

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.04.008

黏结剂含量对含铝炸药燃烧能量的影响^{*}

冯 博 王晓峰 冯晓军 田 轩 徐洪涛

西安近代化学研究所(陕西西安,710165)

[摘 要] 利用小型密闭燃烧装置分别测试了两种黏结剂含量的 RDX 基和 HMX 基含铝炸药燃烧产生的准静态压力,得到 4 种含铝炸药燃烧能量的关系。利用气相色谱仪检测出部分气相燃烧产物的含量,通过化学计算探讨了 4 种含铝炸药的铝粉反应率,并用扫描电镜和能谱(EDS)对 4 种炸药的微观形貌和表面元素进行表征。结果表明,含铝炸药中黏结剂含量增加会使炸药与铝粉颗粒的表面包覆层变厚,更加阻碍铝粉在燃烧初期的吸热,从而在一定程度上导致铝粉反应率减小,并降低炸药燃烧总能量。

[关键词] 含铝炸药;黏结剂;燃烧能量;微观形貌;铝粉反应率

[分类号] TQ56

引言

含铝炸药作为一种高爆破型混合炸药被广泛使用。由于铝粉在爆轰波阵面后的二次反应中放出高热量,所以这类炸药在爆轰时可产生高爆热和高比容,从而有较高的作功能力^[1-3]。含铝炸药能量及其能量输出直接影响其作功能力,因此,对于含铝炸药能量以及能量输出的研究具有比较重要的意义。

Arnold^[4-5]提出并模拟验证了一个含铝炸药的爆轰和燃烧模型,该模型认为含铝炸药爆轰由无氧爆轰、无氧膨胀和有氧燃烧 3 个阶段构成。而含铝炸药能量的释放主要分为两个阶段,即爆轰能量释放过程与后燃能量释放过程^[6-8]。后燃过程一般指主体炸药爆轰后,爆轰产物(H_2O 、C、CO、 CO_2 等)、铝粉和空气的第二阶段反应。郑波等^[9]采用高速运动分析系统观察了高爆速炸药和含铝炸药爆炸以及产物抛撒的过程,通过比较,直观地观察到含铝炸药爆炸和后燃两个过程。Ames^[8]提出,对于内爆条件,爆轰能量体现为爆轰压,其在爆炸室内传播,最后衰减为准静态压力;后燃能量经由后燃反应放热直接转变成准静态压力。准静态压力是指炸药在密闭装置内爆炸后,装置内部所能达到的平衡压力。因此,准静态压力可以对炸药爆炸释放的总能量进行表征^[5,8]。对于炸药的燃烧,由于铝粉与炸药的反应的不同时性,其燃烧也具有两个阶段,准静态压力亦可对其燃烧能量进行表征。

本研究通过对炸药燃烧准静态压力的测量,对比两种不同黏结剂含量的 RDX 基与 HMX 基含铝炸

药燃烧能量的大小关系。用气相色谱仪对含铝炸药的部分燃烧气相产物进行检测,并通过化学计算探讨其铝粉反应状况;利用扫描电镜(SEM)与能谱(EDS)对相应的微观结构与表面元素进行表征,最终探讨黏结剂含量对含铝炸药燃烧能量的影响。

1 试验

1.1 试样制备

根据试验要求,设计了 4 种炸药配方,见表 1。RDX, GJB296A—1995, 2 类; HMX, GJB2335—1995, 6 类; Al 粉, 活性 98.9%, GJB1738—1995, FLQT-3, 13 μm (D_{50}); 石蜡, GB446—1993。

表 1 含铝炸药配方(质量分数)

Tab. 1 Composition of aluminized explosives
(mass fraction)

