

文章编号:1006-9941(2009)04-0459-04

活性材料 PTFE/Al 动态压缩性能

赵鹏铎¹, 卢芳云¹, 李俊玲¹, 陈 荣¹, 徐松林², 阳世清²

(1. 国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073;

2. 国防科技大学航天材料与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要:采用分离式霍普金森压杆(SHPB)实验技术,研究两种不同配比的聚四氟乙烯/铝(PTFE/Al)活性材料(PA265 和 PA35)在高应变率下的力学压缩性能与加载反应性能,对比分析了铝含量不同对 PTFE/Al 活性材料的屈服强度,破坏性能,反应性能的影响。研究表明:两种 PTFE/Al 活性材料存在应变率效应,在应变率 1000 ~ 8000 s⁻¹ 范围,PA265 的屈服应力为 32 ~ 44 MPa,PA35 的屈服应力为 40 ~ 55 MPa。铝含量越高,PTFE/Al 的屈服强度越高;在应变率 3100 ~ 5800 s⁻¹ 范围内,两种材料的破坏应力基本相同,约为 143 ~ 153 MPa;PA265 和 PA35 的临界反应应力分别为 157,163 MPa;铝粉含量不能高于 35%,否则由于缺少足够的氧化剂(PTFE)而普遍出现不完全燃烧反应的现象。

关键词:爆炸力学;分离式霍普金森压杆(SHPB);高应变率;活性材料;聚四氟乙烯(PTFE)

中图分类号:TJ55;O389

文献标识码:A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.04.020

1 引言

活性材料(reactive materials)通常是由两种或两种以上非炸药材料混合而成,例如聚合物/金属或金属/金属的混合物。正常情况下其组分呈现惰性,彼此不发生反应。聚四氟乙烯/铝(PTFE/Al)是应用广泛的一类活性材料。在强冲击作用下,活性材料迅速燃烧或者爆炸,同时释放出大量的化学能。活性材料的这一动载反应特性使其被广泛地应用于战斗部。例如,防空破片战斗部利用活性材料破片穿入目标飞机内部进行化学反应,对目标造成灾难性的结构破坏;变形装药战斗部利用活性材料破片进入目标后提高后效作用;侵彻战斗部将部分结构的惰性材料换成活性材料,增加毁伤效果;无炸药炮弹装填活性材料代替炸药,等等。活性材料应用于战斗部的优点在于:当含有活性材料的高速射弹或破片撞击目标时,活性材料迅速反应并释放出大量化学能,对目标造成化学能和机械能的双重毁伤效果。活性材料破片质量轻,含能高,如果用其替代惰性破片可以有效解决惰性破片战斗部对其自身的体积和装药量的限制,同时安全性能较好。

由于战斗部内活性材料的受载过程是高应变率的动载过程,所以研究活性材料在高应变率下的动态力学性能以及受载响应行为,对于合理设计活性材料以

及优化战斗部结构都是至关重要的,而国内外关于这方面的公开文献还比较少^[1-3]。

分离式霍普金森压杆(SHPB)实验技术^[4-7]被认为是获得材料在 10² ~ 10⁴ s⁻¹ 应变率范围内本构关系的最主要实验手段。本实验利用 SHPB 实验技术对两种配比的 PTFE/Al(PA265 和 PA35)进行了动态单轴实验,给出了应变率为 1000 ~ 8000 s⁻¹ 范围的应力应变曲线,比较了它们的屈服强度以及破坏应力,实验获得了这两种 PTFE/Al 活性材料的临界反应应力。

2 实验

两种配比的活性材料 PA265 和 PA35 的基本组成是聚四氟乙烯/铝(PTFE/Al),其中 PA265 活性材料含铝 26.5%,PA35 含铝 35%。试样制作过程为:将 Al 与 PTFE 粉末混合,然后利用特制模具压制,最后烧结而成。试样采用 $\Phi 6$ mm \times 3 mm, $\Phi 10$ mm \times 5 mm 两种尺寸,分别实现不同应变率,如图 1 所示。

