

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.02.008

不同气氛对 TATB 基含铝炸药爆热的影响^{*}

曹 威 郭向利 段英良 咎继超 韩 勇 刘世俊
中国工程物理研究院化工材料研究所(四川绵阳,621900)

[摘 要] 为了测定三氨基三硝基苯(TATB)基含铝炸药在不同气氛中的爆热,使用绝热式量热弹对其压装药在真空、0.1 MPa 氮气、0.1 MPa 空气、0.1 MPa 氧气和 1.5 MPa 氧气条件下的爆热进行了测量,研究了其能量释放规律,并使用 X 射线衍射(XRD)对固相产物成分进行了分析。结果表明:TATB 基含铝炸药在真空、0.1 MPa 氮气、0.1 MPa 空气、0.1 MPa 氧气和 1.5 MPa 氧气条件下的爆热依次增加;环境中压力的增加会导致爆热值增大,在 0.1 MPa 氮气中,TATB 基含铝炸药的爆热值比真空中增加了 15.7%。环境中氧气量的增加也使爆热值增大;0.1 MPa 空气中的爆热值比 0.1 MPa 氮气中增加了 7.8%,0.1 MPa 氧气中的爆热值比 0.1 MPa 氮气中高出 49.7%,1.5 MPa 氧气中的爆热值比 0.1 MPa 氮气中高出 146.1%。在富氧气氛下测试 TATB 基含铝炸药的爆热时,所测爆热接近于炸药的燃烧热,且爆炸产物的 XRD 结果也表明 Al 粉已基本氧化完全。同时,在 0.1 MPa 氮气气氛下没有检测到氮化物 AlN 的存在。该方法可对不同气氛下含铝炸药的爆热进行测量,并对爆炸产物中 Al 的存在形式进行分析。

[关键词] 爆炸力学;TATB 基含铝炸药;爆热;爆炸产物;后燃反应

[分类号] O389

引言

高活性金属具有高燃烧热值,将其引入高能炸药配方设计,可以明显提高炸药的密度、降低武器的装药感度、提高武器的抗高过载能力及低易损性。Al 粉作为高活性金属,因其高热值和相对较低的成本被广泛应用于先进常规兵器的装药中,如空中和水中兵器装药用含铝炸药等。

含铝炸药作为一种典型的非理想炸药,具有高爆热、高爆温、临界直径大、起爆传爆能力较弱、化学反应区较宽、反应时间长、反应产物组成复杂及存在后续二次反应甚至多次反应(即后燃反应)的特点。与理想炸药相比,含铝炸药的这些特点导致其爆轰性能的明显差异,更导致其能量释放的特殊性。研究人员在对含铝炸药爆轰反应机理的认识上,主要形成了 3 种理论——二次反应理论、惰性热稀释理论和化学热稀释理论,这些理论虽然在很大程度上解释了含铝炸药爆轰的反应过程,但又都不能全面地揭示含铝炸药爆轰的整个过程^[1-2]。

含铝炸药具有高爆热性能,因此对其爆热的研究成为人们关注的焦点。Ornellas^[3]对几十种不同的炸药在量热弹中起爆后放出的热和产物组分进行了测量,研究了量热弹中不同气体环境(真空、二氧

化碳和氧气)下炸药爆热和爆轰产物的差别,结果表明:对于贫氧炸药,在真空环境下爆轰生成的大量 C、CO、H₂、Al 等燃料组分的含量在氧气环境中大大减小,并释放出了更多的热量。Kiciński 等^[4]对 RDX 基含铝炸药在充有氩气、氮气、空气和氩气/氧气的量热弹中起爆后释放的热量分别进行了测量,结果表明:量热弹中充入氮气和氩气的爆热测试结果几乎一致,证明了氮气和氩气都可以作为惰性气体用在量热弹中,而高压氧气则可以使含铝炸药释放出更多的热量。裴明敬等^[5]利用氧弹量热计测试了含铝温压炸药在氩气、空气和氧气环境中的燃烧热,结果表明:含铝温压炸药在有氧环境中的爆热值较高。李媛媛等^[6]利用恒温式量热计测定了不同铝粉颗粒度的 HMX 基含铝炸药在不同环境(真空、空气和氧气)中的爆热,并研究了其能量释放规律。韩勇等^[7]利用恒温式量热计测定了含铝炸药在真空、空气和水中的爆热值,爆热值按照空气、真空、水的顺序依次减小,认为 Al 粉与空气中的氧气发生了二次反应。前述文献表明,爆炸周围气体环境及其中的氧含量影响了含铝炸药的爆轰产物状态

