

文章编号: 1001-1455(2008)05-0471-05

温压炸药的爆炸温度*

李秀丽, 惠君明

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 根据温压炸药的爆炸特性, 采用红外热成像仪研究温压炸药的爆炸温度。通过对实验结果的分析发现, 与等量 TNT 相比, 温压炸药爆炸云团温度较高, 高温持续时间是 TNT 的 2~5 倍, 高温云团体积可达 TNT 的 2~10 倍, 体现了温压炸药相对于传统高能炸药的温压优势。药剂被引发后所形成的高温环境, 足以维持其中铝粉的后续快速燃烧反应, 从而为增强爆炸冲击波提供帮助。

关键词: 爆炸力学; 温度场; 红外热成像仪; 温压炸药

中图分类号: O381

国标学科代码: 130·3510

文献标志码: A

1 引言

温压炸药(thermobaric explosive, 简称 TBE)是利用热效应和压力效应造成毁伤的一类炸药^[1]。它采用一次起爆方式, 温压炸药在中心高爆装药作用下形成边飞散边爆燃边释能的过程, 能利用周围空气中的氧参与释能反应。药剂中含有部分氧化剂, 是富燃料的爆炸混合物, 又是基于燃烧和爆炸双重效应的新概念爆源。采用该药剂的温压弹药主要对付地下或野战工事、建筑物和坑道等密闭和半密闭的目标, 具有比传统弹药(爆破弹药、杀爆弹药等)更加优异的毁伤效能。

温压武器的毁伤作用主要体现在爆炸波和冲击波的超压作用、高温场的燃烧和热作用以及高速破片作用^[2], 因此对温压炸药的爆炸温度进行研究具有重要的理论和实际意义。目前在弹药毁伤研究领域, 主要是对冲击波和破片作用的研究, 而对热作用的研究较少, 原因在于炸药爆炸时温度很高且伴随着爆炸的破坏作用, 使炸药爆炸温度的实验测定较困难。本文中采用红外热成像技术实时记录温压炸药爆炸后的温度场分布, 在时、空 2 方面扩大测试范围。

2 温压炸药爆炸特性

温压炸药中一般添加铝、硼、硅、钛、镁、锆等物质的粉末, 这些粉末在加热状态下点燃并释放大量能量, 大大增强了温压炸药的热效应和压力效应。

温压炸药是典型非理想炸药, 其能量转化为爆炸、冲击波和火球的作用历程可分为 3 个阶段: (1) 最初的无氧爆炸, 主要是化合物炸药以分子形式进行爆轰反应, 时间为微秒量级。(2) 爆炸后的无氧燃烧, 主要是爆轰产物如 CO_2 、 CO 和 H_2O 与铝粉的二次反应, 时间为几百微秒量级。(3) 爆炸后的有氧燃烧, 主要是爆炸后温压炸药中可燃物质或碎片如 Al 、 H 、 C 、 CO 等与氧气的快速燃烧反应。外来空气参加反应, 通过脉冲波和热对软目标产生杀伤作用。此阶段释放大量能量, 延长了冲击波的持续时间, 并使火球扩大, 时间可达数百毫秒级, 对空气爆炸波有增强作用的为数毫秒至几十毫秒内释放的能量。

3 爆炸温度测试方法简介

早期的爆温大多通过间接测量爆热和爆炸产物的比热来进行估算, 这种方法只能给出爆温的大概范围。到 20 世纪 50 年代, 在相关文献中才出现炸药爆温的实验测定值。目前对爆温进行直接测量的研究主要集中在光谱测温 and 辐射测温 2 种方法上。

* 收稿日期: 2007-01-10; 修回日期: 2007-05-16

作者简介: 李秀丽(1980—), 女, 博士研究生。

红外热成像仪是一种红外波段的摄像机,利用实时的扫描热成像技术进行温度分析,属于辐射测温范畴。其系统基本组成包括红外望远镜、光学扫描仪、红外探测器与制冷器组件、信号放大器与处理电路、显示器等,如图1所示。

