

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.04.005

铝粉含量对 RDX 基含铝炸药爆热性能的影响^{*}

李世伟^① 王正宏^① 吴成成^② 李胜伟^② 张桂芬^① 王清波^①

^①辽宁庆阳特种化工有限公司(辽宁辽阳,111002)

^②北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室(北京,100081)

[摘 要] 为了研究铝粉含量对含铝炸药爆热性能的影响,以 RDX 基含铝炸药为研究对象,分别通过理论计算和爆热测试,得到了 RDX 基含铝炸药的爆热结果,重点分析了混合炸药体系铝氧摩尔比对爆热的影响规律。结果表明:RDX 基含铝炸药的爆热随着铝氧摩尔比的增大以三次多项式规律变化,呈先增大、后减小趋势;爆热最大时,炸药体系的铝氧摩尔比为 0.8。

[关键词] 含铝炸药;铝粉;爆热;铝氧摩尔比

[分类号] TJ55

Effect of Aluminum Content on Detonation Heat of RDX-Based Aluminized Explosives

LI Shiwei^①, WANG Zhenghong^①, WU Chengcheng^②, LI Shengwei^②, ZHANG Guifen^①, WANG Qingbo^①

^①Liaoning Qingyang Special Chemical Co., Ltd. (Liaoning Liaoyang, 111002)

^②State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology (Beijing, 100081)

[ABSTRACT] RDX-based aluminized explosives were selected as the research object to study the effect of aluminum content on detonation heat performance of aluminized explosives. Detonation heat of RDX-based aluminized explosives was obtained by theoretical calculations and detonation heat tests, and the influence of molar ratio of aluminum to oxygen of the mixed explosive system on the explosion heat was analyzed. Results show that detonation heat of RDX-based aluminized explosives changed with a cubic polynomial law as molar ratio of aluminum to oxygen increases, molar ratio of aluminum to oxygen which firstly increases and then decreases. When molar ratio of aluminum to oxygen is 0.8, the detonation heat reaches the maximum.

[KEYWORDS] aluminized explosive; aluminum powder; detonation heat; molar ratio of aluminum to oxygen

引言

含铝炸药是混合炸药,通过在单质炸药中加入不同比例的铝粉以改善体系的释能效率,在防空武器弹药、舰载武器弹药以及空地武器弹药中应用广泛^[1-2]。将铝粉加入炸药中以提高做功能力的研究最早开始于 1900 年,Roth^[3]申请了炸药中添加铝粉以提高爆炸威力的专利。由于铝粉优良的高热值性能,含铝炸药在爆热、爆温等能量释放特性上都会有很大提高。含铝炸药在爆轰反应区的反应机理被国内外学者广泛研究^[4-9],但对其爆轰反应区的反应历程仍没有一套比较系统完整的理论。目前,国内外

比较公认的含铝炸药的爆轰反应机理可整理为:惰性稀释理论、化学热稀释理论及二次反应理论等^[10]。

铝粉在炸药爆轰环境中发生燃烧反应可释放大 量热能,但表达铝粉在主体炸药爆轰这样一个高温、高压、高速运动环境中的燃烧行为仍然是一个悬而未决的问题。为了解决这一难题,需要研究人员判定铝粉的反应时间和反应程度,考虑含铝炸药在爆轰反应过后铝粉在有氧和无氧条件下发生燃烧反应的化学反应机制^[11]。爆热是表征含铝炸药的爆轰性能的重要参数之一,最大爆热是含铝炸药配方设计的重要参考指标,现今主要通过计算配方的最大爆热来进行含铝炸药的配方设计。同时,混合体系的

^{*} 收稿日期:2021-11-03
第一作者:李世伟(1971 -),男,高工,主要研究方向为高能混合炸药装药理论与技术。E-mail:ls717@163.com

铝氧比、铝粉自身特性(粒径、活性等)在一定程度上影响着含铝炸药的能量输出特性。例如,Duan 等^[12]为了考察铝氧摩尔比对密闭空间冲击波的影响,测量了铝氧摩尔比范围在 0.25~1.23 之间的含铝炸药在 500 L 密闭空间爆炸中的压力变化,发现随着铝氧摩尔比的增加,准静态压力先升高、后降低,在铝氧摩尔比为 0.99 时达到最大。Zygmunt 等^[13]研究了二元高能炸药与铝体系中的铝氧比和铝粉粒径对爆速和爆热的影响,发现添加适量的铝能显著增加体系的爆速和爆热,且纳米铝粉的效果要强于微米铝粉。

