

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.02.004

含铝温压炸药的爆炸能量结构研究*

杨胜晖 郑 波

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] 为了研究黑索今(RDX)基含铝温压炸药的爆炸能量释放规律及爆炸能量输出结构,对5种含铝温压炸药的爆热和爆速进行了测试,利用绝热式爆热量热计测量了铝粉质量分数为30%的RDX基含铝温压炸药在真空、0.1 MPa氮气、0.1 MPa空气和1.0 MPa氧气环境下的爆炸能量,结合测试数据对试样的爆轰热、爆热和燃烧热进行理论计算。结果表明,RDX基含铝温压炸药的爆速随铝粉含量的增加而线性减小;爆热随铝粉含量的增加呈现先增大后减小的趋势,在铝粉质量分数为40%时,爆热达到最大值。试样在真空、0.1 MPa氮气、0.1 MPa空气、1.0 MPa氧气环境下的爆炸能量逐渐增加,环境压力的增大和气氛环境中氧含量的增加都会提高炸药的爆炸能量,富氧环境下的爆炸能量可以定量地表征炸药的燃烧热。样品的爆轰热占燃烧热的9.8%~26.4%,爆热占燃烧热的34.5%~50.0%,且这两个参数都随铝粉含量的增加而降低。

[关键词] 爆炸力学;含铝温压炸药;爆炸环境;能量结构

[分类号] O381

Explosion Energy Structure of Aluminized Thermobaric Explosive

YANG Shenghui, ZHENG Bo

State Key Laboratory of Explosive Science and Technology, Beijing Institute of Technology (Beijing, 100081)

[ABSTRACT] In order to study the rules of explosive energy release and the structure of explosive energy output, the detonation heat and detonation velocity of five kinds of aluminized thermobaric explosives were measured. The explosion energy of RDX-based aluminized explosive containing 30% (mass fraction) Al was measured by adiabatic detonation calorimeter under different atmosphere: vacuum, 0.1 MPa nitrogen, 0.1 MPa air and 1.0 MPa oxygen. The heat of explosion and combustion were calculated theoretically. The results show that the detonation velocity reduce linearly with the increasing of aluminum content. The detonation heat increases first and then decreases with the increasing of aluminum content, and the heat of explosion reaches a maximum value when the aluminum content is 40%. The explosion energy of the sample increased gradually in sequence of vacuum, 0.1 MPa nitrogen, 0.1 MPa air and 1.0 MPa oxygen; the increase of environmental pressure and oxygen content results in the increase of explosion energy. Explosion energy in oxygen-enriched environment can quantitatively characterize the combustion heat of explosives. Detonation supporting heat of the sample accounts for 9.8%-26.4% of the combustion heat, and the detonation heat accounts for 34.5%-50.0% of the combustion heat, and both of these parameters decrease with the increase of aluminum content.

[KEYWORDS] explosion mechanics; aluminized thermobaric explosives; explosion atmosphere; energy structure

引言

温压炸药是在燃料空气炸药基础上发展而来的新型炸药,爆炸时利用热效应和压力效应能够有效地打击有限空间中的目标。温压炸药主要包含炸药颗粒、高热值金属粉及含能聚合材料等,铝粉通常作

为温压炸药金属添加剂使用,具有良好的综合性能^[1]。铝粉的加入使得炸药的爆轰过程为非理想爆轰,在爆轰反应区铝粉呈现惰性作用,爆轰反应之后,铝粉和爆轰产物抛撒在环境中,与周围空气中的氧反应,产生二次冲击波和更长时间的高温火球。与普通常规炸药相比,温压炸药的爆速、爆压都较低,但具有较长的作用时间、较高的冲量和能量利用

* 收稿日期:2018-12-26
第一作者:杨胜晖(1995 -),男,硕士研究生,主要从事爆炸力学的研究。E-mail:1041415811@qq.com
通信作者:郑波(1960 -),男,博士,研究员,主要从事爆炸力学的研究。E-mail:zhengbo@bit.edu.cn

