

文章编号: 1001-1455(2006)01-0007-05

以 RDX 为基的含铝炸药中铝粉粒度和氧化剂形态对加速金属能力的影响^{*}

黄 辉^{1,2}, 黄亨建¹, 黄 勇¹, 王晓川¹

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 南京理工大学, 江苏 南京 210094)

摘要: 利用激光速度干涉仪研究了含微米铝粉和纳米铝粉复合炸药加速金属平板的能力, 结果表明纳米铝粉的引入能够获得更大的金属平板自由面速度, 其反应时间比微米复合含铝炸药缩短 35.1%。研究了氧化剂的形态对含铝炸药性能的影响, 用物理化学手段获得的 RDX/AP 复合粒子复合粒子制作的含铝炸药加速金属平板的能力优于机械混合 RDX/AP 的含铝炸药, 前者的反应时间也比后者短。此外, 还研究了以富氧炸药取代 RDX 获得的含铝炸药的性能, 结果表明其加速金属平板的速度比 RDX/Al 复合炸药提高 10%。

关键词: 爆炸力学; 作功能力; 纳米铝粉; 含铝炸药; 富氧炸药; 非理想爆轰

中图分类号: O381

国标学科代码: 130 · 3510

文献标志码: A

1 引 言

金属粉末在含能材料中可以增加能量、提高爆热和作功能力、改善点火性能等, 因此铝、镁、镍等金属粉末在含能材料中得到了广泛应用。而铝粉因其高热值和相对低的成本, 在炸药和推进剂中的应用尤为广泛。铝粉的粒度和活性对配方的性能有较大影响, 因此超细铝粉尤其是纳米铝粉在含能材料中的应用研究是当前的热点之一, 研究结果表明在固体复合推进剂中 20% 的纳米铝粉比相同含量的微米铝粉的燃速提高 70%~100%^[1~2]。然而, 纳米铝粉在含铝炸药中的应用研究文献报道很少。

含铝炸药作为一类高密度、高爆热、高威力的非理想炸药, 在水中兵器和对空武器弹药中得到了广泛应用。与氧化剂和燃料在同一分子内的均相理想炸药不同, 含铝炸药属于非均相凝聚体系, 其氧化剂和燃料在体系中处于机械分离状态。这种非均相特征导致含铝炸药表现出独特的非理想爆轰行为, 并具有比理想炸药更宽的爆轰反应区^[3]。研究表明, 其反应区长度(约 10 mm)比理想炸药的(约 0.2 mm)大 1~2 个数量级。同时, 其反应速率表现为慢速且与状态无关的特性, 因而其冲击波转爆轰(SDT)也表现为渐进的过程^[4]。为了改善这种非均相性及其导致的非理想性, 使用超细颗粒的燃料和氧化剂使其更好地结合可能是一种解决途径。本文中, 一方面在配方中引入纳米铝粉, 另一方面采用特殊的物理化学手段获得 AP/RDX 复合粒子用于制作复合含铝炸药, 希望这两种方法都能改善含铝炸药的爆轰性能。

2 实验部分

2.1 含铝炸药的配方设计及其制备

在所有配方中, 铝粉的含量均为 20%, 粘结剂的含量固定为 4% 以保证良好的工艺性能。配方 1~6 中采用高能单质炸药 RDX 为主炸药, 用量为 53%~76%, 选择 50 和 150 μm 两种粒径进行适当的颗粒级配。配方 7 中以爆速和能量均与 RDX 相近的富氧炸药 OEX 为主炸药。部分配方还加入了氧化剂 AP, AP/RDX 复合粒子(23/53)用特殊的物理化学手段获得。各配方的组成列于表 1。

* 收稿日期: 2004-12-29; 修回日期: 2005-04-14

作者简介: 黄 辉(1961—), 男, 研究员。

表1 含铝炸药配方

Table 1 Formulations of aluminized explosives

配方代号	$w_{\text{RDX}}/\%$	$w_{\text{AP}}/\%$	$w_{\text{OEX}}/\%$	$w_{\text{Al}}/\%$	$w_{\text{LiF}}/\%$	$w_{\text{WAX}}/\%$	铝粉平均 粒径/ μm	AP加入 方式
ARX01	76	—	—	20	—	4	0.05	—
ARX02	76	—	—	20	—	4	5	—
ARX03	76	—	—	20	—	4	50	—
ARX04	76	—	—	—	20	4	50	—
ARX05	53	23	—	20	—	4	5	机械混合
ARX06	53	23	—	20	—	4	5	复合粒子
AOX07	—	—	76	20	—	4	0.05	—

