

聚酯材料状态方程的实验研究

林 鹏, 王长利, 李 焰, 刘文祥, 王等旺

(西北核技术研究所, 西安 710024)

[摘要] 在单级轻气炮上对聚酯材料的激波状态方程进行了实验研究。最高撞击速度为 526 m/s, 相应地在靶中得到的最高撞击压力为 2.14 GPa。压力测试采用锰铜计, PVDF 产生的压电信号用于判读激波速度。由实验结果拟合得到了聚酯材料的 Hugoniot 线性关系和多项式状态方程以及 Grüneisen 状态方程。

[关键词] 聚酯材料; 状态方程; Hugoniot; 激波

[中图分类号] TV223.1 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)04-0063-04

1 前言

聚酯材料是指含有酯基的热塑性聚酯的简称, 主要通过二元酸与二羟基醇反应产生, 具有质轻以及高阻隔、高光亮、耐高温、耐水解、抗紫外、可热封、阻燃、高收缩等优良的热力学性能, 在民用包装以及航空航天领域得到广泛应用。随着它的广泛应用, 聚酯材料也得到了不断发展, 其力学性能的研究也就成为国内外研究的重点, 并取得了一定的进展, 但尚缺少对该材料高压状态方程的研究。文章对聚酯材料在冲击加载条件下的状态方程进行了实验研究。

激波参数的计算是以 Rankine - Hugoniot 方程为基础, 将材料视为流体, 忽略材料在高压下的剪切模量。由激波阵面上的质量守恒、动量守恒和能量守恒定律导出的 3 个冲击超越条件^[1]

$$\rho_0(D - u_0) = \rho(D - u) \quad (1)$$

$$p - p_0 = \rho_0(u - u_0)(D - u_0) \quad (2)$$

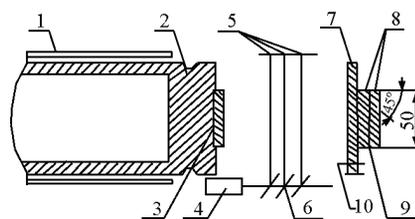
$$E - E_0 = \frac{1}{2}(P + P_0)(V_0 - V) \quad (3)$$

式中, p 为压力; ρ 为密度; E 为内能; D 为激波速度; u 为质点速度; V 为比容 ($V = 1/\rho$)。由这些方程可见, 在已知初始状态参量 (ρ_0, p_0, u_0, E_0) 的情况下, 还剩下 5 个待定参量 (p, ρ, E, D, u), 因此, 必须通过实验方法测定其中的任意两个量, 方能由这个方程

组求出其余的 3 个量, 从而确定冲击压缩线上的某一点的状态参数。只要测出对应于同一初始状态下各不同冲击压缩状态下的这些参数值, 就可以得出以此初始状态为参考点的相应的 Hugoniot 冲击压缩线, 即 Hugoniot 状态关系, 一般可用 $p - V$ 或 $D - u$ 平面上的一条曲线表示。通过对实验数据的分析和推导, 可进一步得到材料的多项式状态方程和 Grüneisen 状态方程。

2 实验技术

实验在西北核技术研究所爆炸力学实验室的 $\phi 130$ 单级轻气炮上进行, 实验装置如图 1 所示。



1—炮管; 2—炮弹; 3—飞片; 4—光电管;
5—光束分离镜; 6—激光管; 7—首层靶板;
8—第二、三层靶板; 9—传感器; 10—触发探针

图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of impact experiment
采用密度不同的 3 种材料作为飞片材料, 以取

[收稿日期] 2008-10-28

[作者简介] 林 鹏 (1968-), 男, 四川峨眉山市人, 西北核技术研究所副研究员, 研究方向为材料和结构的辐射热力学效应; E-mail: linpeng@mail.ustc.edu.cn

得从低到高不同的压力。3种材料分别为 PMMA (有机玻璃)、LY12 - Al 和 H62 铜。靶的尺寸设计和加工的设计原则:保证侧边稀疏不影响测量有效时间;安装传感器方便;波形要有足够宽的平台。飞片和靶皆为 $\phi 50$ 圆片,厚度均为 4 mm。采用激光测速法测量弹速,其相对误差可小于 0.5%。弹速尽量不要低于 300 m/s,否则平面度不好,降低测量精度;弹速尽量不要高于 700 m/s,否则对设备损伤大,也易发生危险。