效率。

因其独特的毁伤效能,对于温压炸药释能规律的研究成为焦点。项大林等^[2]测定了 RDX 基含铝炸药的爆轰参数,得到 RDX 基含铝炸药的爆压和爆速随铝氧质量比的增加呈现线性减小变化,爆热在铝氧质量比为 0.997 时达到最大值。曹威等^[3]测定了三氨基三硝基苯(TATB)基含铝炸药在不同气氛中的爆热,结果表明环境含氧量以及环境压力的增加都会使得实验样品的爆热值增加,并且在富氧环境下所测得的爆热值与样品的理论燃烧热值接近。王晓峰等^[4]根据量热法原理建立了不同气体环境中温压炸药爆炸能量的测量方法,提出温压炸药爆炸时释放的总能量包括爆轰能和燃烧能两部分。前述研究表明,铝粉作为含能添加剂,改善了炸药爆炸能量的输出结构;爆炸气氛环境及环境中的氧含量会直接影响炸药爆轰产物状态及二次反应完全性,从而影响炸药爆炸能量的输出。仅从爆热的角度不足以表征含铝温压炸药的 能量输出,而准确地预测此类炸药的 能量输出参数具有重要的意义。

本文中,测定了不同铝粉含量的 RDX 基含铝温压炸药的爆速及爆热,利用绝热式量热弹测量含铝炸药在不同气氛环境下的爆炸能量,对炸药爆炸能量的输出结构进行计算分析,以期 为温压炸药的配方设计提供参考。

1 实验

1.1 实验样品的制备

制备了 5 种不同配比的 RDX 基含铝温压炸药,样品的配方如表 1 所示。其中,铝粉 FLQ355A、FLQT4 的中位径 D_{50} 分别为 130 μm 和 6 μm ,活性均大于 98%。根据爆轰参数测试要求,采用压装工艺制作了 $\varnothing 25\text{ mm}$ 和 $\varnothing 30\text{ mm}$ 两种不同直径的药柱,分别用于爆热、爆速测试,药柱的密度约为理论密度

表 1 含铝温压炸药配方(质量分数)

Tab.1 Formulation of aluminized thermobaric explosive (mass fraction) %				
样品	RDX	铝粉		蜡
		FLQ355A	FLQT4	
1 [#]	87	5	5	3
2 [#]	77	10	10	3
3 [#]	67	15	15	3
4 [#]	57	20	20	3
5 [#]	47	25	25	3

的 95%。传爆药为 10[#]-159,药量为 10 g,用 8[#]雷管起爆。

1.2 爆热及爆速的测量

爆热测定方法参照 GJB772A—1997 方法 701.1 绝热法。实验仪器采用绝热式爆热量热计装置,爆热弹的容积为 5 L,内桶装入 20 L 的蒸馏水作为测温介质。样品 1[#]~样品 5[#]均进行真空爆热测试,药柱的质量为 30 g,直径为 25 mm,使用内径为 26 mm 的陶瓷外壳装药,利用真空泵抽取爆热弹内的空气,使真空压力不大于 -0.095 MPa,药柱在爆热弹内真空环境下被起爆。试样在爆热弹内爆炸后,根据量热计的热容量及升温值即可求出单位质量试样的定容爆热。

爆速测试采用电离导通式探针,测量方法按照 GJB772A—1997 方法 702.1 电测法。测试药柱的质量为 30 g,直径为 30 mm,每组试验采用 4 个药柱。

1.3 不同气氛环境下温压炸药爆炸能量的测量

为研究温压炸药的爆轰能量输出特性,测量铝粉质量分数为 30% 的温压炸药(样品 3[#])在不同气氛环境下的爆炸能量。实验仪器及测量原理与爆热测定方法一致,改变爆热弹内的气体环境,使爆热弹内分别充有真空 0.1 MPa 氮气、0.1 MPa 空气和 1.0 MPa 氧气,测量样品 3[#]在不同气氛环境下爆轰释放的爆炸能量。氮气和空气环境下试样质量为 30 g,直径为 25 mm;氧气环境下考虑到试样的热值较大,取药量为 15 g,直径为 25 mm,实验均使用内径为 26 mm 的陶瓷外壳装药。由于爆热弹内气氛环境会影响雷管及传爆药的 能量释放,因此,实验之前先对起爆序列在不同环境下的爆炸能量做出标定。