炸药	% 石蜡			
	RDX	HMX	Al	
R1	76	0	20	4
R2	72	0	20	8
H1	0	76	20	4
H2	0	72	20	8

试样为炸药造型粉,由直接法制得。先将 HMX 与 Al 粉干混均匀,再利用石蜡对混合药粉进行包覆后强制通过 26 目筛进行造粒。为保证不同配方试样状态的一致性,试验过程中采用 $\varnothing 25 mm \times 40 mm$ 的纸质圆柱药筒盛装炸药造型粉,装药量 20 g(通过各配方炸药造型粉堆积密度的测量,并为保证每次试验的装药密度一致,每次的装药高度控制在 33

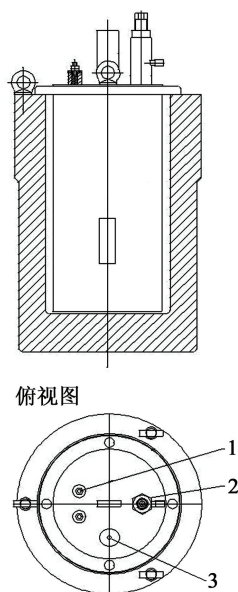
^{*} 收稿日期:2013-09-23

作者简介:冯博(1987~),男,硕士研究生,主要从事混合炸药技术研究。E-mail: rfb061439@163.com

mm), 用 1 g 黑火药点火。

1.2 准静态压力测量

准静态压力的测量采用直接法, 利用自行设计的小型密闭燃烧装置, 直接用压力传感器对炸药在密闭环境下燃烧过程的压力进行测量。密闭燃烧装置是在原有爆热弹的基础上改造而成, 在弹盖上加工了压力传感器的接口, 用来安装压力传感器, 进行炸药燃烧过程中体系压力变化的测量, 本装置采用美国库力特公司的耐高温高压阻压力传感器。密闭燃烧装置为一钢结构的圆柱型弹体, 内容积为 5.8 L, 装置采用真空橡胶垫片密封。装置结构见图 1。



1 - 点火装置; 2 - 通气装置; 3 - 压力传感器

图 1 密闭燃烧装置结构

Fig. 1 Schematic diagram of hermetic crucible for combustion

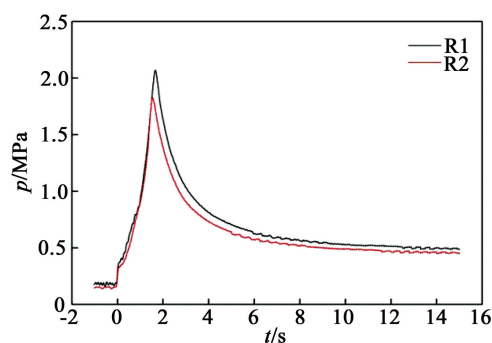
考虑到炸药燃烧过程的产物喷射对压力传感器的破坏性作用, 选择将炸药纸筒悬挂于距弹体顶部 3/4 的位置处。由恒压电源点燃放置于盛装炸药的药筒口部的黑火药, 黑火药将炸药引燃, 同时压力传感器将接收到的压力信号转化成电信号, 并由高速数据采集仪记录, 然后将得到的数据传输到计算机中进行处理, 最终得到能够描述密闭燃烧装置中压力变化趋势的压力与时间曲线。

2 结果与讨论

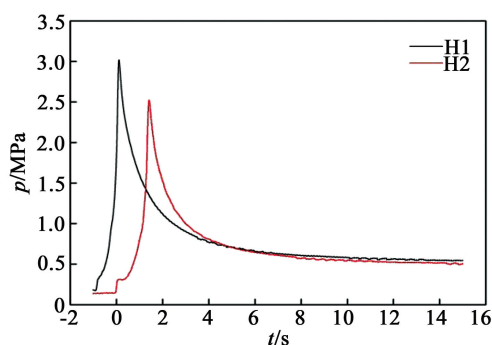
2.1 压力曲线分析

在密闭燃烧装置内对所选的 4 种含铝炸药进行燃烧试验, 装置内保持一个大气压, 分别得到 4 种炸药燃烧过程中的压力与时间曲线, 如图 2 所示。

炸药一经点燃, 随着燃烧在炸药中进行并生成气相产物, 密闭燃烧装置中局部的压力迅速升高。待炸药燃烧殆尽以及燃烧产物在密闭燃烧装置中进



(a) RDX 基



(b) HMX 基

图 2 不同含铝炸药燃烧过程的压力与时间关系

Fig. 2 Relationship between combustion pressure and time for different aluminized explosives