含铝炸药是一种典型的非理想炸药。为了系统地分析铝粉含量对含铝炸药爆热的影响规律,以指导含铝炸药配方设计,选择黑索今(RDX)作为主体炸药,设计了不同铝氧摩尔比的 RDX 基含铝炸药配方。通过试验对不同炸药配方进行了爆热测量,根据测量结果拟合得到 RDX 基含铝炸药的爆热经验计算公式。同时,分析了铝氧摩尔比对 RDX 基含铝炸药爆热的影响规律,旨在找到科学与实用的方法来评价或预估含铝炸药的能量输出规律。

1 试验部分

1.1 试验样品及制备

以 RDX 为主体炸药,设计了一系列不同铝粉含量的抗过载炸药配方,具体配方组成见表 1。试验样品均采用压装工艺制备,压力为 150 MPa。根据 GJB 772A—1997 方法 701.1 炸药爆热测试项目的要求,压制成相应规格(∅25 mm、25 g、带 8#雷管孔)的试验样品。

表 1 含铝炸药配方组成

Tab.1 Formula of aluminized explosives

代号	$w(\text{RDX})/\%$	$w(\text{Al})/\%$	$w(\text{黏结剂})/\%$	$n(\text{Al}):n(\text{O})$
RL-1	85.5	10	4.5	0.16
RL-2	80.5	15	4.5	0.26
RL-3	75.5	20	4.5	0.36
RL-4	70.5	25	4.5	0.49
RL-5	65.5	30	4.5	0.63
RL-6	60.5	35	4.5	0.79
RL-7	55.5	40	4.5	0.99

1.2 试验方法

爆热测定方法参照 GJB 772A—1997 方法 701.1 绝热法。原理为利用已知热值的量热标准物质(苯甲酸)测出爆热热量计的热容量,在同一爆热热

量计中进行试样的爆热测定。在爆热弹内无氧环境中引爆样品,以蒸馏水为测温介质。当水温升高之后,根据热量计的热容量和升温值,即可求出单位质量试样在给定条件下的爆热。

2 结果与讨论

2.1 爆热计算

依据盖斯定律计算爆热的理论值。含铝炸药的放热只与起始和终末状态有关,与变化途径无关。即只要确定炸药爆轰过后的产物成分和原成分的生成焓,就可根据盖斯定律精确得出炸药的爆热。计算方法如下:

$$Q_p = \sum n_{pi} \Delta_f H_{pi}^\ominus - \sum n_{mi} \Delta_f H_{mi}^\ominus;$$

(1)

$$Q_v = Q_p + 2.477n.$$

(2)

式中: Q_p 为定压爆热,kJ/kg; Q_v 为定容爆热,kJ/kg; n_{pi} 为爆炸 i 产物的物质的量,mol/kg; $\Delta_f H_{pi}^\ominus$ 为爆炸 i 产物的生成焓,kJ/kg; n_{mi} 为混合炸药的组分 i 的物质的量,mol/kg; $\Delta_f H_{mi}^\ominus$ 为混合炸药中组分 i 的生成焓,kJ/kg; n 为物质的量,mol。

此外, $\text{C}_a\text{H}_b\text{N}_c\text{O}_d\text{Al}_e\text{Cl}_f$ 类型含铝炸药爆炸反应方程式:

$$\text{C}_a\text{H}_b\text{N}_c\text{O}_d\text{Al}_e\text{Cl}_f \longrightarrow \frac{e}{2}\text{Al}_2\text{O}_3(\text{s}) + \frac{c}{2}\text{N}_2(\text{g}) +$$

$$\frac{1}{2}(d - \frac{3e}{2} - a)\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \frac{1}{2}(d - \frac{3e}{2} - a)\text{CO}_2(\text{g}) +$$

$$\left[a - \frac{1}{2}(d - \frac{3e}{2} - a)\right]\text{CO}(\text{g}) +$$

$$\left[\frac{b}{2} - \frac{1}{2}(d - \frac{3e}{2} - a) - \frac{f}{2}\right]\text{H}_2(\text{g}) + f\text{HCl}(\text{g}).$$

(3)

根据盖斯定律和爆炸反应方程式,计算 $\text{C}_a\text{H}_b\text{N}_c\text{O}_d\text{Al}_e$ 类型含铝炸药爆热的经验公式为:

$$Q_v = 174.45a - 284.91d - 409.86e -$$

$$92.47f - \Delta_f H_{mi}^\ominus.$$

(4)

