

文章编号: 1001-1455 (2000)04-0338-05

高聚物粘结炸药断裂特性实验研究^{*}

罗景润¹, 张寿齐², 李大红³, 赵玉华², 田常津¹

(1. 中物院结构力学研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900;

3. 中物院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 研究了高聚物粘结炸药在室温下的断裂特性, 结果表明这类材料的断裂韧性与裂纹长度有关, 所测试的断裂韧性值随着裂纹长度的增加而降低, 并且不趋于一个较稳定的值, 这与金属材料的结果不一样。断面观察发现断面上有分布的颗粒, 且周围与基体界面的微裂纹使得材料的断裂性能降低。分析表明, 对工程应用来讲, 可以选取 $0.2 \leq a/W \leq 0.3$ 范围内的裂纹长度来确定这类材料的断裂韧性。

关键词: 高聚物粘结炸药; 静态断裂; 断裂韧性

中图分类号: O346.1; TQ560.71 文献标识码: A

1 引 言

高聚物粘结炸药(PBX)是一种颗粒填充高分子复合材料, 其中含能材料颗粒占据了材料的主要成分。在材料设计中, 高聚物粘结炸药的爆轰性能显得非常重要, 如何满足爆轰性能要求是材料设计的主要任务, 但是, 对结构设计来讲, 其力学性能则是关键问题。因此, 在工程应用中, 炸药材料结构应该同时满足物理和力学的要求。

在炸药的结构设计中, 一般都采用传统的强度理论, 因此, 材料的常规力学性能, 如拉伸强度、压缩强度、弹性模量等, 都已有较系统的研究^[1~2]。但是, 由于炸药材料的制作工艺和材料特殊性, 材料构件在制作、贮存和运输等过程中不可避免地会出现细观或宏观裂纹。当材料构件中出现裂纹后, 采用传统的强度理论对结构的安全性进行评估或分析已经不合适, 必须采用断裂力学的理论和方法, 这其中的断裂韧性是一个重要的材料参数。

由于 PBX 是一种损伤介质, 在研究炸药的本构关系时, 必须考虑材料中的损伤演化, 当通过微裂纹的扩展来研究材料中的损伤发展时, 材料的断裂韧性就是一个关键因素; 另外, 在炸药起爆机理的 SDT 及 XDT 研究中, 裂纹的快速扩展引起的温升也是一种可能的加热机制^[3~4], 因此, 在高聚物粘结炸药的起爆机理研究中, 材料的断裂韧性也是一个重要的参数。

但是, 迄今为止, 关于 PBX 断裂特性的研究工作还很少, 还没有较好地揭示这类材料的断裂特性, 在材料设计中也还没有考虑到材料的断裂性能。由于忽视了材料的断裂性能, 对实际工程中也已出现了低应力脆性断裂现象。因此, 高聚物粘结炸药的断裂性能研究在材料的结

* 收稿日期: 1999-08-20; 修回日期: 1999-12-10

基金项目: 中国工程物理研究院科学基金项目(990103)

作者简介: 罗景润(1966—), 男, 博士生, 副研究员。

构力学设计、力学性能研究和起爆机理研究中都具有重要意义。

2 断裂韧性的测试

2.1 材料及试件设计

实验所用 PBX 是由 HMX、TATB、粘结剂和钝感剂等组成^[1],其中单质炸药 HMX 占主要成分。由于材料的实际密度与理论最大密度(TMD)存在差异,因此材料中存在初始的孔隙度,也表明材料存在初始损伤。

高聚物粘结炸药具有高分子材料的性质,其力学性能与温度有极强的依赖关系,对应变率也非常敏感^[1,5]。不过,在室温下可以将其看作脆性材料。

先将高聚物粘结炸药制作成平板状,经正常化处理,从同一平板制作出标准拉伸和断裂试件。标准拉伸试件根据文献[1]来设计。断裂试件设计为三点弯曲试件或称单边缺口试件(SEN),如图1所示。试件几何尺寸设计为 $B:W:S=1:2:8$,其中 B, W, S 分别表示试件的厚度,高度和跨度,尺寸设计为 $B=9\text{mm}, W=18\text{mm}$ 和 $S=72\text{mm}$ 。

