DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-1046-05

PTFE 材料在高应变率冲击下的力学性能*

李顺平[1,2],冯顺山[2],薛再清[1],涂 建[1]
(1.北京航天长征飞行器研究所,北京 100076;
2.北京理工大学,北京 100081)

摘要:聚四氟乙烯(PTFE)在高速碰撞或者爆炸加载时的应变率可高达 10^6 s^{-1},高应变率下 PTFE 材料的力学响应会对其材料性能产生较大影响。本文中采用压剪炮试验系统(PSPI)测试了 PTFE 材料在高应变率(10^5~10^6 s^{-1})下的压缩力学性能,实验中碳化钨(WC)飞片板以一定速度撞击由前靶板、试件和后靶板组成的三明治结构,并采用激光干涉仪记录后靶板自由面的速度变化。对实验结果处理后得到该 PTFE 材料的应力应变数值,并拟合得到应力应变曲线。本研究对 PTFE/金属复合材料制成的动能侵彻体强度及其冲击碎化机理的分析具有指导意义。

关键词:聚四氟乙烯(PTFE);高应变率;压剪炮试验系统(PSPI);应力应变曲线
中图分类号:O347.3 **国标学科代码**:13015 **文献标志码**:A

聚四氟乙烯(PTFE)属于含氟材料,具有出色的材料性能。近年来,对 PTFE/金属复合材料制成的动能侵彻体及破片的研究十分活跃,包括毁伤能力和材料应力应变关系。

关于聚合物材料应力应变性质的第一项研究通常认为是 S. C. Chou 等[1]进行的,他们采用"中等应变率机"和分离式霍普金森压杆(SHPBs)研究了聚甲基丙烯酸甲酯(polymethylmethacrylate),乙酸丁酸纤维素(cellulose acetate butyrate),聚丙烯(polypropylene)和尼龙 66 四种材料的力学行为。E. N. Brown 等[2]研究了几种形式的聚乙烯(polyethylene)。S. M. Walley 等[3]研究了大量室温下应变率为 10^{-2}~10^4 s^{-1}时的聚合物行为,他们特别注意了使用适当的润滑剂和试件尺寸来减少摩擦和惯性。P. J. Rae 等[4]对应变率范围为 10^{-4}~1 s^{-1}时的 PTFE 压缩力学性质进行了测试,所用实验装置为 SHPBs,他们发现 PTFE 压缩力学性质受应变率影响很大。A. Khan 等[5]对 PTFE 材料的应变率强化、蠕变和松弛行为进行了实验研究和数值模拟,提出了一种黏弹塑性本构模型来描述其在该应变率范围下的力学行为。J. L. Jordan 等[6]研究了应变率范围为 10^{-3}~10^5 s^{-1}时的 PTFE 压缩力学性质,并采用 Zerillie-Armstrong 本构模型[7]来分析实验结果。然而 PTFE 材料在使用过程中处于爆炸载荷或局部高过载时,应变率可高达 10^6 s^{-1},对于更高应变率范围(10^5~10^6 s^{-1})的 PTFE 压缩力学性能研究成果未见公布。

本文中采用压剪炮试验系统(PSPI),对 PTFE 材料高应变率范围 10^5~10^6 s^{-1}的应力应变曲线进行研究,并通过拟合得到 PTFE 的应力应变关系,为相关动能弹或破片对目标的毁伤研究提供基础。

1 实验方法和实验方案

PSPI 实验装置如图 1 所示。实验过程中,弹托和飞片板以初速 v_0 撞击前靶板、PTFE 试件和后靶板组成的三明治结构,由法向位移干涉仪 NDI 和切向位移干涉仪 TDI[8]分别记录后靶板自由面法向速度和切向速度,在本次实验中只进行正碰撞,即只采用法向位移干涉仪 NDI 记录后靶板自由面法向速度。在实验的准备过程中,飞片板、前靶板和后靶板均采用碳化钨材料,用 WC#504 表示,其硬度和波阻抗都远远大于测试材料 PTFE,这三类靶板采用专门的磨平设备进行加工,经平面度测量以保证靶板

* **收稿日期**:2016-04-25;**修回日期**:2016-07-31
基金项目:国家自然科学基金项目(11202028);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20121101110012)
第一作者:李顺平(1986—),女,博士后,lishp@14.calt.casc。

