

含能材料的高应变率响应实验

卢芳云, 林玉亮, 王晓燕, 吴会民

(国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 利用分离式霍普金森杆实验技术研究3种含能材料(PBX、B炸药和复合固体推进剂CSP)的高应变率响应, 得到了它们的应力(σ) - 应变(ϵ)曲线。结果表明, 该曲线受含能材料试样与压杆间摩擦的影响, 将足够的润滑剂涂覆于试样和压杆的侧端面可减小摩擦, 得到较好的实验结果。3种含能材料的应力、应变对应变率都比较敏感。用SEM分析材料的细观结构和高应变率加载下的响应机制, 表明3种含能材料在动态实验过程中表现出不同的破坏现象, 两种材料发生碎裂, 另外一种发生软化。

关键词: 结构化学; 力学性能; 含能材料; 霍普金森杆实验; 细观结构

中图分类号: TJ55; TQ565

文献标识码: A

文章编号: 1007-7812(2006)01-0001-04

Experimental Investigation on Dynamic Response of Energetic Materials at High Strain Rate

LU Fang-yun, L N Yu-liang, WANG Xiao-yan, WU Hui-min

(Institute of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The dynamic response on constitutive behavior at high strain rate of three energetic materials, plastic bonded explosive composed of 97% HM X and 3% binder, composition B and composite solid propellant CSP, are studied by using a split Hopkinson pressure bar (SHPB) technique. Their σ - ϵ curves are obtained. The results show that the friction between energetic material specimens and bars can seriously influence the experimental results. Enough lubricant layed on the ends of specimens and bars makes the friction decrease and reasonable experimental data obtain. All the tested energetic materials are sensitive to the strain rate during the SHPB tests. Meso-structures of retrieved specimens are investigated by SEM and the response mechanism of materials at high strain rate is analyzed, showing that the damage of specimens during the dynamic loading is depicted as cracking and separating from each other for two explosive grains and softening for the propellant.

Key words: structural chemistry; mechanical property; energetic material; SHPB test; meso-structure

引言

含能材料在装配、运输、贮存等条件下要经受振动、冲击; 在穿甲、钻地等攻击武器中使用, 要承受较高的动态载荷作用; 在事故条件下, 要经受跌落、撞击、弹丸或碎片的冲击载荷作用等。在这些过程中, 含能材料的响应首先表现为材料的动力学响应, 进而影响其起爆性质和爆轰性能。现代高性能武器系统的发展对含能材料在各种条件下的安全性提出了更高的要求, 含能材料在高应变率动态加载下的响应也越来越受到重视^[1-3]。为此, 利用分离式霍普金森杆实验技

术对几种含能材料的高应变率响应进行了实验研究, 得到了材料本构曲线应变率效应, 重点分析材料细观结构在不同应变率加载下的变化特征。

1 高应变率实验及分析

试样材料为PBX(97% HM X, 3%黏结剂, 质量分数, 下同)、B炸药(60% RDX, 40% TNT, 1%地蜡)和复合固体推进剂CSP(8.0%黏合剂, 69.5%氧化剂AP, 18.5%铝粉, 3.3%增塑剂, 0.5%~0.7%键合剂及催化剂), 炸药由江南机器厂生产, 复合固体推进剂由国防科技大学航天与材料工程学院提供。

收稿日期: 2005-06-21; 修回日期: 2005-11-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10276038)

作者简介: 卢芳云(1963-), 女, 教授, 博士生导师, 从事工程力学方面的研究。

采用国防科技大学轻气炮实验室的分离式 Hopkinson 压杆 (SHPB) 实现高应变率动态加载。实验中所有的杆均采用 LC4 铝杆, 直径 20mm, 入射杆长 2000mm, 透射杆长 1000mm, 子弹长 200mm。应变测试采用自行研制的 KD 205-1A 超动态应变仪, 用 Tektronix TDS3014B 数字存储示波器采集实验信号。

3 种含能材料具有不同的表现特征, 其中复合固体推进剂的波阻抗较小, 属于软材料, 实验过程中难以获得应力平衡; B 炸药和 PBX 炸药呈脆性材料特征, 破坏应变较小, 要获得合理有效的实验数据, 必须使试样在破坏前达到应力平衡并处于常应变率加载状态。针对以上情况, 采用入射波整形技术。

实验发现, 当采用较理想的端面润滑时, 不同厚度试样的实验结果未见明显不同, 说明这时二维效应比较小。在相同长径比下, 试样与压杆接触界面不采取润滑措施或润滑不理想时, 端面摩擦效应对 B 炸药和 PBX 炸药试样的失效力和失效应变都有影响。图 1 是在相同应变率下, 采用不同端面接触条件得到的实验结果, 排除了材料应变率效应带来的影响。

图 1 PBX 和 B 炸药在不同端面摩擦条件下的应力-应变曲线

Fig 1 The σ - ϵ curves of PBX and composition B under different interfacial conditions