一步地扩散均匀, 其内部压力也随之迅速下降并趋于平衡, 最终形成准静态压力。

由图 2 可知, 对于 RDX 基含铝炸药 R1 与 R2, 配方 R1 燃烧所达到的压力峰值和准静态压力均高于 R2; 对于 HMX 基含铝炸药 H1 与 H2, 配方 H1 燃烧所达到的压力峰值和准静态压力均高于 H2。在 4 种配方中, R1 与 H1 均为黏结剂含量低的配方。由图 2 分别得到 4 种配方的准静态压力值 (取曲线最后 50 个点的平均值), 如表 2 所示。

表 2 不同含铝炸药燃烧的准静态压力

Tab. 2 Quasi-static pressure of combustion for different aluminized explosives

配方	MPa			
	R1	R2	H1	H2
准静压	0.489	0.449	0.541	0.513

由于准静态压力可以用于表征炸药所释放的总能量, 由表 2 可知, 对于 HMX 基含铝炸药与 RDX 基含铝炸药, 随着炸药中黏结剂含量的增加, 炸药的燃烧能量降低。一方面, 由于炸药中黏结剂含量增加, 在保持铝粉含量不变的情况下, 主炸药的量相应减小, 这就使得主炸药燃烧所释放的能量相对减少, 从而一定程度上影响炸药所释放的总能量; 另一方面,

由于黏结剂含量的增加,铝粉的后燃可能也会受到一定的影响,从而也在一定程度上影响炸药燃烧所释放的总能量。前者显而易见,而黏结剂含量对后燃的影响则需要对炸药中铝粉的反应率进行进一步探讨。

2.2 铝粉反应率探讨

一般情况下,含铝炸药中的铝粉并未完全反应并释放能量^[2,10-11]。铝粉的反应率,即铝粉的反应完全率,是指含铝炸药在爆炸、燃烧等过程中参加化学反应的铝粉占配方中铝粉加入量的百分数。黏结剂含量对铝粉后燃反应的影响,体现为影响铝粉的反应率。密闭燃烧装置中的炸药燃烧固态产物难以收集,但对炸药燃烧的气相产物进行了收集,并用气相色谱仪对其气相产物组成进行分析。根据气相色谱检测结果,遵循化学反应的元素与质量守恒推导出所有燃烧产物的组成以及含量,从而得到铝粉的反应率。4 种炸药气相产物的气相色谱检测结果如表 3 所示。

表 3 不同含铝炸药燃烧产物的
气相色谱检测结果(体积分数)

Tab. 3 GC results of combustion products for
different aluminized explosives(volume fraction)

炸药	CH ₄	CO ₂	N ₂	CO
R1	0.1237	6.5064	63.4114	20.2161
R2	0.1263	7.0854	62.6096	17.4748
H1	0.1390	2.8959	60.5433	24.9719
H2	0.1401	3.7904	59.9929	21.1261

由于炸药燃烧的剧烈程度比爆炸的剧烈程度弱很多,并根据很多学者的研究^[2,10-12],对含铝炸药燃烧产物的存在形式进行了以下近似处理:

1) 炸药中的 N 元素在燃烧反应过程中完全生成 N₂;

2) 由于气相色谱在检测前自动将液态 H₂O 除去,所以认为最终产物中 H₂O 为液态,且 H 元素仅存在于 CH₄、H₂ 与液态 H₂O 中;

3) O 元素以 CO、CO₂、H₂O、Al₂O₃ 共 4 种形式存在;

4) C 元素以 CH₄、CO、CO₂、C 4 种形式存在;

5) Al 元素以单质 Al、Al₂O₃ 2 种形式存在;

