

文章编号: 1006-9941(1999)03-0133-04

含铝炸药起爆机理的研究

夏先贵, 柏劲松, 林其文, 章冠人

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 通过高速照相, 直接观察含铝 PETN 炸药在落锤撞击期间熔化、点火和爆炸的过程。收集轻气炮实验后的固体爆炸产物, 并对其进行扫描电子显微 (SEM) 分析, 发现铝在炸药爆轰过程中氧化燃烧的痕迹。使用 DYT-RAN 程序, 进行了相关的数值计算, 从理论上描述了冲击波扫过含铝炸药热点形成的过程。

关键词: 含铝炸药; 杂质; 冲击起爆; 热点

中图分类号: O643.12

文献标识码: A

1 引言

为了提高炸药的破坏效力, 通常在炸药中添加金属铝粉。含铝炸药爆轰中的物理化学过程很复杂, 本文假设将 PETN/Al/wax 含铝炸药的反应过程分为下面几个步骤: ① PETN 炸药的冲击起爆和反应; ② Al 的热膨胀; ③ 产物的扩散和混合; ④ Al 从 PETN 的爆轰产物中的几种氧源 (例如 H_2O , CO_2 等) 中获得氧原子, 进行氧化放热反应; ⑤ 热量从固体产物 (Al_2O_3) 传到膨胀的气体爆轰产物对外做功。

在最近几十年中, 含铝炸药的爆轰特性研究, 国外已经做了大量的工作^[1-5]。例如 William 等^[1]侧重于研究炸药起爆以后, Al 被加热早期的动力学方面的问题; Gret Bjarnholt^[2]侧重于研究化学反应后期热量从 Al_2O_3 传到膨胀气体对外做功方面的问题。但是对炸药在冲击载荷下如何起爆, 尤其是含铝炸药中铝粒子对炸药起爆的影响研究不多。固体炸药的冲击起爆取决于炸药中的缺陷结构 (例如空穴、杂质等)。由于这种依赖特性, 导致在一些特殊情况下起爆的原因和结果不一样。但是, 热点概念在冲击起爆的任何理论和分析中作为一个必要因素似乎是公认的^[6]。研究热点的方法很多, 前几年我们研究了炸药中空穴塌陷形成热点的机理^[7]。在这里我们主要研究含铝炸药中

铝粒子在热点形成过程中的作用。

含铝炸药是一种非均匀炸药, 冲击起爆过程比较复杂, 通常用一种比较弱的刺激, 如落锤撞击方法, 诱发局部炸药发生化学反应。通过直接观察, 分析和推断热点的存在。我们还进行了轻气炮实验和相关数值模拟, 用理论方法描述了冲击波与炸药和炸药中铝粒子相互作用形成热点的过程。

2 实验研究

2.1 实验方法

利用落锤实验和轻气炮实验, 研究含铝 PETN 炸药的冲击起爆特性。落锤实验装置如图 1 所示。

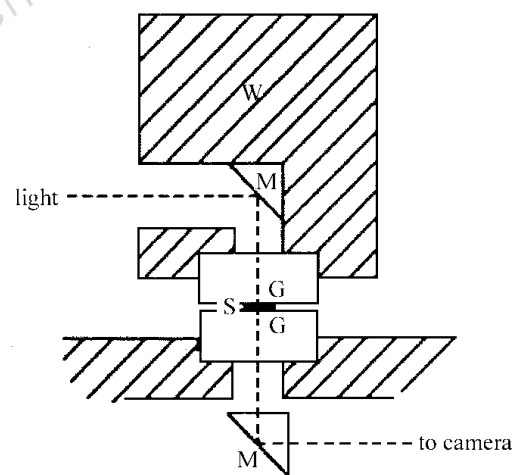


图 1 落锤装置内部光路示意图

W——落锤; M——反光镜; G——透明平台; S——样品

Fig. 1 Schematic diagram of lighting path inside the drop hammer

W——drop hammer; M——mirror;

G——glassy platform; S——sample

收稿日期: 1998-09-04 修回日期: 1999-04-30

基金项目: 中国工程物理研究院科技预研基金资助项目 (960102)