从经正常化处理后的平板加工出三点弯曲试件后,先用较精细的锯条在试件跨距中部制作缺口,然后将一个非常薄的刀片压入缺口根部,在刀片压入过程中,在其前端发生缓慢的裂纹扩展,从而制作出裂纹试件。这是制作聚合物材料裂纹试件的常用方法。高聚物粘结炸药材料三点弯曲试件的表观裂纹长度 a (包括缺口深度和缺口根部的裂纹长度)分别设计为

3.6, 5.4, 9.0 和 10.8mm。

2.2 实验方法及结果

对聚合物材料的断裂特性已进行了不少的研究^[6~7],在这些工作中,一般都采用金属材料平面应变断裂韧性实验标准^[8]来测定聚合物材料的断裂韧性,只不过在制作裂纹试件时不是采用疲劳试验机制作疲劳裂纹,而是采用如上所描述的裂纹缓慢扩展的方法来制作裂纹试件。我们也采用类似的方法研究室温环境、准静态加载速率下高聚物粘结炸药的断裂性能。

室温(20℃)下,在具有防爆措施的材料试验机上对高聚物粘结炸药标准试件进行准静态拉伸,加载速率为 0.5mm/min,由拉伸应力-应变曲线确定材料的弹性模量 E 和屈服强度 σ_s 。

室温(20℃)下,在同一材料试验机上对高聚物粘结炸药三点弯曲试件实施准静态加载,使试件发生断裂,加载速率为 0.5mm/min。由试验机自动记录 $P-V$ 曲线(载荷-裂纹嘴张开位移曲线)。根据金属材料断裂韧性的标准实验方法(如 ASTM E399-83^[8]或 GB4161-84),三点弯曲试件的条件断裂韧性 K_{Iq} 由下式确定

$$K_{Iq} = P_q S f(a/W) / BW^{3/2} \quad (1)$$

$$f(a/W) = \frac{3(a/W)^{1/2} [1.99 - (a/W)(1 - (a/W))(2.15 - 3.93(a/W) + 2.7(a/W)^2)]}{2(1 + (2a/W))(1 - (a/W))^{3/2}} \quad (2)$$

式中: P_q 是由 $P-V$ 曲线确定的临界载荷, a/W 表示无量纲裂纹长度,即裂纹长度与试件高度的比。

如果所得到的 K_{Iq} 满足下列条件

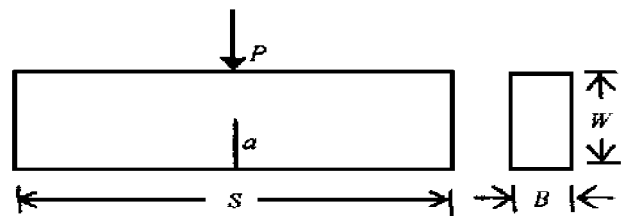


图1 三点弯曲试件的外形
Fig.1 Configuration of the specimen

$$2.5 \left(\frac{K_{Iq}}{\sigma_s} \right)^2 < \min(B, a, W - a) \quad (3)$$

则所测试的结果有效, K_{Iq} 代表了所实验材料的平面应变断裂韧性, 即 $K_{Ic} = K_{Iq}$ 。

在相同条件下对同一裂纹长度三点弯曲试件的实验重复五次, 每一裂纹长度的实验测试结果平均值如表 1 所示, 图 2 和图 3 分别给出了断裂韧性测试值、最大载荷和临界载荷随无量纲裂纹长度的变化。

表 1 高聚物粘结炸药的准静态断裂实验测试结果

Table 1 Experimental results

裂纹长度 a/mm	试件厚度 B/mm	试件高度 W/mm	最大载荷 P_{\max}/N	临界载荷 P_q/N	P_{\max}/P_q	断裂韧性 $K_{Ic}/\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$
3.46	8.98	17.95	56.11	51.80	1.08	0.199
4.97	8.99	18.00	43.16	39.98	1.08	0.190
7.43	9.01	17.97	26.39	21.97	1.20	0.150
8.83	8.97	18.04	19.21	15.81	1.22	0.134
10.8	9.00	18.01	6.49	5.26	1.23	0.065