6) 密闭燃烧装置内空气为理想气体,并认为只含有 N₂ 与 O₂,体积比为 79/21,总量 5.8L,燃烧后将空气中 O₂ 消耗殆尽(气相色谱未检测出 O₂)。

在以上近似处理的基础上,可以确定炸药的燃烧产物组成为 CO₂、CO、CH₄、C、N₂、H₂O、H₂、Al₂O₃ 和 Al 共 9 种物质,其中只有 CO₂、CO、CH₄、N₂、H₂ 为气相。根据表 3 中气相产物的检测结果,依据化学反应的元素与质量守恒,计算出 20 g 各配方含铝炸药的燃烧产物组成和含量以及铝粉的反应率,结果如表 4 所示。

由于含铝炸药的燃烧反应并不是非常剧烈,所以上述对燃烧产物的 6 种近似处理所带来的误差相对较小。由表 4 可知,无论对于 HMX 基含铝炸药还是 RDX 基含铝炸药,黏结剂含量的变化确实会对铝粉的后燃有一定的影响,从而影响炸药燃烧的总能量。黏结剂含量的增加会使铝粉反应率减小,从而导致炸药释放的总能量下降,体现在本试验中准静态压力的降低。

铝粉反应率降低可能是由于黏结剂含量增加使得主炸药比例降低并导致混合炸药中氧含量降低。但假设降低的氧含量全部是最后生成 Al₂O₃ 中的氧,通过计算可知,增加质量分数为 4% 的黏结剂最多会导致铝粉反应率下降 9.7%。这与计算结果有一定的差距,并且这部分降低的氧含量不可能全存在于产物 Al₂O₃ 中,因此,铝粉反应率降低不只是由于混合炸药中氧含量降低。对于混合炸药,配方的变化同时也会导致其微观结构的变化,尤其是黏结剂含量的变化。黏结剂含量的增加会使炸药与铝粉表面的包覆层厚度增加,空间接触程度与颗粒间的热传导会有一定的变化,可能会影响铝粉的反应率,因此,铝粉反应率降低的另一方面原因可能在于混合炸药的微观形貌。

表 4 20 g 不同含铝炸药的燃烧产物组成与铝粉反应率

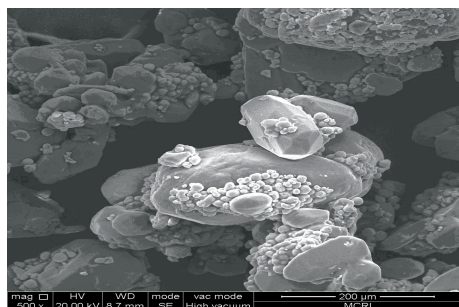
Tab. 4 Combustion products and reaction rates of Al for 20g different aluminized explosives

炸药	燃烧产物物质的量/mol									Al 反应率/%
	N ₂	CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	H ₂ O	C	Al ₂ O ₃	Al	
R1	0.3902	0.0400	0.1244	0.0008	0.0560	0.2042	0.0968	0.0334	0.0814	45.06
R2	0.3794	0.0429	0.1059	0.0008	0.0770	0.2352	0.1583	0.0201	0.1080	27.12
H1	0.3902	0.0187	0.1609	0.0009	0.0738	0.1903	0.0815	0.0401	0.0681	54.08
H2	0.3794	0.0240	0.1336	0.0009	0.0945	0.2176	0.1495	0.0294	0.0895	39.62

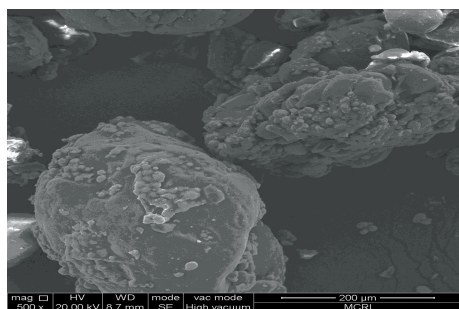
2.3 微观形貌分析

黏结剂含量增加,可能会影响炸药的微观结构与形貌,进而影响铝粉的反应。对此,将本次试验中的 4 种炸药的造型粉进行微观形貌分析与表面元素分析。扫描电镜(SEM)获得的 4 种炸药造型粉的微观形貌如图 3 所示,能谱分析(EDS)得到的造型粉表面元素组成结果如表 5 所示。

