

文章编号: 1006-9941(2000)04-0161-04

高聚物粘结炸药的力学行为及变形破坏机理

陈鹏万, 丁雁生

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 结合实验研究对高聚物粘结炸药(PBX)的力学行为和细观力学现象进行了分析和讨论。

认为 PBX 材料最主要的破坏机理是界面脱粘和粘结剂的成穴失效。

关键词: 高聚物粘结炸药; 力学行为; 变形破坏机理

中图分类号: O344.6; TQ560.71

文献标识码: A

1 引言

有关颗粒填充惰性复合材料的变形破坏机理研究得很多^[1,2]。随着复合材料细观力学的发展,近几年,有关含能材料变形破坏的细观力学研究也越来越受到重视。Palmer等^[3,4]对高聚物粘结炸药的变形破坏进行了实验研究和理论分析。Seaman等^[5]还对断裂过程(微裂纹成核、微裂纹的生长、裂纹的聚合及断裂)进行了模拟。本文结合某种PBX炸药的实验研究结果对PBX炸药的力学行为和细观力学现象进行了分析和讨论。

实验中所用的PBX炸药以HMX为主要成分,氟橡胶为粘结剂,其组成为HMX 94.5%~95%、氟橡胶5%~5.5%。由于PBX炸药材料的强度通常较低,制备标准的直接拉伸哑铃状试样比较困难,因此在试验中主要采用巴西试验(也称间接拉伸或对径压缩试验)。测量材料的间接拉伸和蠕变性能,试样由造型粉通过热压的方法制备,并用配备显微拉伸台的扫描电镜对试样的变形破坏过程进行原位观察。

2 PBX的力学行为描述

采用位移控制的方法进行准静态加载条件下的巴西实验,试样尺寸为 $>20\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,加载头速度分别为0.04, 0.1和1.0 mm/min。试样中心点的拉应力由 $\sigma = 2p/\pi D\delta$ 计算,其中 p 为作用力, D 为试样直径,

δ 为试样厚度。图1为测量得到的试样中心点的拉伸应力-应变曲线。在加载头速率为0.1 mm/min时,试样断裂时中心点的拉应力和拉应变分别为0.85 MPa和3 520 $\mu\epsilon$;在加载头速率为1 mm/min时,相应的拉应力和拉应变分别为1.16 MPa和2 849 $\mu\epsilon$ 。图2是25 $^{\circ}\text{C}$ 下试样的拉伸蠕变曲线。在蠕变曲线上可以明显地观察到加载时的瞬时弹塑性应变以及稳态蠕变和加速蠕变阶段。

