

文章编号: 1001-1455(2001)02-0121-05

飞片撞击下 JO-9159 炸药的脆性损伤

赵 锋¹, 孙承纬¹, 文尚刚¹, 赵剑衡¹, 龙新平²

(1. 中物院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室, 四川 绵阳 621900;

2. 中物院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 介绍了高能炸药在飞片撞击下脆性损伤的实验和理论研究工作。采用了火药枪装置驱动铝飞片作为加载手段, 对被研究样品 JO-9159 进行碰撞; 回收了经受撞击破碎的样品, 对其进行筛网分析获得破片数目分布; 据此分布和有关文献数据, 给出了 JO-9159 炸药的成核-增长(NAG)模型系数。将适用于脆性损伤模式的一维 NAG 模型子程序加入一维流体弹塑性动力学计算编码, 完成调试和初步数值模拟工作, 计算所得的样品最大损伤区域与实验得到的层裂片厚度接近。

关键词: 损伤; 成核增长模型; 微裂纹

* 中图分类号: O346.5 文献标识码: A

1 引言

80年代美国学者根据实验观测结果指出, 在低于正常的冲击引爆阈值条件下, 炸药和推进剂仍可能发生反应和爆炸, 由于其机理不清楚, 称之为 XDT^[1]。这一过程的弛豫时间可超过正常冲击引爆到爆轰时间的数倍或更多, 所以 XDT 也常表示低于冲击引爆阈值条件下炸药装置出现的滞后起爆(Delayed Detonation), 是目前爆轰研究的前沿问题之一。

当前, 对 XDT 起爆机理比较一致的解释是: 在外界撞击加载下受损伤和破碎的炸药中出现了破碎和第二次压缩, 导致压实波和冲击波的形成。研究的关键在于, 首先要清楚在外界撞击加载下发生动态损伤的炸药的细观结构产生什么变化, 研究炸药样品中出现的微损伤, 如微孔洞和微裂纹的尺寸、数量和分布, 描述其演化的统计规律模型等。在这基础上才可能进一步研究对损伤炸药中复杂应力波系和炸药碎块体系的相互作用、压实波形成、二次压缩下热点的形成和发展等, 掌握 XDT 的机理。

材料(包括含能材料)在应力波作用下出现微孔洞和裂纹以及受损材料本构关系属于细观断裂力学和损伤力学的研究范围。其研究方法多种多样, 已有多篇文章作了论述^[2,3]。本项工作拟采用细观断裂力学中的成核-增长模型(NAG)^[4]对撞击加载下炸药内部微损伤进行统计分析。

2 炸药样品的平面一维碰撞及回收实验

被研究样品为 JO-9159 高能炸药^[5], 其重量组分为 HMX/粘结剂=95/5, 初始密度 $\rho_0=1.861 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$, 样品几何尺寸为 $\phi 40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 径厚比达到 8, 保证平面加载下炸药中部的力学过程是平面一维的。火药燃烧驱动铝飞片以一定速度碰撞样品, 样品在应力波的作用下发生破碎。

进行了四发回收实验, 实测的飞片速度和样品的回收率列于表 1 中。回收实验结果表明, 炸药样品在应力波的作用下发生了脆性破碎, 因此可以推断, 撞击过程较早阶段样品中发生的微损伤导致脆性损伤, 样品破碎的原因是其内部微裂纹的萌生、发展、汇聚, 直到破片形成。从回收的破片中找到部分大的破片, 其形状为扁平, 具有近似相同的厚度, 视为层裂片的厚度。

* 收稿日期: 2000-06-27; 修回日期: 2000-10-20

基金项目: 冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室基金项目(96JS75.1.1.ZS7501)

作者简介: 赵 锋(1961—), 男, 博士, 研究员。

表1 不同飞片碰撞速度的回收实验结果

Table 1 Recovered test results for different flyer velocities

实验序号	$v_0/(m/s)$	p/GPa	回收率/(%)	层裂厚度/mm	
				实验	计算 ¹⁾
990616-3	171.1	0.634	75.8	1.8 ± 0.2	1.6
980418	114.5	0.414	74.4	1.7 ± 0.2	1.7
990417	109.2	0.394	97.2	1.5 ± 0.2	
990616-6	73.8	0.262	93.9	2.0 ± 0.2	2.0