^{*} 收稿日期:2010-01-28

基金项目:国家自然科学基金(11372291),中国工程物理研究院化工材料研究所创新基金(KJCX-201202)

作者简介:曹威(1988~),男,博士,助理研究员,主要从事炸药爆轰安全性能研究。E-mail: weicao668@163.com

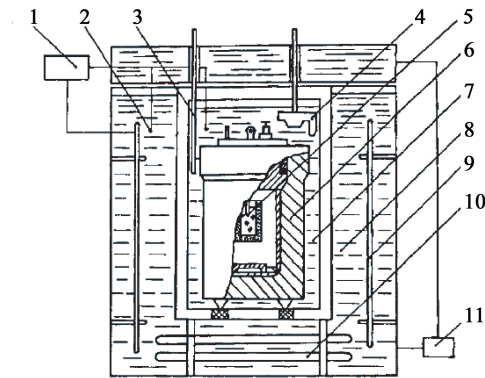
通信作者:郭向利(1987~),女,硕士,助理研究员,主要从事炸药爆轰安全性能研究。E-mail: g-x_l@163.com

及 Al 粉的反应程度,从而直接影响炸药的能量输出^[8-9]。因此,对含铝炸药在不同氧含量的气体氛围中的爆炸参数进行研究具有很重要的意义和价值。

三氨基三硝基苯(TATB)基含铝炸药以钝感高能炸药 TATB 为基,具有良好的爆轰、安全、耐热、力学和相容性能,其能量大于 1.5 倍 TNT 当量,在快速烤燃、慢速烤燃、子弹撞击等热和机械刺激条件下安全性较好。本文利用绝热式量热弹测定了 TATB 基含铝炸药在真空、常压氮气、常压空气、常压氧气和高压氧气中的爆热值,从爆热角度分析了含铝炸药在不同环境气氛中的能量释放规律,从反应动力学角度阐述了其能量释放特点,并对爆炸产物中 Al 的存在形式进行了定性分析。

1 试验

试验用绝热式量热弹的装置结构示意图如图 1,爆热弹内容积为 10.1 L。试验温度控制在 17 ℃ ~ 22 ℃ 之间,每次试验时,温度变化应在 ±1 ℃ 范围内。调节自动跟踪温度控制仪的平衡调节旋钮,控制量热桶内水温与外桶水温之差,使量热桶内水温 15 min 内变化不大于 0.003 ℃,记录筒内水温 T_0 。而后引爆炸药,反应放热使水温不断升高,直至桶内水温在 15 min 内变化不大于 0.003 ℃ 时,记录桶内水温所达到的最高值 T 。



1 - 温度控制仪;2 - 铂电阻;3 - 温度计;4 - 潜水泵;
5 - 试样;6 - 爆热弹;7 - 量热桶;8 - 带夹套的外桶;
9 - 加热极板;10 - 冷却蛇管;11 - 泵
图 1 绝热式量热弹装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of adiabatic calorimetric bomb

圆柱形压装炸药试样组分的质量比 $w(\text{TATB}) : w(\text{Al}) : w(\text{黏结剂})$ 为 70 : 25 : 5,临界起爆直径约为 21 mm,氧平衡为 -0.641。每发样品的质量为 30 g,直径为 25 mm,密度为 2.03 g/cm³。真空中爆热测量试验是通过真空泵将空气从量热弹中抽走,使弹内剩余压力为 0.01 MPa(绝对压力,下同),此时视为真空;参照 GJB 772A—1997 中的充

气方法,使量热弹中分别充有 0.1 MPa 氮气、0.1 MPa 空气、0.1 MPa 氧气和 1.5 MPa 氧气。

此外,为了分析不同气氛下爆炸产物的组成,本文采用 Bruker 公司的 D8 Advance 型粉末 X 射线衍射仪对量热弹中收集的固态爆炸产物中 Al 的存在形式进行了 X 射线衍射(XRD)分析。