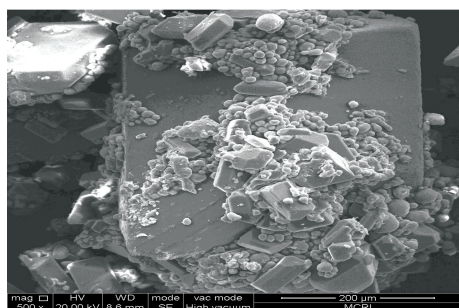
由图 3 可以看出,相比于 R1 与 H1, R2 与 H2



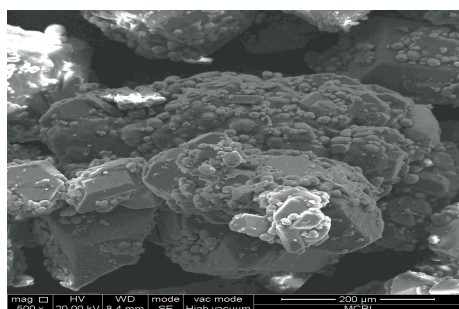
(a) R1



(b) R2



(c) H1



(d) H2

图 3 不同含铝炸药的扫描电镜照片

Fig. 3 SEM images of different aluminized explosives

表 5 不同含铝炸药的表面元素组成

Tab. 5 Surface elements of different aluminized explosives

炸药	质量分数/%			
	C	N	O	Al
R1	45.19	24.20	20.07	10.53
R2	51.81	21.52	20.05	6.62
H1	47.52	21.88	19.51	11.09
H2	58.54	17.41	14.65	9.40

的表面出现较多的黏结剂富集,更多的铝粉颗粒被黏结剂覆盖,黏结剂的包覆相对过量。

从表 5 中炸药的表面元素组成看,相比炸药 R1 与 H1,炸药 R2 与 H2 表面的 C 元素质量分数均有所增大,而其它 3 种元素的质量分数均减小。对于本试验中的 4 种炸药,黏结剂石蜡只含有 C、H 两种元素,而 N 元素也只存在于 RDX 与 HMX 中。因此,黏结剂含量的增加会使炸药与铝粉颗粒的表面包覆层变厚。

在含铝炸药燃烧过程中,RDX 与 HMX 燃烧速率很快,而铝的燃烧相对较慢,因此,含铝炸药的燃烧也基本分为两个阶段。

在燃烧初期,RDX 与 HMX 快速燃烧释放能量并趋向于与周围环境的快速平衡,而大部分铝粉处于吸热阶段,并且铝粉需要吸收一定的能量达到反应阈值才能反应,在此阶段铝粉吸收的热量越多越有利于铝粉的后燃。铝粉又被黏结剂包覆,主炸药燃烧释放的能量一定程度上要通过黏结剂传递给铝粉,而试验中选用石蜡为黏结剂,其具有较大热容和较小导热系数^[2,13],越厚的表面包覆层越不利于铝粉在燃烧初期的吸热。

因此,含铝炸药中黏结剂含量的增加,使得微观上颗粒表面包覆层变厚,更加阻碍了燃烧过程前期铝粉的吸热,致使参加后燃反应的铝粉比例有一定程度的减小,并最终使燃烧释放的总能量降低。