1) 计算值由最大裂纹体积决定。

3 破片尺寸的累积分布

为了获得回收破片几何尺寸的累积分布,我们使用了筛网分析技术,通过筛网过滤,获得不同尺寸范围的破片数目,以便推测样品中的原始裂纹数目。图1为回收样品分析后给出的单位体积内累积破片数目 N_f 与破片半径 R_f 的关系。从图中可以看出,碰撞速度高,小尺寸破片数目相应多。不同撞击速度下的曲线在线性-对数坐标系中处于一个较窄的区域。按文献[4]的建议,破片数目乘以一定的倍数即得到裂纹数目,本文取为4倍。

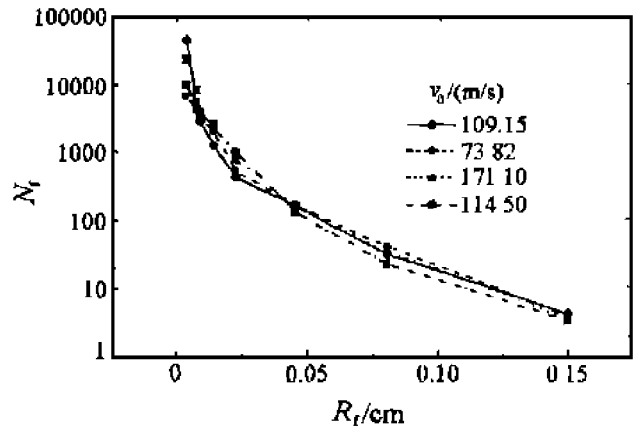


图1 累积碎片个数分布

Fig.1 Cumulative number of fragments

4 微裂纹的成核-增长(NAG)模型

脆性裂纹的分布是各向异性的,在NAG模型中对它的统计必须计及每一个微裂纹的方向。对真实的炸药而言,很难进行这种统计。在本文中裂纹被简单地按空洞描述。假设脆性裂纹为圆片状,设单位体积内裂纹半径大于 R 的数目为 $N(R)$,其半径的分布满足

$$N(R) = N_0 \exp(-R/R_0) \quad (1)$$

式中: N_0, R_0 为分布参数。

裂纹的成核速率满足

$$\dot{N}_0 = \begin{cases} N_0 \exp\left(\frac{\sigma - \sigma_{n0}}{\sigma_1}\right) & \sigma > \sigma_{n0} \\ 0 & \sigma \leq \sigma_{n0} \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_1 为成核参数; σ_{n0} 为成核阈值。裂纹半径的增长速率满足

$$\begin{cases} dR/dt = \frac{1}{4\eta}(\sigma - \sigma_{g0})R & \sigma > \sigma_{g0} \\ 0 & \sigma \leq \sigma_{g0} \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ_{g0} 为增长阈值; η 为材料粘性。

按线弹性断裂力学,裂纹半宽度为

$$\delta = 4(1 - \nu^2)R\sigma_{\varphi\psi}/(\pi E) \quad (4)$$

式中: ν 为泊松比; E 为杨氏模量; $\sigma_{\varphi\psi}$ 是垂直于裂纹面的应力分量。

裂纹体积则为

$$V_c = 16(1 - \nu^2)R^3\sigma_{\varphi\psi}/(3E) \quad (5)$$

对于式(1)的裂纹分布,把式(5)对 R 积分,总的裂纹体积为

$$V = 32(1 - \nu^2)N_0R_n^3\bar{\sigma}/E \tag{6}$$

式中： $\bar{\sigma}$ 为平均应力； R_n 为成核半径。

损伤过程中，裂纹的体积由增长和成核组成

$$V_c = V_n + V_g \tag{7}$$

$$V_n = \frac{32(1 - \nu^2)}{E}N_0R_n^3\bar{\sigma}\Delta t \tag{8}$$

$$V_g = \frac{32(1 - \nu^2)}{E}N_0R_0^3\bar{\sigma}\exp(3T_1(\bar{\sigma} - \sigma_{g0})\Delta t) \tag{9}$$

$$R_n = R_0\exp(T_1(\bar{\sigma} - \sigma_{g0})\Delta t) \tag{10}$$

$$T_1 = 1/(4\eta) \tag{11}$$

损伤过程中材料的状态方程和本构参量、剪切模量 G 及杨氏模量 E 发生变动，这一变化可表示为

$$p = C\left(\frac{\rho}{\rho_0} - \frac{\rho}{\rho_s}\right) + \Gamma e \tag{12}$$

$$G = G_0(1 - 4\nu_c\rho) \tag{13}$$

$$E = E_0(1 - 4\nu_c\rho F), \quad F = 15(1 - \nu)/(7 - 5\nu) \tag{14}$$

式中： C 为体积压缩系数； ρ_0 为未损伤炸药密度； Γ 为 Gruneison 常数； e 为比内能； ρ_s 为固体未损伤密度； ν_c 为裂纹比容； G_0 、 E_0 为初始剪切模量和杨氏模量。

