包括侧基、链段以及没有完全交联的整链等，这些单元在运动中存在各种形式的阻尼，起到相当于粘壶一样的力学效应，在材料的宏观动态力学性能——应变曲线上就表现出时间效应，即应变率相关。这就说明在低应变率下和高应变率下，材料力学性能的微观机制不同，在宏观上反映出材料在准静态下与在动态下的应力应变曲线有较大的差别。在各个应变率下的应力应变曲线总体来说呈非线性特征，这一方面与材料的应变率效应有关，另一方面还与高聚物材料本身的非线性弹性性质有关。综上，酚醛层压材料是一种非线性的黏弹性材料。

朱-王-唐非线性黏弹性本构关系[5]可以对典型高聚物（包括热塑性和热固性的），如环氧树脂、有机玻璃、聚碳酸酯 PC、尼龙、ABS、PBT 等在从准静态载荷到冲击载荷范围内的非线性黏弹性本构行为进行很好的描述：

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

式中：$E_0\varepsilon+\alpha\varepsilon^2+\beta\varepsilon^3$ 描述非线性弹性平衡响应，E_0、α、β 为对应的弹性常数；E_1、E_2 为线弹性模量，θ_1、θ_2 是松弛时间。式(1)在低应变率和高应变率条件下的简化式为：

$$\sigma = \begin{cases} E_0\varepsilon + \alpha\varepsilon^2 + \beta\varepsilon^3 + E_1\int_0^{\tau}\dot{\varepsilon}(\tau)\exp\left(-\dfrac{t-\tau}{\theta_1}\right)\mathrm{d}\tau & \text{低应变率时} \\ E_0\varepsilon + \alpha\varepsilon^2 + \beta\varepsilon^3 + E_1\varepsilon + E_2\int_0^{\tau}\dot{\varepsilon}(\tau)\exp\left(-\dfrac{t-\tau}{\theta_2}\right)\mathrm{d}\tau & \text{高应变率时} \end{cases} \tag{2}$$

所有实验均是在常温下完成，且不考虑损伤及热软化对材料力学性能的影响，利用 2 组低应变率实验数据和 2 组 SHPB 实验得到的高应变率实验数据，结合式(2)可以拟合得到式(1)中的 7 个参量：E_0=134 MPa、α=624、β=−4 096、E_1=198 MPa、θ_1=0.43 s^{-1}、E_2=84 018 MPa、θ_2=8.93×10^{-7} s^{-1}。

图 7 是实验结果和本构关系拟合结果的对比，可以看出，拟合数据与实验曲线吻合较好，说明该本构模型能够较好地在宽应变率范围内描述酚醛层压材料的力学行为。

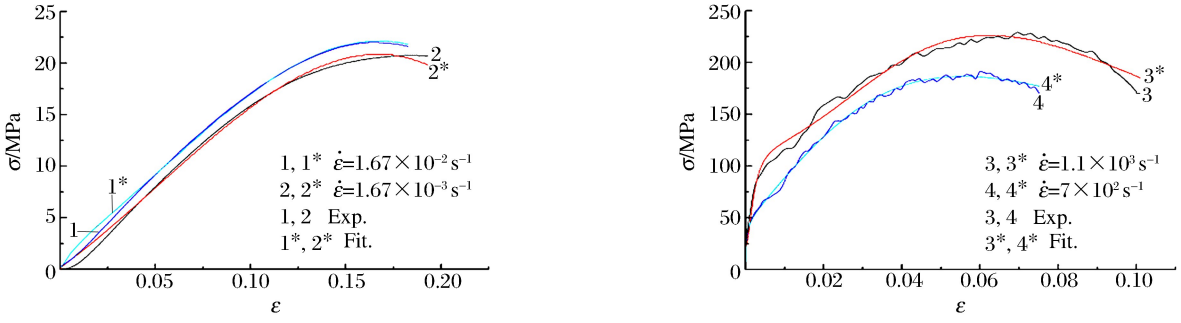

图 7 实验值和拟合值的比较

Fig. 7 Comparison of the experimental and the fitting values

3 结 论

(1)利用铝杆 SHPB 装置和万能试验机获得了酚醛层压材料在动态载荷和准静态载荷下的应力应变曲线。

(2)酚醛层压材料的峰值应力和破坏应变具有强烈的应变率效应,与准静态(1.67×10^{-3} s^{-1})时相比,在动态载荷(7×10^{2} s^{-1})下,材料的峰值应力和破坏应变有着明显的变化,其中峰值应力增加了约 10 倍;破坏应变减少了约一半。

(3)酚醛层压材料在准静态载荷下,具有明显的沿试样径向的层状破坏特征,在动态载荷下,具有明显的劈裂状特征,材料自身的特点造成破坏模式的不同。

(4)拟合得到了适用于酚醛层压材料的朱-王-唐非线性黏弹性本构方程系数,这个方程能较好地描述实验结果。

参考文献:

[1] 孙朝翔,鞠玉涛,胡少青,等. 聚碳酸酯高应变率分离式霍普金森压杆实验研究[J]. 南京理工大学学报,2012,36(3):529-533.
Sun Chao-xiang, Ju Yu-tao, Hu Shao-qing, et al. Experimental investigation of polycarbonate at high strain rate by SHPB[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2012,36(3):529-533.