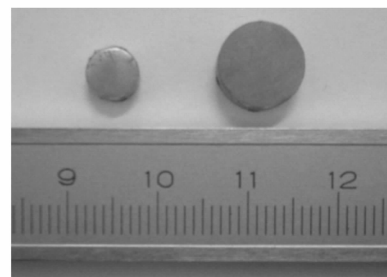


图 1 试样实物图

Fig. 1 Photograph of the samples

收稿日期:2008-12-17;修回日期:2009-03-03

基金项目:国家自然科学基金资助(10672177,10872215)

作者简介:赵鹏铎(1983-),博士,主要从事材料动态力学性能研究。

e-mail: zhaopengduo@163.com

实验采用 SHPB 装置完成动态压缩加载,其原理是通过使用应变片对入射杆中的入射波、从入射杆与试样界面反射回来的反射波以及透射杆中透射脉冲进行测量,根据一维应力波理论导出试样中的应力应变关系。试样中的应力、应变以及应变率存在如下关系^[4]:

$$\sigma = \frac{AE}{2A_0}(\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{c_0}{l_0} \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) d\tau \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{c_0}{l_0} (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \quad (3)$$

式中, c_0 为压杆中的弹性波速, ε_i 、 ε_r 、 ε_t 分别是入射波、反射波、透射波的应变,试样的原始长度和横截面积分别是 l_0 和 A_0 , A 和 E 分别为杆的横截面积和弹性模量。

为研究 PA265 和 PA35 的塑性力学性能,实验试样尺寸为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。为了测试试样材料的破坏强度与临界反应应力(动态加载下,活性材料发生反应所对应的临界应力状态),采用尺寸为 $\Phi 6 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的试样。实验中为了防止试样剧烈燃烧产生破坏,采取了保护盒以及保护板对实验设备及人员进行保护。图 2 为实验装置实物图,其中下方金属盒为保护盒,右侧为保护板。



图 2 实验装置实物图

Fig. 2 Photograph of experimental set-up

3 结果与讨论

3.1 动态应力应变曲线

图 3 和图 4 分别给出了 PA265 和 PA35 在不同应变率下典型的应力-应变曲线。图 3 和图 4 中,在应变率高于 3100 s^{-1} 情况,采用尺寸为 $\Phi 6 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的试样,其余情况采用 $\Phi 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的试样。由图可以看出两种配比的 PTFE/Al 活性材料呈现出近似线性硬化的响应特性。图 3 中在应变率 3100 s^{-1} 以下,PA265 试件仅发生塑性变形,未发生破坏;在应变率

5800 s^{-1} 情况,PA265 试件粉碎破坏;在应变率 6000 s^{-1} 以上情况,试件发生了完全燃烧反应。

图 4 中,在应变率 2700 s^{-1} 以下,PA35 试件发生塑性变形,未发生破坏;在应变率 7000 s^{-1} 情况,PA35 试件粉碎破坏;在应变率 7200 s^{-1} 以上情况,试件发生完全燃烧或部分燃烧反应。