冲击波的测试采用锰铜压阻传感原理。锰铜计的压阻系数与温度基本无关,因此,多年来被广泛地用在平板撞击冲击波测量实验中。实验中选取“H”型锰铜计,电阻值约 2 Ω 。

在测量冲击波压力时,锰铜压阻计与示波器之间通过长的同轴电缆连接,电缆的特性阻抗为 50 Ω 。为了保证压阻计与测试电缆之间有良好的阻抗匹配,防止出现电缆的始、终端反射干扰,在测试线路前端串联一个 50 Ω 电阻,后端示波器前并联一个 50 Ω 电阻。测量电路如图 2 所示。

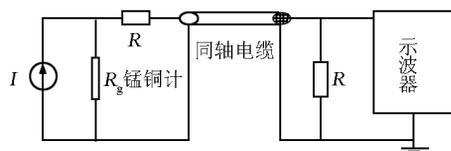


图 2 锰铜计测量电路

Fig. 2 Measuring circuit of manganin gauge

通过实验标定,锰铜计所经历的压力变化与电阻相对变化的关系为

$$p = 51 \frac{\Delta R}{R} \quad (0 \sim 3 \text{ GPa}) \quad (4)$$

当 $R_1 + R_g \gg \Delta R_g$ 时,有

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta R_g}{R_g} \quad (5)$$

结合(4)式,有

$$p = 51 \frac{\Delta V}{V_0} \quad (0 \sim 3 \text{ GPa}) \quad (6)$$

当飞片撞击靶组件时,首先由触发探针触发高速脉冲恒流源,给锰铜计提供脉冲宽度 50 μs 、电流强度 10 A 左右的恒定电流。同时,示波器记录系统同步触发并开始记录。只要测量出电压信号的变化值与其基线电压之比,就可以利用式(6)计算出冲击波压力平台值。

图 3 给出的是实验测量典型波形,通道 1 是锰铜计给出的压力波形,通道 3 使用 PVDF (polyvinylidene fluoride, 聚偏二氟乙烯),作为探针使用来判读激波在靶中的传播时间,从而确定冲击波速度 D 。

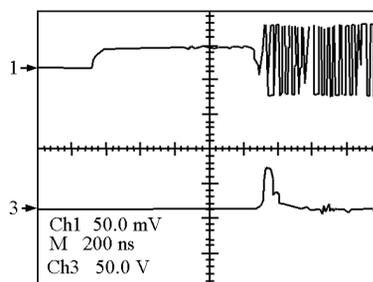


图 3 典型应力历史波形

Fig. 3 A typical stress history profile

3 实验结果

3.1 Hugoniot 线性关系

大多数材料在压力不太高的情况下,其激波速度 D 和质点速度 u 之间满足如下线性关系

$$D = c_0 + su \quad (7)$$

式中, c_0 和 s 是两个材料常数。通过对聚酯材料试样进行的 17 次撞击实验(有效次数),从实验中测量得到撞击压力 p 和激波传播速度 D ,利用式(8)和式(9),求得粒子速度 u ,从而得出 $D-u$ 形式的冲击 Hugoniot 关系。表 1 给出聚酯材料的实验测量结果。

表 1 实验结果

Table 1 Experimental results

实验号	弹速	试样厚度/mm	激波走时/ μs	激波速度	质点速度	峰值应力/MPa	$\xi = 1 - \rho_0/\rho$
	/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$			/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		$\times 10^{-3}$
07-01	331	4.00	1.376	2 907	282	1 173	97
07-02	323	4.00	1.386	2 886	257	1 061	89
07-03	385	4.14	1.315	3 148	377	1 698	120
07-22	409	4.03	1.460	2 760	189	745	69
07-23	354	4.00	1.460	2 740	164	643	60
07-26	332	7.07	2.510	2 820	157	632	56
07-36	472	7.04	2.220	3 171	447	2 025	141
07-37	355	4.08	1.360	3 000	262	1 122	87
07-38	464	4.12	1.320	3 121	346	1 545	111
07-41	467	4.12	1.260	3 283	397	1 862	121
07-44	526	4.14	1.260	3 286	455	2 137	139
07-45	353	4.12	1.470	2 803	196	785	70

