

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.03.001

温压炸药爆炸释热特性研究*

金朋刚 王晓峰 郭 炜 任松涛 王建灵 高 赞

西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 为了研究 RDX 基温压炸药的爆炸热量释放历程,对自由场和半密闭条件下的 TNT、852 及 G-1 温压炸药爆炸过程进行了空爆试验,采用热通量传感器记录了 3 种炸药在两种试验环境下爆炸过程中的热通量时间历程。结果表明,热通量传感器可以获得炸药爆轰、无氧燃烧及有氧燃烧 3 个阶段的热历程时间曲线;在半密闭空间中爆炸时,G-1 温压炸药有 3 个明显的热量释放历程:爆轰、无氧燃烧和有氧燃烧;TNT 和 852 炸药只有爆轰和有氧燃烧过程。结合 852 及 G-1 温压炸药配方组成,对比分析热量释放时间历程曲线认为,铝粉均参与了 G-1 温压炸药的 3 个反应阶段。对比自由场和半密闭条件试验结果发现,试验环境对温压炸药反应历程影响较大,半密闭条件有利于提高温压炸药的热量输出。

[关键词] 温压炸药;热辐射通量;爆轰;后燃烧;无氧燃烧;有氧燃烧

[分类号] TQ560

引言

炸药爆炸是一个高温高压的剧烈化学反应^[1],产生的高压以冲击波的形式向外传播,高温主要以热辐射的形式向外传播^[2-3],因此,热辐射的变化过程中含有大量的爆炸化学反应的微观信息。

温压炸药是一种能够利用环境中氧气提高炸药自身能量释放量的新型炸药,其爆炸热效应较常规高爆炸药更显著^[4-5],热量释放过程更复杂;大量的研究表明,温压炸药的爆炸过程可能存在多阶段的燃烧过程^[6-8]。因此,对温压炸药爆炸过程中热量输出的研究成为本领域新的热点。德国科学家^[9]在非理想体系温压炸药三阶段反应理论假设的基础上建立了温压炸药能量输出的计算模型,得到的温压炸药准静态压力与试验结果非常吻合,因此,推断温压炸药的反应过程分为爆轰、无氧燃烧和有氧燃烧 3 个阶段。国内在含铝温压炸药多阶段热输出特性研究方面也主要利用仿真技术,徐更光等^[10-11]通过改进的点火增长模型及 KHT 和 BKW 方程计算了含铝温压炸药的爆轰参数,并认为可能有部分铝粉参与了爆轰反应,并释放热量。由于试验技术的限制,温压炸药三阶段热量输出的试验研究还未见报道。

本文通过热辐射通量传感器表征了 3 种炸药在自由场和半密闭两种试验条件下的热通量时间历程,从热量释放的角度分析了温压炸药的反应特性。

1 试验部分

1.1 试验样品及仪器

试验样品信息见表 1。样品质量均为 200 g,炸高为 1.7 m。试样均采用 8#雷管起爆。用成都南汇科技生产的 VXI 数据采集器记录 HFM 型热通量传感器信号和 PCB 压力传感器信号,采样频率为 $1 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 。

表 1 试样组分、质量及制造工艺

Tab. 1 Information about samples

试样名称	组成 (质量分数)/%	制药工艺	质量/ g	直径/ mm
TNT	TNT:100	压装	200	60
852	RDX/黏结剂:96/4	压装	200	60
G-1	RDX/Al/黏结剂: 64/20/16	浇注	200	50

1.2 试验布局

温压炸药在自由空间、密闭及半密闭条件下的反应特性不同,为了对比环境对温压炸药反应过程的影响,设计了自由场和半密闭两种试验条件。

自由场条件:将试样悬挂在距地面 1.7 m 处,在距离爆心 2.0 m 处安装热通量传感器和 PCB 压力传感器(距地面均 1.7 m),压力传感器作为系统触发装置;热通量传感器与压力传感器共用同一支架。