2 结果与讨论

2.1 不同气氛对含铝炸药爆热的影响

表 1 给出了不同气体环境下的爆热试验值,本试验对每种环境气氛下的样品爆热进行 2 发平行试验测定,误差不超过 3%,求得平均值作为当前气氛下的爆热值。在常压氮气中爆热值比真空中爆热值增加了 15.7%。在常压空气中爆热值比常压氮气中增加了 7.8%,常压氧气中的爆热值比常压氮气中增加了 49.7%;高压氧气中的爆热值比常压氮气中增加了 146.1%。这说明量热弹作为密闭空间,阻止了爆轰产物的大范围扩散^[6,10],高温高压持续时间更长,根据含铝炸药的二次反应理论,这为含铝炸药二次反应(亦称为后燃反应)的发生提供了有利条件,且由爆热的大小变化可以推测二次反应发生的程度与环境压力和氧含量均有密切的关系。

表 1 不同气氛下 TATB 基含铝炸药的爆热测试结果

Tab. 1 Test results of detonation heat of TATB-based aluminized explosive in different atmospheres

环境气氛	气氛氧含量/g	爆热/(J · g ⁻¹)
真空	0	4 860
0.1 MPa 氮气	0	5 621
0.1 MPa 空气	2.74	6 058
0.1 MPa 氧气	13.06	8 415
1.5 MPa 氧气	195.90	13 832

TATB 基含铝炸药是贫氧炸药 (O. B. = -1.01),在真空条件下爆炸时,虽然爆轰产物 CO、CO₂ 和 H₂O 等与 Al 粉可发生二次反应(可称为无氧后燃反应,即没有外界氧气的参与),但其配方中的氧含量有限,含铝炸药配方中的 Al 粉不可能完全发生氧化反应,生成 Al₂O₃,有一部分 Al 粉只是参加吸热反应。充入 0.1 MPa 的氮气于量热弹时,爆热值比真空条件下的爆热增加了 15.7%;根据 Kiciński 等^[4] 的试验结果,含铝炸药在量热弹中起爆后 Al 粉与氮气发生反应的可能性很小,由此推断这主要是由于在外界压力的作用下炸药反应加快,使得 Al 与爆轰产物反应更充分,促进了无氧后燃反应的发生。

当环境气氛中有氧气出现时,含铝炸药的爆热进一步增大。充入 0.1 MPa 的空气于量热弹时,TATB 基含铝炸药在空气中的爆炸能量值比氮气中的爆热值高 7.8%,由此可以推论,空气中的氧气使 TATB 基含铝炸药中有 Al 粉和其他还原性爆轰产物的二次反应更完全,并且在无氧后燃反应的基础上出现了有氧后燃反应(需要外界氧气的参与)。充入 0.1 MPa 的氧气于量热弹时,TATB 基含铝炸药的爆热值比空气中的爆热值高 38.9%,这说明氧质量浓度的增加,使 Al 粉等还原性爆轰产物与氧气接触的概率增大,有效地促进了炸药有氧后燃反应的进行^[11-12]。充入 1.5 MPa 的氧气于量热弹时,TATB 基含铝炸药的爆热值比 0.1 MPa 氧气中的爆热值高 64.4%,达到了 13 832 J/g。

通过对 TATB 基含铝炸药进行计算,按化学计量比将其完全氧化需氧量为 19.24 g,与表 1 中各气体氛围下的含氧量比较可知,1.5 MPa 氧气氛围下的氧含量大于含铝炸药完全氧化的需氧量,此时含铝炸药爆炸后形成的爆炸混合物为正氧平衡,此气氛称为富氧气氛。根据含铝炸药配方组成,计算该炸药的燃烧热为 14.26 kJ/g,由表 1 中数据可知 1.5 MPa 氧气氛围下的爆热已接近于炸药的燃烧热(误差约为 3%),由此可知量热弹的爆轰产物发生了完全氧化反应,并释放出最大的热量(即炸药的燃烧热),这表明爆轰产物(包括 Al)与氧气的反应已进行完全。

2.2 不同气氛下爆炸产物的定性分析

图 2 给出了 3 种试验情况下固相爆炸产物的 XRD 分析结果。从爆炸产物的 XRD 图谱可以看出,贫氧环境下爆炸后的产物中同时含有 Al_2O_3 和 Al,但是 Al 的特征峰(对应的 2θ 分别为 38.5° 和 44.9°)较弱,分析原因可能是由于生成的 Al_2O_3 包覆在 Al 颗粒表面所致,且在 0.1 MPa 氮气氛围下并没有检测到 Al 的氮化物 AlN 的产生,验证了 Kiciński 等^[4]的试验结果;而富氧环境下爆炸后的产物中则只有 Al_2O_3 的特征峰,说明在此情况下 Al 粉基本燃烧完全,这也印证了前述的爆热测量结果。