2 结果与讨论

2.1 铝粉含量对爆热和爆速的影响

实验测得样品的爆热及爆速结果见表 2。从表 2 可知,对于 RDX 基含铝温压炸药,铝粉含量的增

表 2 含铝温压炸药爆热及爆速测量结果

Tab.2 Test results of detonation heat and detonation velocity of aluminized thermobaric explosive

样 品	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	铝氧 质量比	爆热/ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)	爆速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1 [#]	1.740	0.157	6 627	8 216
2 [#]	1.805	0.356	7 617	8 133
3 [#]	1.869	0.614	8 063	7 941
4 [#]	1.947	0.961	8 598	7 787
5 [#]	2.018	1.458	7 522	7 545

加会导致爆速的降低,而爆热随铝粉含量的增加呈现先增大后减小的趋势。根据二次反应理论,炸药爆轰时在爆轰反应区的铝粉是惰性的,不参加化学反应,却还要消耗一部分爆轰能,从而导致爆速的降低^[5];炸药爆轰后,包含铝粉的爆轰产物开始膨胀,铝粉在高温、高压的条件下与爆轰产物进行二次燃烧反应,释放的能量不支持爆轰波阵面的传播,对爆速无贡献,但能提升炸药的爆热和做功能力。

爆热随铝粉含量的变化见图 1。当炸药中铝粉的质量分数小于 40% 时,爆热随铝粉含量的增加而增大;在铝粉质量分数为 40% 左右时,爆热达到极大值;此后,爆热随铝粉质量分数的增加反而减小;这与文献[2]给出的结果一致,铝粉对爆热提升贡献的饱和度在铝粉质量分数为 40% 左右,此时的铝氧质量比为 0.961。

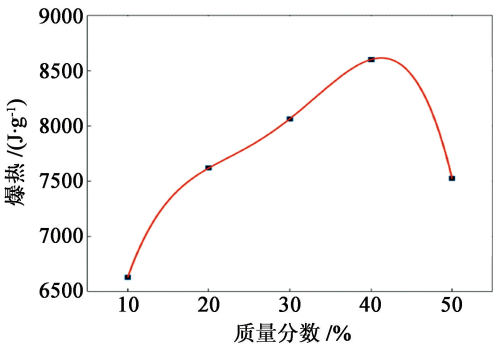


图 1 爆热与铝粉质量分数之间的关系
Fig. 1 Relationship between detonation heat and mass fraction of Al powder

爆速拟合结果见图 2,爆速随铝粉质量分数的增加呈线性减小。

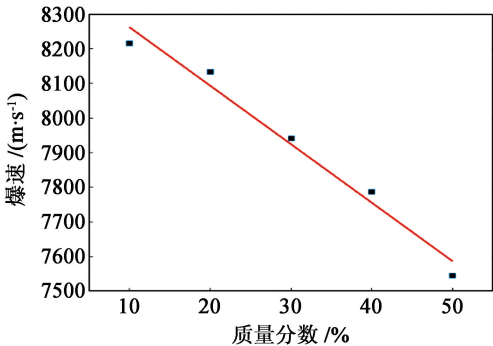


图 2 爆速与铝粉质量分数之间的关系
Fig. 2 Relationship between detonation velocity and mass fraction of Al powder

