

文章编号: 1006-9941(2008)03-0344-05

## 红外热成像技术在云团爆炸测温中的应用

李秀丽, 惠君明, 解立峰

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 利用红外热成像技术研究了具有云团爆炸性质的燃料空气炸药 (FAE) 的爆炸温度场。实验测试了两发液体 FAE 和一发固体 FAE 试验弹的爆炸温度参数, 得到了爆炸火球温度的时空分布, 并根据火球温度分布分析了燃料的抛撒情况。结果表明, 在装药量相同的情况下, 固体 FAE 和液体 FAE 的爆炸火球表面温度分别比 TNT 高 22.3% 和 6.2%, 1000 °C 以上高温持续时间是 TNT 的 1.95 和 1.23 倍; 液体燃料爆炸形成的火球覆盖面积比固体云爆剂大; 预制刻槽的薄壁弹体更利于燃料的抛撒和分散。

**关键词:** 爆炸力学; 红外热成像技术; 云团爆炸; 爆炸火球

**中图分类号:** TJ414.4<sup>\*</sup>7; TB866

**文献标识码:** A

### 1 引 言

相对于传统高能凝聚相炸药, 燃料空气炸药 (FAE) 爆炸的主要特征是体积爆炸, 无论是二次 FAE 还是一次 FAE, 均能形成温度较高、范围较大的爆炸火球。随着 FAE 的发展以及对爆炸热毁伤效应认识的深入, 爆炸火球温度的研究也越来越受到重视。何志光等<sup>[1]</sup>从理论上计算了二次 FAE 的火球温度及热辐射效应; 许学忠等<sup>[2]</sup>采用高速摄影和红外测温计研究了一次起爆 FAE 的燃料扩散特征和云雾爆炸温度。但是由于爆炸现象的快速性、复杂性和破坏作用, 爆炸温度的测量目前仍是一个较为薄弱的环节。

常用的测温方法有光谱法和辐射法两种, 其中光谱法较为成熟, 如光纤光谱探针法、瞬时多光谱测温测量系统 (TMDT)、原子发射光谱双谱线法等<sup>[3-5]</sup>, 已在实际中应用并取得较好结果。但这些方法有的只能得到爆源某点或某几个点的温度, 有的测得的是反应过程中最高温度随时间的变化; 许学忠等提出的改进红外测温计也只能得到火球表面平均温度随时间的变化<sup>[2]</sup>。红外热成像技术属于辐射测温范畴, 它的主要特点是能够得到被测温度场的时空分布图像, 因此对于云团爆炸这种大范围高温区域的测量更为适用。

本工作通过外场静爆实验, 采用红外热成像仪观测了几种 FAE 模拟战斗部爆炸形成的火球, 分析了火球的温度变化特征, 总结了红外热成像技术在云团爆炸研究中的应用, 从而为爆炸反应过程诊断提供依据。

### 2 实 验

#### 2.1 实验仪器

红外热成像技术即通过红外传感器接收位于一定距离外的被测目标所发出的红外辐射, 经由信号处理系统转变成目标的视频热图像的一种技术<sup>[6]</sup>, 它将物体的热分布转换成可视图像, 并在监视器上以灰度级或伪彩色显示出来, 从而得到被测目标温度场的实时分布。目前红外热成像技术已应用于化工、冶金等生产行业以及高焓风洞、油池火灾等科研领域的高温测量, 在爆炸场温度测试领域也有应用<sup>[7-9]</sup>。

本实验采用的红外热成像系统, 仪器型号为 Micronsan7200, 该系统用 320 × 240 微热辐射计 UFPA 探测器接收待测目标所发出的辐射能量, 将其转换成电信号, 运用微机、模拟信号调理、数字信号与图像处理技术, 对温度场进行数字和图像处理, 得到待测物体的时空温度分布。Micronsan7200 拥有强大的图像处理和数据分析软件, 可得到被测物体表面各点温度分布及其随时间的变化、某个区域的温度变化、不同温度区域的分布、图像几何尺寸等信息。仪器的技术参数见表 1。