红外热成像技术即通过红外传感器接收位于一定距离的被测目标所发出的红外辐射,再由信号处理系统转变成目标的视频热图像的一种技术,它将物体的热分布转换为可视图像,并在监视器上以灰度级或伪彩色显示出来,从而得到被测目标的温度分布场。一切温度高于绝对零度的物体都在以电磁波的形式向外辐射能量,其辐射能包括各种波长,其中波长范围在 $0.76 \sim 1\,000 \mu\text{m}$ 之间的称为红外光波。红外光具有很强的温度效应,这正是辐射测温技术所感兴趣的。红外测温技术的理论基础是普朗克分布定律,该技术应用于爆炸温度及辐射特性的测量,可对爆炸热结构的时空分布和变化进行实时观测和记录,具有结果直观、信息量大等优点。

目前红外热成像技术主要用于化工、冶金行业生产设备的高温实时监测及高焓风洞、油池火灾等领域的高温测量^[3-5],在炸药爆炸这类反应迅速、破坏作用强的特殊场合尚未见使用,本文中作一尝试。

4 实验研究

4.1 实验条件及测试仪器

采用自行设计的PVC塑料壳体模拟战斗部进行静爆实验。实验弹标记为TBE-1,长径比为2:1,内装2 kg温压炸药。实验炸高为0.35 m,作用时为直立圆柱,下端起爆,因此得到的是扁平状的爆炸云团。为考察温压弹的热辐射效应与TNT的区别,同时对等量TNT裸药柱的爆炸温度进行测试。

采用的红外热成像仪型号为Mikroscan 7200V,仪器技术参数见表1。测试时将仪器摆放在距爆源90 m的安全距离处,镜头与爆心处于一个水平面上。根据以往实验的经验,红外热成像仪的发射率选0.35,分幅率选30 f/s,记录最长时间为10 s。实际使用中由于数据线传输等问题记录时间相对延长,约40~60 f/ms。环境温度为28 ℃,湿度为46%,将这些参数输入仪器可自动调节环境补偿。

表1 Mikroscan 7200V的技术参数表

Table 1 Technical parameters of Mikroscan 7200V

项目	参数
温度范围	范围 1: $-40 \sim 120 \text{ }^\circ\text{C}$
	范围 2: $0 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$
	范围 3: $200 \sim 2\,000 \text{ }^\circ\text{C}$
测量准确度	$\pm 2\%$ or $2 \text{ }^\circ\text{C}$
焦距范围	$\geq 50 \text{ cm}$
探测器	320×240 UFPA VOX microbolometer
波段	$8.0 \sim 14.0 \mu\text{m}$
大气传输修正	将环境温度、湿度、测量距离等参数输入仪器 来自动调节环境补偿
发射率设定	根据输入自动调节

4.2 实验结果

运用Mikroscan 7200V自带的图像处理软件处理测得的红外热像图谱,选取具有代表性的表观温度高于500 ℃的图像,如图2(图中阴影部分为温度高于1 800 ℃的区域)所示。从图像得到不同时刻云团的表观最高温度 T 和云团最大直径 D 、某一高温的持续时间 t 和云团参数以及云团表观最高温度随时间的变化曲线,见图3和表2~5。其中, h 为云团的高度, V_{app} 为云团最大体积。