式中: $\Delta_f H_{mi}^\ominus$ 混合炸药中组分 i 的生成焓,kJ/kg。

2.2 爆热测试及计算结果

不同配方含铝炸药爆热的实测值与计算值对比以及和其他爆炸参数计算值见表 2。

由表 2 可以看出:盖斯定律计算结果与经验法计算结果基本一致;它们与爆热实测值的测试偏差随铝氧摩尔比的增加呈先减小、后递增的规律。

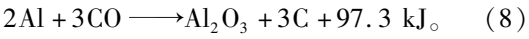
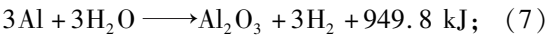
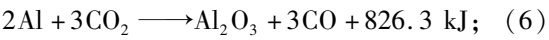
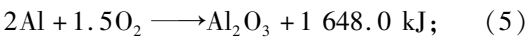
2.3 Al 粉含量对炸药爆热的影响

含铝炸药的爆热随铝氧摩尔比变化的规律与其爆轰反应机理有关。目前,含铝炸药爆轰理论认为,

表 2 不同方法获得的 RDX 基含铝炸药爆热对比

Tab.2 Comparison of detonation heat of RDX-based aluminized explosives obtained by different methods								
代号	实测爆热/ (kJ·kg ⁻¹)	盖斯定律爆热/ (kJ·kg ⁻¹)	偏差/ %	经验法爆燃/ (kJ·kg ⁻¹)	偏差/ %	n(Al) : n(O)	理论爆速/ (km·s ⁻¹)	理论爆压/ GPa
RL-1	5 855	5 593	-4.47	5 702	-2.62	0.16	8 570	34.47
RL-2	6 705	6 083	-9.23	6 074	-9.41	0.26	8 494	34.44
RL-3	7 015	6 578	-6.23	6 564	-6.43	0.36	8 415	34.40
RL-4	7 367	7 073	-3.99	7 055	-4.24	0.49	8 333	34.33
RL-5	7 691	7 569	-1.59	7 545	-1.90	0.63	8 249	34.25
RL-6	7 573	8 064	6.48	8 036	6.11	0.79	8 151	34.14
RL-7	7 646	8 560	11.97	8 526	11.51	0.99	8 070	34.01

当含铝炸药发生爆轰时,组分中的铝粉在 C-J 面上未发生反应或在 C-J 面上远未反应完全,铝粉与炸药的爆轰产物进行二次反应,放出热量。其主要的反应有:



可以看出,反应(5)~反应(8)均为放热反应。因此,炸药中加入铝粉后,爆热会大幅度提高。

通过拟合可以得到 RDX 基含铝炸药的爆热与铝氧摩尔比关系式。

RDX 基含铝炸药爆热 Q 与铝氧摩尔比 χ 的盖斯定律拟合方程:

$$Q = Q_{\text{盖斯}} - 490 + 6\,428\chi - 12\,555\chi^2 + 5\,700\chi^3. \quad (9)$$

表 3 为拟合计算结果与实测值对比。图 1 为拟合方程、盖斯定律计算结果与实测值的对比;图 2 为拟合方程计算偏差与盖斯定律计算偏差的对比。

由拟合方程计算值、盖斯定律计算值与实测值表 3 爆热的拟合方程计算值与实测值对比

Tab.3 Comparison of detonation heat between calculated results of fitting equation and measured results				
代号	实测值/ (kJ·kg ⁻¹)	拟合方程 计算值/ (kJ·kg ⁻¹)	偏差/ %	n(Al) : n(O)
RL-1	5 855	5 874	0.32	0.16
RL-2	6 705	6 538	-2.49	0.26
RL-3	7 015	7 043	0.39	0.36
RL-4	7 367	7 380	0.18	0.49
RL-5	7 691	7 552	1.80	0.63
RL-6	7 573	7 597	0.32	0.79
RL-7	7 646	7 606	-0.52	0.99

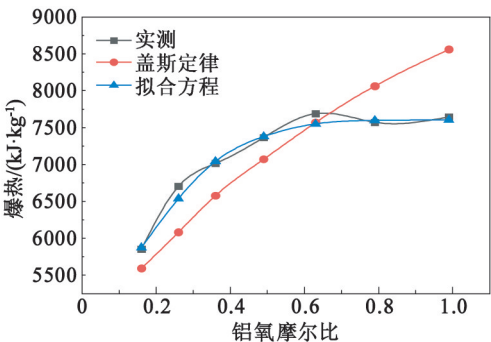


图 1 计算结果与实测值的对比

Fig.1 Comparison between calculated results and measured values

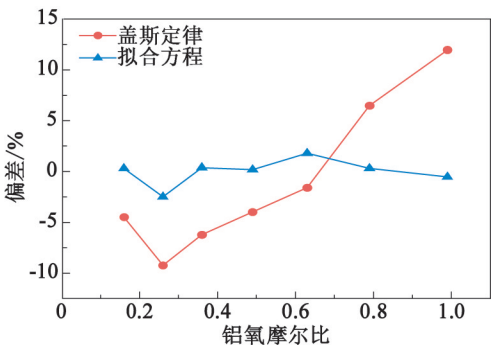


图 2 拟合方程计算偏差与盖斯定律计算偏差对比

Fig.2 Comparison between calculation deviation of fitting equation and calculation deviation of Hess's law

