

文章编号: 1001-1455(2010)04-0439-06

PTFE/Al 含能复合物的本构关系*

徐松林¹, 阳世清¹, 张 炜¹, 卢芳云²

(1. 国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 室温下, 利用万能材料试验机和分离式霍普金森压杆获得了 PTFE/Al 含能复合物在应变率 $10^{-3} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 范围内的压缩应力应变曲线。通过对不同应变率下力学性能的分析, 初步建立了材料基于 Johnson-Cook 塑性模型的压缩本构方程, 考虑了材料的应变硬化效应和应变率效应。利用该方程进行的 PTFE/Al 弹丸侵彻钢靶板的数值模拟结果与实际情况较符合, 验证了该方程的可靠性和合理性, 对 PTFE/Al 材料的实际应用也具有一定的指导作用。

关键词: 固体力学; 本构关系; 压缩; PTFE/Al; 含能材料

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 130·15

文献标志码: A

1 引言

材料的本构关系反映了材料在外界因素作用下的力学响应行为。本质上讲, 材料的本构关系应体现材料的微、细观结构的变形规律^[1]。但是, 由于还没有搞清楚材料微、细观结构的变形机制, 目前只能建立各种近似的本构模型来描述材料的变形规律, 如基于试验结果的经验型的本构模型等^[2-3]。

金属-氟聚合物含能复合物是一类新型的高级含能材料, 又被称为反应材料或冲击引发的含能材料, 力学响应是该类材料的重要性能之一^[4]。目前对于典型的反应材料如 PTFE/Al, 相关研究多限于材料制备、组成及反应的冲击引发、反应效率等基本性能表征^[5-7], 对其动态压缩性能及本构方程的研究正在开展中^[8-9], 还未见有关该类材料冲击试验数值模拟的公开报道。

因此, 本文中利用万能材料试验机和分离式霍普金森压杆(SHPB)进行经压制烧结的 PTFE/Al 材料的准静态和动态压缩试验, 对其应变硬化效应、应变率效应进行分析, 初步建立材料基于 Johnson-Cook 塑性模型的应力应变本构关系, 并进行该材料弹丸侵彻薄钢靶板的数值模拟。

2 试验

按照冷压烧结成型工艺^[7], 制备 PTFE/Al 试样, 其中 PTFE 的质量分数为 73.5%, Al 的质量分数为 26.5%。准静态压缩试验是在青山牌 WDW-100B 微机控制万能材料试验机上进行的, 试样尺寸为 $\varnothing 6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$, 压杆试验速度为 $2 \sim 30 \text{ mm/min}$, 对应的应变率为 $6 \sim 84 \text{ ks}^{-1}$ 。采用自行研制的 SHPB 实现高应变率动态加载^[10]。试验中所有的杆均为 LC4 铝杆, 直径为 20 mm, 入射杆长 2 m, 透射杆长 1 m, 子弹长 200 mm。SHPB 压缩试样尺寸为 $\varnothing 6 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 实现的应变率为 $1.2 \sim 8.0 \text{ ms}^{-1}$ 。本文中压缩强度指压缩试验过程中试样所承受的最大压缩应力, 临界应变指最大压缩应力时试样单位原始高度的改变。

3 结果与分析

3.1 准静态压缩

对 PTFE/Al 材料进行了 5 种应变率加载下的准静态压缩试验, 得到了不同应变率下的应力应变

* 收稿日期: 2009-06-30; 修回日期: 2009-12-01

作者简介: 徐松林(1983—), 男, 博士研究生。

曲线,并进行了同一应变率下的重复试验,见图1,结果表明试验重复性较好,试验误差为1.45%~4.02%。

PTFE/Al材料是1种通过高分子粘结而成的颗粒增强复合材料,属于典型的硬而韧聚合物基复合材料,其力学性能取决于基体以及基体/填料形成的界面。PTFE/Al材料的应力应变曲线可分为3个阶段:弹性阶段、强化阶段和应变软化阶段。其力学响应特点是:在加载开始就表现出非线性行为,弹性阶段很短,主要为PTFE键长键角产生的形变以及链段的运动,该阶段的损伤演化是可逆的,即卸载后可恢复;而在载荷的继续作用下,无定形区的分子链沿应力取向产生轻微滑移和应变诱发再结晶化,但也未出现明显的屈服行为,而后结晶区的分子链也开始产生滑移,出现微裂纹的摩擦滑移、弯折扩展,该阶段的损伤演化发展进入不可逆阶段;当载荷达到最大值时,出现应变软化现象,材料形成裂纹开裂以至于最终失效。