作者简介: 夏先贵 (1940 -), 男, 副研究员, 从事爆炸力学方面的研究工作。

整个系统是由落锤装置,高速相机,氦-氖激光器以及配套的微机组成,其中落锤装置分为上下平台,由坚硬玻璃做成。上平台嵌在落锤上,可随落锤上下运动;下平台嵌在固定的铁砧上。实验时将一个重量为 15kg 的落锤用电磁铁提升到 1.5m 高,断其电源,落锤沿两根制导钢轨下落,上平台撞击到下平台上的炸药样品上。落锤下落过程中,截断激光光路触发相机实现闪光照相。

轻气炮实验是用高压气体驱动飞片冲击炸药样品,利用回收装置,收集固体爆炸产物。

2.2 研究材料

研究的含铝 PETN (PETN/Al/wax 85/10/5) 炸药平均密度为 $1.67 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,其中铝粉平均粒径为 $5 \mu\text{m}$,石蜡(wax)密度为 $0.89 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,熔点为 70°C ,将被试炸药压成 $>10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 和 $>15 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 两种规格的药片,其中 $>10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 药片用于落锤实验, $>15 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 用于轻气炮实验。

2.3 实验结果与讨论

测试样品在落锤撞击下的变形破坏情况如图 2 所示。

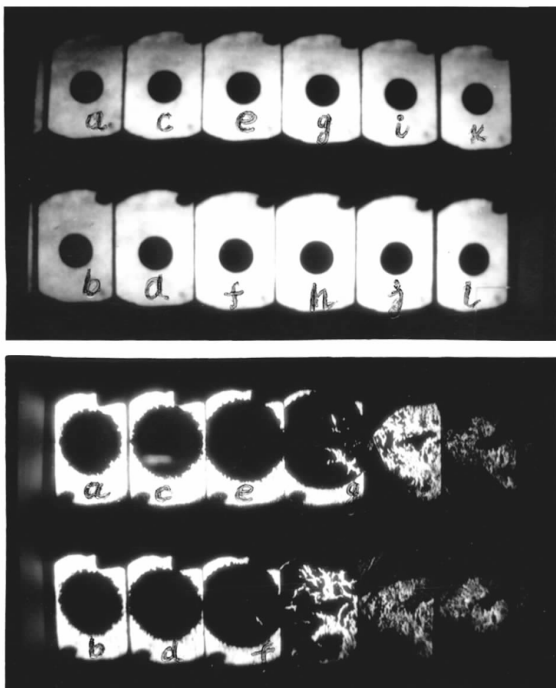


图 2 含铝 PETN 炸药在落锤撞击前和撞击时的高速照相 (上图为撞击前静止相,下图为撞击时的动态相)

Fig. 2 High-speed photographs of Al-containing PETN before and during impact

在图 2 中每幅图像时间间隔是 $20 \mu\text{s}$ 。从图可以看到,样品在上下玻璃平台挤压下逐渐径向膨胀。当变形到第 f 幅时,在它的右下角出现了一个亮点,经过 $20 \mu\text{s}$ 以后,到第 g 幅时,原来发亮的地方范围扩大,而且在它的上方又出现了一个亮点。随着时间的推移,两个亮区逐渐扩展,到第 i 幅时连成一片。这种现象反映了含铝 PETN 炸药冲击起爆的过程:首先是炸药在径向膨胀过程中,由于摩擦作用在某个铝粒子附近产生高温形成热点,使得 PETN 炸药局部熔化,出现亮点,随着热点向外扩展,PETN 炸药熔化区域增大,所以亮区连成一遍,最后发生爆炸,这个过程经历了 $60 \mu\text{s}$ 。这个过程与 Heavens^[8] 研究掺金刚砂薄层 PETN 炸药用撞击方法引起热点起爆炸药完全类似。

轻气炮实验是用速度为 $200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的飞片冲击 $>15 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的含铝 PETN 炸药样品,回收固体爆炸产物,进行 SEM 分析,结果如图 3 所示。