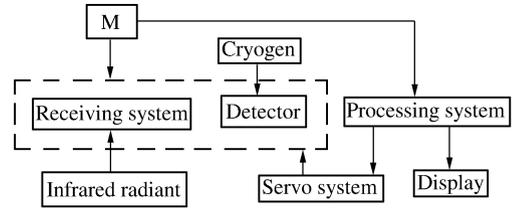


图1 红外热成像系统示意图

Fig. 1 Sketch map of the infrared thermal imaging system

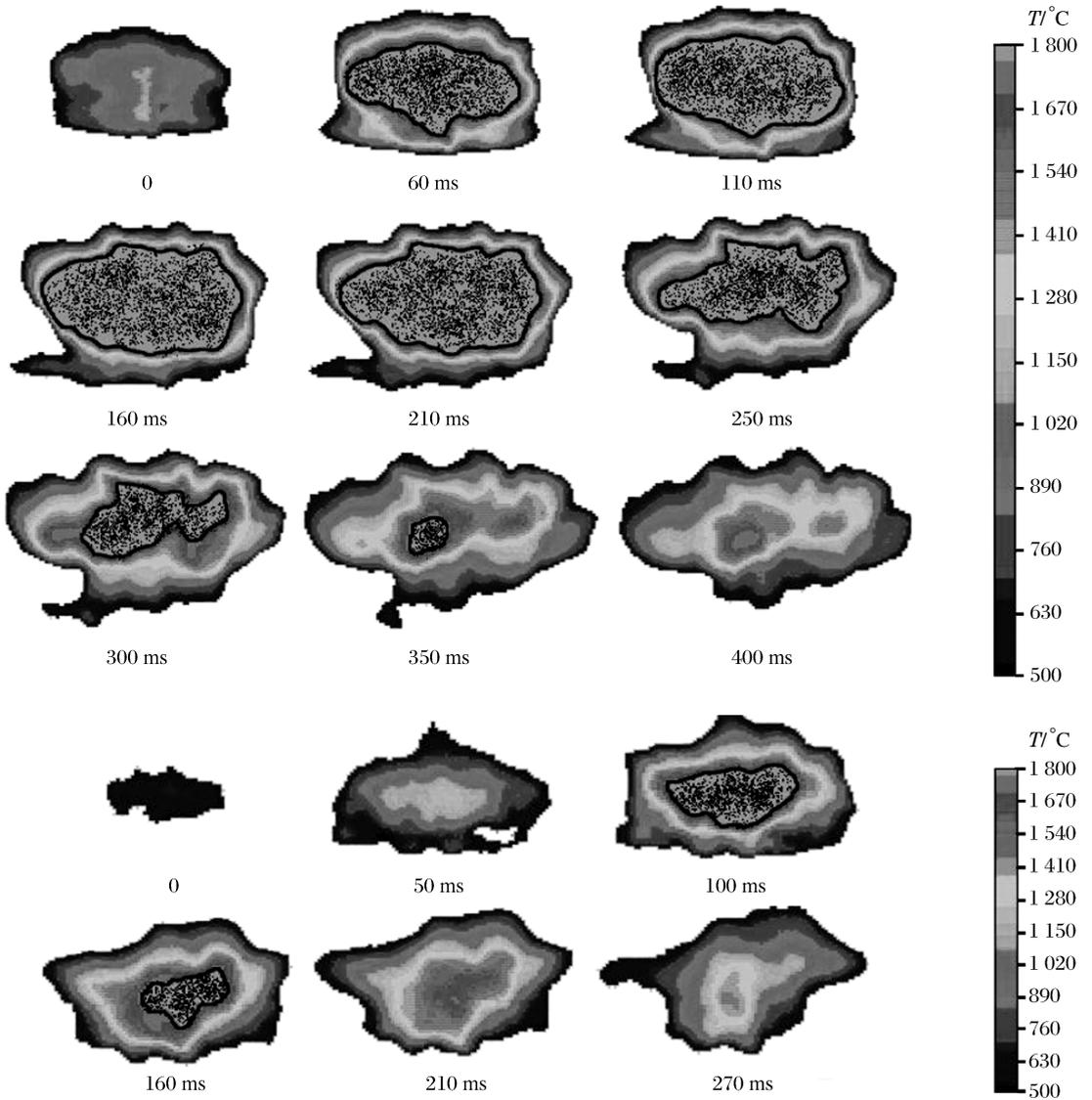


图 2 实验弹爆炸时各时段的云团表面温度分布

Fig. 2 Apparent temperature distributing of detonation cloud at different times when the testing bombs exploded

表 2 TBE-1 爆炸不同时刻云团表面最高温度及云团最大直径

Table 2 The highest apparent temperature and the biggest diameter of detonation cloud at different times when TBE-1 exploded

t/ms	$T/^\circ\text{C}$	D/m	t/ms	$T/^\circ\text{C}$	D/m	t/ms	$T/^\circ\text{C}$
0	1 177.6	4.89	350	1 912.0	7.77	711	1 004.0
60	2 218.1	5.48	400	1 759.9	7.99	761	936.7
110	2 391.3	5.63	450	1 506.3	—	811	901.9
160	2 391.3	6.22	500	1 377.7	—	861	807.3
210	2 391.3	6.81	560	1 178.3	—	911	754.4
250	2 348.9	7.18	600	1 135.8	—	961	682.5
300	2 242.3	7.33	661	1 048.3	—		

