DOI: 10.11883/1001-1455(2016)01-0038-05

温压炸药在野外近地空爆中的冲击波规律*

赵新颖[1,2],王伯良[1],李 席[1]
(1.南京理工大学,江苏 南京 210094;
2.沈阳理工大学,辽宁 沈阳 110159)

摘要:为了研究温压炸药在敞开空间爆炸中冲击波的规律,选取典型温压炸药制成不同量级的裸药柱进行野外近地空爆实验,同时用 TNT 进行对比实验,获取温压炸药与 TNT 的冲击波参数并拟合得到相似律公式。结果表明,温压炸药的冲击波超压峰值在中远场略高于 TNT;在相同对比距离处,温压炸药的比冲量明显高于 TNT,在对比距离小于 2 m/kg$^{1/3}$的近场,温压炸药的比冲量达到 TNT 的 2 倍。引入超压-比冲量曲线描述冲击波特征,表明当超压峰值相同时,温压炸药比冲量更大,超压峰值在 20~50 kPa 的中度以下毁伤范围时,温压炸药的比冲量比 TNT 高 40%~60%,可产生更严重的毁伤效应。冲量是爆炸冲击波的重要毁伤元素,应建立与冲量有关的方法评价温压炸药的威力。

关键词:爆炸力学;冲击波;相似律;温压炸药
中图分类号:O382.4 **国标学科代码**:1303520 **文献标志码**:A

温压炸药(thermobaric explosive,TBE)是利用压力效应和热效应造成毁伤的一类炸药[1],一般由高能炸药、金属或非金属超细燃料粉、活性剂和黏结剂按一定比例混合制成[2],从爆轰特性看属于非理想炸药。温压炸药的爆轰反应区为厘米量级[3],在膨胀波中反应仍在进行,即后燃过程,在此过程释放的能量将进一步支持空气冲击波向前传播[4],形成了与普通高能炸药不同的释能过程和毁伤特征。研究温压炸药近地空爆的冲击波规律是研究温压炸药毁伤作用的基础。

目前,对温压炸药空中爆炸的实验研究多基于优化配方的目的,着重研究组分对爆炸场参数的影响[5-7]。李秀丽等[8]针对空爆实验中出现的二次冲击波现象进行了研究。黄菊等[9]、李世民等[10]基于单一量级温压炸药自由场爆炸实验结果进行了数值模拟研究,探索对温压炸药空爆过程进行数值模拟的可行性。通过冲击波参数深入研究温压炸药作用特征的工作较少,但实验建立的温压炸药冲击波特征是进行数值模拟和机理分析的基础。本文中,对典型温压炸药和 TNT 进行野外近地空爆实验,获取若干对比距离上的冲击波参数,按爆炸相似律拟合,对比温压炸药与 TNT 的冲击波参数特征,总结温压炸药不同于普通高爆炸药的近地空爆冲击波规律。

1 爆炸相似律

相似原理广泛应用于炸药空中爆炸的理论研究和实验技术中,它能够把多变量的函数关系通过量纲变换归纳为数量最少而又能反映基本关系的量纲一量,给理论分析和实验研究提供了极大的方便[11]。爆炸中的相似性是以几何相似原理为基础的,当炸药种类、装药密度及空气状态不变时,空气冲击波超压峰值 Δp、比正压作用时间 $t_+/\sqrt[3]{W}$、比冲量 $i_+/\sqrt[3]{W}$ 均为对比距离 $\bar{r}=r/\sqrt[3]{W}$ 的函数,其中 r 为测点到爆心垂直投影的距离,W 为炸药质量。相似律函数为:

$$\Delta p = A_1/\bar{r} + A_2/\bar{r}^2 + A_3/\bar{r}^3 \tag{1}$$

$$t_+ / \sqrt[3]{W} = a\bar{r}^n \tag{2}$$

$$i_+ / \sqrt[3]{W} = A/\bar{r} \tag{3}$$

* **收稿日期**:2014-07-18;**修回日期**:2015-01-08
第一作者:赵新颖(1978—),女,博士研究生;**通讯作者**:王伯良,boliangwang@163.com。

式中：系数 A_1、A_2、A_3、a、n 和 A 由实验数据拟合确定；Δp、$t_+/\sqrt[3]{W}$、$i_+/\sqrt[3]{W}$ 和 $\bar{r}$ 的单位分别为 kPa、ms/kg$^{1/3}$、Pa·s/kg$^{1/3}$和 m/kg$^{1/3}$。