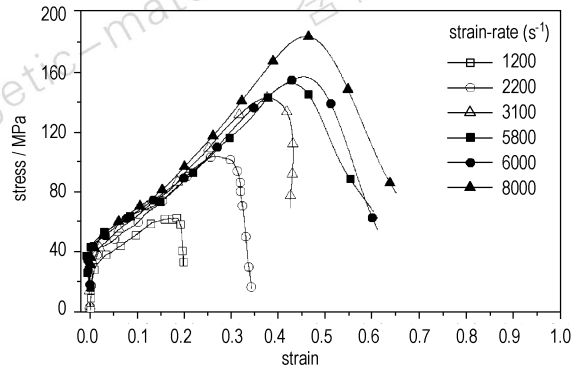


图 3 PA265 典型的应力应变曲线

Fig. 3 The stress-strain curves of PA265

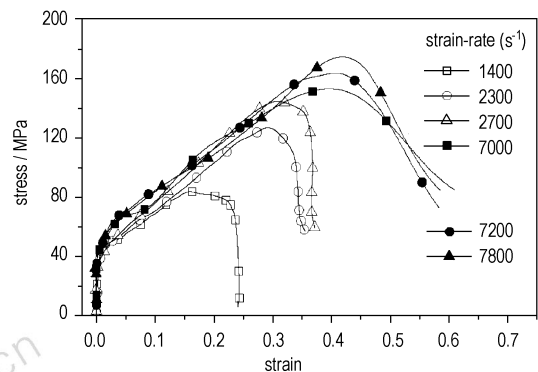


图 4 PA35 典型的应力应变曲线

Fig. 4 The stress-strain curves of PA35

3.2 燃烧反应

对 PA265 和 PA35 试件加载达到某个临界值,试件发生剧烈的燃烧反应,并伴有明显的火光。实验结果发现 PA265 一旦燃烧则反应充分,而 PA35 普遍存在熄燃现象,回收试样也发现只有部分材料发生反应。图 5、图 6 分别为 PA35 完全反应原始波形与熄燃情况的原始波形,PA265 和 PA35 未反应情况的原始波形与图 5 类似,只有幅值的差别。通道 1 记录入射和反射信号,通道 2 记录透射信号。

图 7 给出了在应变率 8000 s^{-1} 条件下,PA35 部分反应和完全燃烧反应的应力应变曲线。由图 7 可知,在相同加载应变率下,部分燃烧情况与完全反应情况的反应应力基本一致。由于原始波形中透射信号的第二尖峰在应力应变曲线上所对应的真实应变已经超过

1,所以图 7 中未给出此部分,在 3.3 节将对此进行分析讨论。图 8 给出了 PA35 部分燃烧反应和未反应试样回收实物图,由图 8 可知发生部分燃烧反应的试样只在局部有燃烧反应的痕迹,试样大部分区域未发生反应,在图中的椭圆区域内,试样边界呈现黑色,是燃烧反应的结果,而未发生反应的试样无此黑色边界。

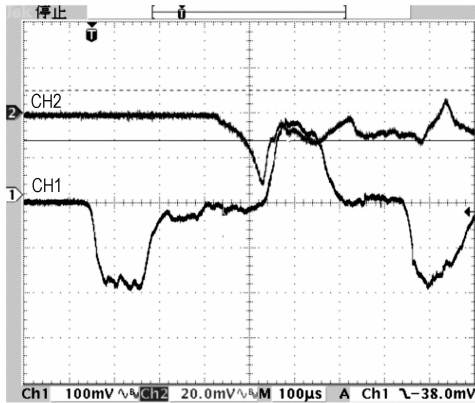


图 5 PA35 完全燃烧反应的原始波形

Fig.5 The oscillographic signals of full reaction for PA35

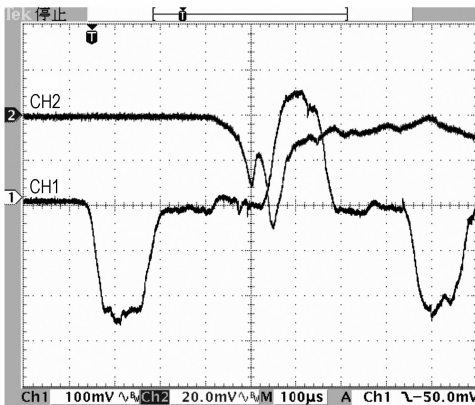


图 6 PA35 熄燃情况的原始波形

Fig.6 The oscillographic signals of partial reaction for PA35

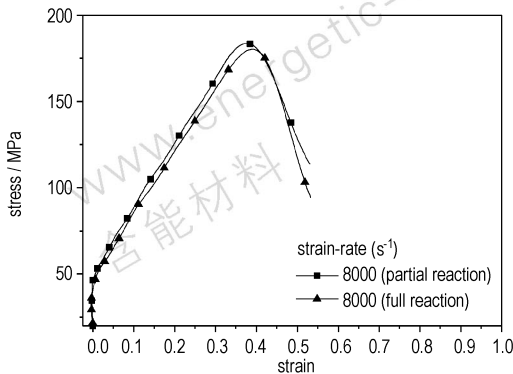


图 7 PA35 在相同应变率下部分燃烧反应和完全反应情况的应力应变曲线

Fig.7 The stress-strain curves of partial reaction and full reaction for PA35 at the same strain rate