选择热力学性质与铝相近的惰性添加剂氟化锂(LiF)代替铝粉获得参比配方,以反映铝粉未参加反应时炸药的爆轰性能和作功能力。

含铝炸药的制备采用非水造粒和压制成型技术路线。制备过程包括粘结剂的溶解,混合炸药的捏合、造粒、除溶剂、烘干、过筛和压制药柱等过程,制得的药柱规格为 $\varnothing 40\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 。

2.2 加速金属能力测试方法

采用小尺寸装药驱动金属平板的实验方法评估各配方的性能。用激光速度干涉仪(VISAR)测试含铝炸药驱动金属平板的能力,实验装置如图1所示。该方法能够记录金属板自由面速度-时间曲线,从而获得爆轰驱动细节,从中反映各配方的作功能力。

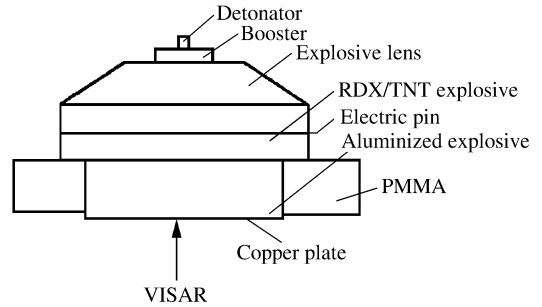


图1 实验装置

Fig. 1 Experimental set-up

3 结果和讨论

3.1 铝粉粒度对氧化反应及加速金属能力的影响

不同粒度铝粉的比表面积不同,反应活性也不同,从而可能影响铝粉的氧化反应及其最终反应程度和能量释放程度。铝粉的氧化对能量的贡献与装药约束条件、铝粉的颗粒形状和粒度分布,以及爆轰产物的化学组成等多种因素有关^[5]。目前,关于铝粉的氧化反应问题主要存在两种观点。一种认为铝粉的氧化在爆轰波前沿进行^[6];另一种认为铝粉的氧化主要在爆轰波后 Taylor 稀疏波中进行^[7]。M. A. Cook 等^[8]认为,C-J 面之前,微米铝粉只有少量参与反应,大部分是在 C-J 面之后爆轰产物膨胀过程中完成的,因而对爆轰参数的贡献不大。

图2(a)~(b)表明,ARX03和ARX04复合炸药驱动在0.54和1 mm铜板时,在铜板开始运动的1.3 μs 内,铜板自由面粒子速度-时间曲线几乎重合在一起,说明该时段内铝粉几乎没有参加反应。此后,ARX03加速铜板的能力高于ARX04,说明铝粉已经开始反应,正是铝粉的作用提高了作功能力,这与G. Baudin 等^[9]的结果一致。

从图2(c)可知,对于含5和50 μm 铝粉的复合炸药ARX02和ARX03,在铜板开始运动的3.3 μs 内乃至整个加速期间,铜板自由面粒子速度-时间曲线几乎重合在一起,速度变化过程也基本相同。说明含微米铝粉的复合炸药加速金属的能力即作功能力受粒度的影响不明显。这与T. Keicher 等^[10]研究不同粒度铝粉对气泡能和冲击波峰压的影响不明显而得出的铝粉粒度对作功能力的影响不显著的结论一致。不过,仔细地分析曲线,发现铝粉粒度对加速金属能力也有细微的差别(见表2)。铝粉粒度较小的ARX02加速两种厚度铜板的最大速度均略大于ARX03,相应的加速时间则相反。不过这种差别很小,但随着约束增强,这种差别有增大的趋势。