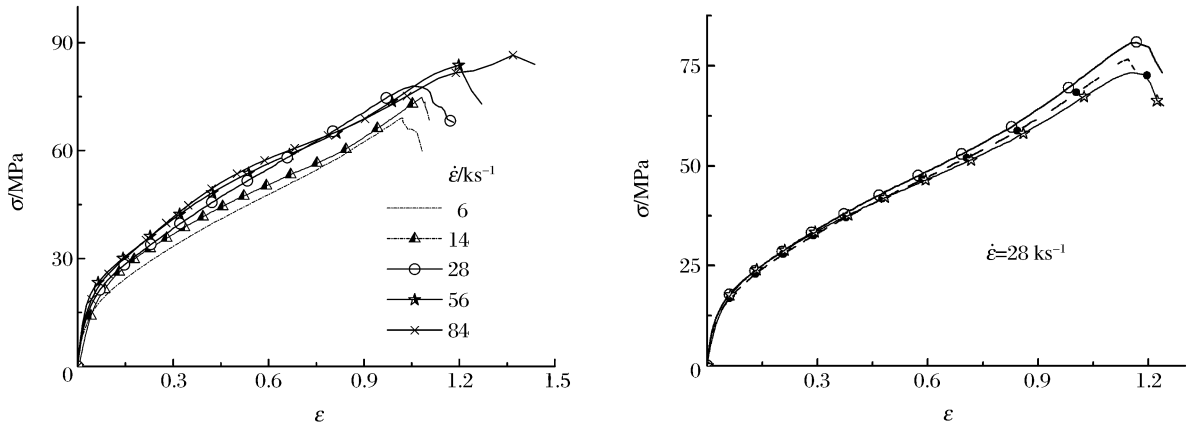


图1 PTFE/Al材料的准静态压缩应力应变曲线

Fig. 1 Quasi-static compressive stress-strain curves of the PTFE/Al material

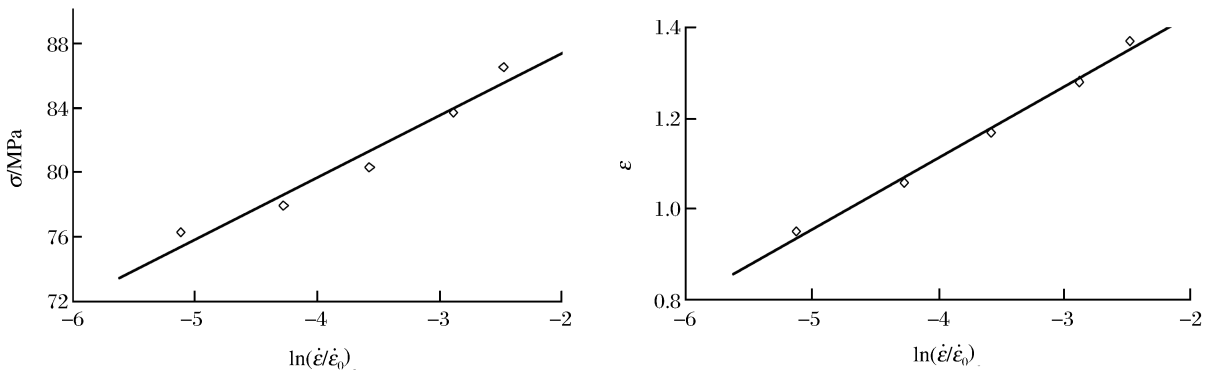


图2 准静态压缩参数与相对应变率对数的关系

Fig. 2 Relation between quasi-static compressive parameters and logarithmic strain rates

PTFE/Al材料在低应变率范围内的压缩强度和临界应变值具有应变率效应,其值与应变率成正比,弹性模量和硬化模量的应变率效应不明显,其值基本为一常数,弹性模量数值为约 260 ± 15 MPa,硬化模量为约 55 ± 5 MPa。通过对准静态压缩曲线的拟合,可得出材料的应变硬化效应符合 $y = a + bx^c$ 的形式。