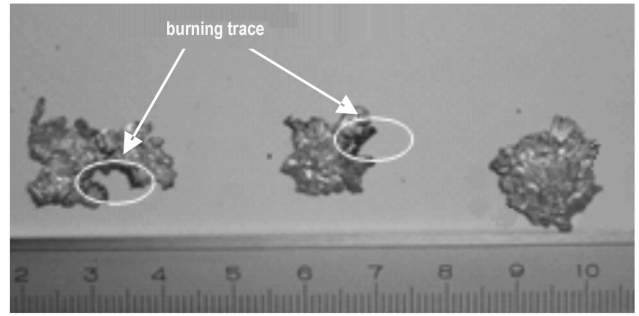


图 8 PA35 的部分燃烧反应和未反应回收试样

Fig.8 The retrieved samples of partial reaction and non-reaction for PA35

3.3 结果与讨论

从图 3 和图 4 可以看到,PA265 和 PA35 两种材料的流动应力都存在应变率效应。在应变率 $1200 \sim 8000 \text{ s}^{-1}$ 范围,PA265 的屈服强度为 $32 \sim 44 \text{ MPa}$ 。在应变率 $1400 \sim 7800 \text{ s}^{-1}$ 范围,PA35 的屈服强度为 $40 \sim 55 \text{ MPa}$ 。在相同应变率下,PA265 的屈服强度低于 PA35 的屈服强度。两种材料的主要组成部分是铝和 PTFE,而高聚物 PTFE 的强度明显低于金属铝。因此铝所占比重越大,材料的屈服强度越高。PA35 中铝含量比较高,因此强度也较高。

由图 3 和图 4 还可知 PA265 和 PA35 的破坏应变都超过 35% ,两者都表现出良好的延展性能。在应变率 $3100 \sim 5800 \text{ s}^{-1}$,PA265 的破坏强度在 $143 \sim 152 \text{ MPa}$ 范围内。在应变率 $2700 \sim 7000 \text{ s}^{-1}$,PA35 的破坏强度在 $144 \sim 153 \text{ MPa}$ 范围内。这表明在一定应变率的范围内,Al 含量提高 8.5% ,对 PTFE/Al 活性材料的破坏强度影响不明显。

在图 3 中,应变率 5800 s^{-1} 和 6000 s^{-1} 情况所对应曲线的最大应力值接近,分别为 $152, 157 \text{ MPa}$,表明 PA265 在此应变率下破坏应力为 152 MPa ,此时试样未发生燃烧反应;PA265 的反应应力为 157 MPa ,此时试样发生了完全燃烧。在图 3 中,曲线峰值高于 157 MPa 所对应的试样均发生燃烧反应,而低于此值的情况所对应的试样均未发生反应,因此认为 PA265 的临界反应应力约为 157 MPa 。图 4 中应变率 7000 s^{-1} 和 7200 s^{-1} 所对应曲线的最大应力值分别为 $156, 163 \text{ MPa}$,前者对应的试样未发生反应,后者对应的试样发生反应,因此认为 PA35 的临界反应应力约为 163 MPa 。

图 5 中透射信号的尖峰代表了反应的应力值,透射信号未出现第二个明显的尖峰,表明反应产物不能产生明显压缩信号。图 6 中透射信号出现两次尖峰,

第一尖峰代表试样反应,同时由于试样燃烧,透射应力下降。由于试样出现熄烧现象,反应迅速停止,因此出现第二个尖峰,此尖峰可以理解成对残余压碎试样的继续加载,所以会出现第二次尖峰。在强冲击加载下,PTFE/Al 活性材料发生的是氧化还原反应,其中 Al 是还原剂,而 PTFE 是氧化剂。PA35 试样出现熄烧现象正是由于还原剂 Al 的含量过高,而氧化剂不足。因此,为提高 PTFE/Al 活性材料的反应放能效率,铝的含量不能高于 35%,否则出现熄烧现象。

