

doi: 10.3969/j.issn.1001-8352.2015.05.006

TNT 和温压炸药的爆炸火球表面温度对比试验研究^{*}

张玉磊 翟红波 李芝绒 蒋海燕 闫潇敏

西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 使用红外热成像仪记录了 TNT 和温压炸药爆炸后的火球表面温度场,得到了 2 种炸药的爆炸火球表面最高温度、持续时间、火球尺寸和火球温度变化速率等参数,并对温压炸药后燃烧对火球温度的影响进行了分析。结果表明,温压炸药爆炸火球的不同时刻最高温度和持续时间都大于 TNT,温压炸药火球体积较大,且更为扁平,温压炸药和 TNT 爆炸火球的温度变化速率曲线分别呈“V”和“L”型,强烈的后燃烧使得温压炸药爆炸火球温度衰减较慢,持续时间较长。

[关键词] 温压炸药;爆炸火球;红外热成像仪;温度变化速率;后燃烧

[分类号] TQ564.4

引言

由于高能炸药爆炸冲击波的作用范围远大于热作用的范围,且爆炸反应时间极短,热效应难以积累,热毁伤难以实现,因此研究人员对炸药爆炸作用研究重点集中于冲击伤效应。随着温压炸药的逐步使用,其热效应是不可忽略的^[1-2],这是因为温压炸药的反应与普通高能炸药相比有着显著的特点。温压炸药是一种由高能炸药、超金属细粉、氧化剂、黏接剂和塑性剂等按一定比例混合制成的新型炸药。温压炸药爆炸反应能量释放分为 3 个阶段:首先是温压炸药组分中高能炸药的无氧爆轰反应释能;接着是燃料颗粒和爆轰产物的无氧燃烧反应释能;这两个阶段中周围环境中的氧气基本不参与化学反应,反应输出陡峭上升然后又缓慢衰减的冲击波,时间尺度为微秒量级;最后是有氧后燃烧反应阶段,由于温压炸药是强负氧平衡炸药,炸药组分中的氧元素不能满足燃料颗粒、爆轰产物的氧化反应,燃料颗粒和爆轰产物在随冲击波向周围空间扩散的过程中,与空气中的氧气湍流混合,产生燃烧反应,释放大量的燃烧热能,这一阶段化学反应的时间尺度为毫秒量级^[3-5]。

由于温压炸药反应时间和空间尺度都大于高能炸药,在密闭、半密闭等特定环境下热毁伤甚至超过了冲击波损伤^[6],因此研究温压炸药爆炸火球的温度特性意义重大。本文在相同的试验条件下对比研究了 TNT 和温压炸药的爆炸火球温度的发展变化规律,并分析了后燃反应对火球温度变化的影响。

1 试验部分

1.1 试验样品

试验样品为 TNT 和温压炸药裸药柱,装药质量均为 2 kg,长径比均为 1。TNT 为熔铸药柱,密度 1.58 g/cm^3 ;温压炸药(WY)为压制药柱,主要成分为铝粉、高氯酸铵(AP)、RDX 和塑性黏结剂,密度 1.81 g/cm^3 。起爆药均为 JH-14 药柱,20 g。采用 8# 电雷管上端面中心起爆。

1.2 仪器设备

本次试验所用红外测温仪器为 Micronsan7200 红外热成像仪,如图 1 所示。Micronsan7200 红外热成像系统用 320×240 微热辐射计 UFPA 探测器接收红外线辐射能,将被测物体发射的红外辐射能转变成电信号,红外辐射能的大小与物体的表面温度相对应,电信号大小就间接反应了表面温度。该仪器还配套有自动化程度高、功能强大的试验数据处理软件,通过该软件可以分析每一帧温度场图像



图 1 红外热成像仪

Fig. 1 Infrared thermal imager

^{*} 收稿日期: 2015-02-11

作者简介: 张玉磊(1987~),男,工程师,从事毁伤测试及评估技术研究。E-mail: kaka-zyl@163.com

的最高温度、平均温度、直径等参数。

1.3 试验场布置

试验现场选择在比较开阔的旷野内,将被试温压炸药药柱和 TNT 药柱放置于木制弹架上,以药柱几何中心为爆心,爆心距离地面 1.5 m,在距离爆心水平距离约 30 m 处布置红外热成像仪。