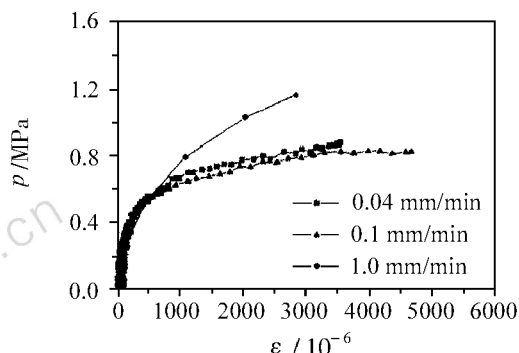


图1 间接拉伸应力-应变曲线

Fig. 1 Indirect tensile stress-strain curves

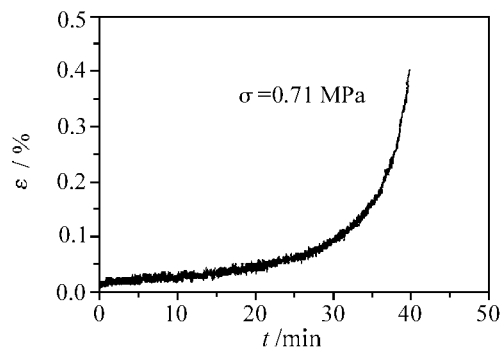


图2 间接拉伸蠕变曲线

Fig. 2 Indirect tensile creep curves

收稿日期: 2000-04-18; 修回日期: 2000-10-30

基金项目: 中科院力学所所长择优基金

作者简介: 陈鹏万(1971-),男,博士后,发表论文十余篇,主要从事爆炸力学研究。

可以看出,该 PBX 炸药的强度较低,断裂应变也较低,它的力学性能与加载头速率有关,同时还表现出明显的蠕变特征,这些正是 PBX 炸药的典型性质。

PBX 是颗粒高度填充的高分子基复合材料,它们表现出不同于单相材料的力学性质。其中的炸药颗粒在很小的变形下就会发生破坏,是一种弹脆性材料;而高分子粘结剂可以承受较大的变形,表现出粘弹性,起着粘结炸药颗粒及传递应力的作用。由于高分子基体的粘弹性,使得受基体控制的变形也表现出明显的粘弹性,其损伤和破坏过程也明显受到粘弹性的影响。PBX 材料中炸药颗粒的含量很高,材料整体抵抗变形的能力较低,断裂应变通常只有 $10^3 \mu\epsilon$ ^[4],其力学行为的特征是小变形和粘弹性,具有典型的蠕变和松弛特征,并明显受到温度和应变率的影响。这些物理特征给 PBX 材料力学行为的准确描述带来了困难。

影响 PBX 粘弹性的因素包括:高分子粘结剂基体的性质、基体-炸药颗粒界面的相互作用以及炸药颗粒填充相之间的相互作用。高分子粘结剂表现出的宏观力学行为是由部分高聚物分子链的重新取向引起的。最重要的现象是链段绕高分子主链中 C—C 键的转动。这些转动受到庞大的边链的阻碍。当有填充相存在时,还会受到填充相的阻碍。另一个重要的现象是分子链之间的滑动。这些现象引起了高分子粘结剂的粘弹性效应。

炸药颗粒之间的相互作用引起了 PBX 材料拉伸和压缩时力学性能的差异。在拉伸时,填充颗粒相互分离,而在压缩时颗粒互相挤压。这样,高分子粘结剂的力学行为在拉伸时显得更重要,而颗粒相的力学行为在压缩时更重要。在压缩率较大时,还会引起炸药颗粒的断裂。

3 PBX 的细观力学现象及变形破坏机理

有关 PBX 材料的变形破坏已有过一些研究^[4,6-8]。这些研究包括对变形破坏过程进行显微观察以及采用光学测试方法对应变场进行测量。Wie-gand^[9]和 Gray 等^[10]研究了温度和应变率对 PBX 材料变形破坏的影响。Palmer 等^[4]还在实验研究的基础上对 PBX 材料几种可能的变形破坏机理进行了理论分析。

图 3~图 6 是在 $>10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 试样变形破坏过程中观察到的现象。图 3 为典型的断裂路径的 SEM 图。可以看出,断裂主要发生在颗粒与粘结剂的界面。

从图 4 中还可以观察到,在断裂路径上有很多粘结剂细丝,这些粘结剂细丝承受很大的变形而不发生断裂。图 5 为在断裂路径上发生的穿晶断裂,但这种现象发生的几率很小。从图 6 所示的试样断口的 SEM 图可以观察到突出的炸药颗粒和颗粒拔出后留下的凹坑,拔出的颗粒表面比较光滑,没有或只有很少的粘结剂残留,同时在一些炸药颗粒上还有裂纹,这是由于压制过程中颗粒发生接触,接触应力引起了炸药颗粒的断裂。对变形破坏过程的实时原位观察还表明,破坏不一定是在承受最大拉应力的中心点处开始,而是在靠近中心点附近具有初始损伤的某些部位开始,破坏的发生具有多个成核位置,通常在大颗粒的边界首先形成,随载荷增加裂纹生长并贯通。