表1为不同应变率下PTFE/Al材料的力学性能参数,图2给出了材料准静态压缩强度、临界应变与相对应变率对数的关系。图2中拟合出的压缩强度(MPa)、临界应变的直线方程分别为

$$\sigma = 95 + 3.838 \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0) \tag{1}$$

$$\epsilon = 1.743 + 0.158 \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0) \tag{2}$$

式中: $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$, 为参考应变率。

表 1 不同应变率下 PTFE/Al 材料的准静态压缩参数

Table 1 Quasi-static compressive parameters for PTFE/Al material at different strain rates

$\dot{\epsilon}/\text{ks}^{-1}$	σ/MPa	ϵ	$\dot{\epsilon}/\text{ks}^{-1}$	σ/MPa	ϵ
6	76.3	0.95	56	83.7	1.28
14	77.9	1.06	84	86.5	1.37
28	80.3	1.17			

3.2 动态压缩

进行了 PTFE/Al 材料在 6 种不同应变率下的动态加载试验, 结果如图 3 所示, 试验同样具有良好的重复性, 试验误差为 2.02%~3.86%。

PTFE/Al 材料在动态加载下的应变率效应与准静态下的较一致, 压缩强度和临界应变随应变率的增加而增大, 弹性模量和硬化模量的应变率效应不明显。通过对不同应变率曲线同一应变值处的应力应变值的拟合, 可得到应变率对应力的影响具有明显的乘幂关系, 即符合 $y = (x/\dot{\epsilon}_0)^r$ 的形式。