实验和理论分析得出, 具有黏弹性质、泊松比大、长径比小的材料试样在轴向应变大的 SHPB 实验中端面摩擦效应明显^[4]。PBX 中的炸药颗粒属于

弹脆性材料, 而高分子黏结剂可以承受较大的变形, 表现出黏弹性, 起着黏结炸药颗粒及传递应力的作用, 两者结合使其力学特征表现为小变形和黏弹性。另一方面, B 炸药的泊松比 $\nu = 0.34$, PBX 炸药的泊松比 $\nu = 0.24$ 。因此, 大的泊松比和端面摩擦系数是两种炸药试样端面摩擦效应明显的主要原因。

就两种炸药而言, B 炸药的端面摩擦效应比 PBX 炸药的明显。这是因为, 首先 B 炸药的泊松比比 PBX 炸药的大; 其次, PBX 与 B 炸药的破坏形式不同, 摩擦的存在更大程度地减小了 B 炸药的破坏。因此, 在实验中表现为 B 炸药的端面摩擦效应比 PBX 的明显。可以预测, 对于 CSP 推进剂, 端面摩擦效应也将存在影响。所以, 对于这些含能材料, SHPB 实验中需要特别注意对端面摩擦的控制^[5-6]。

2 高应变率应力-应变曲线

从 SHPB 实验可以看出, PBX 和 B 炸药都是脆性材料, 在失效力状态下试样开始破坏。

图 2(a) 给出了 PBX 炸药在高应变率下的应力-应变曲线。从图 2(a) 可以看出, PBX 炸药的力学性能具有明显的应变率相关性。失效力随着应变率的增加而增加, 失效应变随着应变率的增加反而降低; 失效力与失效应变的乘积基本为一常数, 这表明在高应变率条件下其破坏由能量准则控制。材料弹性模量和压缩强度随着应变率的增加呈非线性关系增加, 临界应变与应变率的对数则近似呈线性关系。

图 2(b) 是 B 炸药的应力-应变曲线。可以看出, 失效力和失效应变都随着应变率的增加而增加, 相对来说, B 炸药弹性模量的应变率效应较小。

从图 2 可以看出, 应力-应变曲线可以分为 3 个阶段: 弹性阶段、强化阶段和应变软化阶段。在弹性阶段中, 损伤有所发展, 但不能累积; 当加载超过一定应力值后, 进入强化阶段, 损伤的演化将成为不可逆过程; 由于损伤带来的性能劣化使试样承载能力下降, 应力也逐渐下降, 在出现微裂纹甚至宏观裂缝的区段内, 损伤仍在不断积累, 微裂纹区和宏观裂缝在不断扩展, 故应变将继续增长, 全曲线出现了下降段, 这就是材料的应变软化效应。在损伤演化过程中, 从弹性阶段到强化阶段所对应的应力-应变的临界值随着应变率不同而不同, 这表明 PBX 炸药和 B 炸药的损伤具有应变率效应。

图 2(c) 给出了复合固体推进剂 CSP 的应力-应变曲线。可以看出, 该材料的弹性模量很低, 其力学

性能也具有明显的应变率相关性, 压缩强度、弹性模量和临界应变都对应变率比较敏感。失效力和失效应变随着应变率的增加都会有不同程度的增加。

(SEM)对3种含能材料破坏后的断面进行了观察。

3.1 PBX 炸药细观破坏模式

图3(a)是PBX原始试样表面放大3000倍的观察结果, 可以看出PBX炸药包覆性好, 组织结构比较细密, 同时也存在一定数量的微裂纹和空穴等初始损伤。图3(b)给出了高应变率下试样断面放大2000倍的细观形貌。从图3(b)可以看出, 在断面上表现出3种不同的情况: HM X晶粒与黏结剂分离区域, HM X晶粒破碎区域以及黏结剂断裂区域。结果表明, 在高应变率压缩条件下, 试样断面细观特征主要表现为HM X晶粒破碎, HM X晶粒与黏结剂的分离以及黏结剂的断裂。

www.cnki.net

图3 PBX 炸药试样原始形貌(a)及高应变率条件下断面形貌(b)

Fig 3 Original appearance (a) and crack appearance at high strain-rate(b) of PBX specimen

PBX炸药的黏结剂强度高, 黏结力强, 在高应变率压缩作用下, 试样内部应力增加, 在试样内部会积累一定的能量, 由于应变率较高, 这部分能量未能及时以宏观破坏的形式释放出去, 而是积累在试样内部, 造成宏观裂纹的形成和扩展。当这部分能量大于一定数值的时候会引发晶粒的破碎, 同时在这一过程中伴随着试样内部微裂纹的传播, 其传播路径比较复杂, 但总是沿着比较薄弱的路径进行。如果黏结剂与晶粒表面的黏结强度大于黏结剂的强度, 则表现为黏结剂的断裂, 如果黏结剂与晶粒表面的黏结强度小于黏结剂的强度, 则表现为黏结剂与晶粒的分离, 如图3(b)所示。高应变率条件下PBX炸药颗粒的破碎可能增加潜在的热点, 进而影响PBX炸药的感度, 使PBX炸药意外起爆的概率增加。