2　实　验

2.1　靶场布置

靶场选择在空旷的野外，地面平坦，硬度适中。药柱置于距地面 1 m 的支架上，以药柱在地面上的垂直投影点为圆心，测点分布在半径为 3、4、5、6、8、12、14、17、20、22 和 24 m 的相互垂直的两条射线上。采用压电式压力传感器获取冲击波参数，传感器用加固装置安装在地面，敏感面与地面平齐，数据采集仪安放在距靶场 140 m 的掩体内。

2.2　实验样品

实验样品为 TNT 和温压炸药圆柱形裸药柱。其中 TNT 药柱药量分别为 1、8、30 和 35 kg，TBE 药柱药量分别为 0.07、1、2、3、20 和 30 kg。均以钝化黑索金作为传爆药，用 8 号电雷管上端起爆。

2.3　冲击波波形与参数

每发实验在各个测试距离均获得两条测试曲线，先将形状上明显不属于冲击波波形、量级上显著高于理论计算值及到达时间明显不合理的异常信号去除，再对采集到的信号进行判读，获得冲击波特征参数。温压炸药冲击波波形如图 1 所示，在野外空爆中温压炸药的毁伤作用主要与冲击波正压部分有关，将冲击波正压区放大，如图 2 所示。可获取冲击波超压峰值 Δp、正压作用时间 t_+ 和正压冲量 i_+ 等 3 个特征值，其中 i_+ 为计算值，是冲击波超压在正压作用时间内的积分。有的测点波形噪音较大，导致数据读取困难，应先对数据进行滤波降噪处理，再进行参数提取。

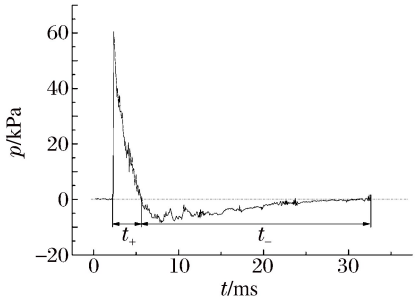

图 1　温压炸药冲击波波形

Fig. 1　Shockwave of thermobaric explosives

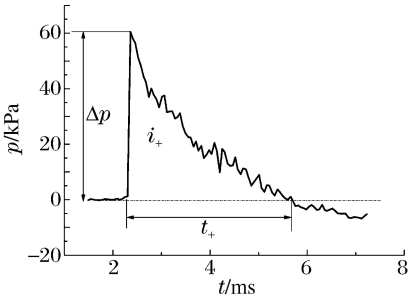

图 2　冲击波参数

Fig. 2　Shock wave parameters

需注意的是，壁面压力传感器获取的是冲击波在地面测点的反射波。本文中实验测点入射角为 71.6°～ 87.6°，根据冲击波反射理论，在冲击波较强时，入射角大于 40°左右即发生马赫反射，可见全部测点均在马赫反射区内，提取的参数均为马赫反射波参数。而爆炸相似律是针对没有反射的自由场冲击波提出的，广义上也适用于马赫反射区，但需将冲击波超压峰值和正压冲量换算为相应的入射波参量再进行相似律拟合。

3　结　果

3.1　冲击波超压峰值的相似律

经冲击波参数判读与换算，获得各对比距离上的冲击波入射超压峰值，根据爆炸相似律按式(1)进行拟合，温压炸药与 TNT 的相似律公式分别为：

$$\Delta p_{\mathrm{TBE}}=\begin{cases}-\dfrac{313.33}{\bar{r}}+\dfrac{2573.1}{\bar{r}^2}+\dfrac{153.99}{\bar{r}^3} & 0.98\ \mathrm{m/kg^{1/3}}\leqslant\bar{r}\leqslant 2.49\ \mathrm{m/kg^{1/3}}\\ -\dfrac{46.93}{\bar{r}}+\dfrac{2215.68}{\bar{r}^2}-\dfrac{954.75}{\bar{r}^3} & 2.49\ \mathrm{m/kg^{1/3}}<\bar{r}\leqslant 8.68\ \mathrm{m/kg^{1/3}}\end{cases}\tag{4}$$

$$\Delta p_{\mathrm{TNT}}=\begin{cases}\dfrac{18.67}{\bar{r}}+\dfrac{454.02}{\bar{r}^2}+\dfrac{2292.15}{\bar{r}^3} & 0.88\ \mathrm{m/kg^{1/3}}\leqslant\bar{r}\leqslant 3\ \mathrm{m/kg^{1/3}}\\ \dfrac{193.67}{\bar{r}}-\dfrac{358.17}{\bar{r}^2}+\dfrac{3282.55}{\bar{r}^3} & 3\ \mathrm{m/kg^{1/3}}<\bar{r}\leqslant 11\ \mathrm{m/kg^{1/3}}\end{cases}\tag{5}$$