的表面符合平面度要求。加工后符合要求的飞片板和弹托粘合在一起，弹托的前端具有一定的倾斜角，斜碰撞的角度就是由弹托的倾斜角确定的。前靶板、PTFE 试件和后靶板用 4 个螺钉固定在一起，实验时固定于特制的靶托上。在前靶板上设计有测夹角探针，目的是测量飞片板与前靶板碰撞瞬间二者之间的夹角，夹角越小说明二者碰撞时平行度越好，当夹角过大时，实验数据无效。后靶板的自由面需要抛光并形成镜面，用于反射激光，反射的激光经过干涉仪记录，可以计算后靶板的自由面速度。

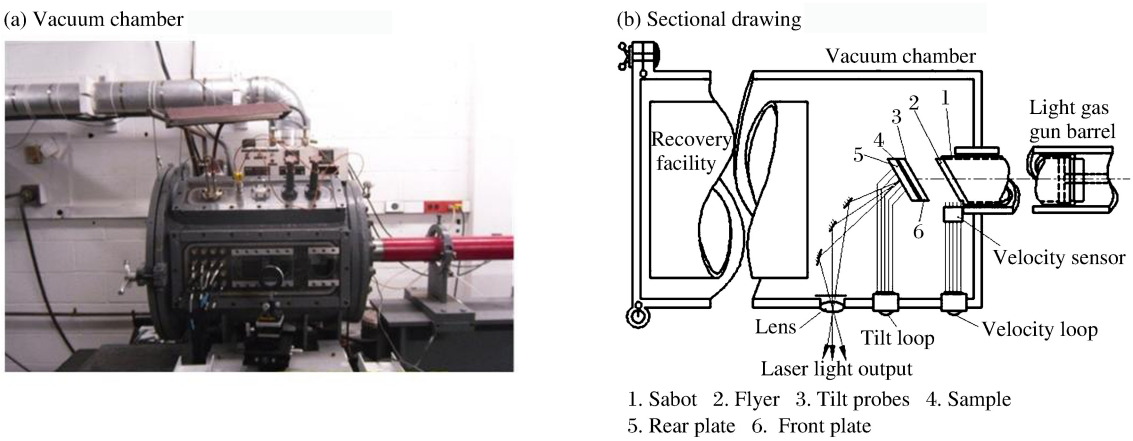

图 1　PSPI 试验系统真空密闭测试箱及其剖面图

Fig. 1　Vacuum chamber and its sectional drawing of PSPI facility setup

实验参数如表 1 所示，表中 h 为试件 PTFE 薄板厚度；h_{front} 为前靶板厚度；h_{rear} 为后靶板厚度；h_{flyer} 为飞片板厚度；$\varnothing$ 为前靶板、后靶板、飞片板和 PTFE 薄板的直径，四者具有相同的直径；v_0 为飞片板与前靶板撞击时的速度，在撞击的瞬间由图 1(b)“测量飞片板初速回路”测量；倾斜角为飞片板与前靶板撞击时的夹角，实验过程中由图 1(b)“测夹角探针”测量。

表 1　实验参数

Table 1　Experimental parameters for PSPI test

实验号	h/mm	h_{front}/mm	h_{rear}/mm	h_{flyer}/mm	$\varnothing$/mm	靶板材料	v_0/(m·s^{-1})	倾斜角/rad
SL1301	0.4	4.016	4.026	4.021	50	WC＃504	186.7	＜0.7

2　实验结果与分析

根据一维弹性波理论，试件 PTFE 中正应力 σ 可表示为：

$$\sigma(t)=-\rho c_1\frac{v_{\mathrm{fs}}(t+h_{\mathrm{rear}}/c_1)-v_{\mathrm{fs}}(t-h_{\mathrm{rear}}/c_1)}{2} \tag{1}$$

式中：v_{fs} 为自由面法向速度，$v_{\mathrm{fs}}(t+h_{\mathrm{rear}}/c_1)$ 为 $(t+h_{\mathrm{rear}}/c_1)$ 时刻的自由面法向速度，$v_{\mathrm{fs}}(t-h_{\mathrm{rear}}/c_1)$ 为 $(t-h_{\mathrm{rear}}/c_1)$ 时刻的自由面法向速度，ρ 和 h_{rear} 为后靶板密度和厚度，c_1 为后靶板纵波波速。