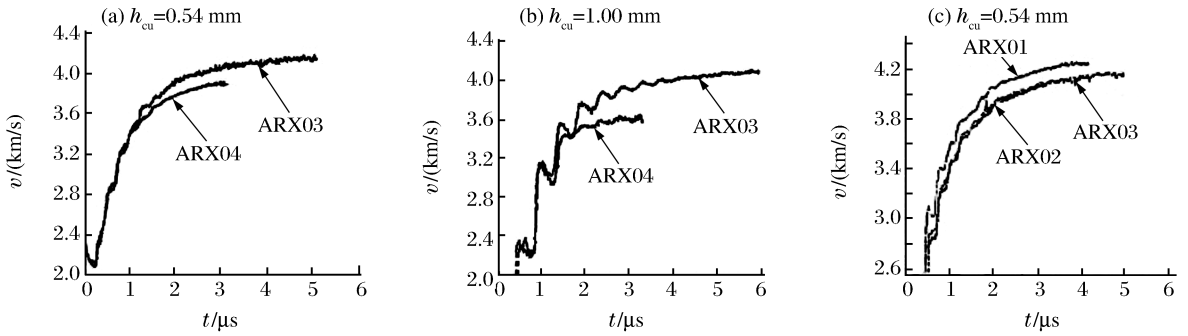


图 2 铜板自由面速度
Fig. 2 Free-surface velocities of copper plates

表 2 铜板的最大速度和加速时间

Table 2 Maximum velocities and accelerating time of copper plates

配方代号	铝粉粒径 / μm	$h_{\text{Cu}}=0.54 \text{ mm}$		$h_{\text{Cu}}=1.00 \text{ mm}$	
		$v_m/(km/s)$	$t_m/\mu s$	$v_m/(km/s)$	$t_m/\mu s$
ARX01	0.05	4.239	3.6	3.119	3.7
ARX02	5.0	4.155	4.3	3.113	5.0
ARX03	50.0	4.149	4.5	3.062	5.7
ARX04	10(LiF)	3.911	2.8	2.816	2.8
ARX05	5.0	—	—	3.420	8.0
ARX06	5.0	—	—	3.556	6.7
AOX07	0.05	—	—	3.424	4.3

对于纳米铝粉,其参加反应的时间与约束条件有一定关系,在约束较弱时,纳米铝粉在爆轰反应之初即已参与反应。从图 2(c)可知,ARX01 在加速 0.54 mm 铜板时,铜板自由面粒子速度在整个过程中都高于其余配方,其加速铜板的时间也比含 5 和 50 μm 铝粉的复合炸药分别缩短 16.3% 和 20%,而铜板达到的最大速度也比其余配方大。说明纳米铝

粉因其独特的反应活性,有相当份额的铝粉在爆轰波前沿参加反应,反应速度较快,反应的程度较高,对爆轰参数有所贡献,因而其加速金属的能力略强。驱动 1 mm 铜板也有类似结果,不过微米铝粉在较强约束条件下的反应时间相应增加,而纳米铝粉几乎无变化,这使其加速铜板的时间比含 5 和 50 μm 铝粉的复合炸药分别缩短 26.0% 和 35.1%。说明在较强约束条件下,纳米铝粉在波前参与反应的铝粉份额很少,但纳米铝粉一旦开始反应就迅速完成,因而其加速铜板的时间明显比微米铝粉短;微米铝粉的反应程度增加,以至 ARX02 中铝粉的反应程度接近纳米铝粉的反应程度,这就是二者加速 1 mm 铜板的最大速度极为接近的原因。此外,ARX01 在两种约束条件下加速铜板到最大速度的时间极为接近,均与加入 LiF 的理想炸药参比配方 ARX04 接近,表明其非理想程度较小。

上述结果表明铝粉参加反应的时间及其做功能力与铝粉的粒度有很大关系,与约束条件也有一定关系。

3.2 氧化剂的形态对加速金属能力的影响

研究表明,含铝炸药中加入氧化剂如 AP 能够增加气泡能。表 2 表明,含 AP/RDX 复合粒子的 ARX06 加速 1 mm 铜板的能力大于含 AP/RDX 机械混合物的 ARX05,也明显优于不含氧化剂而含纳米铝粉的配方 ARX01,说明氧化剂分散形式和分散程度