* 收稿日期:2013-08-28

基金项目:国防重大基础专项项目

作者简介:金朋刚(1978~),男,副研究员,硕士,主要从事炸药性能评估技术研究。E-mail:jinpenggang204@126.com

通信作者:王晓峰(1964~),男,研究员,中国兵器工业集团公司首席科学家,主要从事炸药及装药技术研究。

半密闭条件:在自由场条件的基础上,距试样两侧 1.0 m 处安装 4 mm 厚钢板,钢板尺寸为 4.0 m × 4.0 m (图 1);在半密闭空间轴线上距爆心水平距离 2.0 m 处布置热通量传感器和 PCB 压力传感器,压力传感器作为系统触发装置(图 2)。

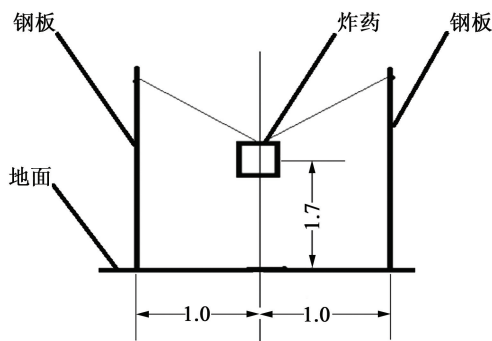


图 1 半密闭试验示意图(单位:m)

Fig.1 Sketch of test in semi-enclosed condition(unit:m)

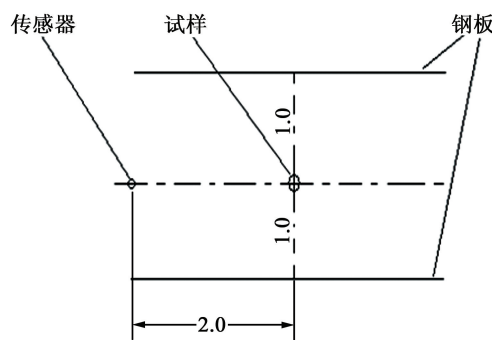


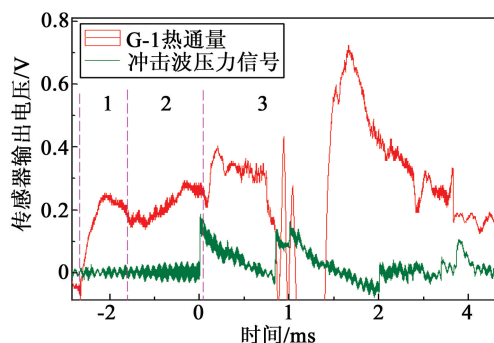
图 2 传感器布局俯视图(单位:m)

Fig.2 Vertical view of the layout of sensors(unit:m)

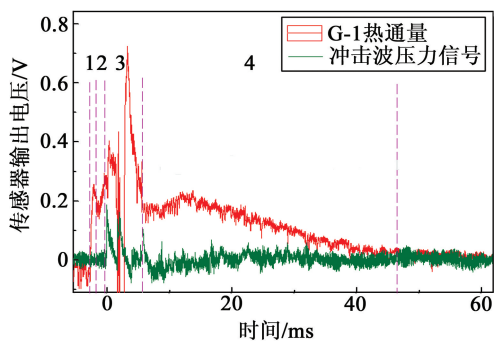
2 结果与讨论

2.1 热通量时间曲线

图 3 是 G-1 炸药在自由场条件下的热通量及压力时间曲线。由于爆轰、无氧燃烧和有氧燃烧 3 个阶段的时间跨度很大,难以在同一图中清楚地绘制出,因此将图形分为图 3(a)和图 3(b)。TNT/Al 的爆轰反应时间约小于 1 ms^[12];结合热通量传感器光辐射测量原理^[13]可以判定,热通量第一个峰为 G-1 炸药爆轰过程热通量时间曲线。另从图 3 可知,当冲击波压力信号还未到达时,热通量传感器已有信号输出,两者时间差约为 2.8 ms,这一时间段是图 3(a)中 1 和 2 区域。图 3(a)中区域 1 时间约为 0.7 ms,区域 2 的时间约为 2.1 ms,且此时冲击波还未到达传感器附近,冲击波将空气沿爆心方向向外推动,爆心区域形成负压区,此时的空气量很少,爆炸反应产物的温度非常高,主要是高温的爆炸产物之间的放热化学反应在进行,也叫无氧燃烧阶段^[12]。无氧燃烧阶段还未完成时,冲击波传播至热通量传