2.2 不同气氛环境对含铝温压炸药爆炸能量的影响

样品 3[#]在不同气氛环境下爆炸能量的测量结果见表 3。从表 3 可知,气氛条件对含铝温压炸药

爆炸能量的释放有非常大的影响。真空、氮气、空气和氧气环境下试样的爆炸能量依次增加。在 0.1 MPa 氮气环境下,试样的爆炸能量相对于真空环境提升了 3.3%,两种气氛环境下炸药都属于无氧爆轰,且铝粉与氮气反应生成的 AlN 含量非常低^[6],由此可见,环境压力的提高导致了含铝温压炸药爆炸能量的提升,外部压力的作用在一定程度上促进了炸药的爆轰反应以及铝粉与爆轰产物的二次反应。

表 3 不同气氛环境下样品 3[#]的爆炸能量

Tab. 3 Explosion energy of Sample 3[#] in different atmosphere

环境条件	气氛含氧量/ mol	爆炸能量/ (J · g ⁻¹)
真空	0	8 063
0.1 MPa 氮气	0	8 328
0.1 MPa 空气	0.01	9 027
1.0 MPa 氧气	0.49	16 362

在 0.1 MPa 空气环境下,试样的爆炸能量相比于 0.1 MPa 氮气环境提升了 8.4%,可见空气中氧气的存在使含铝炸药的爆炸能量得到提升。炸药在爆热弹中爆轰,生成的爆轰产物被限制在弹内狭小密闭的环境,空气中的氧加入到炸药的二次反应以及后燃烧反应当中,从而提高了含铝温压炸药的爆炸能量。

在 1.0 MPa 氧气环境下,试样的爆炸能量达到了 16 362 J/g。利用理想气体的状态方程 $pV = nRT$,近似地求得弹体内部氧气的含量约为 0.49 mol,通过对试样的计算得知,其完全氧化所需要的氧气为 0.24 mol,试样在弹体内处于富氧环境。利用盖斯定律求得该试样的燃烧热为 17 078 J/g,1.0 MPa 氧气环境下试样的爆炸能量与理论燃烧热十分接近,误差约为 -4%,试样在富氧环境下氧化完全。

3 含铝温压炸药爆炸能量构成

对于温压炸药,其释能过程可分为 3 个阶段^[7],即爆轰反应阶段、二次反应阶段和后燃反应阶段。从温压炸药的 3 个释能阶段来看,温压炸药的爆炸能量需要从 3 个方面进行讨论,即温压炸药的爆轰热、爆热和燃烧热^[8]。通过对能量参数的计算可以探究温压炸药爆炸能量的组成结构,分析铝粉作为含能添加剂对炸药爆炸能量输出结构的影响,为温

压炸药的配方优化设计提供参考。

3.1 爆轰热

爆轰热是炸药在爆轰反应阶段释放的能量,这部分能量主要传递给爆轰波并维持其稳定传播。炸药的爆轰热目前还无法通过实验准确测量,但可以通过CJ爆轰关系式对爆轰热进行求解^[9],两者关系如下:

$$Q_D = \frac{D^2}{2(\gamma^2 - 1)}。$$
 (1)

式中: Q_D 为炸药的爆轰热,J/g; D 为炸药爆速,m/s; γ 为炸药多方指数。

多方指数 γ 可通过炸药的组分以及初始密度进行计算:

$$\gamma = k + \Gamma_0(1 - e^{-0.546\rho_0});$$
 (2)

$$\Gamma_0 = \frac{\sum n_i}{\sum \Gamma_{0i}}。$$
 (3)

式中: k 为定压比热容与定容比热容比值,即 c_p/c_v ,取1.25; Γ_0 为总绝热指数; ρ_0 为混合炸药的装药密度,g/cm³; n_i 为混合炸药中*i*组分的物质的量,mol; Γ_{0i} 为混合炸药中*i*组分的绝热指数。

使用式(1)对含铝温压炸药的爆轰热进行计算,多方指数通过式(2)、式(3)计算,爆速采用实测值,计算结果见表4。从计算结果来看,铝粉的加入导致炸药的多方指数增大,含铝炸药的爆轰热随着含铝量的增加而减小。由二次反应理论和惰性热稀释理论可知,铝粉在反应区是惰性的,在爆轰反应区会吸收部分能量,因此,铝粉的相对含量越高,爆轰热越小。