由实验结果可知,PA265 和 PA35 试件受载变形的响应顺序是首先弹性变形,其次塑性变形,试件压碎,最后发生反应。这表明,试样发生破碎可能是其发生反应的一个前提条件,这与国外学者高速摄影拍摄的结果相同^[8]。但试样破碎对于材料反应所起作用仍需进一步研究。

4 结 论

(1) 含铝 26.5% 与 35% 的 PTFE/Al 活性材料存在应变率效应。在应变率 1200 ~ 8000 s⁻¹ 范围,PA265 的屈服强度为 32 ~ 44 MPa。在应变率 1400 ~ 7800 s⁻¹ 范围,PA35 的屈服强度为 40 ~ 55 MPa。PTFE/Al 活性材料屈服强度随铝含量的提高而增大。

(2) PA265 和 PA35 都表现出良好的延展性能。在应变率 3100 ~ 5800 s⁻¹ 范围内,两者的破坏强度基本相当,约为 143 ~ 153 MPa。

(3) PA265 和 PA35 的临界反应应力分别约为

157 MPa 和 163 MPa。

(4) PA265 一旦燃烧则反应充分,而 PA35 普遍出现熄烧现象。对于 PA35,在相同加载应变率下,部分燃烧情况与完全反应情况的反应应力基本一致。实验结果表明,PTFE/Al 活性材料的 Al 粉含量不能高于 35%,否则氧化剂含量不足,反应不能持续。

参考文献:

- [1] Bourne N K, Gray G T. Equation of state of polytetrafluoroethylene [J]. *J of Applied Physics*, 2003, 93(2): 8966-8969.
- [2] Rae P J, Dattelbaum D M. The properties of poly(tetrafluoroethylene) (PTFE) in compression[J]. *Polymer*, 2004, 45: 7615-7625.
- [3] Kletschkowski T, Schomburg U, Bertram A. An endochronic viscoplastic approach for materials with different behavior in tension and compression[J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2004, 8: 119-135.
- [4] Diop N N, Leever P S, Williams J G. Thickness effects in the split Hopkinson pressure bar tests[J]. *Polymer*, 1993, 34: 4230-4234.
- [5] Chen W, Zhang B, Forrestal M J. A split Hopkinson bar technique for low-impedance materials[J]. *Exp Mech*, 1999, 39: 81-85.
- [6] Chen W, Lu F, Frew D J, et al. Dynamic compression testing of soft materials[J]. *Trans ASME*, 2002, 69: 214-223.
- [7] Forrestal M J, Wright T W, Chen W. The effect of radial inertia on brittle sample during the split Hopkinson pressure bar test[J]. *Int J Impact Eng*, 2007, 34: 405-411.
- [8] Lee R J, Mock W, Carney J R, et al. Reactive materials studies[C] //Furnish M D, Elert M, Russell Th P, et al. Shock Compression of Condensed Matter(2005), American Institute of Physics, 2006: 169-174.

The Dynamic Compressive Properties of PTFE/Al Reactive Materials

ZHAO Peng-duo¹, LU Fang-yun¹, LI Jun-ling¹, CHEN Rong¹, XU Song-lin², YANG Shi-qing²

(1. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The dynamic compressive and reactive properties of two kinds of PTFE/Al reactive materials were studied by the split Hopkinson pressure bars (SHPB). The effects of Al content on yield stress, fragmented and reactive properties of PTFE/Al reactive materials were analyzed. Results show that PTFE/Al is sensitive to the strain rate. In the strain rate range of 1000 - 8000 s⁻¹, the yield stress of PA265 is 32 - 44 MPa and the yield stress of PA35 is 40 - 55 MPa; the yield stress increases with Al content; the fragmented stress is 143 - 153 MPa in the strain rate range of 3100 - 5800 s⁻¹ for the PTFE/Al reactive materials; the critical reactive stresses of PA265 and PA35 are 157 MPa and 163 MPa; partial reaction phenomena appear frequently due to lacking of enough oxidant polytetrafluoroethylene (PTFE), if Al content is higher than 35%.

Key words: explosion mechanics; split Hopkinson pressure bar (SHPB); high strain rate; reactive materials; polytetrafluoroethylene (PTFE)