#### 2.2 测试原理

红外测温的基本原理是利用被测物体所辐射的红外线的能量来确定该物体的温度, 得到的是物体的表面温度, 也称辐射温度或表观温度。红外测温属于窄带光谱辐射测温系统, 所得到的物体表面温度, 不是直接测量到的, 而是以测到的辐射能计算出来的。因此, 实际测量时, 测量精度受被测表面的发射率和反射率、背景辐射、大气衰减、测量距离、环境温度等因素的影响, 需要在每次测量时进行环境补偿和修正。它的理

收稿日期: 2007-10-17; 修回日期: 2007-12-25

作者简介: 李秀丽 (1980 -), 女, 博士, 研究方向为新型含能材料及其性能测试。e-mail: echoli331@yahoo.com.cn

论根据是著名的 Stefan-Boltzmann 定律<sup>[10]</sup>,即物体的全波段辐射  $M$  与其绝对温度  $T$  的四次方成正比:

$$M = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4$$

其中,  $\sigma$  为 Boltzmann 常数,  $\sigma = 5.7 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $T$  为物体的绝对温度, K;  $\varepsilon$  为物体的辐射率,  $\varepsilon \leq 1$ , 当物体为绝对黑体时,  $\varepsilon = 1$ 。

表1 Mikroscan7200 的技术参数表  
Table 1 Technical parameters of Mikroscan7200

item	parameter
temperature range	range 1: -40 °C to 120 °C range 2: 0 °C to 500 °C range 3: 200 °C to 2000 °C (optional)
measurement accuracy	±2% or 2 °C of reading
focus range	50 cm to infinity
detector	320 x 240 UFPA VOX Microbolometer
spectral band	8.0 to 14.0 μm
atmospheric transmission correction	input correction by outside temperature, humidity, and measuring distance
emissivity setting	auto based on operator input

一般被测物体的辐射率总是小于1,因此,用黑体定标的测温仪测出的温度总是低于实际温度。实际测温时,需对辐射率进行修正。炸药爆炸是一个短暂而复杂的过程,在爆炸瞬间测定爆炸产物的辐射率相当困难。况且,物体的辐射率与其本身的温度、物理性质以及环境温度等因素有关,因此很难确定爆炸产物的精确辐射率。根据以往实验结果,只能得出爆炸产物的辐射率在0.3~0.45之间<sup>[11]</sup>。为了研究FAE的爆炸火球温度,本实验用TNT与FAE进行对比研究。测试的云爆剂和TNT,其爆炸产物的主要组分是相同的,因此认为它们的辐射率差别不大,可以在相同辐射率下对测定的温度进行比较。根据多次实验分析,认为辐射率取0.35较为合理。

Micronscan7200的测温范围分三个温度段(见表1)。测量爆炸温度时采用高温测试段200~2000 °C,但炸药爆炸的实际温度一般高于2000 °C,解决这一问题的方法是:在测试时先设定一个较大的测试辐射率 $\varepsilon$  ( $\varepsilon \leq 1$ ),处理数据时再将辐射率设定为爆炸产物的辐射率(0.3~0.45)。对于一定的被测物体,设定的测试辐射率越大,得到的测试温度越低,以此保证测试温度落在2000 °C以内,再通过数据处理还原被测物体的实际温度,从而记录爆炸云团的全部温度信息。因此,从理论上讲,测温上限是不受限制的。根据大量实验结果分析,爆炸产物辐射率为0.35时,测试辐射率设定为0.6,测温上限可达3000 °C以上,满足炸药测温

的需要。本实验仪器分幅率选30幅/s,记录最长时间为10 s。实验时记录当地环境温度和湿度以及测试距离,将这些参数输入仪器可自动调节环境补偿。

### 2.3 实验样品

第一次实验测试了一发一次FAE试验弹,装填20 kg液体燃料(简称“LF-20”)。

第二次实验测试了两发一次FAE试验弹,为对比还测试了一发TNT试验弹,三发弹装药量均为30 kg。两发FAE弹分别装填液体燃料(简称“LF-30”)和固体云爆剂(简称“SF-30”)。