2 结果与分析

2.1 试验结果

读取红外热成像仪测试结果,得到 TNT、温压炸药爆炸火球表面最高温度随时间变化的曲线,如图 2 所示,不同炸药爆炸火球在某高温区间的持续时间如表 1 所示。

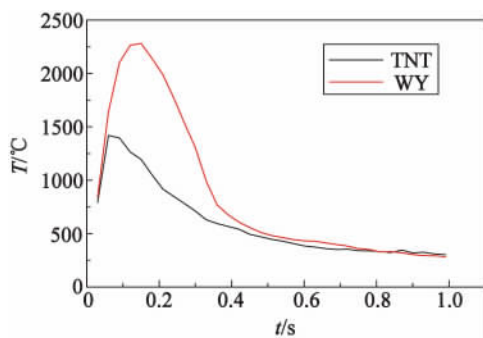


图 2 温压炸药和 TNT 炸药爆炸火球最高温度变化曲线

Fig. 2 Changing curves of the highest temperatures of thermobaric explosive's and TNT's fireballs

表 1 TNT 和温压炸药爆炸高温持续时间

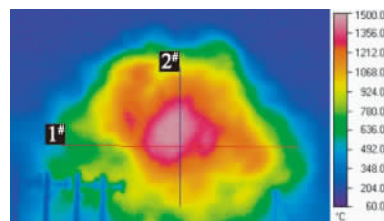
Tab. 1 Durations of TNT's and thermobaric explosive's fireballs at certain high temperatures

温度/°C	≥1 500	≥1 200	≥1 000	≥800
TNT/ms	—	60	120	180
温压炸药/ms	210	240	270	330

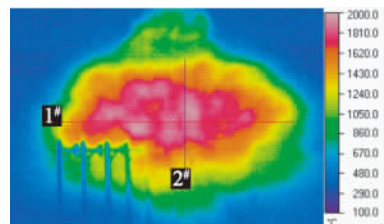
从图 2 可以看出,2 kg 温压炸药爆炸火球的表面最高温度大于 TNT, TNT 爆炸火球的最高温度为 1 418.6 °C,而温压炸药达到了 2 281.5 °C,是 TNT 的 1.61 倍。温压炸药火球温度大于 1 500 °C 的时间为 210 ms,而 TNT 为 0,温度大于 1 200 °C 的持续时间是 TNT 的 4 倍,温度大于 1 000 °C 的持续时间是 TNT 的 2.25 倍,温度大于 800 °C 的持续时间是 TNT 的 1.83 倍。究其原因,主要是温压炸药为体爆轰炸药,抛撒在空气中的燃料颗粒与氧气充分混合,能发生较为完全的燃爆反应,且温压炸药中加入了铝粉等高温金属粉,显著增加了爆炸温度,而 TNT 浇铸药柱的爆轰属于点源爆炸,且 TNT 是典型的负氧炸药,自带的氧不足够碳、氢等元素反应,爆炸温度相对较低^[7-9]。

2.2 典型温度场对比分析

炸药爆炸后,爆炸火球呈扁平状由爆心周围膨胀,在反射冲击波和气流的作用下,火球形状从 0.1 s 开始上飘变形。通过对红外温度场图像分析对比,爆炸后 60 ms 时刻的火球大小和形状最具有代表性,如图 3 所示。通过对典型温度场温度分布进行分析,可以对比研究 TNT 和温压炸药爆炸火球温度场特性,见图 4。



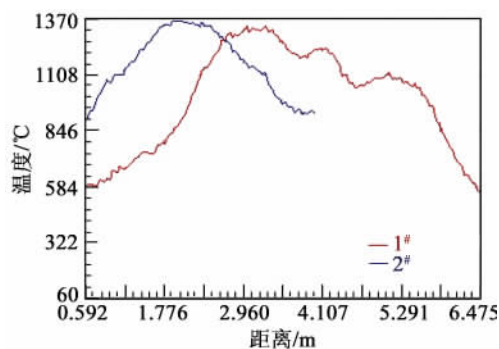
(a) TNT



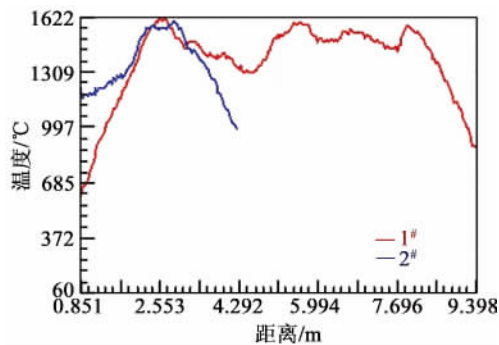
(b) 温压炸药

图 3 TNT 和温压炸药典型温度场图片

Fig. 3 Typical temperature fields of TNT and thermobaric explosive



(a) TNT



(b) 温压炸药

图 4 火球垂直方向和水平方向温度分布曲线
Fig. 4 Temperature distribution of fireballs in vertical direction and horizontal direction