(a) 10 ms 内



(b) 60 ms 内

图 3 G-1 炸药自由场条件下热通量及压力时间曲线

Fig.3 Curves of heat flux and pressure changing with time for G-1 in free field

感器附近,在传感器支架、安装管等硬介质处发生反射(热通量传感器安装在钢管内),形成反射压,在热通量传感器敏感面压缩空气,导致空气温度骤然升高,严重干扰了热辐射传感器对爆炸反应过程中热输出的测量^[13],这种干扰体现在图 3(a)中 3 区域,干扰持续的时间从图 3(b)中可以读出,约为 6 ms。当冲击波及其反射压掠过热辐射通量传感器后,G-1 炸药的反应过程还在持续,并仍存在一个放热过程(40 ms),如图 3(b)中 4 区域,这与冯晓军等^[14]测量结果相近。这一时间段内,G-1 炸药主要进行有氧燃烧反应^[9]。TNT 和 852 炸药的热释放过程与 G-1 炸药的热释放过程有一定相似性。

2.2 环境对温压炸药反应过程的影响

图 4 和图 5 分别是两种条件下 3 种炸药热通量时间曲线。由图 4(a)和图 5(a)可以看出,G-1 炸药无氧燃烧阶段的热量释放随环境条件的变化而改变:半密闭条件下热量释放有明显的持续增长过程。环境的改变不会影响 TNT 和 852 炸药无氧燃烧阶段的热量释放过程。温压炸药的后燃烧过程中有氧燃烧阶段对环境的依赖程度更高^[9],比较图 4(b)和图 5(b)可以看出,自由场条件下,G-1 炸药的爆炸过程中存在一个不明显的有氧燃烧阶段;半密闭条件下,G-1 炸药的爆炸过程中存在明显的有氧燃烧