两实验采用的FAE弹有相同的装药结构,但“LF-20”弹采用没有预制刻槽的钢壳体,而“LF-30”和“SF-30”作了改进,采用薄壁铝壳体结构和预制刻槽处理。

## 3 在云团爆炸中用红外热成像技术可测量的参数

### 3.1 爆炸场温度的时空分布

从红外热成像仪得到的最直观的参数是不同时刻的红外热图像(见图1),通过图像处理能得到图像上各点的温度或选定图像区域内的最高、最低和平均温度。

图1为SF-30的典型红外图像。图2是SF-30、LF-30和TNT爆炸火球表面最高温度随时间的变化曲线。图3~图5分别是三发弹爆炸火球在最高温度附近温度场的分布情况,图中从左至右分别为爆炸时刻的温度场图像、温度刻度、相应的三维温度分布图和对直线上温度变化曲线。

由图2可见,试验弹引爆后,爆炸火球表面温度迅速升高,SF-30在320 ms达到最高温度2786.2 °C; LF-30在200 ms达到最高温度2418.9 °C; TNT在170 ms达到最高温度2277.3 °C。SF-30和LF-30爆炸火球的表面温度在高温区( $\geq 1000$  °C)的持续时间分别达到1.50 s和0.95 s,而TNT的持续时间约为0.77 s。对于整个爆炸过程而言,两发FAE试验弹的爆炸火球表面温度均高于TNT,高温持续时间也较长。原因是FAE爆炸后,燃料被中心装药抛撒,与空气中的氧气混合并持续燃烧,因此能够维持较长的高温时间且达到较高的温度;而TNT近似于点爆炸,并在瞬间完成,所观测到的爆炸火球是扩散的爆轰产物,后续燃烧反应较少,产物温度在达到最高后很快就下降了。而对于装药量相同的两发FAE试验弹,由于SF-30装填的固体云爆剂中含有较多的高能组分,产生的后续燃烧效应更为明显,其表面温度和高温持续时间均大于LF-30。

由图3~图5可见,FAE的爆炸火球比TNT的大得多。LF-30的火球较为扁平,火球直径是高度的四

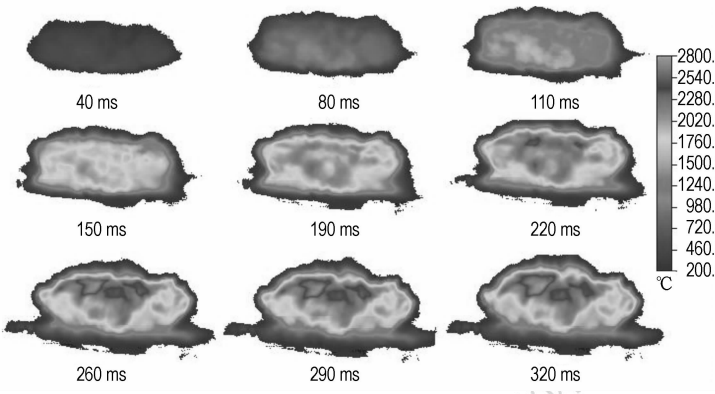


图 1 SF-30 爆炸后不同时刻的红外图像(部分图像)