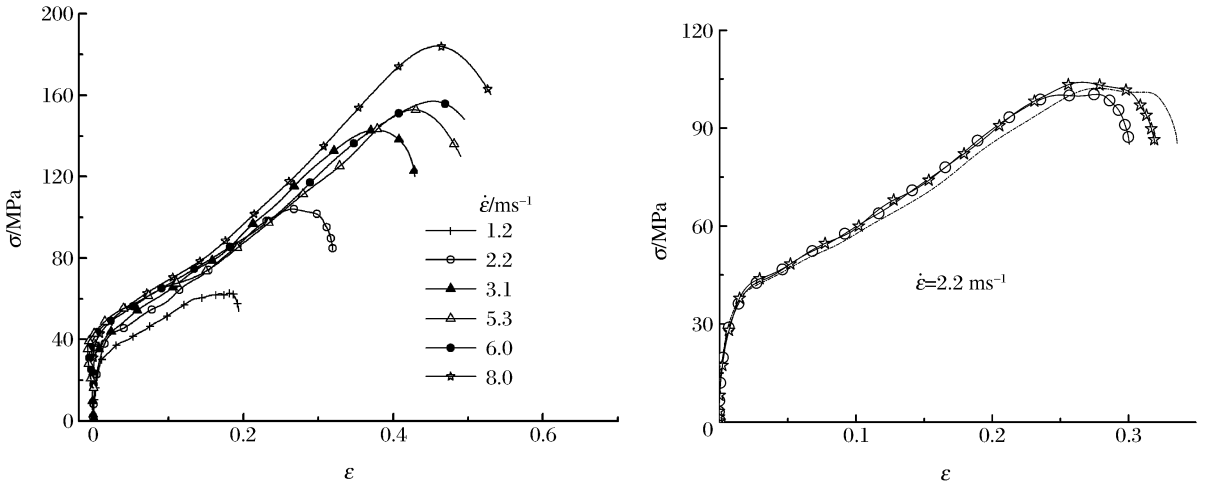


图 3 PTFE/Al 材料的动态压缩应力应变曲线

Fig. 3 Dynamic compressive stress-strain curves of the PTFE/Al materials

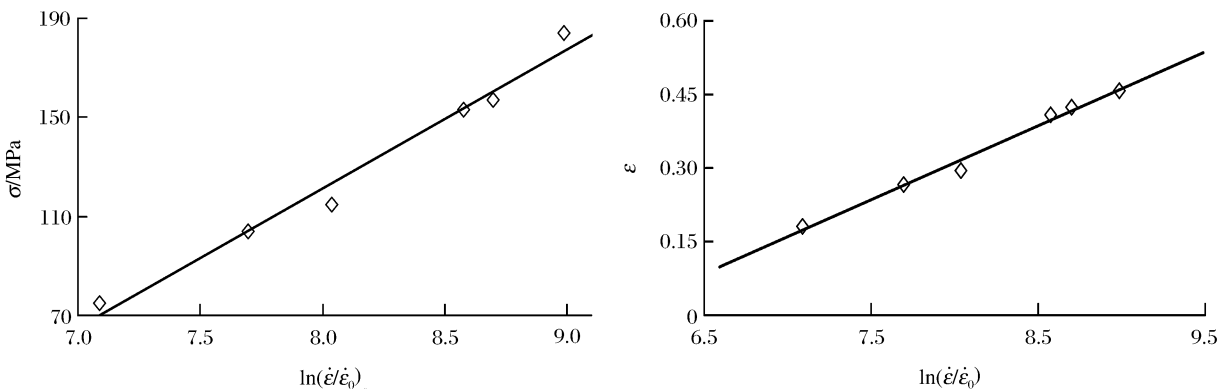


图 4 动态压缩参数与相对应变率对数的关系

Fig. 4 Relation between dynamic compressive parameters and logarithmic strain rates

表 2 为不同应变率下 PTFE/Al 材料的动态力学性能参数, 图 4 中给出了材料动态压缩强度、临界

应变与相对应变率对数的关系,图4中拟合出的压缩强度(MPa)、临界应变直线方程分别为

$$\sigma = 56.364 \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0) - 329.67 \quad (3)$$

$$\epsilon = 0.151 \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0) - 0.8946 \quad (4)$$

式中: $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$, 为参考应变率。

表2 不同应变率下 PTFE/Al 材料的动态压缩参数

Table 2 Dynamic compressive parameters for PTFE/Al material at different strain rates

$\dot{\epsilon}/\text{ms}^{-1}$	σ/MPa	ϵ	$\dot{\epsilon}/\text{ms}^{-1}$	σ/MPa	ϵ
2.2	104	0.266	6.0	157	0.424
3.1	110	0.295	8.0	184	0.458
5.3	153	0.408			

3.3 本构关系

通过上述分析可知,PTFE/Al 材料在弹性范围内的应变率效应不明显,基本服从胡克定律,可用 $\sigma = E_0 \epsilon$ 描述材料的力学行为,而在强化阶段的应力应变关系符合以下形式

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^r \quad (5)$$

式中: A 为屈服强度, B 、 n 为应变硬化参数, r 为经验性应变率敏感因数, $\dot{\epsilon}_0 = 6 \text{ ks}^{-1}$, 为参考应变率。且

$$A = A_2 \lg^2 \dot{\epsilon} + A_1 \lg \dot{\epsilon} + A_0$$

$$B = B_2 \lg^2 \dot{\epsilon} + B_1 \lg \dot{\epsilon} + B_0$$

$$n = n_1 \lg \dot{\epsilon} + n_0$$

式(5)中右边第1项反映材料的应变硬化效应,第2项则反映材料的应变率效应。

将式(5)代入图3中曲线进行拟合,得 $A_2 = -30.72 \text{ MPa}$, $A_1 = 238.17 \text{ MPa}$, $A_0 = -437.89 \text{ MPa}$, $B_2 = 174.41 \text{ MPa}$, $B_1 = -1093.5 \text{ MPa}$, $B_0 = 1800.61 \text{ MPa}$, $n_1 = 1.04$, $n_0 = -2.75$, $r = 0.0803$ 。

图5给出了PTFE/Al材料高应变率本构关系拟合结果,从拟合曲线看,所建立的本构方程基本能描述材料在强化阶段的力学行为(材料弱化之前),随着应变接近于临界应变,2组曲线的偏差稍增大。

3.4 数值模拟

选用LS-DYNA有限元软件模拟系统作为工作平台,模拟尺寸为 $\varnothing 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的PTFE/Al弹丸在 1.5 km/s 撞击速度下侵彻 3 mm 厚的45钢靶板的试验。PTFE/Al弹丸、钢靶板材料模型都选用JC模型,弹丸材料的JC本构方程为本文中构建,相关模型参数引用文献[9],钢靶板的本构方程和Grüneisen方程参考文献[11]。