$$p = \rho_0 D u \quad (8)$$

$$u = \frac{p}{\rho_0 D} \quad (9)$$

根据表 1 列出的实验结果,拟合得到聚酯的 Hugoniot 线性关系为

$$D = 2\,537 + 1.61u \quad (10)$$

即, $c_0 = 2\,537$ m/s, $s = 1.61$ 。拟合回归系数 $r = 0.927\,0$ 。图 4 是聚酯的 $D - u$ 关系曲线。

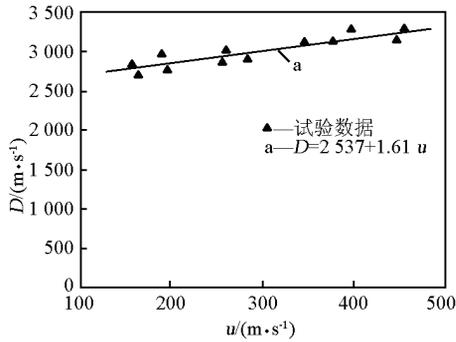


图 4 聚酯的 $D - u$ 关系

Fig. 4 Linear Hugoniot relation of the polyester

3.2 Hugoniot 状态方程

根据表 1 列出的实验结果,用方程(1),(2)和(7)可以得到聚酯材料的压力 p 和体应变 $\xi = 1 - V/V_0 = 1 - \rho_0/\rho$ 的关系,见式(11)。

$$p_H = \frac{\rho_0 c_0^2 \xi}{(1 - s\xi)^2} \quad (11)$$

表 1 列出了各实验点的 ξ 值。由实验值拟合得到 $p - \xi$ 多项式为

$$p = 9.2\xi + 29.7\xi^2 + 71.3\xi^3 \quad (12)$$

式中, p 为压力,单位为 GPa。图 5 是聚酯材料的 $p - \xi$ 关系曲线。图中的实线是根据式(11)画出的,点画线是方程式(12)的拟合曲线。两条曲线在低压端吻合较好。

3.3 Grüneisen 状态方程

Grüneisen 方程是计算物质晶格热振动对压力贡献的一种状态方程。在研究高压下固体中激波传播时,Grüneisen 状态方程是最常用的状态,通常的描述形式如下^[2]

$$p = p_c + \frac{\Gamma(V)}{V}(E - E_c) \quad (13)$$

$$\Gamma(V) = \left(\frac{b}{2} - \frac{2}{3}\right) - \frac{V}{2} \frac{d^2[p_c(V)V^b]/dV^2}{d[p_c(V)V^b]/dV} \quad (14)$$

式中, p 为压力; p_c 为冷压; E 为内能; E_c 为冷能;

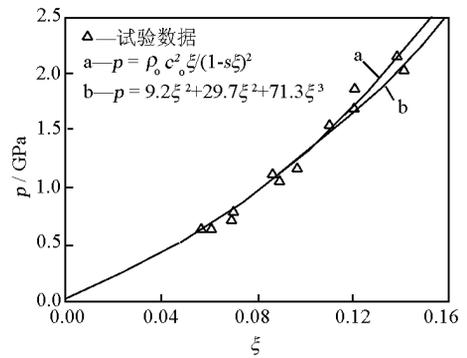


图 5 聚酯材料的 $p - \xi$ 关系曲线

Fig. 5 Curve of impact stress versus bulk strain for polyester

$\Gamma(V)$ 为表征热压与晶格热能之比的 Grüneisen 系数; b 为表征固体中点阵振动特性的一个材料常数。

在绝热冲击状态下,Grüneisen 状态方程可以写为如下形式^[3]

$$p = p_H + \frac{\Gamma(V)}{V}(E - E_H) \quad (15)$$

在激波作用下, $E_H \gg E_0$, $p_0 = 0$, 由(3)式计算出 E_H , 代入式(15), 得到

$$p = p_H \left[1 - \frac{\Gamma(V)}{V} \frac{\xi}{2\rho_0} \right] + \frac{\Gamma(V)}{V} E \quad (16)$$

上式即为由 Hugoniot 曲线间接得到的该材料的 Grüneisen 状态方程, p_H 由实验确定, 见式(11)。现在只需计算 $\Gamma(V)$ 系数即可。