由图 3 可见，温压炸药的冲击波超压峰值在对比距离小于 1.3 m/kg$^{1/3}$的近场略低于 TNT，而在对比距离 1.3 m/kg$^{1/3}$<$\bar{r}$< 3.6 m/kg$^{1/3}$的中远场则略高于 TNT，整体来看温压炸药在超压峰值上相对 TNT 优势不明显。温压炸药中加入了一定量的金属粉，其多数能量是在爆轰波阵面之后释放的，金属粉的热稀释作用降低了爆压，使温压炸药爆炸冲击波超压峰值与普通高能炸药差别不大。

3.2 比正压作用时间的相似律

爆炸相似律指出，冲击波的比正压作用时间与对比距离满足相似关系。温压炸药和 TNT 的比正压作用时间拟合曲线如图 4 所示，拟合公式为：

$$\frac{t_{+,\mathrm{TBE}}}{\sqrt[3]{W}}=0.49\bar{r}^{1.05}\qquad 0.98\ \mathrm{m/kg^{1/3}}\leqslant\bar{r}\leqslant 8.68\ \mathrm{m/kg^{1/3}}\tag{6}$$

$$\frac{t_{+,\mathrm{TNT}}}{\sqrt[3]{W}}=0.69\bar{r}^{0.84}\qquad 1.53\ \mathrm{m/kg^{1/3}}\leqslant\bar{r}\leqslant 9.69\ \mathrm{m/kg^{1/3}}\tag{7}$$

正压作用时间 t_+ 不仅与冲击波强度和传播距离有关，还与反应药量有关系。受样本数量、测试方法和数据提取方法的限制，图 4 所示的测试数据分布规律性不强，只能看到比正压作用时间随对比距离增加而增长，即离爆心越远，正压区越宽，无法确定温压炸药与 TNT 的对比关系。

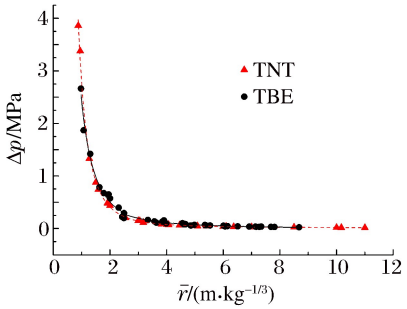

图 3 温压炸药与 TNT 的超压峰值

Fig. 3 Peak overpressures of TBE and TNT

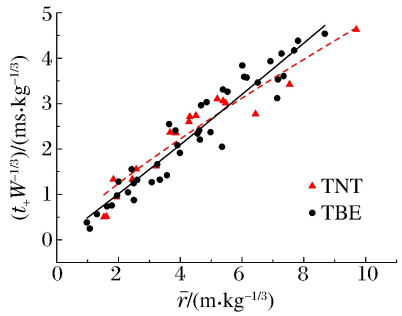

图 4 温压炸药与 TNT 的比正压作用时间

Fig. 4 Specific positive phase time of TBE and TNT

3.3 冲击波比冲量的相似律

将积分得到的各对比距离上的比冲量按式(3)进行相似律拟合，得到拟合曲线如图 5 所示，拟合公式为：

$$\frac{i_{+,\mathrm{TBE}}}{\sqrt[3]{W}}=\frac{310.76}{\bar{r}}\qquad 0.98\ \mathrm{m/kg^{1/3}}\leqslant\bar{r}\leqslant 8.68\ \mathrm{m/kg^{1/3}}\tag{8}$$

$$\frac{i_{+,\mathrm{TNT}}}{\sqrt[3]{W}}=\frac{226.85}{\bar{r}}\qquad 1.53\ \mathrm{m/kg^{1/3}}\leqslant\bar{r}\leqslant 9.69\ \mathrm{m/kg^{1/3}}\tag{9}$$