试件的应变率可用下式计算：

$$\dot{\varepsilon}=\frac{v_{\mathrm{fs}(t+h/c_1)}-v_0}{h} \tag{2}$$

式中：v_0 为飞片板初速，h 为试件 PTFE 薄板厚度。

图 2 所示为后靶板自由面法向速度变化。由于实验材料 PTFE 的声阻抗远小于 WC＃504，冲击过程中，WC＃504 可视为刚体不发生变形，只有试件 PTFE 发生变形，我们可以观察到在后靶板自由表

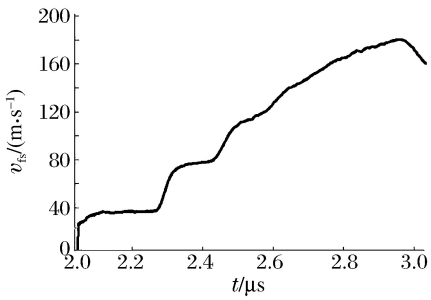

图 2　后靶板自由面法向速度变化

Fig. 2　Normal velocity of free surface of rear plate vs. time of PSPI test

面处法向速度回荡的历史过程，该历史过程反映了 PTFE 材料的变形过程。法向速度-时间曲线用于确定依赖于压力的纵波。

弱冲击波在试件中传播回荡过程的每一步都包含波的一个往返。图 3 为纵波在靶板和试件中振荡的 t-x 图，每一个平台 n 及其持续时间 Δt_n 为：

$$\Delta t_n = \frac{h}{U^{n-1/2}} + \frac{h}{U^{n+1/2}} \tag{3}$$

式中：$U^{n-1/2}$ 是材料应力状态从 σ_{n-1} 跳转到 σ_n 时的波速，$U^{n+1/2}$ 是材料应力状态从 σ_n 跳转到 σ_{n+1} 时的波速。在图 3(b) 中应力时变曲线中点 σ_n 处的斜率为 $\rho_0 [c(\sigma_n)]^2$，其中 $c(\sigma_n)$ 是材料在应力为 σ_n 时的声速。连接 σ_{n-1} 和 σ_n 的直线斜率为 $\rho_0 (U^{n-1/2})^2$，连接 σ_n 和 σ_{n+1} 的直线斜率为 $\rho_0 (U^{n+1/2})^2$，因此，

$$U^{n-1/2} = \sqrt{\frac{\sigma_n - \sigma_{n-1}}{\rho_0 (\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1})}} \tag{4}$$

$$U^{n+1/2} = \sqrt{\frac{\sigma_{n+1} - \sigma_n}{\rho_0 (\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_n)}} \tag{5}$$