这些结果表明,PBX 材料受力变形后,最主要的破坏现象是炸药颗粒-粘结剂界面脱粘和粘结剂基体开裂。



图 3 典型的断裂路径

Fig. 3 Typical fracture route

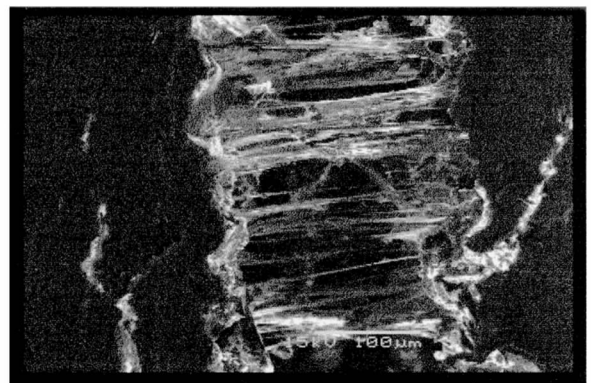


图 4 断裂路径上观察到的粘结剂细丝

Fig. 4 Binder filaments on a fracture route

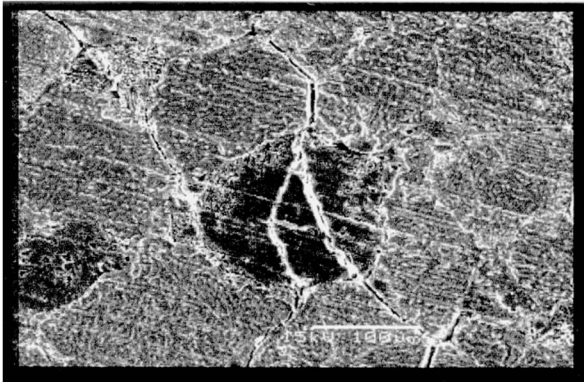


图5 断裂路径上发生的穿晶断裂
Fig. 5 Crystal fracture on a fracture route

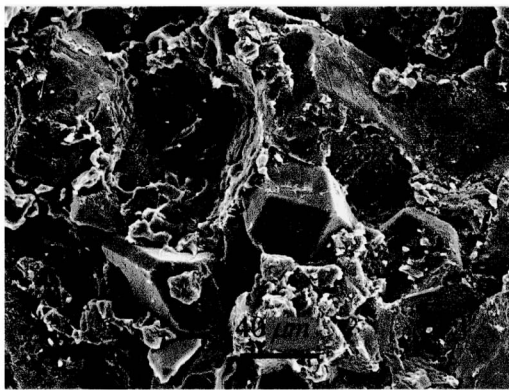


图6 试样断口形貌
Fig. 6 Fractograph of a sample

下面对材料发生炸药晶体断裂、界面脱粘和粘结剂成穴的临界应力进行估算。

热压得到的PBX炸药颗粒含有很多微裂纹等初始缺陷,它们在拉应力的作用下可能发生Griffith断裂。炸药晶体发生断裂的临界应力 σ_f 可以用Griffith准则进行估算^[4]。

$$\sigma_f = K_{Ic} / (\pi C)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中, K_{Ic} 是I型应力强度因子, C 为二分之一裂纹长度,裂纹长度取为炸药最大颗粒尺寸。

由于炸药-粘结剂的界面断裂表面能通常比粘结剂内聚破坏失效能低至少两个量级,这样破坏就很可能发生在炸药-粘结剂界面。假设粘结相的泊松比为0.5,颗粒相的杨氏模量为无穷大,脱粘临界应力 σ_d 可以表示为^[4]:

$$\sigma_d^2 = 4E_b\gamma(2 + 3V)/3r(1-V) \quad (2)$$

式中, E_b 为基体的杨氏模量, γ 为界面断裂表面能(即产生单位面积的脱粘面所需的能量), r 是颗粒半径, V 为颗粒相的体积分。如果忽略裂纹扩展过程中的粘弹性损失,界面断裂表面能可以近似取为热力学粘附功,这样计算的应力值对应于裂纹扩展速度为零时脱粘所需的应力。

弹性体在受到临界三轴拉应力时会由于成穴作用而发生断裂,这个过程从微观孔洞的非稳定弹性膨胀开始,当达到材料的最大伸长时发生内聚破坏。理论和实验研究都表明^[11],当静压 σ_b 达到约 $5/6E_b$ 时将发生微空洞的膨胀。对于巴西试验条件下粘结剂发生成穴的临界拉应力 σ_c 可以表示为^[4]:

$$\sigma_c \approx \frac{1}{4}E_b \quad (3)$$

对于本研究所用的PBX炸药,取应力强度因子 $K_{Ic} = 5.5 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3/2}$,界面断裂表面能 $\gamma = 64 \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2}$,弹性模量 $E_b = 1 \text{ MPa}$ ^[3,4], $V = 95\%$,最大晶粒尺寸 $500 \mu\text{m}$ 。根据式(1)~(3)计算得 $\sigma_f = 1.96 \text{ MPa}$, $\sigma_d = 0.18 \text{ MPa}$, $\sigma_c = 0.25 \text{ MPa}$ 。如果考虑裂纹扩展过程中的粘弹性损失,脱粘应力还会比 0.18 MPa 大。可以看出,界面脱粘应力和粘结剂成穴应力显著低于炸药晶体的断裂应力。虽然以上的计算还过于简化,但也说明,发生大面积炸药颗粒断裂的可能性不大,而界面脱粘和粘结剂的成穴则可能发生,这与Palmer等^[4]的分析结果是一致的。

当发生粘结剂成穴时,一个可能性是虽然有成穴发生,但并不是破坏的直接原因。空穴的膨胀虽然只与模量有关,但随后从空穴而来的裂纹生长却与内聚破坏断裂表面能有关。弹性体的强度极限可以是成穴所需压力的数倍^[12]。Mueller^[13]测量得到的聚亚胺酯的内聚破坏断裂表面能约为 $20 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$,比热力学粘附功高出两个量级。这就说明,随后的裂纹扩展可能沿界面进行,以致在应力 σ_d 作用下发生界面脱粘。