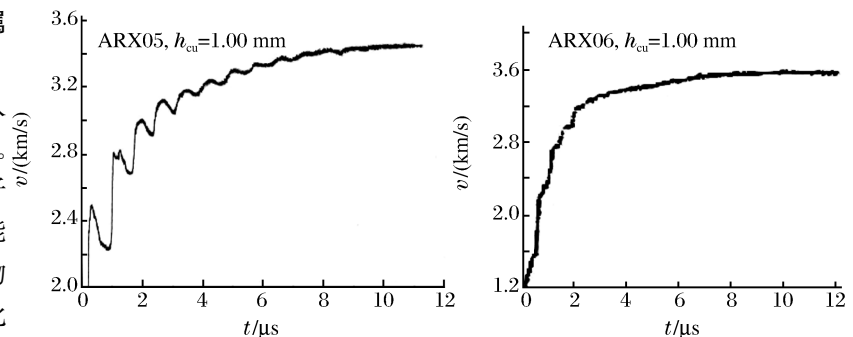


图 3 铜板自由面速度
Fig. 3 Free-surface velocities of copper plates

对于增加含铝炸药的作功能力具有重要的作用。此外,图3也显示 ARX05 在反应初期不如 ARX06 稳定,也从一个侧面说明了 AP 的形态对配方性能的影响。

AP/RDX 复合粒子通过特殊的物理化学手段获得,它不同于按相同比例简单混合的粒子。

X 射线衍射分析(见图4)表明,该复合粒子具有新的结构特征,明显不同于机械混合物的衍射特征。DSC 分析(见图5)表明,该复合粒子与机械混合粒子的热分解行为不同,前者的热分解相对比较缓慢,在曲线上表现为宽峰,后者分解则快得多,在曲线上呈现一个尖峰。

3.3 富氧炸药对加速金属的影响

常用含铝炸药中的主炸药如 HMX 和 RDX 等均为负氧平衡,可加入氧化剂如 AP 等以改善氧平衡,提高作功能力。选用一种富氧炸药(OEX)取代 RDX 制作含铝炸药,即配方 AOX07。驱动 1 mm 铜板的实验结果表明, AOX07 加速铜板的速度比 ARX01 高 10%,而前者达到最大值所用时间略长,表明铝粉的反应程度更高。

由于铝粉主要在波后与爆轰产物中的氧(如 CO_2 、 H_2O)反应而释放能量,那么爆轰产物中的氧含量越多,铝粉反应程度就越高。ARX01 中 RDX 是负氧平衡(-21.6%),其爆轰产物中尚有部分 CO 和 C 而氧含量不足, AOX07 中 OEX 是正氧平衡(+4.4%),其爆轰产物中的氧含量丰富,因而铝粉的反应程度后者比前者高,使后者加速金属的能力大于前者。因此 OEX 可以增加 Al 的反应程度,不仅能提高炸药的作功能力,也能提高炸药的作用后效。

4 结论

(1) 铝粉的反应时间与铝粉的粒度和装药的约束条件有关。微米铝粉主要在爆轰波后反应。纳米铝粉在较弱约束条件下,较大份额在波前反应,在较强约束条件下,其反应时间略微推后,但一旦反应即迅速完成。

(2) 铝粉的粒度直接影响含铝复合炸药的爆轰性能和作功能力。铝粉的粒径越小,参与反应区内反应的铝粉比例越高,能量释放越快,炸药的非常理想性越小。含纳米铝粉的复合炸药具有较短的反应时间和高的反应程度。

(3) 配方中引入氧化剂(AP),可提高铝粉反应程度,延长能量释放时间,较大幅度提高炸药的作功能力和作用效果。而 AP 以 AP/RDX 复合粒子的形态存在时效果更为明显。

(4) 配方中加入富氧的主炸药,可提高铝粉的反应程度,提高含铝炸药的作功能力和作用效果。

陈朗博士等负责完成了含铝炸药驱动金属平板实验工作,李尚斌等帮助完成了部分炸药试件的制备。谨表谢意。

参考文献:

- [1] Mench M M, Yeh C L, Kuo K K. Propellant burning rate enhancements and thermal behavior of ultra-fine powder (Alex)[A]. 29th Int Annu Conf of ICT[C]. Karlsruhe, Germany, 1998:1-5.
- [2] 赵凤起,覃光明,蔡炳源. 纳米材料在火炸药中的应用研究现状及发展方向[J]. 火炸药学报, 2001, 24(4): 61-65.
ZHAO Feng-qi, QIN Guang-ming, CAI Bing-yuan. Research status and development trends of nanometer materials in the application of propellants and explosives[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2001, 24(4): 61-65.