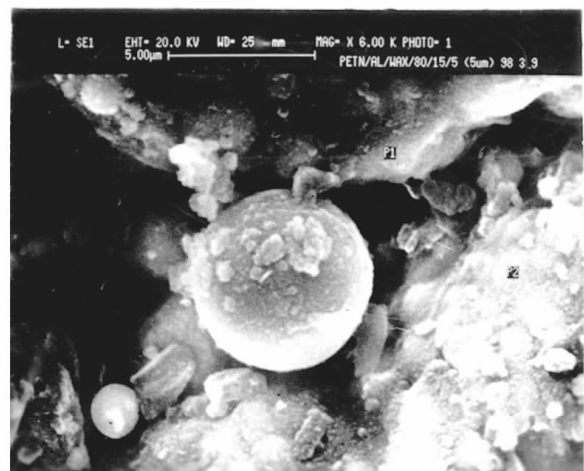


图 3 含铝 PETN 炸药固体爆炸产物的 SEM 照片

Fig. 3 SEM photograph of the solid explosion products of Al-containing PETN

从图 3 可以看出,表面凹凸不平的凝团之间还夹杂着一些球形颗粒,这可能是没有完全燃烧的铝粒子。凝团成分的特征光谱表明,它们都是铝的氧化物。

为了更好地理解含铝炸药的实验结果,我们用 MSC/DYTRAN 程序计算模拟了含铝炸药在冲击波扫过以后热点形成的过程。

3 理论计算

3.1 基本假设

将无粘性、无热传导、可压缩流体的偏微分方程在

直角坐标系中作有限元法计算。欧拉网格元胞中介质分布满足研究的物理模型。炸药中的铝介质认为是球形,在实际计算中沿直径方向是一个圆面(二维计算)。各种介质在给定的初始条件和边界条件下,在欧拉元胞中运动,构成流体的动力学状态。

3.2 计算结果及讨论

我们计算了包含 $5\mu\text{m}$ 粒径铝颗粒的 PETN 炸药,假定在 $25\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ 范围中包含两个铝粒子,它们在 xy 平面上的坐标分别是 $\text{Al}_1(6,10)\mu\text{m}$ 和 $\text{Al}_2(19,10)\mu\text{m}$,这个区域用 60×80 个网格覆盖,从飞片击靶时开始计算。当用速度为 $200\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的飞片冲击含铝 PETN 炸药样品时,产生了一个强度为 5.5GPa 的平面冲击波在炸药中传播。由于炸药和铝的密度不一样,所以当冲击波通过含铝炸药时,在不同介质中冲击波速度发生变化,引起波阵面弯曲。这个过程可以用一个简单图式(图4)描述。

假设冲击波在炸药中的冲击波速度为 D ,铝粒子中的冲击波速度为 D_1 ,而且 $D_1 > D$,这时波阵面变化如图4所示。从图可以看出,当 $\tau = 3.8\text{ns}$ 时,波阵面已经发生了明显的弯曲,凹进去的部分产生击波会聚。当 $\tau = 5.2\text{ns}$ 时,冲击波会聚更加明显,呈现一个椭圆区,这些地方冲击波速度到 $854.5\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,冲击波压力达到 5.97GPa 。在这样高的速度和压力区域内形成的热点足以产生炸药的化学反应。因此可以认为,含铝炸药中热点是在铝粒子的下方,由于波阵面弯曲,产生冲击波相互作用逐渐形成的。当然实际过程要比这里描述的复杂得多,为了简化模型,我们这里只计算了含两个铝粒子的情况。热点形成以后,能否向外扩展,取决于初始冲击波的强度和对击波的支持情况。

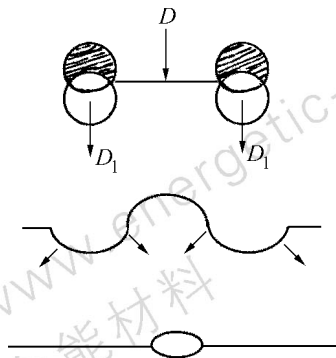


图4 冲击波在不同时刻波阵面发生弯曲的示意图

Fig.4 Schematic diagram of meandering wave front of the shock wave at different time

4 结论

通过不同冲击加载方式,直接观察含铝 PETN 炸药样品的变形破坏以及爆炸过程,回收固体爆炸产物进行理化分析;使用 DYTRAN 程序进行了相应的数值计算,初步得到下面几点看法:

(1) 含铝 PETN 炸药在落锤撞击和飞片冲击下,都发生了强烈的化学反应,出现了爆炸现象。这些化学反应最初开始于局部高压和高温区域(几个到几十个微米量级),它们是由于冲击波扫过或者落锤撞击含铝炸药产生热点引起的。