表4 含铝温压炸药的爆轰热计算结果

Tab.4 Calculation results of CJ detonation heat of aluminized thermobaric explosive

样品	多方指数 γ	爆轰热 $Q_D/(J \cdot g^{-1})$
1 [#]	3.26	3 505
2 [#]	3.43	3 072
3 [#]	3.57	2 685
4 [#]	3.67	2 432
5 [#]	3.78	2 142

3.2 爆热

爆热是炸药爆轰反应阶段和二次反应阶段释放热量的总和,是炸药在不借助外界氧的情况下实际能够释放的能量。含铝温压炸药的爆热可通过量热实验测得,炸药在爆热弹内无氧条件下爆轰,所测得的爆炸能量即视为爆热。爆热的理论计算主要依据盖斯定律,计算方式如下:

$$Q_V = \sum \Delta H_f(\text{产物}) - \sum \Delta H_f(\text{生成物}) - n_g RT。$$
 (4)

式中: Q_V 为炸药的定容爆热,J/g; $\sum \Delta H_f$ 为物质的生成焓,J/g; n_g 为气体产物总物质的量,mol; R 为气体普适常数; T 为气体温度,K。

采用经验方法^[10] 建立爆炸反应方程式,样品爆热计算结果见表5。从计算结果与实测数据的对比发现,当铝粉质量分数低于20%时,计算结果与实测爆热误差较小;但误差随铝粉质量分数的增加而逐渐增大,当铝粉质量分数为30%时,相对误差达到了21.57%。在建立爆炸反应方程式时采用了全氧化法,认为基体炸药中的全部氧均用来将铝粉氧化成Al₂O₃,当铝粉质量分数较大时,实际爆炸过程无法满足铝粉对氧的充分利用,且铝粉二次反应过程十分复杂,二次反应产物无法精确确定,导致计算误差变大。根据理论计算,铝粉质量分数在30%左右时,爆热达到最大值,此时的铝粉质量分数为获得最大燃烧热效应的理论加入量。

表5 含铝温压炸药的爆热计算结果

Tab.5 Calculation results of detonation heat of aluminized thermobaric explosive

样品	爆热实测值/ (J · g ⁻¹)	爆热计算值/ (J · g ⁻¹)	相对误差/ %
1 [#]	6 627	6 657	0.45
2 [#]	7 617	7 669	0.68
3 [#]	8 063	9 802	21.57
4 [#]	8 598	9 261	7.71
5 [#]	7 522	7 719	2.62

3.3 燃烧热及爆炸能量构成

燃烧热 Q_C 是炸药中的可燃元素均完全氧化的情况下所能释放的最大能量,是衡量温压炸药爆炸潜能的重要参数。分析样品3[#]在富氧环境下爆炸能量的测量结果,利用量热法测量得到的含铝温压炸药在富氧环境下的爆炸能量接近于炸药的燃烧热。燃烧热的计算仍然建立在盖斯定律的基础上,温压炸药属于负氧平衡炸药,在建立燃烧反应方程式时,外界的供氧量需保证炸药中的可燃元素被完全氧化。

温压炸药由于其独特的能量应用形式,除了满足常规的爆轰性能要求外,燃烧热应具有较大值。表6 为实验样品的能量构成,其中,燃烧热通过盖斯定律求得。

从计算结果可知,铝粉含量越高,温压炸药的燃烧热越大。从实验样品的能量构成来看,样品的爆

表 6 含铝温压炸药的燃烧热及
能量结构

Tab.6 Combustion heat and energy structure
of aluminized thermobaric explosive

样品	燃烧热/ (J · g ⁻¹)	Q_b/Q_c / %	Q_v/Q_c / %
1 [#]	13 253	26.4	50.0
2 [#]	15 410	19.9	49.4
3 [#]	17 078	15.7	47.2
4 [#]	19 689	12.4	43.7
5 [#]	21 831	9.8	34.5