表3 TNT爆炸不同时刻云团表面的最高温度及云团最大直径

Table 3 The highest apparent temperature and the biggest diameter of detonation cloud at different times when TNT exploded

t/ms	$T/^\circ\text{C}$	D/m	t/ms	$T/^\circ\text{C}$	D/m	t/ms	$T/^\circ\text{C}$	t/ms	$T/^\circ\text{C}$
0	728.0	2.89	270	1 494.7	5.55	530	696.2	780	568.4
50	1 249.6	5.41	320	1 388.2	—	580	684.5	830	523.6
100	2 118.2	5.70	370	1 109.7	—	630	646.4	880	505.8
160	1 928.4	5.78	420	881.6	—	680	630.0	930	495.3
210	1 723.2	6.15	480	798.6	—	730	600.1	970	501.9

表4 TBE-1爆炸时某一高温的持续时间和该温度下云团最大体积

Table 4 Duration of some high temperatures and the biggest volume of detonation cloud at each temperature of TBE-1

$T/^\circ\text{C}$	t/ms	D/m	h/m	$V_{\text{app}}/\text{m}^3$
1 000	711	5.63	3.39	84.35
1 200	440	5.41	3.11	71.45
1 500	390	5.33	2.74	61.10
1 800	290	4.96	2.38	45.96
2 000	240	4.59	2.09	34.57

表5 TNT爆炸时某一高温的持续时间和该温度下云团最大体积

Table 5 Duration of some high temperatures and the biggest volume of detonation cloud at each temperature of TNT

$T/^\circ\text{C}$	t/ms	D/m	h/m	$V_{\text{app}}/\text{m}^3$
1 000	320	4.96	1.88	36.31
1 200	270	4.81	1.59	28.88
1 500	170	3.55	1.30	12.86
1 800	60	2.52	1.08	5.38
2 000	2 000 $^\circ\text{C}$ 以上持续时间很短,忽略不计。			

由上述图、表可知:与同量级 TNT 相比,温压炸药 TBE-1 的高温云团比 TNT 的大得多,1 000 $^\circ\text{C}$ 以上云团体积是 TNT 的 2 倍多,1 800 $^\circ\text{C}$ 以上云团体积约是 TNT 的 10 倍。且 TBE-1 云团表观最高温度比 TNT 的高得多,TBE-1 云团的表观温度在 110 ms 时达到最高值 2 391.3 $^\circ\text{C}$,并在该高温段维持了 100 ms;而 TNT 云团的表观温度在 100 ms 时达到最高值 2 118.2 $^\circ\text{C}$,随后迅速下降;TBE-1 弹在 1 800 $^\circ\text{C}$ 以上高温持续 290 ms,1 000 $^\circ\text{C}$ 以上高温持续 710 ms,而 TNT 1 800 $^\circ\text{C}$ 以上高温持续 60 ms,1 000 $^\circ\text{C}$ 以上高温持续 320 ms。

4.3 结果现象分析

分析实验结果可知:红外热成像仪所观测到的并非完全是爆炸产物,而是高温区域,即包括周围被热辐射加热的介质。TNT 爆炸是点源爆炸,爆炸在瞬间完成,几乎没有产物的后续燃烧,因此对周围介质加热时间较短,高温区域小,高温持续时间短。TBE 爆炸具有体积爆炸特征,爆炸后药剂在中心炸药的作用下有一个边飞散边爆燃的过程,并最终形成一个由众多高温燃烧点组成的高温云团,因此形成较大高温区域;又由于后续燃烧,对周围空气介质提供一定时间的热量支持,因此高温持续时间较长。