Fig. 1 Several infrared images at different times after SF-30 explosion

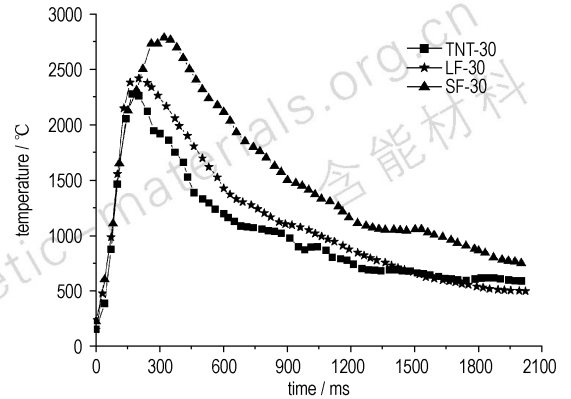


图 2 火球表面最高温度随时间的变化曲线

Fig. 2 The highest surface temperature of fireball vs time

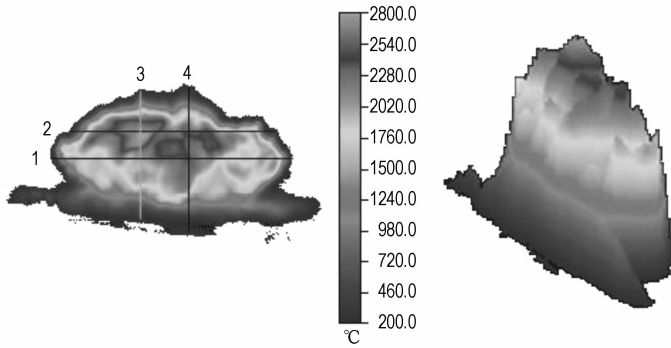


图 3 SF-30 爆炸后 320 ms 时的表面温度及其对应直线上的温度变化曲线

Fig. 3 Surface temperature distribution of SF-30 explosion at 320 ms and temperature change curves of corresponding lines

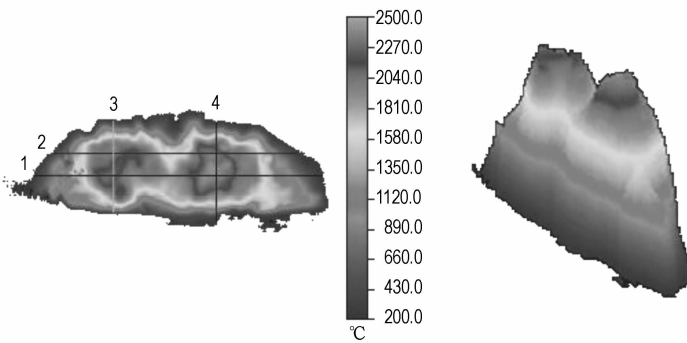
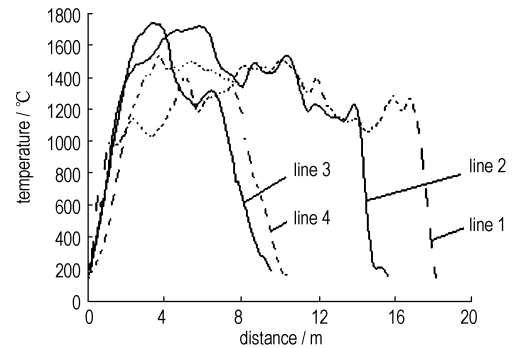


图 4 LF-30 爆炸后 200 ms 时的表面温度及其对应直线上的温度变化曲线

Fig. 4 Surface temperature distribution of LF-30 explosion at 200 ms and temperature change curves of corresponding lines

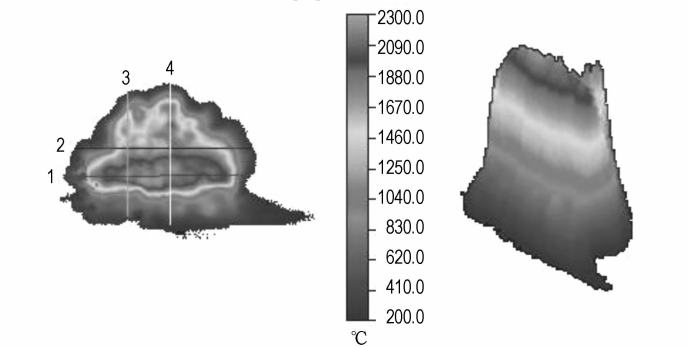
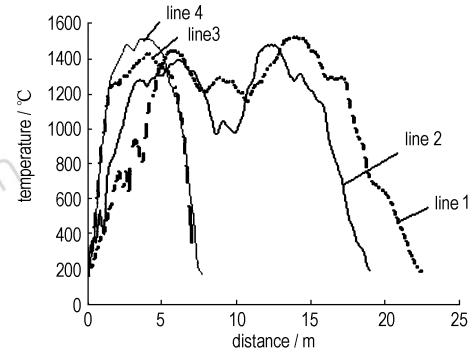
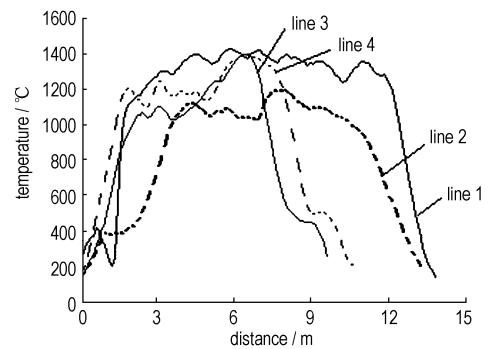