弹丸的模拟穿孔(孔径 14.96 mm)与实际穿孔(尺寸 $16.5 \text{ mm} \times 14.3 \text{ mm}$)情况如图6所示。可以看出,模拟的弹丸穿孔和实测弹孔形状、尺寸都较接近,弹道的中间部分是近似直通的弹孔,孔径约为弹径的1.5倍,弹孔的一侧边缘有凸起的翻边,实际穿孔周围的黑色痕迹为PTFE/Al弹丸撞击靶板时引发反应形成的产物(主要为碳黑)。

但实测弹孔并非规则的圆形,可能是因为弹丸在空中飞行时翻滚,未能以端面撞击靶板。通过计算可以得出,模拟计算的穿孔面积(2.24 cm^2)稍小于实测穿孔面积(约 2.36 cm^2),这可能是由于PTFE/Al弹丸在侵彻靶板时产生的高温($>1.2 \text{ kK}$)和受到的剪切作用,导致PTFE/Al材料局部被引发了反

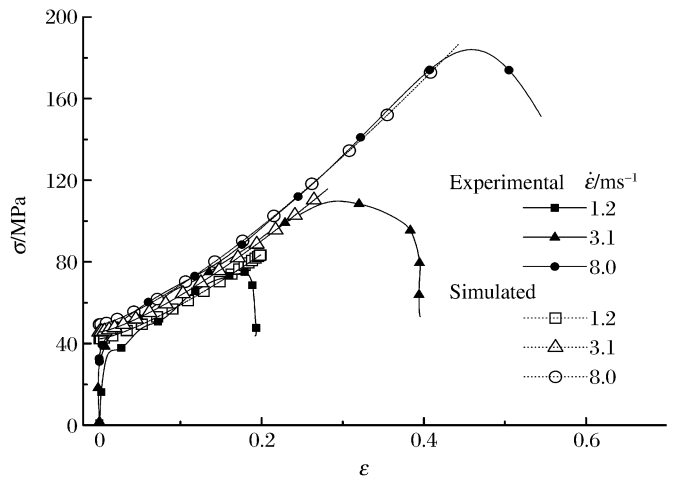


图5 PTFE/Al材料高应变率本构关系的曲线拟合

Fig. 5 Constitutive curves fitted for the PTFE/Al material's data at high strain rates

应,产生的高温高压气体减小了穿甲阻力,因此在靶板上的实际穿孔更大,而本文中建立的本构方程中未考虑材料在高速冲击下的反应特性。

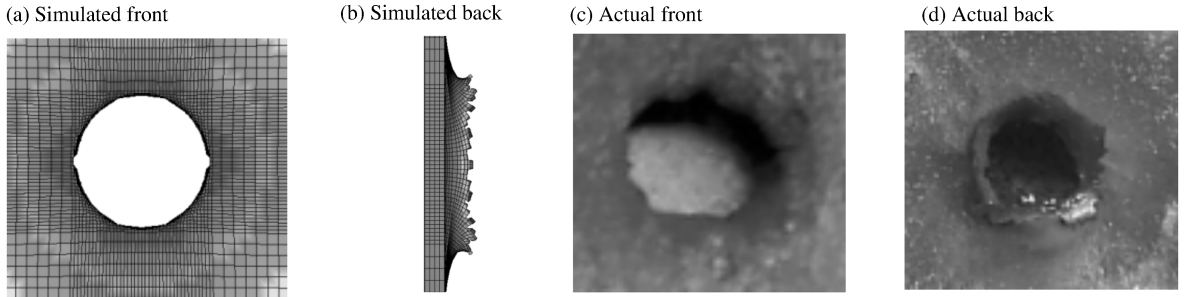


图6 撞击速度为 1.5 km/s 时弹丸的模拟与实际穿孔

Fig. 6 Simulated and actual perforations for a pressed PTFE/Al composite projectile with the 1.5 km/s impact velocity penetrating into a steel target

4 结 论

通过冷压烧结工艺制备了 PTFE/Al 试样,获得了材料在多个应变率下的准静态和动态压缩试验曲线,试验结果重复性较好。PTFE/Al 材料的弹性模量和硬化模量均没有表现出明显的应变率效应,但应力和应变值对应变率都比较敏感。获得了压缩强度-应变率和临界应变-应变率的数学关系,材料压缩强度、临界应变值都随着应变率的增加而增大。