3 结论

1) TATB 基含铝炸药在真空、氮气、空气和氧气环境中的爆热值不同,爆热值高低顺序为 1.5 MPa 氧气、0.1 MPa 氧气、0.1 MPa 空气、0.1 MPa 氮气、真空。当环境中压力增加时,其爆热值增大,在 0.1 MPa 氮气中 TATB 基含铝炸药的爆热值比真空中增加了 15.7%;随着环境中氧气量的增加,其爆热值逐渐增大,0.1 MPa 空气中的爆热值比 0.1 MPa 氮

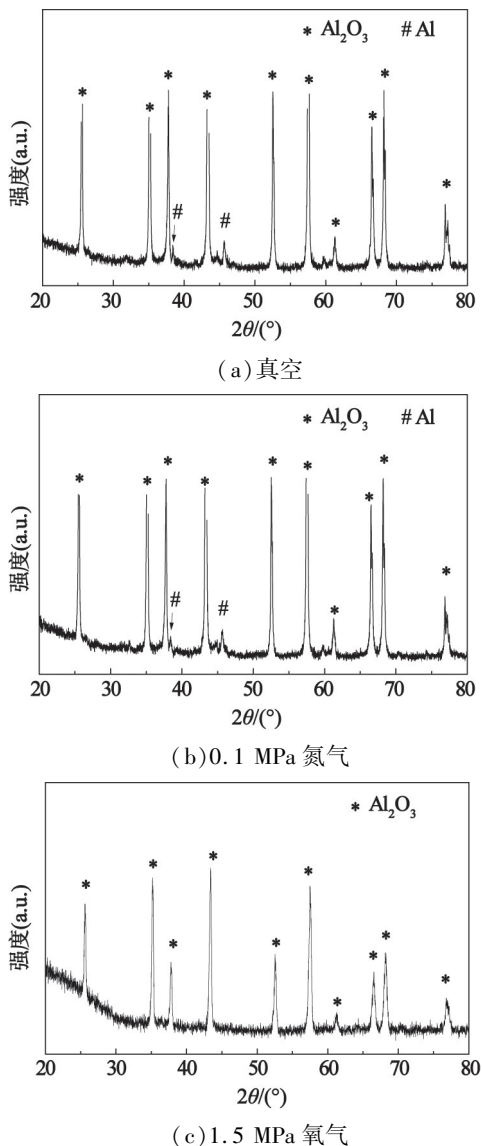


图 2 不同气氛下固体爆炸产物的 XRD 分析结果

Fig. 2 XRD analysis results of the solid explosion products in different atmospheres

气中增加了 7.8%,0.1 MPa 氧气中的爆热值比 0.1 MPa 氮气中高出 49.7%,1.5 MPa 氧气中的爆热值比 0.1 MPa 氮气中高出 146.1%。

2) 在贫氧环境的量热弹中测量 TATB 基含铝炸药的爆热时,炸药中的 Al 粉发生了后燃反应,生成了 Al_2O_3 ,同时由于氧气量不足,Al 粉没有燃烧完全,还有剩余 Al 存在。而在富氧气氛的量热弹中测量含铝炸药的爆热时,Al 粉可以基本燃烧完全,所测爆热接近于炸药的燃烧热。同时,在 0.1 MPa 氮气气氛下,爆炸产物中没有检测到 AlN 的存在。

参考文献

- [1] 孙业斌,惠君明,曹欣茂. 军用混合炸药[M]. 北京:兵器工业出版社,1995.
SUN Y B, HUI J M, CAO X M. Military Composite Explosives[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1995.