由图 5 可见，温压炸药与 TNT 的比冲量都随对比距离增加而减小。在对比距离相同时，温压炸药的比冲量明显高于 TNT，在对比距离小于 2 的近场，温压炸药的优势尤其显著，能达到 TNT 比冲量的 2 倍。这也显示了温压炸药与普通高能炸药冲击波结构的不同之处。

3.4 温压炸药冲击波特征

为进一步明确温压炸药冲击波特征，引入超压-比冲量关系曲线，对比温压炸药与 TNT 在相同峰值超压下的比冲量大小，如图 6 所示。

由图 6 可见，当超压峰值相同时，温压炸药具有更大的比冲量。这是因为温压炸药爆炸后的无氧反应和有氧后燃效应为冲击波补充能量，延缓其衰减，使冲量增加。当超压在 20～50 kPa 时，无论对人还

是建筑物都只能造成中度以下毁伤。此时 TNT 的比冲量为 25～37 Pa·s/kg$^{1/3}$，对建筑物也只能造成中度以下破坏[12]；而温压炸药的比冲量为 36～60 Pa·s/kg$^{1/3}$，比 TNT 高约 40%～60%，可使建筑物门窗玻璃全部受损，造成较严重的破坏。即在 TNT 冲击波已无法造成严重损伤时，温压炸药的冲量仍能产生严重毁伤效应。因此在超压相同时，温压炸药的威力更大，在评价温压炸药威力时应考虑比冲量因素。

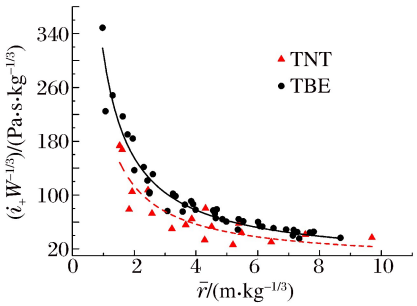

图 5　温压炸药与 TNT 的比冲量

Fig. 5　Specific impulse of TBE and TNT

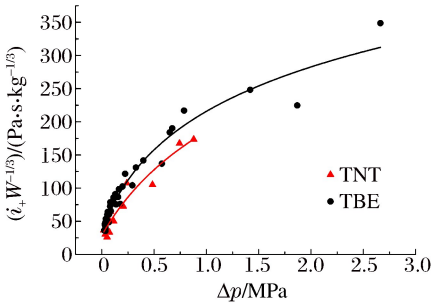

图 6　超压-比冲量关系曲线

Fig. 6　Peak pressure-specific impulse curve

4　结　论

通过对不同量级温压炸药和 TNT 的野外空爆冲击波参数的相似律拟合，得到温压炸药不同于 TNT 的冲击波作用规律：

(1)在野外空爆条件下，温压炸药的冲击波超压峰值只在中远场高于 TNT，在整个爆炸场来看，温压炸药冲击波超压峰值相对普通高爆炸药优势不显著。

(2)受样本数量、测试方法和数据提取方法的限制，温压炸药与 TNT 的冲击波比作用时间对比关系不明显。

(3)在相同对比距离处，温压炸药的冲击波比冲量明显高于 TNT，在对比距离小于 2 m/kg$^{1/3}$ 的近场，温压炸药的比冲量能达到 TNT 的 2 倍。

(4)引入超压-比冲量关系曲线描述温压炸药冲击波特征。当温压炸药与 TNT 具有相同超压峰值时，温压炸药比冲量更大，当超压峰值在 20～50 kPa 的中度以下毁伤范围时，温压炸药的比冲量比 TNT 高 40%～60%，可产生更严重的毁伤效应。冲量作为重要的毁伤元素，在评价温压炸药威力时应予以考虑。

参考文献：

[1]　Wildegger-Gaissmaier A E. Aspects of thermobaric weaponry[J]. ADF Health, 2003,4(4):3-6.

[2]　李芝绒，王胜强，殷俊兰. 不同气体环境中温压炸药爆炸特性的试验研究[J]. 火炸药学报，2013，36(3)：59-61.
Li Zhirong, Wang Shengqiang, Yin Junlan. Experiment study of blast performance of thermobaric-explosive under different gas environment[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2013,36(3):59-61.