图 5 TNT 爆炸后 170 ms 时的表面温度及其对应直线上的温度变化曲线

Fig. 5 Surface temperature distribution of TNT explosion at 170 ms and temperature change curves of corresponding lines



倍左右。SF-30 的火球比 LF-30 的小,火球直径是高度的两倍左右。可见,液体燃料比固体云爆剂更容易抛撒,形成的火球覆盖面积更大。

### 3.2 爆炸火球几何尺寸

Micronscan7200 的图像处理软件可以根据测试距离计算出图像中像素代表的实际距离,从而计算爆炸火球的几何尺寸。如 3.1 中实验的测试距离为 130 m,则图像中一个像素代表的实际距离为 106.97 mm/Pix。图 3~图 5 中直线对应的实际距离即由这一比例关系求得。在这基础上,还可利用 AutoCAD 等图像处理软件重建火球立体构型,得到火球截面积、火球体积等参数,从而进行爆炸火球的热辐射效应分析。

此外用图像处理软件还可得到不同温度区域的火球尺寸,如希望得到温度高于 1000 °C 区域的火球尺寸,则处理图像时将温度下限设为 1000 °C 即可。图 6 是对 SF-30 爆炸后火球在最高温度附近不同温度区域尺寸的判读。采用相同方法对 TNT 爆炸火球在最高温度附近的红外图像也进行了处理,结果见表 2。可见 SF-30 爆炸火球不仅表面温度比 TNT 高得多,且高温范围也宽得多。

### 3.3 燃料抛撒和云团分布的均匀性

燃料抛撒是燃料到燃料空气炸药 (FAE) 的转化与制造过程,分析燃料抛撒过程的动力学特征,从而选择合理的装置参数,对于提高爆炸波能量输出,进而达到高威力毁伤效应具有重要意义<sup>[12]</sup>。燃料分散和云雾浓度分布的均匀程度是影响 FAE 爆炸效果的主要因素。

由红外图像可以清晰地分辨燃料抛撒和云团的分布情况。如图 7 为“LF-20”的红外图像。由图 7a 可见爆炸火球右侧温度明显高于左侧,且高温区域较大,因此判断燃料向右侧抛撒。分析原因为:由于壳体没有进行预制刻槽处理,装置引爆后壳体破裂不均匀,导致燃料侧向抛撒。从 350 ms 时的 3D 温度分布图(见图 7b)和对应直线上的温度变化曲线(见图 7c)也可以得到相同的结论。相比之下,3.1 中两发 FAE 试验弹的壳体进行了预制刻槽处理,燃料抛撒就较为均匀(见图 1、图 4 和图 5)。