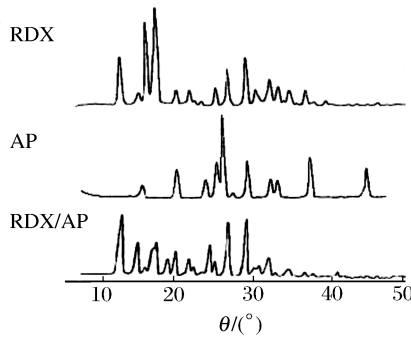


图4 RDX、AP、RDX/AP 的 X 射线衍射图
Fig. 4 X ray diffraction of RDX、AP、RDX/AP

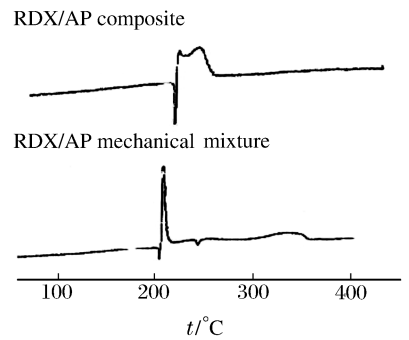


图5 RDX/AP 复合粒子、机械混合物的 DSC
Fig. 5 DSC of RDX/AP Composite and their mechanical mixture

- [3] Finger M, Helm F, Lee E, et al. Characterization of commercial, composite explosives[A]. Proceedings of the Sixth International Symposium on Detonation[C]. White Oak, MD, USA: Naval Surface Weapons Center, 1976: 729—739.
- [4] Lee J, Kuk J H, Cho Y S, et al. Numerical modeling of underwater explosion properties for an aluminized explosive[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1997, 22: 337—346.
- [5] Guiruis R H, Miller P J. Time-dependent equations of state for aluminized underwater explosives[A]. Tenth Symposium (International) on Detonation[C]. 1993: 675—682.
- [6] Belyaev A F, Frolow Y V, Korotkov A I. Combustion and ignition of particles of finely dispersed aluminum[J]. Fizika Goreniya i Vzryva, Moscow, 1999, 4(3): 323—329.
- [7] Finger M, Horning H C, Lee E L, et al. Metal acceleration by composite explosives[A]. Proceedings of 5th Symposium on detonation[C]. Pasadena, 1970: 137.
- [8] Cook M A, Filler A S, Keyes R T, et al. Aluminized explosives[J]. Phys Chem, 1957, 1(1): 189—196.
- [9] Baudin G, Bergues D. A reaction model for aluminized PBX applied to underwater explosion calculation[A]. Short J M. Proceedings of the tenth International Symposium on Detonation[C]. Boston, Massachusetts, USA: Office of Naval Research, 1993: 1—3.
- [10] Keicher T, Happ A, Kretschmer A. Influence of aluminium/ammonium perchlorate on the performance of underwater explosives[J]. Propellants, Explosive, and Pyrotechnics, 1999, 24: 140—143.

The influence of aluminum particle size and oxidizer morphology in RDX-based aluminized explosives on their ability to accelerate metals

HUANG Hui^{1,2*}, HUANG Heng-jian¹, HUANG Yong¹, WANG Xiao-chuan¹

(1. Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics,

Mianyang 621900, Sichuan, China;

2. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: The ability to accelerate metal plates of aluminized explosives containing micrometer and nanometer aluminum powder has been investigated experimentally with a VISAR interferometer. In the case of nanometer aluminum powder, the free surface velocity of metal plates was larger and the reaction time was decreased by 35.1% compared with that in the case of normal aluminized explosives. The influence of morphology of oxidizer AP on aluminized explosive performances was explored. The ability of the aluminized explosive made from RDX/Al composite with physical-chemical method was larger and its detonation reaction time was shorter than that made with mechanical mixing. When RDX in the aluminized explosive was replaced by an oxygen-enriched explosive, a 10% higher metal plate velocity resulted.

Key words: mechanics of explosion; work ability; nanometer aluminum powder; aluminized explosive; oxygen-enriched explosive; non-ideal detonation

* Corresponding author: HUANG Hui
E-mail address: huanghui@caep.ac.cn
Telephone: 0816-2485301