[3]　Jackson S I, Kiyanda C B, Short M. Experimental observations of detonation in ammonium-nitrate-fuel-oil (ANFO) surrounded by a high-sound-speed, shockless, aluminum confiner[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011,33(2):2219-2226.

[4]　Ruggirello K P, DesJardin P E, Baer M R. A reaction progress variable modeling approach for non-ideal multiphase explosives[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2012,42:128-151.

[5]　郑波，陈力，丁雁生，等. 高能、含铝和温压炸药爆炸抛撒实验研究[J]. 弹箭与制导，2008，28(3)：118-120.
Zheng Bo, Chen Li, Ding Yansheng, et al. Experimental study on explosion dispersal of thermobaric explosive[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008,28(3):118-120.

[6]　Peuker J M, Krier H, Glumac N. Particle size and gas environment effects on blast and overpressure enhancement

in aluminized explosives[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013,34(1):2205-2212.

[7] Hahma A, Palovuori K, Romu H. Experimental studies on metal fueled thermobaric explosives[C]//35th International Annual Conference of ICT. Karlsrune: ICT, 2006.

[8] 李秀丽,惠君明,王伯良.云爆剂爆炸/冲击波参数研究[J].含能材料,2008,16(4):410-414.
Li Xiuli, Hui Junming, Wang Boliang. Blast/shock wave parameters of single-event FAE[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008,16(4):410-414.

[9] 黄菊,王伯良,仲倩,等.温压炸药能量输出结构的初步研究[J].爆炸与冲击,2012,32(2):164-168.
Huang Ju, Wang Boliang, Zhong Qian, et al. A preliminary investigation on energy output structure of a thermobaric explosive[J]. Explosive and Shock Waves, 2012,32(2):164-168.

[10] 李世民,李晓军,郭彦朋.温压炸药自由场爆炸空气冲击波的数值模拟研究[J].爆破,2011,28(3):8-12.
Li Shimin, Li Xiaojun, Guo Yanpeng. Numerical simulation study on airblast of thermobaric explosive explosion in free air[J]. Blasting, 2011,28(3):8-12.

[11] 北京工业学院八系《爆炸及其作用》编写组.爆炸及其作用[M].北京:国防工业出版社,1979:259-264.

[12] 王新建.爆破空气冲击波及其预防[J].中国人民公安大学学报,2003(4):41-43.
Wang Xinjian. Blasting wave and prevention[J]. Journal of Chinese People's Public Security University, 2003(4):41-43.

Shockwave characteristics of thermobaric explosive in free-field explosion

Zhao Xinying[1,2], Wang Boliang[1], Li Xi[1]

(1. *Nanjing University of Science and Technology*, *Nanjing* 210094, *Jiangsu*, *China*;
2. *Shenyang Ligong University*, *Shenyang* 110159, *Liaoning*, *China*)

Abstract: The energy release process and damage characteristics of thermobaric explosive (TBE), a non-ideal explosive, differ from those of a normal explosive. In the present work, free-field explosion experiments were done to study the shock wave characteristics of TBE. The typical TBE grains and TNT grains with different magnitude order were tested and the shock wave parameters of TBE and TNT were obtained and fitted following the explosion similarity principle. Then a comparative research of TBE and TNT was done to show the characteristics of TBE. The results show that the peak pressure of TBE isn't obviously advantageous compared with that of TNT because it is only slightly higher than TNT at middle and far field. The positive phase time and impulse are related not only with the shock wave intensity and propagation distance but also with the explosive quality, so the specific impulse and specific positive phase time were studied. The correlation of the specific positive phase time between TBE and TNT is not definite. The specific impulse of TBE is higher than that of TNT at the same contrastive distance. When it is less than 2 $m/kg^{1/3}$, the specific impulse of TBE is 2 times that that of TNT. The curves of the peak pressure and the specific impulse was introduced to describe the characteristics of the shock wave, showing that the specific impulse of TBE is larger than that of TNT under the same peak pressures. When the peak pressure is between 20 kPa to 50 kPa, the damage degree is below middle level but when the specific impulse of TBE is 40%—60% higher than that of TNT serious damage is generated. As an important damage factor in the free field explosion, the impulse should be taken into account when evaluating the power of TBE.

Key words: mechanics of explosion; shockwave; similarity principle; thermobaric explosive

(责任编辑 丁 峰)