

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.02.004

酚醛层压材料的本构模型研究^{*}

冯海林 胡毅亭 侯海周

南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 文中讨论了雷管生产线中使用的酚醛层压材料的本构模型,使用分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)研究了材料在高应变率下的力学行为。通过对实验结果的分析,材料的动态应力—应变曲线符合 ZWT(朱王唐)非线性热弹粘性本构模型。利用最小二乘法拟合了方程参数,同时对拟合的理论结果与实验结果进行比较,发现在低应变区,拟合并不很好,试件内存在应力应变分布不均的影响因素;在高应变区,拟合与实验结果比较吻合。

[关键词] 酚醛层压材料 分离式 Hopkinson 压杆 高应变率 本构模型 最小二乘法

[分类号] TQ560.7 TD235.2⁺2

引言

几十年来,雷管的运输、贮存一直是安全研究的重点之一,传统的金属和木材等作为雷管的外包装材料,都有不可避免的缺陷。因此,利用酚醛层压材料代替传统材料,对于雷管的安全具有促进作用。酚醛层压材料在冲击下的力学性能与准静态下的力学性能有很大的差别,研究酚醛层压材料在高应变率下的力学性能及其对应的动态本构模型显然不可避免^[1-3]。本文利用分离式 Hopkinson 压杆(SHPB),在常温下,对材料在不同高应变率($10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$)时的力学性能进行了研究,并对应力—应变曲线进行分析,发现其动态本构模型符合 ZWT(朱王唐)非线性热弹粘性本构模型^[4]。

1 实验过程与装置

实验采用的是 $\varnothing 14.5 \text{ mm}$ 分离式 Hopkinson 压杆,装置配置如图 1^[3]。将酚醛层压材料制成 $\varnothing 13 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的圆柱体试件,将试件两端面涂上凡士林,夹在输入杆和输出杆之间。子弹由高压气枪以设定的压力射出,撞击输入杆,在输入杆内产生入射脉冲,在应力脉冲到达试件时,试件产生变形,在输入杆产生反射脉冲,同时在输出杆产生透射脉冲,最后由阻尼器吸收输出杆速度。子弹的速度由位于子弹与输入杆之间的平行光源测量,输入杆和输出杆上的应力由贴在其上的应变片测量。

SHPB 实验测试技术是建立在两个基本假设的基础上:1)杆中一维应力波假设;2)试件应力和应变沿长度均匀分布假设^[5]。本次实验使用的是 $\varnothing 14.5 \text{ mm}$ 的压杆,压杆的直径相对较小,二维弥散

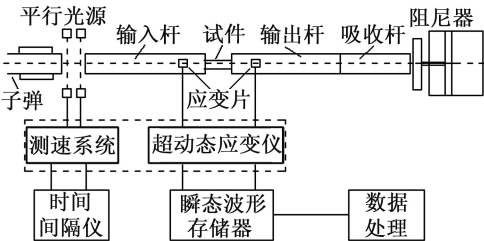


图 1 SHPB 装置简图

Fig. 1 SHPB device system

效应可忽略,满足一维应力波假设;试件的长径比也符合要求,且试件相对较短,当入射脉冲作用于试件时,在一个脉冲作用时间内试件内脉冲来回反射多次,可以近似认为试件内应力是均匀的。由于加工精度的制约,致使 SHPB 压杆与试验两端面不可能达到完全的光滑,此时可通过凡士林油润滑接触面来减小摩擦^[6]。

利用一维应力波假设,在入射杆、透射杆材料和横截面积都相同前提下,得到计算试件应力 $\sigma(t)$ 、应变 $\varepsilon(t)$ 和应变率 $\dot{\varepsilon}(t)$ 的三波公式。利用均匀性假设:试件内部各处应力应变均匀($p_1 = p_2$),可以得到 $\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) = \varepsilon_t(t)$,再对应力、应变和应变率的三波公式简化得出两波公式:

$$\begin{aligned}\sigma(t) &= E \left(\frac{d}{d_0} \right)^2 \cdot \varepsilon_i(t) \\ \dot{\varepsilon}(t) &= \frac{2c_0}{l_0} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t)] \\ \varepsilon(t) &= \frac{2c_0}{l_0} \int_0^t [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t)] dt\end{aligned}\tag{1}$$

^{*} 收稿日期:2012-12-10

作者简介:冯海林(1988 ~),男,硕士研究生,主要从事爆炸安全方面的研究。fhl880601@yahoo.com

通信作者:胡毅亭(1973 ~),男,讲师,主要从事安全技术评价方面的研究。huyiting@hotmail.com

式中: l_0 为试件的初始厚度; d_0 为试件的初始直径; E 为杆的杨氏模量; d 为杆的直径; c_0 为杆的声速。

2 实验结果与讨论

实验时给定高压气枪不同的压力, 发射子弹得到不同的速度, 再撞击杆, 获得不同的应变率。实验得出的是试件应力和应变的原始数据, 再由 Matlab 软件拟合得出不同应变率下的应力—应变曲线。图 2 是酚醛层压材料的应力—应变曲线。