对比,以及拟合方程计算偏差与盖斯定律计算偏差对比可以看出,使用拟合后的方程来计算 RDX 基含铝炸药的爆热效果更好。

由图 1 和图 2 可以看出:当铝氧摩尔比在 0.63~0.67 之间时,盖斯定律计算值与实测值相近;当炸药配方中使用铝粉的质量分数小于 35% (铝氧摩尔比 0.8) 时,随着铝粉质量分数的增大,反应体系的爆热会逐渐增加;达到最大爆热时,铝粉的质量分数为 35%。最大爆热的计算值远高于爆热测量值。

这是因为多出的铝粉作为惰性吸热物质出现在爆炸产物中,消耗大量的热从而使含铝炸药的爆热降低。当铝氧摩尔比达到 0.7~0.8(铝粉质量分数为 32%~35%)左右时,炸药爆热达到最大值,铝氧摩尔比继续增加,炸药爆热呈现出降低趋势。

3 结 论

选择 RDX 作为主体炸药,设计了不同铝粉含量的 RDX 基含铝炸药配方,并通过试验以及理论计算得到了不同炸药配方的爆热,主要研究结论如下:

- 1)随着铝氧摩尔比的增大,RDX 基含铝炸药的爆热以三次多项式规律变化;当铝氧摩尔比在 0.8(质量分数 35%)附近时,爆热达到最大。
- 2)对于 RDX 基含铝炸药,随着铝粉含量不同,盖斯定律与经验法计算值与实测值比较,计算值与实测值相比呈现先低后高的现象。
- 3)对于 RDX 基含铝炸药,当铝氧摩尔比在 0.63~0.67 之间时,盖斯定律计算值与实测值相近。

参 考 文 献

[1] 孙业斌,惠君明,曹欣茂,等. 军用混合炸药[M]. 北京:兵器工业出版社,1995.

[2] 张晓敏. DNAN 基熔铸炸药爆轰参数研究[D]. 北京:北京理工大学,2016.

ZHANG X M. Research on detonation parameters of DNAN-based melt-cast explosive [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology,2016.

[3] ROTH G. Performance of explosives: DE173327 [P]. 1900.

[4] COOK M A, FILLER A S, KEYES R T, et al. Aluminized explosives [J]. Journal of Physical Chemistry, 1957, 61(2): 189-196.

[5] FINGER M, HORNIG H C, LEE E L, et al. Metal acceleration by composite explosives: UCRL-72171, CONF-

700803-1 [R]. Livermore, CA, US: Lawrence Radiation Lab., California University, 1970.

[6] DAVISON L, KENNEDY J E, COFFEY F. Behavior and utilization of explosives in engineering design [C]//12th Annual Symposium Proceedings. Albuquerque, NM, US, 1972.

[7] JARNHOLT G B. Effects of aluminum and lithium flouride admixtures on metal acceleration ability of Comp B [C]//Proceedings of 6th International Symposium on Detonation. San Diego, CA, US, 1976: 517-526.

[8] TAO W C, TARVER C M, KURY J W. Understanding composite explosive energetics: 4. Reactive flow modeling of aluminum reaction kinetics in PETN and TNT using normalized product equation of state: UCRL-JC-11348, CONF-930713-31 [R]. Livermore, CA, US: Lawrence Livermore National Lab., 1993.

[9] TRZCINSKI W A, MAIZ L. Thermobaric and enhanced blast explosives: properties and testing methods [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2015, 40(5): 632-644.

[10] 冯晓军,黄亚峰,徐洪涛. Al 粉对含铝炸药爆轰性能的影响 [J]. 火工品, 2012(1): 38-41.

FENG X J, HUANG Y F, XU H T. The influence of Al on the detonation parameters of aluminized explosives [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2012(1): 38-41.

[11] 杨胜晖,郑波. 含铝温压炸药的爆炸能量结构研究 [J]. 爆破器材, 2019, 48(2): 20-24.

YANG S H, ZHENG B. Explosion energy structure of aluminized thermobaric explosive [J]. Explosive Materials, 2019, 48(2): 20-24.

[12] DUAN X Y, GUO X Y, JIAO Q J, et al. Effects of Al/O on pressure properties of confined explosion from aluminized explosives [J]. Defence Technology, 2017, 13(6): 428-433.

[13] ZYGMUNT A, GANCZYK-SPECJALSKA K, KASZ-TANKIEWICZ A B, et al. Application and properties of aluminum in primary and secondary explosives [J]. Journal of Elementology, 2017, 22(2): 747-756.