计算的 NAG 模型参数^[6]列于表 2，在表中同时列出推进剂 XLDB^[7]的参数作为比较。表中参数 σ_{g0} 由下式计算

$$\sigma_{g0} = \sqrt{\frac{\pi}{4R_0}}K_{Ic} \tag{15}$$

K_{Ic} 取自文献[7]； R_0 和 N_0 由筛网分析得到； T_1 或 η ， σ_{n0} 和 σ_1 是可调常数。 σ_1 通常比 σ_{n0} 小一个量级。表 2 中 JO-9159 的参数 N_0 比 XLDB 推进剂的相应参数大了近 4 个量级，这是因为计算损伤体积时两者的定义有差别。

表 2 XLDB 和 JO-9159 的 NAG 模型参数

Table 2 NAG model parameter for XLDB and JO-9159

炸 药	增长参数 $T_1/(TPa/\mu s)$	材料粘性 $\eta/(kPa \cdot \mu s)$	增长阈值 σ_{g0}/kPa	成核分布参数 R_0/cm	分布参数 $N_0/(cm^3/\mu s)^{-1}$	成核阈值 σ_{n0}/kPa	成核参数 σ_1/kPa
XLDB ^[8]	-150	16.7	-24.75	0.0021	60	-80	-20
JO-9159	-599.4	4.171	-27	0.043	1.70×10^5	-30.8	-6.08

5 数值模拟

一维反应流体弹塑性计算编码 SSS 是一个多功能、多介质的拉格朗日形式的冲击动力学计算程序，可以计算多种加载和边界条件下样品内部质点运动速度、内能、压力、密度、温度、化学反应率、应变和应力分布。在 SSS 编码的模块化结构中加入一定应力场中细观损伤的核数、成核率、尺度和体积等参数，如利用 NAG 模型计算，就可以得到每个格点的损伤度（即损伤空穴或裂纹体积占格点体积的分数）。再通过计及损伤影响和其他因素（如热软化、应变、应变率等）的本构关系，计算宏观的应力和应变分布，得到比较自洽的动态细观损伤数值模拟。

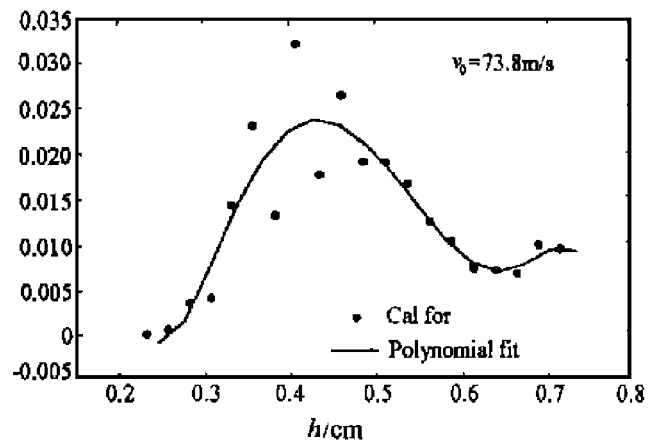


图 2 JO-9159 中的裂纹体积分布

Fig.2 Cracks volume profile in JO-9159 sample

采用 SSS 编码,我们对飞片速度为 73.8 m/s 的回收实验作了计算,计算所得的相对裂纹体积 V_c' 的分布见图 2。可以看出,样品中存在一个强拉伸破坏区域,这个破坏区域具有一定的宽度,计算结果与实验回收得到的层裂片的厚度近似吻合。

