

文章编号: 1001-1455(2011)05-0528-05

火球动态模型在温压炸药热毁伤效应 评估中的应用^{*}

仲 倩,王伯良,黄 菊,房莹莹,惠君明
(南京理工大学化工学院,江苏 南京 210094)

摘要: 根据红外热成像仪所测的某温压炸药和 TNT 爆炸火球的表征参量数据,分析了火球热辐射的动态模型,对爆炸火球变化规律进行了定量描述。以具有时间属性的爆炸火球热辐射动态模型为基础,比较了温压炸药和 TNT 装药爆炸火球热毁伤效应。研究表明,温压炸药的热辐射剂量可达 TNT 热辐射剂量的 3.6~4.8 倍,温压炸药具有明显的高温毁伤优势;与静态模型相比,动态模型能用来更好地模拟火球的动态变化过程,更合理地评估炸药的热辐射毁伤效应。

关键词: 爆炸力学;热辐射;火球动态模型;温压炸药;火球静态模型

中图分类号: O389;TQ564

国标学科代码: 130·3510

文献标志码: A

温压炸药中一般添加铝粉等高能添加剂以增加燃烧和爆炸效应,同时还添加部分高能炸药以增强其起爆性能^[1],其热辐射毁伤效应高于常规高能炸药,因此温压炸药的热辐射毁伤效应评估研究具有极其重要的意义。

关于爆炸火球的热辐射毁伤,前人做了很多研究与探讨,何志光^[2]分别用 Baker 模型和 S. B. Dorofeev 模型计算了二次引爆型云爆剂和一次引爆型云爆剂火球热辐射的毁伤效应,认为 Baker 模型计算的热剂量值显著偏大,而 S. B. Dorofeev 模型计算结果比较合理。郭学永等^[3]利用 Baker 模型分析了温压炸药的热辐射毁伤半径。上述模型将爆炸火球简单地假设为静态,其体积、表面温度和上升高度等表征参量瞬间达到最大并保持不变,但高速录像测试结果表明温压炸药在爆炸过程中,火球尺寸及上升高度等表征参量均是动态变化的,因此这些假设不利于准确评估爆炸火球的热辐射毁伤效应。W. E. Martinsen^[4]基于火球热辐射基础理论,建立了适合于过热可燃液体瞬间燃烧的火球热辐射动态模型,张董莉等^[5]用 Martinsen 模型计算了沸腾液体蒸气云爆炸火球的热辐射毁伤后果,与静态模型相比,该动态模型可体现火球的动态变化。但利用该动态模型在计算火球表面辐射参量时,将火球增长阶段的表面辐射能看作定值,在计算大气传输率参数时,忽略了 CO₂ 对传输系数的影响,而且火球直径、火球高度及火球持续时间等参数表征是应用经验、半经验公式,参数的处理难以适用于具有复杂爆炸过程的火球,如具有后燃效应的温压炸药火球。

本文中以 Martinsen 动态模型为基础,对关键参数的选取进行分析和改进,结合红外热成像仪和高速摄影仪所测得的温压炸药和 TNT 爆炸火球的表征参量,形成以实验数据为基础的火球热辐射毁伤动态模型,并比较温压炸药和 TNT 爆炸的火球热辐射毁伤效应。

1 温压炸药热辐射动态模型

根据火球热辐射理论^[4]可知,目标接受的热通量 $q(x,t)$ 是火球表面热辐射能 $E(t)$ 、火球和目标之间的几何视角系数 $F(x,t)$ 及大气传输率 $\tau(x,t)$ 的函数

$$q(x,t) = E(t)F(x,t)\tau(x,t) \quad (1)$$

* 收稿日期: 2010-04-28; 修回日期: 2010-10-13

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金项目

作者简介: 仲 倩(1981—),女,博士研究生。

火球对暴露目标所造成的毁伤效应是由热辐射强度与目标暴露时间决定的,而火球持续时间很短,通常认为目标暴露时间等于火球持续时间。因此可以用热辐射剂量

$$Q = \int_0^{t_a} q(x, t) dt = \int_0^{t_a} E(t) F(x, t) \tau(x, t) dt \tag{2}$$

即热通量 q 在火球持续时间 t_a 内的积分来评估对暴露目标所造成的毁伤效应。

1.1 火球表面辐射能

文献[4]中的火球表面辐射能计算公式是将火球表面辐射能看作与燃料质量、燃烧热及燃烧热辐射系数相关的定值,未反映出表面辐射能对温度 T 的强烈依赖关系。因此,根据 Stefan-Boltzmann 方程,给出了火球表面辐射能与时间 t 的函数

$$E = \epsilon \sigma T^4(t) \tag{3}$$

式中: E 为火球表面辐射能, W/m^2 ; ϵ 为火球表面比辐射率; σ 为斯蒂芬·波尔茨曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T 为火球表面温度, K 。