基于动态加载下压缩应力应变曲线的分析,初步建立了 PTFE/Al 材料基于 Johnson-Cook 塑性模型的、考虑应变率效应和应变硬化效应的本构关系。所建立的本构方程能够较好地描述材料在动态加载下强化阶段(材料破坏前)的应力应变行为。

构建的本构方程能够较好地用来进行 PTFE/Al 材料侵彻靶板的数值模拟,模拟结果与实测结果吻合较好,验证了该本构方程的可靠性和合理性,还可为材料工程应用的相关数值计算提供有益的认识和试验依据。但建立的本构关系中未考虑材料反应因素的影响,因此还需要做进一步深入细致的工作。

感谢赵鹏铎博士在材料的 SHPB 动态性能测试中给予的帮助。

参考文献:

- [1] Bischoff P H, Perry S H. Compressive behavior of concrete at high strain rate[J]. *Materials and Structures*, 1991, 24(6):425-450.
- [2] 罗景润. PBX 损伤、断裂及本构关系研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2001.
- [3] 吴会民,卢芳云. 一种高聚物粘结炸药和 B 炸药的本构关系研究[J]. *高压物理学报*, 2005, 19(2):139-144.
WU Hui-min, LU Fang-yun. Research on constitutive relation of a polymer bonded explosive and pressed Comp. B [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2005, 19(2):139-144.
- [4] Rose M T, Doll D W, Hodgson J R, et al. Reactive material enhanced projectiles and related methods[P]. *Boliven Patents: US7603951*, 2005-03-14.
- [5] 张彤. 含能破片材料的制备及毁伤性研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2006.
- [6] WANG Hai-fu, LIU Zong-wei, WANG Hui, et al. Impact-initiated characteristics of reactive material fragments [C]//*Proceeding of the 14th International Detonation Symposium*. Xi'an, China, 2008:429-432.
- [7] 阳世清,徐松林,张彤. PTFE/Al 反应材料制备工艺及性能研究[J]. *国防科技大学学报*, 2008, 30(6):512-516.
YANG Shi-qing, XU Song-lin, ZHANG Tong. Preparation and performance of PTEF/Al reactive materials[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2008, 30(6):512-516.
- [8] Ames R G. Energy release characteristics of impact-initiated energetic materials[C]//Thadhani N N, Armstrong R W, Gash A E, et al. *Materials Research Society Symposium Proceedings: Multifunctional Energetic Materials*.

2006,896:123-132.

- [9] Raftenberg M N, Mock Jr W, Kirby G C. Modeling the impact deformation of rods of a pressed PTFE/Al composite mixture[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008,35(12):1735-1744.
- [10] 卢芳云,林玉亮,王晓燕,等. 含能材料的高应变率响应试验[J]. 火炸药学报,2006,29(1):1-4.
LU Fang-yun, LIN Yu-liang, WANG Xiao-yan, et al. Experimental investigation on dynamic response of energetic materials at high strain rate[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006,29(1):1-4.
- [11] 何涛,文鹤鸣. 球形弹对金属靶板侵彻问题的数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2006,26(5):456-461.
HE Tao, WEN He-ming. Computer simulations of the penetration of metal targets by spherical-nosed projectiles [J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(5):456-461.

A constitutive relation for a pressed PTFE/Al energetic composite material *

XU Song-lin¹, YANG Shi-qing¹, ZHANG Wei¹, LU Fang-yun²

- (1. College of Aeronautic and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;
2. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China)

Abstract: The compressive behaviors of a pressed PTFE/Al energetic composite material were experimentally investigated by split Hopkinson pressure bars and quasi-static behaviors by a universal testing machine at room temperature. Stress-strain curves of the material were obtained in the strain rate range from 10^{-3} s^{-1} to 10^3 s^{-1} . According to the analysis on the compressive behavior at different strain rates, the constitutive relation considering strain-hardening effect and strain rate effect were developed based on the Johnson-Cook plastic model. The penetration of a pressed PTFE/Al composite projectile into a steel target was numerically simulated by using the developed constitutive relation. The simulated results are close to the experimental results, which validates the reliability and rationality of the developed constitutive relation, and can be used to instruct the application of the PTFE/Al material.

Key words: solid mechanics; constitutive relation; compression; PTFE/Al; energetic composite material

* Received 30 June 2009; Revised 1 December 2009

Corresponding author: XU Song-lin, xsl_1217@163.com