[2] 谢中秋,张蓬蓬. PMMA 材料的动态压缩力学特性及应变率相关本构模型研究[J]. 实验力学,2013,28(2):220-226.
Xie Zhong-qiu, Zhang Peng-peng. On the dynamic compressive mechanical properties and strain rate related constitutive model of PMMA material[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013,28(2):220-226.

[3] 管公顺,王少恒,成方圆. 不同加载应变率下有机玻璃的压缩破坏与力学行为[J]. 航空材料学报,2012,32(6):96-101.
Guan Gong-shun, Wang Shao-heng, Cheng Fang-yuan. Compression failure and mechanics behavior of PMMA under different loading strain rates[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012,32(6):96-101.

[4] 王礼立,施绍裘,陈江瑛,等. ZWT 非线性热粘弹性本构关系的研究与应用[J]. 宁波大学学报:理工版,2000,13:141-149.
Wang Li-li, Shi Shao-qiu, Chen Jiang-ying, et al. ZWT non-linear thermo-viscoelastic constitutive relationship between research and application[J]. Journal of Ningbo University: Natural Science & Engineering Edition, 2000, 13:141-149.

[5] 王礼立, Pluvinage G, Labibes K. 冲击载荷下高聚物动态本构关系对粘弹性波传播特性的影响[J]. 宁波大学学报,1995,8(3):30-57.
Wang Li-li, Pluvinage G, Labibes K. The influence of dynamic constitutive relations of polymers at impact loading on the viscoelastic wave propagation character[J]. Journal of Ningbo University, 1995,8(3):30-57.

[6] 邹广平,杨继,王瑞瑞,等. 聚氨酯夹芯整体层连复合材料的力学性能研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43:257-261.
Zou Guang-ping, Yang Ji, Wang Rui-rui, et al. Experimental investigation on mechanical properties of the integrated hollow core sandwich composite filling polyurethane[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011,43:257-261.

[7] Forquin P, Nasraoui M, Rusinek A. Experimental study of the confined behavior of PMMA under quasi-static and dynamic loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012,40/41(1):46-57.

[8] 宋力,胡时胜. SHPB 数据处理中的二波法与三波法[J]. 爆炸与冲击,2005,25(4):368-373.
Song Li, Hu Shi-sheng. Two-wave and three-wave method in SHPB data processing[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(4):368-373.

[9] Zhang H D, Zhu Z W, Song S C, et al. Dynamic behavior of frozen soil under uniaxial strain and stress conditions [J]. Applied Mathematics and Mechanics: English Edition, 2013,34(2):229-238.

[10] Christmann A, Ienny P, Quantin J C, et al. Mechanical behavior at large strain of polycarbonate nanocomposites during uniaxial tensile test[J]. Polymer, 2011,52(18):4033-4044.

[11] 王鹏飞,胡时胜.轴向尺寸对泡沫铝动静态力学性能的影响[J].爆炸与冲击,2012,32(4):393-398.
Wang Peng-fei, Hu Shi-sheng. Mechanical properties of foam aluminum with different sizes[J]. Explosion and Shock Waves, 2012,32(4):393-398.

[12] Capan I, Tarimci C, Hasasan A K. Characterization and optical vapour sensing properties of PMMA thin films [J]. Materials Science and Engineering: C, 2009,29(1):140-143.

[13] 胡泽斌,许金余,席峰,等.EPS混凝土的冲击力学行为及本构模型[J].振动与冲击,2011,30(2):65-68.
Hu Ze-bin, Xu Jin-yu, Xi Feng, et al. Dynamic behavior and constitutive model of styropor concrete under impact loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011,30(2):65-68.

[14] Casem D, Weerasooriya T, Moy P. Inertia effects of quartz force transducers embedded in a split Hopkinson pressure bar[J]. Experimental Mechanics, 2005,45:368-376.

Dynamic behavior and constitutive model of phenolic cotton fabric material under impact loading

Hou Hai-zhou[1], Hu Yi-ting[1], Peng Jin-hua[1], Jin Jian-wei[2]

(1. *Nanjing University of Science and Technology, School of Chemical Engineering, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
2. *Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an* 710065, *Shaanxi, China*)

Abstract: In order to obtain mechanical properties of phenolic cotton fabric material at different strain rates, we performed experiments of the uniaxial compression tests of phenolic cotton fabric material at the strain rate ranging from 10^{-3} to 10^{3} s^{-1}, using the universal testing machine and the split Hopkinson pressure bar (SHPB), obtained the stress-strain curve at different strain rates, and discussed compression failure mechanism under quasi-static and dynamic loads. The results from our experiments show that the dynamic compression fail strength of phenolic cotton fabric material has strong strain rate sensitivity and it increases along with the strain rate. Compared with the stress under the quasi-static loading, the peak stress under the dynamic loading increases by approximately 10 times, while the failure strain is reduced to about half. The differences in the mechanical properties under quasi-static and dynamic loading conditions is due to the strain rate effect of the fiber matrix interface characteristics on the one hand, and to the differences in failure modes at different strain rates on the other. Zhu-Wang-Tang (ZWT) constitutive was adopted to describe the mechanical behavior of the phenolic cotton fabric material.

Key words: solid mechanics; dynamic compression; SHPB; phenolic cotton fabric material; Zhu-Wang-Tang constitutive; high strain rate

(责任编辑　曾月蓉)