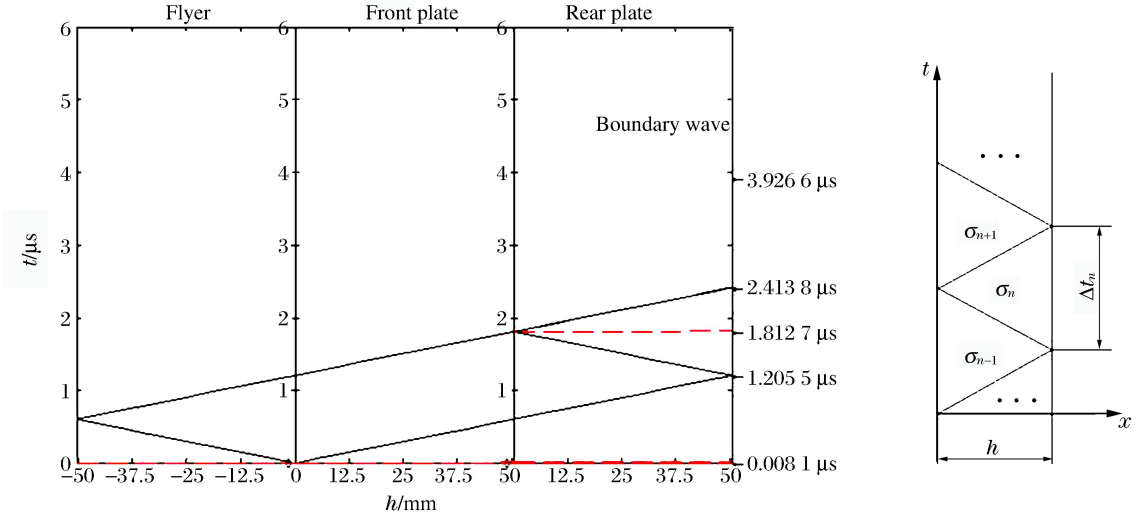

图 3 纵波在飞片板、前靶板和后靶板以及试件中的传播示意图

Fig. 3 t-x diagram of longitudinal waves propagation in plates and sample

由式(1)～(3)可得：

$$\sqrt{\frac{\sigma_{n+1} - \sigma_n}{\rho_0 (\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_n)}} = \frac{h}{\Delta t_n - h \Big/ \sqrt{\dfrac{\sigma_n - \sigma_{n-1}}{\rho_0 (\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1})}}} \tag{6}$$

$U^{n-1/2}$ 和 $U^{n+1/2}$ 大致相等，$c_{n-1/2}$ 和 $c_{n+1/2}$ 可视为应力中间点，$\sigma_{n-1/2} = (\sigma_{n-1} + \sigma_n)/2$ 和 $\sigma_{n+1/2} = (\sigma_n + \sigma_{n+1})/2$ 时的声速。再加上 $\dfrac{h}{c_{n-1/2}} - \dfrac{h}{c_{n+1/2}}$ 可以忽略，则式(4) 满足 $c_{n+1/2} \to 2h/\Delta t_n$ 和 $c_{n+1/2} \to c_{n-1/2}$ 的解为

$$c_{n+1/2} = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{3h}{\Delta t_n} + \frac{h^2}{(\Delta t_n)^2 c_{n-1/2}}\right) + \sqrt{\left(\frac{3h}{\Delta t_n} + \frac{h^2}{(\Delta t_n)^2 c_{n-1/2}}\right)^2 - \frac{12h^2}{(\Delta t_n)^2}}\right] \tag{7}$$

根据测量所得回程时间 Δt_n 和初始波速 $c_{1/2}$，式(5)可用来产生波速 $c_{n+1/2}$ ($n = 1, 2, 3, \cdots$)，其中 n 的最大值取决于图 2 中所记录的清晰可辨的反射波(每个反射波在图中表现为一个平台)。选择的初始波速用来提供较低压力下波速向反射压缩波的波速的平稳过渡，其值取为 1 840 m/s,，计算结果声速随应力的变化如图 4 所示。

应力应变曲线可以通过对下式积分得到，如图 5 所示。

$$\mathrm{d}\varepsilon = \frac{\mathrm{d}\sigma}{\rho c^2(\sigma)} \tag{8}$$

基于实验结果拟合得到的应力应变关系为：

$$\sigma = 10.24 e^{-((\varepsilon-0.3396)/0.1295)^2} \tag{9}$$

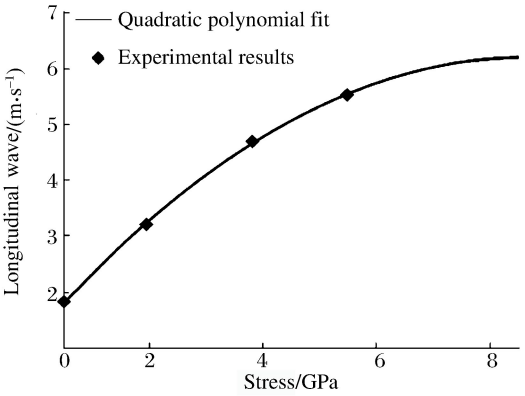

图 4 声速随应力的变化

Fig. 4 Longitudinal wave speed vs. pressure

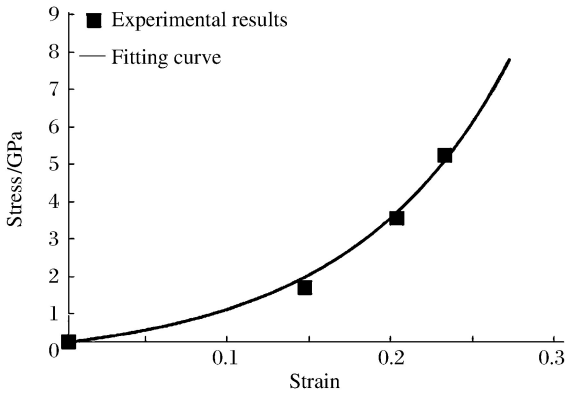

图 5 4 mm 厚 PTFE 材料在 $10^5 \sim 10^6$ s^{-1} 应变率下的应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain profile for PTFE film of 4 mm thickness across strain rate $10^5 \sim 10^6$ s^{-1} of PSPI test