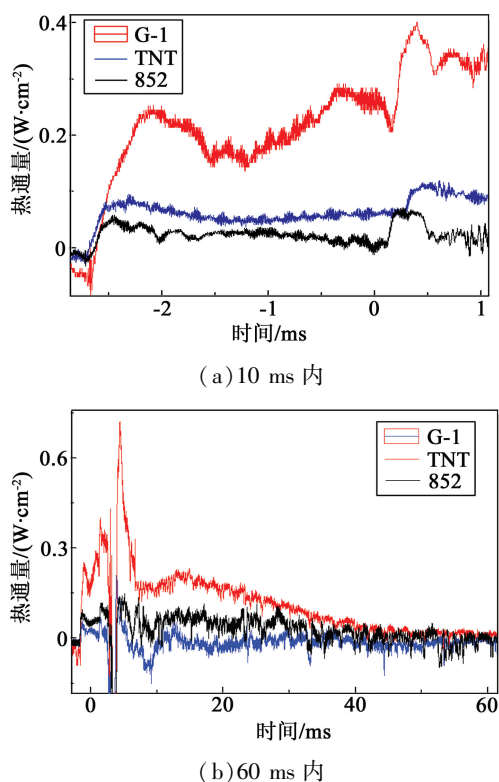


图4 自由场条件下的热通量—时间曲线

Fig. 4 Heat flux-time curves of three explosives in free field

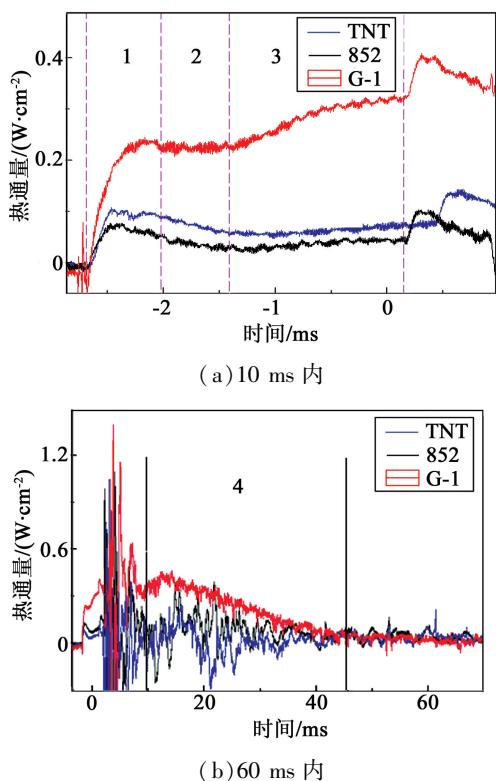


图5 半密闭条件下热通量—时间曲线

Fig. 5 Heat flux-time curves of three explosives in semi-closed space

燃烧过程,但其热通量值却小于半密闭条件下的热通量,因此,从热释放的角度可以认为,G-1 炸药的反应过程受环境的密闭程度影响较大。TNT 和 852 炸药在半密闭试验条件下均未出现明显的有氧燃烧过程。

2.3 从热输出分析温压炸药配方中铝粉的燃烧

从图 4 和图 5 中均可以看出,G-1 与 852 爆轰过程中的热释放量差别较大,852 炸药爆轰过程中的热通量约为 G-1 炸药的 1/3,这说明有铝粉参与了 G-1 炸药的爆轰反应,释放出大量的热;同时,G-1 炸药的爆轰反应持续时间比 852 及 TNT 长。半密闭空间中 G-1 炸药的无氧燃烧过程中出现了热量释放的增加过程,如图 5(a)中 3 区域所示,与 852 的反应过程比较可知,在无氧燃烧阶段,有铝粉或者未完全氧化的铝粉(AIO)参加了爆炸化学反应^[15-16],增加了无氧燃烧过程中的热通量输出。在有氧燃烧阶段,如图 5(b)所示,铝粉或者未完全氧化的铝粉(AIO)继续反应释放热量。TNT 及 852 炸药有氧燃烧阶段的热通量时间曲线还说明,爆轰及无氧燃烧后未完全氧化的产物(如 C 粉等)在本试验条件下无法发生明显的有氧燃烧。当环境条件为全密封时,TNT 爆轰产物也能够发生明显的有氧燃烧过程^[12]。

3 结论

- 1) 热通量传感器可以表征毫秒级爆炸反应的热量释放过程,能够用于温压炸药不同反应阶段热量输出特性的表征。
- 2) 在有约束条件下,温压炸药的爆炸反应热量释放的 3 个过程从时间尺度上能够与温压炸药的爆轰、无氧燃烧和有氧燃烧对应。
- 3) 对比 852 炸药与 G-1 炸药的配方及热辐射通量曲线可知,Al 参与了 G-1 温压炸药爆轰、无氧燃烧和有氧燃烧 3 个阶段的爆炸反应。
- 4) 温压炸药爆炸反应的热量释放依赖于环境条件,封闭条件有利于提高爆炸反应后的燃烧热量。

参考文献

- [1] 惠君明,陈天云. 炸药爆炸理论[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1995.
- [2] 姬建荣,苏建军,刘艳萍,等. 非理想炸药爆炸热作用的实验研究[J]. 火炸药学报,2010,33(4):49-52.
Ji Jianrong, Su Jianjun, Liu Yanping, et al. Experimental study on explosive thermal effect of the non-ideal explosive[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2010, 33(4): 49-52.
- [3] 姬建荣,苏建军,李芝绒,等. WRe 5/26 热电偶对爆炸产物的热响应分析[J]. 火炸药学报, 2008, 31(1): 26-