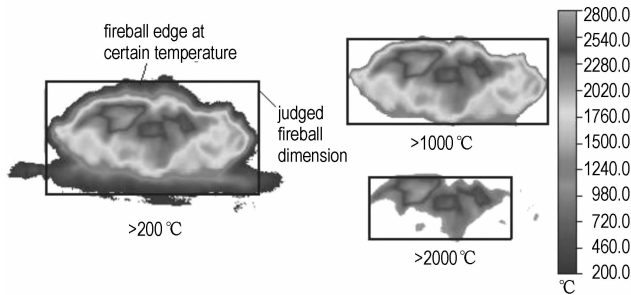


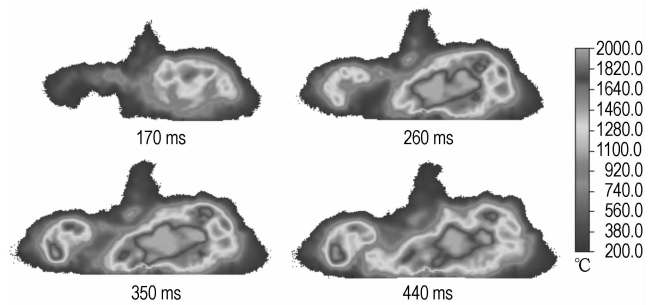
图 6 火球尺寸判读

Fig. 6 Judgment of fireball dimensions

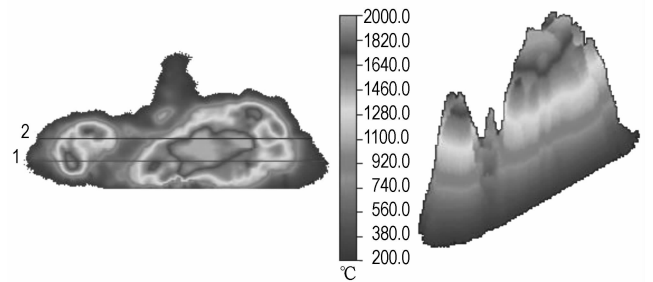
表 2 SF-30 和 TNT 不同温度区域的火球尺寸

Table 2 The fireball dimensions of SF-30 and TNT at different lower limits of temperature

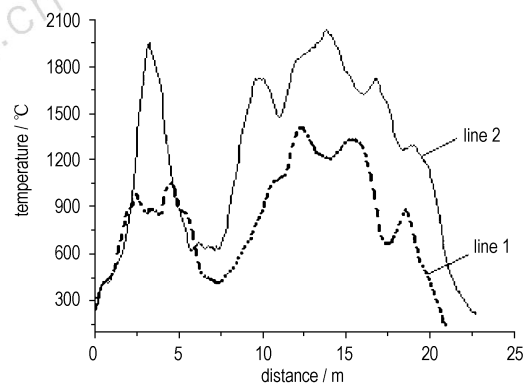
lower limit of temperature/ °C	SF-30		TNT	
	diameter/m	height/m	diameter/m	height/m
>200	18.29	10.38	14.55	10.48
>1000	17.22	7.59	11.45	7.70
>1500	16.69	6.74	10.80	6.95
>2000	12.19	5.78	8.34	2.35
>2300	7.59	2.89	0	0



a. Typical side fuel dispersal phenomena



b. 3D temperature distributing at 350 ms



c. Temperature change curves of lines at 350 ms

图 7 LF-20 的典型红外图像

Fig. 7 Typical infrared images of LF-20

## 4 结论和建议

(1) 在云团爆炸测温中采用红外热成像技术可得到爆炸火球表面温度的时空分布,从时间和空间两方面扩大了测试范围,得到的信息较为全面。

(2) 通过比较同量级 FAE 和 TNT 试验弹的红外热图像及相关参数处理结果表明: 30 kg 液体 FAE 和固体 FAE 的爆炸火球表面温度可达 2786.2 °C 和 2418.9 °C, 分别比 TNT 剪度高 22.3% 和 6.2%, 1000 °C 以上高温持续时间分别是 TNT 的 1.95 倍和 1.23 倍。固体云爆剂的爆炸火球温度较液体燃料的高, 而液体燃料比固体云爆剂更利于抛撒, 因此火球覆盖面积更大。

(3) 由于仪器条件所限, 采用的仪器分幅率最高仅为 30 幅/s。若仪器的扫描速度提高至 100 幅/s 以上, 则对爆炸反应过程, 特别是点火初期阶段的过程描述将更为清晰。