3 结论

1) 通过测试含铝炸药在密闭容器中燃烧所产生的准静态压力,可以简单、直观地获得不同配方含铝炸药燃烧能量的大小关系。

2) 根据气相色谱仪对燃烧气相产物的检测结果,通过计算确定,含铝炸药中黏结剂含量增加,铝粉的反应率减小,从而导致炸药燃烧的总能量下降。

3) 含铝炸药中黏结剂含量增加会使炸药与铝粉颗粒的表面包覆层变厚,更加阻碍铝粉在燃烧初期的吸热,从而在一定程度上导致铝粉反应率减小,

并降低炸药燃烧总能量。

参 考 文 献

- [1] 王晓峰. 军用混合炸药的发展趋势[J]. 火炸药学报, 2011,34(4):1-4.
Wang Xiaofeng. Developmental trends in military composite explosive[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2011,34(4):1-4.
- [2] 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.
- [3] 陈朗, 龙新平, 冯长根, 等. 含铝炸药爆轰[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [4] Arnold W, Rottenkolber E. Thermobaric charges: Modeling and testing[C]//Proceeding of the 38th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, 2007: P2/1-P2/12.
- [5] Arnold W, Rottenkolber E. Combustion of an Aluminized Explosive in a Detonation Chamber[C]//Proceeding of the 39th International Annual Conference of ICT, Karlsruhe, 2008: P17/1-P17/12.
- [6] 韩勇. 含铝炸药非理想爆轰行为的研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2002.
- [7] Edri I, Feldgun V R, Karinski Y S, et al. On blast pressure analysis due to a partially confined explosion; III. Afterburning Effect[J]. International Journal of Protective Structures, 2012(3):311-332.
- [8] Ames R G, Drotar J T, Silber J, et al. Quantitative distinction between detonation and afterburn energy deposition using pressure-time histories in enclosed explosions [C]//13th International Detonation Symposium. Virginia, 2006:253-262.
- [9] 郑波, 陈力, 丁雁生, 等. 温压炸药爆炸抛撒的运动规律[J]. 爆炸与冲击, 2008,28(5):433-437.
Zheng Bo, Chen Li, Ding Yansheng, et al. Dispersal process of explosion production of thermobaric explosive [J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(5):433-437.
- [10] Makhov M N. The heat and products of explosion of aluminized high explosives [C] // Proceeding of the 31st International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, 2000: P42/1-P42/11.
- [11] 李静, 王伯良, 赵新颖, 等. 高含铝炸药爆炸过程中的能量分析[J]. 爆破器材, 2013,42(2):10-13.
Li Jing, Wang Boliang, Zhao Xinying, et al. Energy analysis in the explosion process of high aluminized explosive [J]. Explosive Materials, 2013,42(2):10-13.
- [12] 冯博, 王晓峰, 冯晓军, 等. HMX 基含铝炸药铝粉反应率的估算[J]. 爆破器材, 2013,42(4):20-23.
Feng Bo, Wang Xiaofeng, Feng Xiaojun, et al. Reaction rate evaluation on the aluminum powder in HMX-based aluminized explosives [J]. Explosive Materials, 2013,42(4):20-23.
- [13] 陆明. 炸药的分子与配方设计[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2004.

Effect of Binder Content on the Combustion Energy of Aluminized Explosives

FENG Bo, WANG Xiaofeng, FENG Xiaojun, TIAN Xuan, XU Hongtao

Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] Small closed device for combustion was used to measure the combustion quasi-static pressures of both RDX-based and HMX-based aluminized explosives, each of which has two different binder contents. The energy relations of combustion among these four explosives were obtained. Contents of some gaseous combustion products were tested by gas chromatograph, and Al reaction ratios of the four aluminized explosives were discussed by chemical calculations. The microcosmic structure and surface elements content of these four explosives were characterized by SEM and EDS. The results show that the surface coating of explosive particles would be thicker, because of the binder content increased in aluminized explosives. The thicker surface coating would make heat absorption of Al more difficult in the prime of combustion. And then the Al reaction ratio would be decreased and the energy of combustion would be lower.

[KEY WORDS] aluminized explosive; binder; energy of combustion; microcosmic structure; reaction ratio of Al

声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部