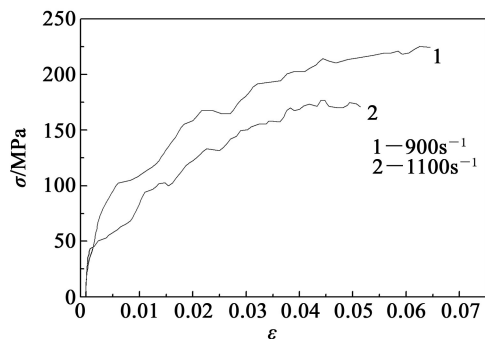


图 2 不同应变率下的应力—应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves at different strain rates

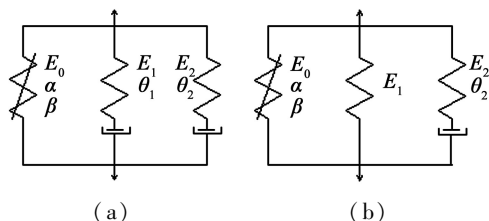
在高应变率下, 材料的应力—应变曲线随应变率的增大而提高, 说明酚醛层压材料对应变率是敏感的。同时, 动态弹性模量也在提高, 但提高的幅度不大。在图中, 900s^{-1} 和 1100s^{-1} 时的应力—应变曲线有相交部分, 说明试验中存在二维杆弥散现象。根据文献[7], 高聚物材料在高应变率下的弹性模量比准静态下的弹性模量提高 2 倍左右, 同时, 屈服强度也提高 2~3 倍。酚醛层压材料微观分子的侧基团、链段以及没有完全交联的整链等单元, 在晶格运动中存在各种形式的阻尼, 形成一定的黏性力学效应, 在材料的宏观动态应力—应变曲线上就表现与应变率相关的时间效应。因此, 酚醛层压材料是一种非线性的粘弹性材料。朱兆祥等[7] 在研究环氧树脂、PMMA、PC 等一大类高聚物材料的动态力学性能时, 从 Green—Rivlin 本构理论出发, 提出了 ZWT(朱王唐)非线性热弹粘性本构模型, 其关系式如下:

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

式中: $E_0, \alpha, \beta, E_1, E_2, \theta_1, \theta_2$ 均为待求参数。

ZWT(朱王唐)非线性热弹粘性本构模型是由一个非线性弹性弹簧和两个平行的 Maxwell 模型组成, 对应的力学模型如图 3(a)。 E_0, α, β 表示材料相对应的弹性参数; 第一个积分项描述了低应变率下材料的粘弹性响应, E_1 和 θ_1 分别是所对应的

Maxwell 单元的弹性常数和松弛时间。对于聚合复合材料[8], 实验表明, θ_1 通常是 $10^0 \sim 10^2$ 秒量级; 第二个积分项描述了高应变率下材料的粘弹性响应, E_2 和 θ_2 则分别是所对应的 Maxwell 单元的弹性常数和松弛时间, 且 θ_2 通常是 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 秒量级, 对应的力学模型如图 3(b)。



(a) 低应变率; (b) 高应变率

图 3 ZWT 本构模型在低应变率和高应变率下的力学模型

(a) Mechanical model at low strain rate;

(b) Mechanical model at high strain rate

Fig. 3 ZWT mechanical models at low strain rate and high strain rate

ZWT 本构模型可简化低应变率下的积分项(第一个积分项)为一维应变项, 并假定 $E_3 = E_1 + E_2$ 。酚醛层压材料在应变率 $10^2 \sim 10^4\text{s}^{-1}$ 范围内的实验结果表明, 材料表现出与应变率相关的粘性效应。通过比较高聚物材料在低应变率下的应力—应变曲线, 高应变率下有明显不同的应变率相关性, 即低应变率条件下存在主要松弛时间 θ_1 , 而在高应变率下存在主要松弛时间 θ_2 。由图 2 可知, 应力—应变曲线呈现非线性, 且有相交, 可能存在一定的二维杆弥散效应。在高应变率下, 简化后的公式符合酚醛层压布板在高应变率 $10^2 \sim 10^4\text{s}^{-1}$ 范围内使用的条件。对于实验在恒应变率条件下, 公式可简化第二个积分项, 但依旧是一个比较复杂的非线性函数:

$$\sigma = E_3 \varepsilon + \alpha \varepsilon^2 + \beta \varepsilon^3 + E_2 \dot{\varepsilon} \theta_2 \left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon} \theta_2}\right) \right] \quad (3)$$