3.2 B 炸药细观破坏模式

图4(a)是B炸药原始试样表面放大1000倍的观察结果。从图4(a)可以看出, 在压装B炸药原始试样中存在大量的初始损伤, 损伤形式主要表现为炸药晶粒间的孔隙和裂纹。与PBX相比, B炸药中的初始损伤更为严重。图4(b)给出了B炸药高应变率条件下试样断面放大1000倍的观察结果, 可以看

图2 3种含能材料的应力-应变曲线

Fig 2 The σ - ϵ curves of three energetic materials

3 细观破坏模式分析

在高应变率实验中, 如果冲击速度较高, PBX和B炸药试样破碎后成粉状; 如果冲击速度较低, PBX炸药和B炸药试样会发生断裂或破碎成粒状。即在冲击载荷作用下, PBX炸药和B炸药破碎程度依赖于冲击速度的大小。CSP在冲击载荷作用下试样产生了明显的残余变形, 同时变软, 残余变形和弹性模量下降的程度依赖于冲击速度的大小。为了确定3种材料在不同压缩应变率下的破坏机制(晶粒破碎, 晶粒与黏结剂的脱粘, 或两者共存), 同时观察3种材料试样中的初始损伤的存在形式(破碎的晶粒; 黏结剂包覆不全等), 采用KY2800扫描电镜

出, 高应变率条件下试样断面细观破坏特征为晶粒

图 4 B 炸药试样原始表面形貌(a)及高应变率条件下断面形貌(b)

Fig 4 Original appearance (a) and crack appearance at high strain rate (b) of composition B

之间的分离, 但没有发现晶粒破碎的现象。这可能由于 B 炸药中添加了石蜡, 起钝感作用, 同时其强度较低, 与晶粒的黏结力较弱, 在外力作用下容易首先弱化形成宏观破坏, 保护了炸药晶粒不出现破碎。

3.3 CSP 细观破坏模式

图 5(a) 给出了 CSP 原始试样剖面放大 300 倍的观察结果。可以看出, 颗粒添加物与基体粘结面之间粘接紧密, 没有明显的裂纹等初始损伤。图 5(b) 为复合固体推进剂高应变率实验回收试样的内部结构放大 300 倍的观察结果。从图 5(b) 看出, 高应变率条件下试样内部细观破坏特征为固体推进剂内部颗粒与基体之间的分离, 表明材料的主要损伤形式是脱黏, 伴随有颗粒破碎现象, 造成了材料结构解体, 试样强度和刚度大大下降。

图 5 CSP 原始表面形貌(a)及高应变率条件下断面形貌(b)

Fig 5 Original appearance (a) and crack appearance at high strain rate (b) of CSP specimen

4 结 论

(1) 在利用 SHPB 实验研究含能材料高应变率力学性能时, 试样界面与压杆间的摩擦会对实验结果产生较大影响, 实验过程中必须采取足够的端面润滑措施, 保证测试结果的合理性。

(2) 3 种含能材料的应力、应变对应变率都比较敏感。

(3) PBX 炸药原始试样组织结构比较细密; 高应变率压缩条件下试样破坏形式主要表现为炸药晶粒破碎、晶粒与黏结剂分离以及黏结剂的断裂。

(4) 压装 B 炸药原始试样中存在大量的孔隙和裂纹; 冲击压缩加载后试样的破坏特征以炸药颗粒间的分离为主。

(5) 在 CSP 原始试样中, 颗粒添加物与基体间黏结紧密, 没有明显初始损伤; 动态加载条件下, 材料的主要损伤形式是脱黏, 伴随颗粒破碎, 材料结构解体。

参考文献

- [1] Christopher F R, Foster J C. The use of impact techniques to characterize the high rate mechanical properties of plastic bonded explosives[C]. 11th International Detonation Symposium. Snowmass: CO, 1998: 286-292
- [2] 李英雷, 李大红, 胡时胜. TA/TB 钝感炸药本构的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(4): 355-359
- [3] 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.
- [4] 王晓燕, 卢芳云, 林玉亮. SHPB 实验中端面摩擦效应实验研究[C]. 第三届全国爆炸力学实验技术学术会议论文集. 合肥: 中国科技大学, 2004: 144-149.
- [5] Trautmann A, Siviour C R, Walley S M, et al. Lubrication of polycarbonate at cryogenic temperatures in the split Hopkinson pressure bar[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31: 523-544
- [6] Hall I W, Guden M. Split Hopkinson pressure bar compression testing of an aluminum alloy: Effect of lubricant type[J]. Journal of Materials Science Letters, 2003, 22: 1533-1535