3 结　论

对应变率范围为 $10^5 \sim 10^6$ s^{-1}的 PTFE 材料采用压剪炮试验系统来测试其压缩应力应变关系，经过对实验结果的拟合得到 PTFE 材料应力应变关系为 $\sigma = 10.24 e^{-((\varepsilon-0.3396)/0.1295)^2}$ 。PTFE 材料应力应变特性研究为 PTFE/金属复合材料制成的动能侵彻体弹道实验应变率与速度关系的建立提供基本数据，是研究 PTFE/金属反应破片冲击碎化机理的前提。

另外，一次 PSPI 实验对于得到 PTFE 高应变率 $10^5 \sim 10^6$ s^{-1}时的应力应变曲线并不太充分，因此，还可改变初始条件进行多次重复实验。

感谢美国布朗大学 Clifton 教授和焦桐教授对 PSPI 实验设备的提供和指导以及对实验结果处理方法的指导。

参考文献：

[1] Chou S C, Robertson K D, Rainey J H. The effect of strain rate and heat developed during deformation on the stress-strain curve of plastics[J]. Experimental Mechanics, 1973,13(10):422-432.

[2] Brown E N, Willms R B, Gray III G T, et al. Influence of molecular conformation on the constitutive response of polyethylene: a comparison of HDPE, UHMWPE, and PEX[J]. Experimental Mechanics, 2007,47(3):381-393.

[3] Walley S M, Field J E. Strain rate sensitivity of polymers in compression from low to high rates[J]. DYMAT Journal, 1994,1(3):211-227.

[4] Rae P J, Dattelbaum D M. The properties of poly(tetrafluoroethylene) (PTFE) in compression[J]. Polymer, 2004,45(22):7615-7625.

[5] Khan A, Zhang H. Finite deformation of a polymer: experiments and modeling[J]. International Journal of Plasticity, 2001,17(9):1167-1188.

[6] Jennifer L J, Clive R S. Compressive properties of extruded polytetrafluoroethylene[J]. Polymer, 2007,48(14):4184-4195.

[7] Zerilli F J, Armstrong R W. A constitutive equation for the dynamic deformation behavior of polymers[J]. Journal of Materials Science, 2007,42(12):4562-4574.

[8] Kim K S, Rodney J C, Prashant Kumar. A combined normal- and transverse-displacement interferometer with an application to impact of ycutquartz[J]. Journal of Applied Physics, 1977,48(10):4132.

Mechanical properties of PTFE at high strain rate

Li Shunping[1,2], Feng Shunshan[2], Xue Zaiqing[1], Tu Jian[1]
(1. *Beijing Institute of Space Long March Vehicle*, *Beijing* 100076, *China*;
2. *Beijing Institute of Technology*, *Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The mechanical properties of polyetrafluoroethylene (PTFE), which is being used increasingly in diverse applications owing to its many attractive properties, are important for applications involving either high-velocity impact or blast loading at very high strain rates (of the order of 10^6 s^{-1}). In this work, for high strain rates of $10^5 \sim 10^6$ s^{-1}, the PTFE dynamic pressure experiment was conducted using the pressure-shear plate-impact (PSPI) facility in which a tungsten-carbide (WC) flyer impacted a target assembly consisting of a thin PTFE plate sandwiched between two hard (elastic) WC plates. The velocity at the free surface of the target assembly was measured using the laser interferometry, an effective method was adopted to analyze the experimental results to obtain the values of the stress and strain at four points, and the stress strain relationship was fitted. The investigation has significance for the analysis of the strength and impact crushing performance of PTFE/metal reactive fragments.

Keywords: polyetrafluoroethylene (PTFE); high strain rate; pressure-shear plate-impact (PSPI); stress-strain curve

(责任编辑 曾月蓉)