- [2] MILLER P J. A reactive flow model with coupled reaction kinetics for detonation and combustion in non-ideal explosives[C]//MRS Proceedings. Cambridge: Cambridge University Press, 1996(418):413-420.
- [3] ORNELLAS D L. Calorimetric determinations of the heat and products of detonation for explosives: October 1961 to April 1982; UCRL-52821[R]. California: Berkeley Lawrence Livermore Lab., 1982.
- [4] KICIŃSKI W, TRZCIŃSKI W. Calorimetry studies of explosion heat of non-ideal explosives[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2009, 96(2): 623-630.
- [5] 裴明敬,胡华权,张景森,等. 含铝温压炸药及其爆炸效能研究[J]. 中国工程科学,2008, 11(4): 67-75.
PEI M J, HU H Q, ZHANG J S, et al. Study on efficiency of aluminized thermobaric explosive[J]. Engineering Sciences, 2008, 11(4): 67-75.
- [6] 李媛媛,王晓峰,牛余雷,等. 环境氧含量对含铝炸药爆热的影响[J]. 火炸药学报,2014,37(2):49-52, 56.
LI Y Y, WANG X F, NIU Y L, et al. Effects of environment oxygen content on heat of detonation of aluminized explosive[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2014, 37(2): 49-52, 56.
- [7] 韩勇,韩敦信,陈红霞,等. 含铝炸药爆热的实验研究[J]. 含能材料,2002,10(2):78-80.
HAN Y, HAN D X, CHEN H X, et al. Experimental research of detonation heat of Al-containing explosives[J]. Energetic Materials, 2002, 10(2): 78-80.
- [8] ARNOLD W, ROTTENKOLBER E. Combustion of an aluminized explosive in a detonation chamber[C]// Proceedings of the 39th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe: ICT, 2008.
- [9] 冯晓军,王晓峰,李媛媛,等. 铝粉粒度和爆炸环境对含铝炸药爆炸能量的影响[J]. 火炸药学报,2013,36(6):24-27.
FENG X J, WANG X F, LI Y Y, et al. Effects of aluminum particle size and explosion atmosphere on the energy of explosion aluminized explosive[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2013, 36(6): 24-27.
- [10] 金朋刚,郭炜,任松涛,等. TNT 密闭环境中能量释放特性研究[J]. 爆破器材,2014, 43(2): 10-14.
JIN P G, GUO W, REN S T, et al. Research on TNT energy release characteristics in enclosed condition[J]. Explosive Materials, 2014, 43(2): 10-14.
- [11] Cao W, He Z Q, Chen W H, et al. Measurement of afterburning effect of underoxidized explosives by underwater explosion method[J]. Journal of Energetic Materials, 2015, 33(2): 116-124.
- [12] 曹威,何中其,陈网桦,等. 水下爆炸法测量含铝炸药后燃效应[J]. 含能材料,2012,20(2):229-233.
CAO W, HE Z Q, CHEN W H, et al. Measurement of afterburning effect of aluminized explosives by underwater explosion method[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2012, 20(2): 229-233.

Detonation Heat of TATB-based Aluminized Explosive in Different Atmospheres

CAO Wei, GUO Xiangli, DUAN Yingliang, ZAN Jichao, HAN Yong, LIU Shijun

Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics (Sichuan Mianyang, 621900)

[ABSTRACT] To measure the heat generation of triaminotrinitrobenzene(TATB)-based aluminized explosive in different atmospheres, the exotherm of pressed charge in vacuum, 0.1 MPa nitrogen, 0.1 MPa air, 0.1 MPa oxygen and 1.5 MPa oxygen were measured by adiabatic calorimetric bomb and the energy release rule was studied. Then the solid explosion products were detected by X-ray diffraction (XRD). Results show that the heat output of TATB-based aluminized explosive increased gradually in the sequence of vacuum, 0.1 MPa nitrogen, 0.1 MPa air, 0.1 MPa oxygen and 1.5 MPa oxygen; the increase of atmospheric pressure results in the increase of heat output, which is shown that the heat output in 0.1 MPa nitrogen increased by 15.7% than that in vacuum; and the heat output increases with the increase of oxygen amount in atmosphere, which is verified by the conclusion that the heat output in 0.1 MPa air was 7.8% larger than that in 0.1 MPa nitrogen, the heat output in 0.1 MPa oxygen was 49.7% higher than that in 0.1 MPa nitrogen, and the heat output in 1.5 MPa oxygen was 146.1% higher than that in 0.1 MPa nitrogen. In the case that the heat output of TATB-based aluminized explosive was measured in oxygen-rich atmosphere, the measured heat output was close to the combustion heat, and the XRD of the explosion products verified that the aluminum powders were almost completely oxidized. Meanwhile, AlN was not detected in 0.1MPa nitrogen. It provides a method to measure the heat output of aluminized explosives and analyze the existing form of aluminum element in explosion products.

[KEY WORDS] explosion mechanics; TATB-based aluminized explosive; detonation heat; explosion products; afterburning reaction