式中: $E_3, \alpha, \beta, E_2, \theta_2$ 均为待求参数。

根据分离式 Hopkinson 压杆测得的应力—应变曲线, 利用最小二乘法可求得 E_2, E_3, α, β 和 θ_2 的值。对不同应变率下拟合的本构方程参数值进行均化后, 得到本构模型参数数据(表 1)。

根据拟合参数, 酚醛层压材料的拟合结果与实验结果比较如图 4。

由图 4 可见, 在低应变区, 拟合结果与实验结果有一定的偏差, 可能是由于酚醛层压材料的试件在压制过程中, 酚醛树脂并非均匀分布, 存在一定的间隙, 从而引起试件中应力应变分布不均; 在高应变

表 1 实验数据拟合的材料常数

Tab.1 Material constants fitted with experimental data

$E_3/$ MPa	$\alpha/$ MPa	$\beta/$ MPa	$E_2/$ MPa	$\theta_2/$ μs
17.08	-287.92	170.09	-6.67	32.80

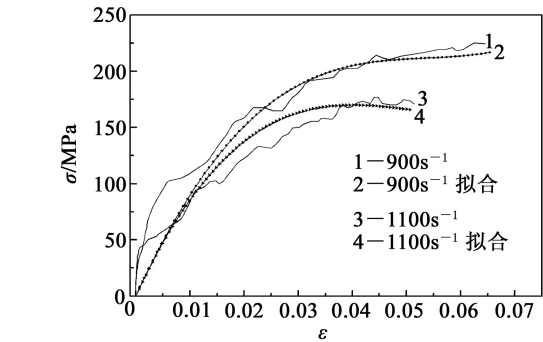


图 4 拟合结果与实验结果的比较
Fig.4 The comparison of the calculated curves and experimental results

区,随着应力的增加,试件受压制的影响变得微乎其微,因此,拟合结果与实验结果较为吻合。

3 结论

1) 酚醛层压材料是应变率敏感的高聚物材料,其高应变率下的应力—应变曲线表现出非线性的粘弹性性质。实验所得的应力—应变曲线出现了小幅度的波动(曲线呈锯齿状),这可能是由于在测试过程中出现的二维杆弥散效应导致的。

2) 在高应变率范围内($10^2 \sim 10^4 s^{-1}$),其动态本构特性可用 ZWT 非线性粘弹性力学模型表示。由拟合结果与实验结果的比较可看出,在低应变区,拟合并不很好,试件内存在应力应变分布不均的影响因素;在高应变区,拟合与实验结果比较吻合。

Study on Constitutive Model of Phenolic Cotton Fabric Material

FENG Hailin, HU Yiting, HOU Haizhou

School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] The constitutive model of phenolic cotton fabric material which is used in the detonator production lines was discussed and its dynamic behaviors were studied at high strain rates by using the split Hopkinson pressure bar in present study. Experimental data analysis shows that its dynamic strain-stress curves are consistent with ZWT (Zhu-Wang-Tang) non-linear visco-elastic constitutive model. ZWT equation parameters were obtained by the least square method. In comparison with the experimental results, the fitted theoretical results are not so good at low strain rates due to the existence of uneven stress and strain distribution within the test specimens but quite well at high strain rates.

[KEY WORDS] phenolic cotton fabric material, split Hopkinson pressure bar, high strain rate, constitutive model, least square method

参 考 文 献

[1] 胡时胜. 霍普金森压杆技术[J]. 兵器材料科学与工程, 1991, 14(11): 42-49.
Hu Shisheng. Technology of Hopkinson pressure bar[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1991, 14(11): 42-49.

[2] Niu Xiaoyan, Yuan Gouzheng, Shu Xuefeng. Study on dynamic failure model of lead-free solders using SHPB techniques[J]. International Journal of Modern Physics B, 2008, 22: 1117-1122.

[3] 王礼立. 应力波基础[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2005: 52-60.

[4] Ninan L, Tsai J, Sun C T. Use of split Hopkinson pressure bar for testing off-axis composites[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25(3): 291-313.

[5] 黄德进, 孙紫建, 王礼立. 高聚物材料动态本构关系对 PP/PA 共混物的应用研究[J]. 材料工程, 2006(3): 3-5.
Huang Dejin, Sun Zijian, Wang Lili. Study on PP/PA blended material by polymer dynamic constitutive relation[J]. Journal of Material Engineering, 2006(3): 3-5.

[6] Sabuwala T, Linzell D, Krauthammer T. Finite element analysis of steel beam to column connections subjected to blast loads[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(7): 861-876.

[7] 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, 2002, 15(3): 141-149.
Wang Lili, Shi Shaoqiu, Chen Jingyin, et al. Research and Apply of ZWT non-linear visco-elastic constitutive model[J]. Journal of Ningbo University: NSEE, 2002, 15(3): 141-149.

[8] Limbert G, Middleton J. A constitutive model of the posterior cruciate ligament[J]. Medical Engineering and Physics, 2006, 28(2): 99-113.