6 讨 论

我们所讨论的 NAG 模型参数和数值计算结果中对裂纹损伤变量的计算基本按照对待空洞的办法,没有考虑裂纹面的取向,这肯定会引起一定的误差。对 NAG 模型的深入研究,需要在金相显微镜下观测回收样品的裂纹大小、方向等统计结果,我们尚未开展这方面的工作。其次,计算中使用了理想弹-塑性流体模型,这一模型对于一些金属材料可能更为接近,对于我们使用的 JO-9159 这样的塑料粘结高分子材料而言,适应性较差。需要把 NAG 模型同已有的、更合理的本构模型结合起来,这方面的工作也有待以后进一步研究。

在 1998 年第十一届国际爆轰会议上,美国学者发表了多篇关于低强度加载下炸药内部损伤、断裂以及热点形成的文章^[9,10],主要研究内容均为进行定性观察,但未建立模型。必须提到的是法国人的工作,他们早就在 1993 年的第十届国际爆轰会议上,就提出了基于 NAG 模型的 BFRACT 程序来描述推进剂中的热点形成问题^[8]。但这方面工作进展也甚为缓慢,1998 年的第二十八届国际 ICT 会议上,他们发表的文章^[11]仍然基本停留在计算材料的最大损伤度的水平上。

因此,采用断裂力学和损伤力学的方法研究含能材料的损伤演化,并进而研究意外事故条件下炸药热点形成机理和引爆过程,以及由此获得炸药反应放能的适当模型,这是一个十分困难的任务,需要较长时间才能解决。

参考文献:

- [1] Lawrence Livermore National Laboratory. Detonation of Explosive in Accidentals[J]. Energy and Technology Review, 1988, (1~2): 29—36.
- [2] CURRAN D R, SEAMAN L, SHOCKEY D A. Dynamic Failure of Solids[J]. Phys Reports, 1987, 147:253—388.
- [3] 黄筑平,杨黎明,潘客麟.材料的动态损伤[A].黄筑平.塑性力学近代进展与展望[C].北京:北京大学出版社,1992.139—176.
- [4] SEAMAN L, CURRAN D R, SHOCKEY D A. Computational Models for Ductile and Brittle Fracture[J]. Journal of Applied Physics, 1976, 47(11):4814—4816.
- [5] 董海山,周芬芬.高能炸药及相关物性[M].北京:科学出版社,1989.
- [6] 赵锋,孙承伟,文尚刚,等.高能炸药低压冲击点火的热点机理研究[R].绵阳:中物院流体物理研究所,1999.
- [7] 罗景润,张寿齐,李大红,等.高聚物粘结炸药断裂特性的实验研究[J].爆炸与冲击,2000,20(4):338—342.
- [8] SALVETAT B, GUERY J F. Visualization and Modeling of Delayed Detonation in the Card Gap Test[A]. Proceedings of 10th International Symposium on Detonation[C]. Boston, USA:[s.n.],1993.709—715.
- [9] RAMASWAMY A L. Microscopic Mechanism Leading to the Ignition (Initiation), Hot Spot (Initiation sites), Deflagration, Detonation in Energetic Materials[A]. Proceedings of the 11th International Symposium on Detonation[C]. Snomass, Colorado, USA:[s.n.],1998.
- [10] SHARMA L, BEARD B C, FORBES J, et al. Physical and Chemical Nature of Hot Spots in TATB and HMX[A]. Proceedings of 9th Symposium on Detonation[C]. Portland, USA:[s.n.],1989. 897—905.
- [11] GUENGANT Y, GUERY J F. Double Card Gap Test[A]. 28th International Annual Conference of ICT[C]. Germany:[s.n.],1997.26-1—26-11.

Brittle Fracture of High Explosive JO-9159 under Plate Impact Loading

ZHAO Feng¹, SUN Cheng-wei¹, WEN Shang-gang¹, ZHAO Jian-heng¹, LONG Xin-ping²

(1. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research*,

Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, Sichuan, China;

2. *Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, Sichuan, China*)

Abstract: This paper describes the fracture damage of JO-9159 high explosive under the impact of flyer. Aluminum flyer is accelerated by the burning of black powder to impact studied samples. Four collide experiments for JO-9159 sample have been undertaken, and the broken sample fragments have been recovered, and sieve analysis has been used to obtain the fragments number distribution. According to this distribution and concerned document data, NAG model coefficient of JO-9159 has been initially determined. The subroutine of NAG model has been incorporated into one-dimensional program SSS. Calculation work has been done, and the results show that the biggest damage zone is corresponding to spallation thickness from the experiments.

Key words: damage; nucleation and growth model; cracks