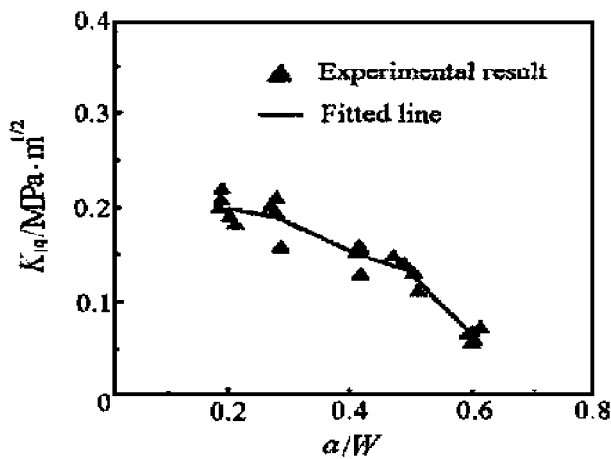


图 2 断裂韧性测试值与无量纲裂纹长度的关系

Fig. 2 Relation of measured K_{Ic} vs a/W

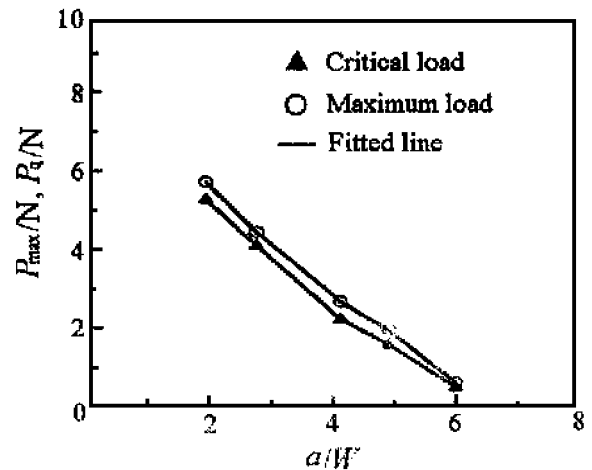


图 3 最大载荷及临界载荷与无量纲裂纹长度的关系

Fig. 3 Relation of P_{\max} and P_q vs a/W

3 结果与讨论

高聚物粘结炸药不同裂纹长度的三点弯曲试件所测试的条件断裂韧性 K_{Iq} 都满足条件式 (3), 因此, 根据 ASTM E399-83 或 GB4161-84, 所得到的 K_{Iq} 就代表了材料的平面应变断裂韧性。结果表明, 高聚物粘结炸药的断裂韧性与试件裂纹长度有极大的依赖关系, 而且, 随着裂纹长度的增加而急剧下降, 其最大载荷和临界载荷也随裂纹长度的增加而急剧下降。

我们知道, 作为一种材料性能, 材料的断裂韧性与其它力学性能一样, 虽然受到温度和加载速率等的影响, 但是其值应该与加载方式、试件几何尺寸以及裂纹长度无关。在金属材料平面应变断裂韧性的标准实验方法中, 建议选取 $0.45 \leq a/W \leq 0.55$ 范围的裂纹长度来确定材料的断裂韧性, 因为在此范围内裂纹长度所得到的断裂韧性值的误差是满足工程要求的。很多研究者也采用同样的方法来确定聚合物材料的断裂韧性^[6], 而且认为其值与裂纹长度无关。但是, 对我们所研究的材料, 按照该方法所测试的断裂韧性却与裂纹长度有极强的依赖关系。

文献[9]采用紧凑拉伸试件研究普通炮药的断裂特性也得到同样的结果,即普通炮药(发射药)的断裂韧性与裂纹长度有关。因此,断裂韧性与裂纹长度的相关性反映了高聚物粘结炸药的断裂特性。

断裂试件的断口观察表明,在断面上有很多分布的颗粒,而且有些颗粒较大,在颗粒周围存在分布的微裂纹,这些缺陷使得材料性能劣化。高聚物粘结炸药的断裂韧性,与其它性能一样,受到材料分子结构的控制,同时,其值也与微结构有关。如果在材料的微结构中存在缺陷,材料抵抗裂纹扩展的能力就会降低。因此,对这种存在初始缺陷(损伤)的材料,当材料构件中出现宏观裂纹后(如图3所示),随着裂纹长度的增加,构件抵抗裂纹扩展的能力急剧下降。