需要特别指出的是,可能是由于扫描电镜试样制备方面的原因,我们在试验中并没有观察到 β -HMX晶体的变形孪晶,但Palmer等^[3]和Skidmore等^[7]在试验中都观察到了这种现象。在一些情况下,孪晶变形在破坏的成核阶段可能起关键作用。孪晶变形引起界面脱粘或者形成表面台阶,使得应力集中加剧,进而降低裂纹起裂的阈值。作者认为研究炸药晶体产生弹性孪晶、永久孪晶以及最终破坏的临界应力对研究PBX材

料的细观变形破坏机理很重要。

4 结束语

本文在准静态间接拉伸和蠕变实验研究的基础上对 PBX 炸药的力学行为和变形破坏机理进行了一些分析和讨论。研究 PBX 的力学行为和变形破坏机理还需要开展很多工作,这包括深入研究单相材料(炸药和粘结剂)的力学性质,对材料的微观结构和细观力学现象进行分析;建立 PBX 材料的细观力学模型,研究在不同应变率和温度下材料的力学性质。

致谢:本研究得到了中科院力学研究所所长择优基金的资助,实验中所用的 PBX 炸药由华北工学院张景林教授提供,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Nicholson D W. On the detachment of rigid inclusion from an elastic matrix[J]. *J. Adhesion*, 1979, 10: 255 - 260.
- [2] Gent A N, Park B. Failure processes in elastomers at or near a rigid spherical inclusion [J]. *J. Mater. Sci.*, 1984, 19: 1947 - 1956.
- [3] Palmer S J P, Field J E. The deformation and fracture of β -HMX[J]. *Proc. R. Soc. Lond. A.*, 1982, 383: 399 - 407.
- [4] Palmer S J P, Field J E, Huntley J M. Deformation, strengths and strains to failure of polymer bonded explosives[J]. *Proc. R. Soc. Lond. A.*, 1993, 440: 399 - 419.
- [5] Seaman L, Simons J W, Erlich D C. Development of a viscous internal damage model for energetic materials based on the BFRAC T microfracture model[A]. 11th In-

ternational Detonation Symposium [C], Snowmass, Colorado(USA), 1998.

- [6] Field J E, Parry M A, Palmer S J P, et al. Deformation and explosive properties HMX powers and polymer bonded explosives[A]. Ninth Symposium(International) on Detonation[C], Portland, Oregon(USA), 1989.
- [7] Skidmore C B, Phillips D S, Howe P M. The evolution of microstructural changes in pressed HMX explosives[A]. 11th International Detonation Symposium [C], Snowmass, Colorado(USA), 1998.
- [8] Rae P J, Goldrein H T, Palmer S J P, et al. Studies of the failure mechanisms of polymer-bonded explosives by high re-resolution moire interferometry and enviromental scanning electron microscopy[A]. 11th International Detonation Symposium [C], Snowmass, Colorado (USA), 1998.
- [9] Wiegand D A. Mechanical properties and mechanical failure of plastic bonded explosives and other energetic materials[A]. 11th International Detonation Symposium[C], Snowmass, Co-lorado(USA), 1998.
- [10] Gray G T, Idar D J, Blumenthal W R, et al. High- and low- strain rate compression properties of several energetic material composites as a function of strain rate and temperature [A]. 11th International Detonation Symposium [C], Snowmass, Co-lorado(USA), 1998.
- [11] Cho K, Gent A N. Cavitation in model elastomeric composites[J]. *J. Mater. Sci.*, 1977, 12: 1055 - 1058.
- [12] Gent A N, Lindley P M. [J]. *Proc. R. Soc. Lond. A.*, 1959, 249: 195 - 205.
- [13] Mueller H K, Knauss W G. [J]. *Trans. Soc. Rheology*, 1971, 15: 217 - 233.

Mechanical Behaviour and Deformation and Failure Mechanisms of Polymer Bonded Explosives

CHEN Peng-wan, DING Yan-sheng

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract: The micromechanical phenomena and deformation and failure mechanisms of PBXs are discussed based on the experimental studies of a certain PBX material. PBX material has several kinds of failure pheno-mena. Interface debonding and matrix cavitation are the predominant failure mechanisms.

Key words: polymer bonded explosives, mechanical behaviour, deformation and failure mechanism