胡金彪^[4]等提出可按下式计算材料的 Grüneisen 系数:

$$\Gamma(V_{0k}) = 2s - \left(\frac{b}{2} + \frac{2}{3}\right) \quad (17)$$

式中, s 为冲击实验得到的 Hugoniot 参数, 见式(7)。当采用 Slater 模型时, $b = 0$ 。 V_{0k} 为零温下材料比容。 $\Gamma(V)$ 是 V 的弱函数, 假定材料从零温到室温范围内的膨胀比的变化不大, 近似认为 $V_{0k} = V_0$, 可得

$$\Gamma(V_0) = 2s - \frac{2}{3} \quad (18)$$

由式(18)计算得到 $\Gamma_0 = \Gamma(V_0) \approx 2.55$ 。 R. W. McQueen^[5]等人提出的 $\Gamma(V)$ 的简化表达式:

$$\rho\Gamma(V) = \rho_0\Gamma_0 \quad (19)$$

结合体应变的定义, 可得

$$\Gamma(V) = \frac{D - u}{D} \Gamma_0 \quad (20)$$

根据表 1 的实验结果, 代入上式计算得到 $\Gamma(V) - \xi$ 之间的关系, 如图 6 所示。

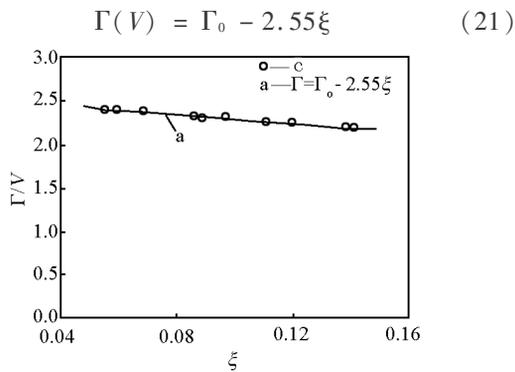


图6 聚酯材料的 $\Gamma(V) - \xi$ 变化关系
Fig. 6 Curve of Grüneisen coefficient versus bulk strain for polyester

4 结语

用轻气炮平板碰撞实验技术,对聚酯材料的 Hugoniot 状态方程进行了实验测定。撞击速度范围为 323 ~ 526 m/s,相应的靶中撞击应力范围为 632 ~ 2 137 MPa。得到聚酯中的激波速度 D 和指点速度 u 的 Hugoniot 线性关系为

$$D = 2\,537 + 1.61u \quad (\text{m/s})$$

通过拟合得到了聚酯的激波峰值压力 p 与体应变 ξ 的多项式状态方程为

$$p = 9.2\xi + 29.7\xi^2 + 71.3\xi^3 \quad (\text{GPa})$$

计算了聚酯材料 Grüneisen 状态方程中的常压 Grüneisen 系数,即 $\Gamma_0 \approx 2.55$;给出了 $\Gamma(V)$ 与体应变 ξ 之间的变化关系:

$$\Gamma(V) = \Gamma_0 - 2.55\xi$$

参考文献

- [1] 经福谦. 实验物态方程导引(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 81 - 82
- [2] 谭 华. 实验冲击波物理导论[M]. 北京: 国防科技大学出版社, 2007. 50 - 51
- [3] 周 南, 乔登江. 脉冲束辐照材料动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 199 - 200
- [4] 胡金彪, 经福谦. 用冲击压缩数据计算物质结合能的一个简便解析方法[J]. 高压物理学报, 1992, 4(3): 175 - 181
- [5] McQueen R W, Marsh S P, Taylor J W, et al. The Equation of State of Solids from Shock Wave Studies[M]. New York and London: Academic Press, 1970. 294 - 415

The experimental study on the equation of state for polyester

Lin Peng, Wang Changli, Li Yan,
 Liu Wenxiang, Wang Dengwang

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

[Abstract] The shock wave propagation characteristics of the polyester have been measured by recording the shock wave profile produced by the impact of projectiles accelerated in a light gas gun. The impact velocities in the experiments were from 323 m/s to 526 m/s, and the corresponding peaks of impact stresses in the targets were from 0.632 to 2.137 GPa. The Hugoniot relation, expressed as the curve of shock wave velocity versus particle velocity, obtained from the experiments shows linearity in the testing stress range. The polynomial equation of state is obtained by regression of the experimental data and the Grüneisen coefficient is calculated.

[Key words] polyester; equation of state; Hugoniot; the shock wave