由 TBE 的爆炸特性可知,该炸药的特征在于:金属粉的后续燃烧反应使爆炸场压力波超压升高并持续较长的时间(十几至几十毫秒)。TBE 初始的爆轰气态产物与其中的金属微粒燃烧反应能否产生连续的增强冲击波,取决于该云雾反应区能否维持一个高温环境,使更多的金属微粒参与快速点火和燃烧,也就是说使后续的燃烧反应在爆轰反应之后快速建立,这是温压炸药能否产生更加广泛和严重破坏作用的关键。有研究表明,铝粉在空气中的发火点大于 800 $^\circ\text{C}$,而快速彻底燃烧则需要高达 1 750 $^\circ\text{C}$ 的点火温度,铝粉从点燃到燃烧完全整个过程中均需要保持高温环境。

由 4.2 实验结果可见,温压炸药爆炸云团 1 800 $^\circ\text{C}$ 以上高温持续 290 ms,1 800 $^\circ\text{C}$ 以上高温区域最大直径为 4.96 m,为铝粉的快速彻底燃烧提供了足够长时间的高温环境。

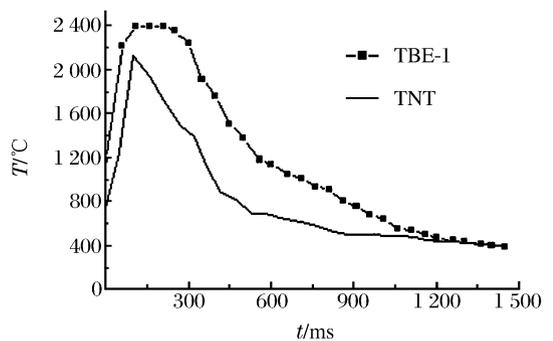


图3 云团表面最高温度随时间变化曲线
Fig. 3 The highest apparent temperature of detonation cloud vs time

5 结 论

根据温压炸药的爆炸特性,借助红外热成像仪对温压炸药的爆炸温度场进行了实验,得到结论:

(1) 采用红外热成像仪研究具有较长爆炸作用时间和较大作用范围的温压炸药的爆炸温度是可行的,能够得到爆炸温度随时空变化的红外热像图谱,具有结果直观、信息量大等优点。

(2) 与等量 TNT 相比,温压炸药具有较高的爆炸场温度,其高温持续时间是 TNT 的 2~5 倍,高温云团体积可达 TNT 的 2~10 倍,体现了温压炸药相对于传统高能炸药的温度场优势。

(3) 从对实验结果的分析可见,所研究的温压炸药被引发后形成的持续高温环境,足以维持其中铝粉的后续快速燃烧反应,从而为增强爆炸冲击波提供帮助。

感谢解立峰、王伯良、郭学永老师在实验工作方面给予的支持,感谢何正文硕士在红外测温工作中给予的帮助。

参考文献:

- [1] Wildegger-Gaissmaier Dr A E. Aspects of thermobaric weaponry[J]. ADF Health, 2003,4(1):3-6.
- [2] 惠君明,郭学永.云爆弹与热压弹[C]//2002 火炸药技术及钝感弹药学术研讨会论文集.中国工程物理研究院化工材料研究所.绵阳:中国工程物理研究院化工材料研究所,2002:333-336.
- [3] 张明,曾令可.火焰温度场的红外热成像动态测试[J].激光与红外,1997,27(5):288-291.
ZHANG Ming, ZENG Ling-ke. IR thermal imaging test of the flare dynamic temperature field[J]. Laser & Infrared, 1997,27(5):288-291.
- [4] 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.
- [5] 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.

Detonation temperature of thermobaric explosives

LI Xiu-li^{*}, HUI Jun-ming

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

Abstract: The infrared thermography method was used to investigate the detonation temperature of thermobaric explosives (TBE). The experimental result shows that the temperature of TBE's detonation cloud is higher than that of TNT with the same weight. The duration of high temperature and the volume of the high temperature cloud are 2~5 and 2~10 times as much as those of TNT, respectively. This implies that TBE is superior to the traditional high explosive on the temperature field. The high-temperature environment formed by the explosive explosion is sufficient to maintain the after-burning of the aluminum powder, which can provide assistance to boost up the blast wave.

Key words: mechanics of explosion; thermobaric explosive; temperature field; infrared thermography

* Corresponding author: LI Xiu-li

E-mail address: echoli331@yahoo.com.cn

Telephone: 86-25-84310502