阶段,这是因为自由场条件中有地面的反射,并非理想的自由场条件,该条件下的 G-1 炸药虽存在有氧

29.
Ji Jianrong, Su Jianjun, Li Zhirong, et al. Analysis of hot response of WRe 5/26 thermocouple to explosive products [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2008, 31(1): 26-29.
- [4] 阚金玲, 刘家骢, 曾秀琳, 等. 温压炸药爆炸火球的特征[J]. 火炸药学报, 2007, 30(2): 55-58.
Kan Jinling, Liu Jiacong, Zeng Xiulin, et al. Fireball characteristics of a thermal-baric explosive [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2007, 30(2): 55-58.
- [5] 阚金玲, 刘家骢. 一次引爆云爆剂的爆炸特性——后燃反应对爆炸威力的影响[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(5): 404-409.
Kan Jinling, Liu Jiacong. The blast characteristic of SEFAE effect of after burning on blast power [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(5): 404-409.
- [6] 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]// Proceedings of the 13th International Detonation Symposium. Norfolk, Virginia, 2006: 253-262.
- [7] Carney J R, Lightstone J M, McGrath II T P, et al. Fuel-rich explosive energy release: oxidizer concentration dependence [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2009, 34(4): 331-339.
- [8] McNesby K L, Homan B E, Ritter J J, et al. Afterburn ignition delay and shock augmentation in fuel rich solid explosives [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2010, 35(1): 57-65.
- [9] Arnold W, Rottenkolber E. Thermobaric charges: modeling and testing [C]// Proceedings of the 38th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, Germany, 2007: 683-695.
- [10] 丁刚毅, 徐更光. 含铝炸药二维冲击起爆的爆轰数值模拟[J]. 兵工学报, 1994(4): 25-29.
Ding Gangyi, Xu Gengguang. 2-Dimensional modelling of detonation in explosives containing aluminum [J]. Acta Armanmentarii, 1994(4): 25-29.
- [11] 刘云剑, 徐更光, 王延增, 等. 分子间炸药加速金属能力计算研究[J]. 爆炸与冲击, 1998, 18(4): 344-348.
Liu Yunjian, Xu Gengguang, Wang Yanzeng, et al. Predicting the ability of metal accelerating of intermolecular explosives [J]. Explosion and Shock Waves, 1998, 18(4): 344-348.
- [12] Zhang Fan, Aderson J, Yoshinaka A. Post-detonation energy release from TNT-aluminum explosive [J]. AIP Conference Proceedings, 2007, 955: 24-29.
- [13] 黄磊, 何中其, 李春光, 等. 热通量传感器在爆炸场热辐射测试中的应用[J]. 火炸药学报, 2011, 34(5): 38-42.
Huang Lei, He Zhongqi, Li Chunguang, et al. Application of heat flux microsensor in radiation measurement of explosive field [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2011, 34(5): 38-42.
- [14] 冯晓军, 王晓峰, 徐洪涛, 等. AP 对炸药空中爆炸参数的影响[J]. 火炸药学报, 2010, 33(2): 40-44.
Feng Xiaojun, Wang Xiaofeng, Xu Hongtao, et al. Effect of AP on the air explosion parameters of explosive [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2010, 33(2): 40-44.
- [15] Miller J S, Pangilinan G I. Measurements of aluminum combustion in energetic formulations [J]. AIP Conference Proceedings, 2004, 706: 867-870.
- [16] Tassia D P E. Internal blast test to support the tomahawk and APET programs [C]// Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium. San Diego: NDIA, 1996.

Research on the Heat Release Characters of TBX Explosion

JIN Penggang, WANG Xiaofeng, GUO Wei, REN Songtao, WANG Jianling, GAO Zan
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] In order to study the heat release process of RDX based thermal-baric explosive (TBX), heat radiation flux sensor was used to measure the heat radiation flux histories of TNT, 852 and G-1 TBX under free-field and semi-enclosed conditions, respectively, in air blast experiments. The results shows that heat flux-time curves of detonation, anaerobic combustion and aerobic combustion could be obtained from the heat radiation sensor. In semi-enclosed condition, G-1 presents three distinct heat release processes including detonation, anaerobic combustion and aerobic combustion, while TNT and 852 have only two heat release processes of detonation and anaerobic combustion. Taking the compositions of 852 and G-1 into account, comparative analysis of the heat radiation-time curves revealed that Al is involved in the three reaction stages of G-1. The experimental results under free-field and semi-enclosed conditions show that the reaction process of TBX is strongly affected by the test conditions, in that the semi-enclosed condition facilitates raising the heat release volume of TBX.

[KEY WORDS] thermal-baric explosive; heat radiation flux; detonation; after-burning; anaerobic combustion; aerobic combustion