如图 3 所示,温压炸药火球形状较 TNT 扁平,且体积大于 TNT 火球,TNT 和温压炸药火球温度场都呈现中心温度高、周围温度低的总体趋势,其中 TNT 火球温度由中心向外单调衰减,爆心处温度最高;而温压炸药火球高温区域面积占比大,内部分布着多个较高温度区域。这是由于 TNT 为理想炸药,可认为其爆轰反应仅在装药中发生,爆炸反应瞬间能量全部释放由中心点向周围扩散;而温压炸药为典型的非理想体炸药,先后经历无氧爆轰、无氧燃烧和有氧燃烧 3 个阶段,其爆轰反应为体积爆轰^[10],因此,温压炸药爆炸作用时间和空间尺度都有所增长。

以爆心为交点,在火球范围内画出水平线段 1[#]和垂直线段 2[#],通过考察水平线段和垂直线段上的温度分布,就可以分析出火球不同位置处的温度分布规律。水平线段 1[#]以左端为起始,垂直线段 2[#]以上端为起始,其不同位置处温度曲线如图 4 所示。

从图 4 看出,TNT 火球的水平直径约为 5.9 m,而温压炸药火球的水平直径为 8.5 m,是 TNT 的 1.44 倍,两种火球的垂直高度均约为 3.3 m。在水平方向上,TNT 火球温度范围约为 600 ~ 1 400 °C,在中心 2.9 m 范围内温度都大于 1 100 °C,占整个水平直径的 50% 左右;温压炸药火球温度约为 700 ~ 1 600 °C,在中心 5.5 m 范围内温度大于 1 300 °C 以上,占整个水平直径的 65% 左右。在垂直方向上,TNT 火球温度约为 850 ~ 1 400 °C,温压炸药火球温度约为 1 000 ~ 1 600 °C。此外,温压炸药火球内部线段 1[#]和线段 2[#]上温度分布曲线呈平台型,而 TNT 则呈抛物线形,尤其在水平方向上更为明显,温压炸药火球爆炸温度在水平线段 1.7 ~ 7.2 m 范围内温度都维持在 1 300 °C 以上。这是由于温压炸药的反应是体爆轰,在中心爆轰云雾区温度较高,而 TNT 则不具有这样的特性。

2.3 火球温度变化速率对比分析

温压炸药是典型的非理想炸药,与 TNT 这类理想炸药相比,最大的特点就是具有强烈的后燃效应,爆炸热效应显著。爆炸热效应差异不仅表现为温度高低不同,还表现为温度变化速率不同。温度变化速率大表明放热迅速,能迅速达到造成目标热毁伤的阈值温度。将火球表面最高温度曲线对时间求导,便得到爆炸火球最高温度变化速率曲线,如图 5 所示。

从图 5 看,温压炸药爆炸火球的温度变化速率曲线大致呈“V”型,而 TNT 爆炸火球温度变化速率

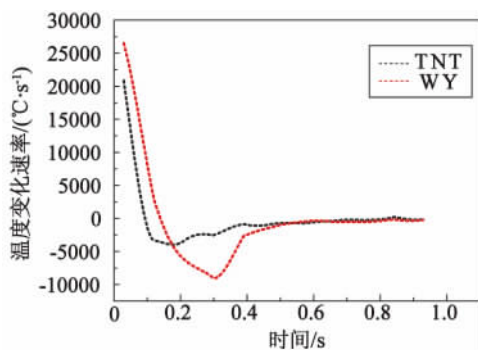


图 5 爆炸火球温度变化速率曲线

Fig. 5 Rates of temperature change of blast fireball

曲线呈“L”型。TNT 和温压炸药爆炸后 1 s 内的温度变化速率曲线总体趋势一样,都是先迅速降低后缓慢回升,最后趋于 0。TNT 在爆炸反应后温度变化速率随时间不断减小,初始值约为 22 000 °C/s,这段时间火球温度是持续上升的;在 0.1 s 左右时降为 0,此时火球温度开始降低;0.2 s 左右降到最小,约 -4 000 °C/s,对应火球温度下降最快;之后慢慢增大趋于 0,此时火球逐渐湮灭,温度逐渐与周围环境相同。温压炸药反应后爆炸火球瞬间的温度变化速率约为 27 500 °C/s,在 0.17 s 左右时降为 0,0.3 s 左右降到最小约 -8 000 °C/s,之后慢慢增大趋于 0。由此可见,温压炸药的先期温度变化速率大于 TNT,且温度变化速率大于 0 的时间比 TNT 长,这表明温压炸药爆炸后火球温度不仅上升速度快,而且温度持续时间长。