从结果可以看出,虽然试件的外形尺寸及裂纹尺寸都满足 ASTM E399-83 关于试件几何尺寸的要求,并且,条件断裂韧性值也满足条件式(3),但是,随着裂纹长度的增加,材料的断裂韧性值并不趋于一个较稳定的值。因此,象确定金属材料断裂韧性以及一些研究者确定聚合物材料断裂韧性一样选取 $0.45 \leq a/W \leq 0.55$ 范围内裂纹长度的三点弯曲试件来确定炸药材料的断裂韧性是不合适的,因为这种方法所确定的材料断裂韧性值与裂纹长度有极大的依赖关系,不能作为一个材料参数值来表征材料的断裂性能。对于所研究的高聚物粘结炸药,实验结果表明,无量纲裂纹长度 $a/W=0.2$ 和 $a/W=0.3$ 的三点弯曲试件所测试的断裂韧性值相差约为 4.5%,其误差满足工程要求。但是,当无量纲裂纹长度 $a/W > 0.3$ 以后,断裂韧性的相差值就急剧增加,比如,无量纲裂纹长度 $a/W=0.3$ 和 $a/W=0.4$ 的试件断裂韧性测试值相差约 21%,而 $a/W=0.5$ 和 $a/W=0.6$ 的试件断裂韧性测试值相差就更大。因此,对于高聚物粘结炸药,可以选取 $0.2 \leq a/W \leq 0.3$ 范围内裂纹长度的三点弯曲试件来确定材料的断裂韧性,这与文献[9]建议用 $a/W=0.3$ 的紧凑拉伸试件来测定发射药的断裂韧性是一致的。

4 结 论

根据实验结果和讨论,可以得到结论:

对于高聚物粘结炸药材料,选取 $0.45 \leq a/W \leq 0.55$ 范围内裂纹长度的三点弯曲试件来确定材料的断裂韧性是不合适的,因为该方法所测试的断裂韧性值与裂纹长度有极大的依赖关系,并且随着裂纹长度的增加而急剧下降,并不趋于一个稳定的值;对工程应用来讲,可以选取 $0.2 \leq a/W \leq 0.3$ 范围内裂纹长度的三点弯曲试件来确定材料的断裂韧性;我们所确定的高聚物粘结炸药的断裂韧性约为 $0.2 \text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$ 。

参考文献:

- [1] 董海山,周芬芬.高能炸药及其相关物性[M].北京:科学出版社,1989.
- [2] Weigand D A, Pinto J, Nicolaidis S. The Mechanical Response of TNT and a Composite, Composition B, of TNT and RDX to Compressive Stress, I : Uniaxial Stress and Fracture [J]. J Energetic Materials, 1991, (9): 19—80.
- [3] Ho S Y. High Strain Rate Impact Ignition of Rocket Propellants [A]. Short J M, Tasker D G. Proc 10th Int Symp on Detonation [C]. 1993. 94—103.
- [4] Salvat B, Guery J F. Visualisation and Modelling of Delayed Detonation in the Card Gap Test [A]. Short J M, Tasker D G. Proc 10th Int Symp on Detonation [C]. 1993. 709—815.
- [5] LUO Jing-run, ZHANG Shou-qi, LI Da-hong, et al. Nonlinear Constitutive Relation of PBX Considering the Effects of Temperature and Loading Rate [A]. ZHANG Shou-qi, ZHAO Yu-hua. Theory and Practice of Energetic Materials

- [C] .Chengdu;Sichuan Publishing House of Science and Technology, 1999.385—389.
- [6] Williams J G.Fracture Mechanics of Polymers [M] .New York:Ellis Horwood Limited, 1984.
- [7] 吕锡慈.高分子材料的强度与破坏 [M] .成都:四川教育出版社, 1988.
- [8] ASTM E399-83.Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials [S] .
- [9] 曾昭煌,胡国胜,罗运军,等.炮药的断裂韧性初探 [J] .爆炸与冲击, 1990(3):218—225.

Experimental Investigation on the Fracture Character of PBX

LUO Jing-run¹, ZHANG Shou-qi², LI Da-hong³, ZHAO Yu-hua², TIAN Chang-jin¹

(1. *Institute of Structural Mechanics, Mianyang Sichuan 621900, China;*

2. *China Academy of Engineering Physics, CAEP, Mianyang Sichuan 621900, China;*

3. *Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang Sichuan 621900, China*)

Abstract: In this paper the room temperature experiments to study the fracture character of PBX is presented. The results show that the fracture toughness of PBX is dependent on crack length. It decreases with an increase of the crack length and does not tend to any value. The fracture surface examination reveals that there are microcracks around the granules distributing on the surface. The research indicates that the fracture toughness of this pre-damage material can be determined by the measured fracture toughness, if the single-edge notch specimen is selected, the chosen crack length is $0.2 \leq a/W \leq 0.3$.

Key Words: polymer bonded explosive; fracture; fracture toughness