轰热占燃烧热的9.8%~26.4%，爆热占燃烧热的34.5%~50.0%，且 Q_b/Q_c 和 Q_v/Q_c 都随铝粉含量的升高而降低。当炸药的铝粉质量分数低于40%时，随铝粉质量分数的提升，样品的爆轰热减小，爆热和燃烧热增加；当铝粉质量分数超过40%时，铝粉含量过高导致炸药的爆热出现下降趋势。由此可见，铝粉作为含能添加剂，对温压炸药爆炸能量的输出结构有非常大的影响，合理地分析温压炸药爆炸能量构成，是含铝温压炸药配方设计的关键所在。

4 结 论

1) RDX 基含铝温压炸药的爆速随着铝粉含量的增加而减小，爆热随铝粉含量增加表现出先增后减的趋势。根据理论计算，获得最大燃烧热效应的铝粉理论加入量在铝粉质量分数 30%（铝氧质量比为 0.614）左右；实际测试中，铝粉质量分数在 40%（铝氧质量比为 0.961）时爆热达到极大值。

2) 在不同气氛环境下，同一配方含铝温压炸药的爆炸能量是不同的。环境压力的提高会导致炸药爆炸能量的提升；当气氛环境中存在氧气时，氧气会加入到炸药的二次反应以及后燃烧反应当中，提高炸药的爆炸能量。富氧环境下测得的爆炸能量接近于炸药的燃烧热。

3) 铝粉作为含能添加剂，改善了炸药爆炸能量的构成。本文中，对温压炸药能量参数的测试和计算，提供了分析温压炸药的爆炸能量输出结构的一种手段，对优化温压炸药的配方设计具有指导意义。

参 考 文 献

[1] 裴明敬, 毛根旺, 胡华权, 等. 含铝温压燃料性能研究[J]. 含能材料, 2007, 15(5): 441-446,463.

PEI M J, MAO G W, HU H Q, et al. Characteristic of the thermobaric explosive contained aluminun powders [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007, 15 (5): 441-446,463.

[2] 项大林, 荣吉利, 李健, 等. 黑索今基含铝炸药的铝氧比对爆轰性能及其水下爆炸性能的影响[J]. 兵工学报, 2013, 34(1): 45-50.

XIANG D L, RONG J L, LI J, et al. Effect of Al/O ratio on detonation performance and underwater explosion of RDX-based aluminized explosive [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(1): 45-50.

[3] 曹威, 郭向利, 段英良, 等. 不同气氛对 TATB 基含铝炸药爆热的影响[J]. 爆破器材, 2016, 45(2): 34-37.

CAO W, GUO X L, DUAN Y L, et al. Detonation heat of TATB-based aluminized explosive in different atmospheres [J]. Explosive Materials, 2016, 45(2): 34-37.

[4] 王晓峰, 冯晓军, 肖奇. 温压炸药爆炸能量的测量方法[J]. 火炸药学报, 2013, 36(2): 9-12.

WANG X F, FENG X J, XIAO Q. Method for measuring energy of explosion of thermobaric explosives [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2013, 36(2): 9-12.

[5] MILLER P J. A reactive flow model with coupled reaction kinetics for detonation and combustion in non-ideal explosives [C]//MRS Online Proceedings Library Archive. Cambridge: Cambridge University Press, 1995 (418): 413-420.

[6] KICIŃSKI W, TRZCIŃSKI W A. Calorimetry studies of explosion heat of non-ideal explosives [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2009, 96(2): 623-630.

[7] 王晓峰, 冯晓军. 温压炸药设计原则探讨[J]. 含能材料, 2016, 24(5): 418-420.

[8] 韩早. 温压炸药能量参数计算与释能规律研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.

HAN Z. The calculation of thermal parameters and the characterization of energy release in themobaric explosions [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2015.

[9] 宁建国, 王成, 马天宝. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 93-94.

NING J G, WANG C, MA T B. Explosion and shock dynamics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 93-94.

[10] 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: 475-477.