(2) 含铝炸药中的铝粒子相当于一般非均匀炸药中的空穴或气泡,对冲击波传播起到干扰作用。冲击波通过铝粒子后,波阵面发生弯曲,产生局部冲击压缩能量的变化。而在落锤撞击特殊条件下炸药样品只能在上下平台的狭缝中做径向运动,彼此摩擦,铝粒子这时起到增加摩擦力的作用。这些变化和作用使得局部地方温度升高,形成热点,引起炸药的初始化学反应。铝粒子在这个阶段不参与化学反应,呈惰性状态。

(3) 当初始反应热积累到一定程度时炸药起爆,产生大量爆轰产物,这时铝粒子开始吸收产物中的热量,温度逐渐升高达到熔点(660°C)时,铝粒子发生明显的膨胀变化。氧化物外壳出现裂缝,部分熔化铝从裂缝向外渗出,在球形母体外面形成一些“痂子”状的小凸包,它们是熔化铝冷却凝聚的结果。

随着温度不断升高,原来分离开的铝粒子由于热膨胀,彼此向外扩张,因此出现堆积和结块。这些结块互相挤压,产生点火,导致铝的燃烧氧化,并放出大量的热量。这些特性和过程都取决于它周围的炸药,是受加载方式和强度所控制的。

(4) 当铝发生氧化燃烧反应时,铝粒子尺寸,铝的重量百分比含量等因素将直接影响铝的氧化反应程度。

参考文献:

- [1] William C Tao, Craig M Tarve, Don L Ornellas. Understanding composite explosive energetics: III. reactive flow modeling of aluminum reaction kinetics in PETN and TNT [R]. LLNL Report UCRL-JC-108149
- [2] Gret Bjarnholt. Effects of aluminum and lithium fluoride admixtures on metal acceleration ability of Comp. B [C]. 6th Symp. on Detonation. California USA, 1976.
- [3] Давыдов В Ю, Гришкин А М, Феодоригов И И.

- Экспериментально-теоретическое исследование окисления алюминия в детонационной волне [J]. ФГВ, 1992, 28(5) : 124 ~ 128.
- [4] Kato Y and Brochet C. Cellular structure of detonation in nitro-methane containing aluminum particles [C]. 6th Symp. on Detonation. California USA, 1976.
- [5] Volk F, Schedlbauer F. Products of aluminum-containing explosives detonation in argon and underwater [C]. 10th Symp. on Detonation. Boston, Massachusetts USA, 1993.
- [6] Johnson J N, Tang P K, Forest C A. Shock-wave initiation of heterogeneous reactive solids [J]. J. Appl. Phys. , 1985, 57(9) : 4323 ~ 4334.
- [7] 夏先贵, 等. IHE 热点细观模拟研究 [J]. 爆轰波和冲击波, 1995(3) : 10 ~ 17.
- [8] Heavens S N and Field J E. The ignition of a thin layer of explosive by impact [C]. Proc. R. Soc Lond, A, 1974, 338 : 77 ~ 93.

A Study on Initiation Mechanism of Al-containing Explosive

XIA Xian-gui, BAI Jing-song, LIN Qi-wen, ZHANG Guan-ren

(Southwest Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The processes of melting, initiation and explosion of the sample of Al-containing PETN are observed directly by a high speed photograph during impact, and the solid products of the sample after impact from the gas gun are studied by SEM analysis. The results show that the aluminum powder is oxidized and burns during detonation. After conducting the related numerical modeling by the DYTRAN code, the process of the hot spot formation in the sample around the aluminum grain is described theoretically.

Key words: Al-containing explosive; hot spot; impurity; shock initiation

(上接第 132 页)

- [25] L. R. Rothstein, R. Peterson. Predicting high explosive detonation velocities from their composition and structure. Propellants, Explosive, 1979, 4 : 56 ~ 60.
- [26] S. Zeman, V. Mlynárik, I. Goljer, M. Dimun. Method of determination of detonation velocities [M]. Czech. Pat. , 1986 : 232 ~ 322.

多硝基芳烃静电火花感度与爆速的关系

摘要: 通过测定 32 种多硝基芳烃的静电火花感度, 建立了 50% 发火能量 E_{ES} 与爆速平方值的关系式。该式不仅体现了 Evans-Polanyi-Semenov 关系, 而且表明在起爆、初始分解或由静电火花引起的能量转换过程中多硝基化合物分子初始分裂时化学机理的同一性。但电火花能转至分子反应中心的方式还不甚清楚。

关键词: 静电火花感度; 起爆; 多硝基芳烃

中图分类号: TQ56

文献标识码: A