**致谢:** 感谢王伯良老师和苑鸿志、李斌等学生对本实验的帮助。

#### 参考文献:

- [1] 何志光, 陈网桦, 彭金华. 二次 FAE 的火球温度及热辐射效应研究[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(增刊): 183-185.  
HE Zhi-guang, CHEN Wang-hua, PENG Jin-hua. Study of fireball temperature and thermal effect of DE-FAE[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2004, 4(Supplement): 183-185.
- [2] 许学忠, 裴明敬, 王宇辉, 等. 一次起爆 FAE 的燃料扩散特征[J]. 火炸药学报, 2000(1): 47-49.  
XU Xue-zhong, PEI Ming-jing, WANG Yu-hui, et al. Dispersion characteristics of single-event FAE[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2000(1): 47-49.
- [3] 于常青, 阎军, 李家泽, 等. 炸药爆轰温度的光纤光谱测量方法[J]. 兵工学报, 2001, 22(1): 70-73.  
YU Chang-qing, YAN Jun, LI Jia-ze, et al. Optical fiber spectrum measurement of the detonation temperature[J]. *Acta Armamentarii*, 2001, 22(1): 70-73.
- [4] 白永林, 任克惠, 欧阳娴, 等. 炸药爆轰温度的瞬时光谱测量[J]. 光子学报, 2003, 32(7): 868-871.  
BAI Yong-lin, REN Ke-hui, OUYANG Xian, et al. Measurement of the detonation temperature by transient multi-wavelength pyrometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(7): 868-871.
- [5] 周新利, 李燕, 刘祖亮, 等. 炸药爆轰瞬态温度的光谱法测定[J]. 光谱学与光谱分析, 2003, 23(5): 982-983.  
ZHOU Xin-li, LI Yan, LIU Zu-liang, et al. Transient detonation temperature measurement of explosives using spectroscopic method[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2003, 23(5): 982-983.
- [6] 郑兆平, 曾汉生, 丁翠娇, 等. 红外热成像测温技术及其应用[J]. 红外技术, 2003, 25(1): 96-98.  
ZHENG Zhao-ping, ZENG Han-sheng, DING Cui-jiao, et al. Summary on the infrared thermal imaging temperature measurement technology and its application[J]. *Infrared Technology*, 2003, 25(1): 96-98.
- [7] 邓建平, 王国林, 黄沛然. 用于高温测量的红外热成像技术[J]. 流体力学实验与测量, 2001, 15(1): 43-47.  
DENG Jian-ping, WANG Guo-lin, HUANG Pei-ran. The IR thermography technique for high temperature measurement[J]. *Experiments and Measurements in Fluid Mechanics*, 2001, 15(1): 43-47.
- [8] 王喜世, 伍小平, 秦俊, 等. 用红外热成像方法测量火焰温度的实验研究[J]. 激光与红外, 2001, 31(3): 169-172.  
WANG Xi-shi, WU Xiao-ping, QIN Jun, et al. Experimental study on flame temperature measurement by infrared thermography[J]. *Laser & Infrared*, 2001, 31(3): 169-172.
- [9] 解立峰, 何正文, 严峰, 等. FAE 模拟装置温度场参数实验研究[J]. 弹道学报, 2007, 19(1): 48-50.  
XIE Li-feng, HE Zheng-wen, YAN Feng, et al. An experimental study on the parameter of FAE temperature field[J]. *Journal of Ballistics*, 2007, 19(1): 48-50.
- [10] 张敬贤, 李玉丹, 金伟其. 微光与红外成像技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [11] 严峰. 燃料空气炸药威力评价及温度场研究[D]. 硕士学位论文. 南京: 南京理工大学, 2005.
- [12] 惠君明, 张陶, 郭学永. FAE 装置参数对燃料抛撒与爆炸威力影响的实验研究[J]. 高压物理学报, 2004, 18(2): 103-108.  
HUI Jun-ming, ZHANG Tao, GUO Xue-yong. Experimental study on the influence of device parameters of FAE to fuel dispersion and explosive power[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2004, 18(2): 103-108.

## Application of Infrared Thermo-imaging Technology in Temperature Measurement of Cloud Explosion

LI Xiu-li, HUI Jun-ming, XIE Li-feng

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Cloud explosion is the main characteristic of fuel-air explosive (FAE). The blast temperature parameters of two FAE testing bombs with liquid fuel and one with solid FAE were measured by infrared thermo-imaging technology. The temperature distribution of blast fireball at different times was obtained and the fuel casting phenomena were analyzed. Experimental results show that the surface temperature of blast fireball of FAE with liquid or solid fuel are 22.3% or 6.2% higher than that of TNT respectively when their charge quantities are the same. The high temperature durations of two FAE bombs are 1.95 and 1.23 times large than that of TNT, respectively. The fireball overcast area of liquid fuel is bigger than that of solid one. The thin shell treated with charactering grooves is beneficial to the fuel casting and dispersal.

**Key words:** explosion mechanics; infrared thermo-imaging technology; cloud explosion; blast fireball