温压炸药和 TNT 爆炸的温度变化速率曲线在降到最低点后都有回升趋势,这表明 2 种炸药前期的反应产物与空气中的氧气都发生了后燃反应放热,弥补高温火球与周围空气热交换的损失,减缓火球温度的衰减,但是 TNT 的这一过程很不明显,温度变化速率回升较为缓慢。温压炸药火球温度变化速率曲线在最低点的回升则较为陡峭,文献[2]通过高速录像也记录了温压炸药火球的直径具有由大变小再变大的过程,这表明温压炸药特有的强烈后燃反应再次释放大量的热,对爆炸火球高温起到了重要的维持作用。

3 结论与建议

1) 温压炸药爆炸火球最高温度是 TNT 的 1.61 倍,其火球温度高于 1 500、1 200、1 000 °C 和 800 °C 的持续时间均为 TNT 的 1.8 倍以上,爆炸热效应显著优于 TNT。

2) 温压炸药爆炸火球垂直高度与 TNT 相当,水平直径为 TNT 的 1.44 倍,且温压炸药爆炸火球温度场中高温区域面积比例更大。

3) 温压炸药和 TNT 爆炸火球的温度变化速率曲线分别呈“V”和“L”型,温压炸药强烈的后燃反应能延缓火球温度的衰减,使得爆炸火球温度持续时间更长。

参 考 文 献

- [1] Davies P A. A guide to the evaluation of condensed phase explosives [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1993, 33 (1): 1-33.
- [2] 阚金玲,刘家骢. 一次引爆云爆剂的爆炸特性 [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]. *Explosive and Shock Waves*, 2006, 26(5): 404-409.
- [3] 郭学永,李斌,解立峰. 温压药剂的热毁伤研究 [J]. *火炸药学报*, 2008, 31(1): 16-19.
Guo Xueyong, Li Bin, Xie Lifeng. Study on thermal damage of thermobaric explosive [J]. *Chinese Journal of Explosive and Propellants*, 2008, 31(1): 16-19.
- [4] Wildegger-Gaissmaier A E. Aspects of thermobaric weaponry [J]. *ADF Health*, 2003, 4(1): 3-6.
- [5] Smirnov N N, Nikhin V F, Legros J C. Ignition and combustion of turbulized dust-air mixtures [J]. *Combustion and Flame*, 2000, 123(1-2): 46-47.
- [6] Elsayed N M, Atkins J L. 爆炸与冲击相关损伤 [M]. 蔡继峰,译. 北京: 人民卫生出版社, 2011: 96.
Elsayed N M, Atkins J L. *Explosion and blast-related injuries* [M]. Cai Jifeng, translated. Beijing: The People's Health Press, 2011: 96.
- [7] 李秀丽,惠君明. 温压炸药的爆炸温度 [J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(5): 471-475.
Li Xiuli, Hui Junming. Detonation temperature of thermobaric explosives [J]. *Explosive and Shock Waves*, 2008, 28(5): 471-475.
- [8] Makhviladze G M, Roberts J P, Yakush S E. Combustion of two-phase hydrocarbon fuel clouds released into the atmosphere [J]. *Combustion and Flame*, 1999, 118(4): 583-605.
- [9] 刘科种,徐更光,辛春亮,等. 含铝炸药与一次引爆 FAE 威力特性对比研究 [J]. *含能材料*, 2009, 17(5): 554-557.
Liu Kezhong, Xu Gengguang, Xin Chunliang, et al. Comparison of blast power of aluminized explosive and single-event FAE [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2009, 17(5): 554-557.
- [10] 秦友花,周昕清,沈兆武,等. 一次引爆的固态燃料空气炸药爆炸特性的研究 [J]. *实验力学*, 2002, 17(3): 284-288.
Qin Youhua, Zhou Tingqing, Shen Zhouwu, et al. Study on the explosion characteristics of single igniting solid sensitized fuel air explosive [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2002, 17(3): 284-288.

Experimental Research on the Contrast of the Fireball's Surface Temperature of TNT and Thermobaric Explosive

ZHANG Yulei, ZHAI Hongbo, LI Zhirong, JIANG Haiyan, YAN Xiaomin
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] Surface temperatures of TNT's and thermobaric explosive's fireball were measured by the infrared thermal imager respectively. Some parameters of the two fireballs, including highest surface temperature, the duration at certain temperature, the size of the fireballs and the rate of temperature change, were observed. Moreover, the influence of post burning on the temperature of fireball was also analyzed. Results show that the fireball of thermobaric explosive always has higher temperature and longer duration of high temperature than those of TNT. In addition, the fireball of the thermobaric explosive is bigger and flatter. The temperature changing curves of fireballs of thermobaric explosive and TNT are in “V” and “L” shapes, respectively. Strong post burning makes the fireball of the thermobaric explosive has slower temperature damping and longer duration contrasted with those of TNT.

[KEY WORDS] thermobaric explosive; blast fireball; infrared thermal imager; rate of temperature change; after burning