1.2 几何视角系数

由于目标所处位置不可能接受到辐射表面每个点的辐射能,因此需要引入几何视角系数,即每单位面积上目标接受的辐射能与火球释放的辐射能之比[5]。它不仅与火球大小、火球与目标的距离相关,还与火球与目标的相对方位相关。

假设目标在地面上,且与火球中心的连线垂直于火球表面,如图 1 所示,则目标的最大几何视角系数为

$$F(x, t) = \frac{1}{4} \left[\frac{D(t)}{S(t)} \right]^2 \tag{4}$$

式中: $D(t)$ 是火球直径随时间变化的函数; $S(t) = \sqrt{H^2(t) + x^2}$, $H(t)$ 是火球上升高度随时间变化的函数, x 是火球在地面垂直投影点到目标的距离, m ; t 是时间, s 。

1.3 大气传输率

大气传输率 $\tau(x, t)$ 为考虑了空气中水蒸气和 CO_2 等对热辐射吸收后的传输系数,文献[5]采用的计算公式为

$$\tau(x, t) = 2.02 \left\{ R p_v \left[S(t) - \frac{D(t)}{2} \right] \right\}^{-0.09} \tag{5}$$

式中: R 为实验时当地相对湿度; p_v 为对应环境温度下水的饱和蒸气压, Pa 。

用公式(5)计算时未考虑 CO_2 对热辐射的吸收影响,根据大气中热辐射的传播和衰减规律,本文中采用文献[6]中的大气传输率公式

$$\tau(x, t) = 1.006 - 0.117 \lg X(\text{H}_2\text{O}) - 0.023 \lg^2 X(\text{H}_2\text{O}) - 0.031 \lg X(\text{CO}_2) + 0.001 \lg^2 X(\text{CO}_2) \tag{6}$$

式中: $X(\text{H}_2\text{O}) = \frac{288.651}{T_a} \frac{760}{101325} R p_v \ln \left[S(t) - \frac{D(t)}{2} \right]$, $X(\text{CO}_2) = \frac{273}{T_a} \ln \left[S(t) - \frac{D(t)}{2} \right]$, T_a 为环境温度, K 。

2 实 验

2.1 实验条件

实验中采用 30 kg 温压炸药和同等质量的参比炸药 TNT,温压炸药炸高 1.33 m,采用直立圆柱上下两端起爆模式;TNT 炸高 1.33 m,采用直立圆柱下端起爆方式。利用红外热成像仪和高速录像仪,记录热辐射动态模型表征参数及实验现象,仪器安放在距爆源 130 m 的掩体内,镜头与爆心处于同一个水平面上,高速录像仪扫描速度为 $2\,000 \text{ s}^{-1}$,每种炸药分别作 2 次平行实验。

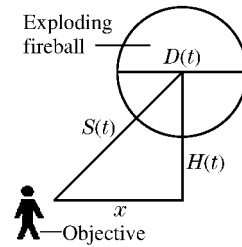


图 1 火球几何视角

Fig. 1 Geometric perspective of fireball

2.2 实验结果

根据红外热成像和高速录像仪的记录结果,可得到火球温度随时间变化的数据,由于爆炸火球表面温度分布不均匀,因此需取其表面温度算术平均值,得到结果较为合理,平均温度可采用红外热成像仪软件处理得到,采用多项式拟合算法对实测数据进行分阶段拟合,图 2 为火球平均温度实测数据与拟合曲线对比图。

同理可对火球直径和火球上升高度实测数据进行处理,表 1 列出了火球平均温度 T 、火球直径 D 及火球上升高度 H 的拟合系数,并给出了各公式的适应范围及拟合精度。表内拟合系数均是根据药量为 30 kg 时实测数据而通过多项式拟合算法获得,拟合系数会根据药量的不同而有所变化。

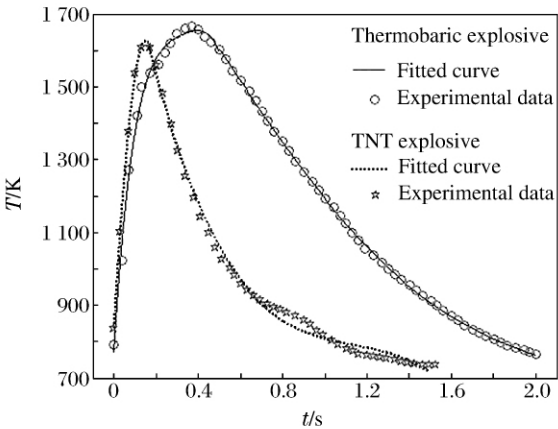


图 2 火球平均温度拟合曲线

Fig. 2 Fitted curves of fireball's average temperature

表 1 温压炸药和 TNT 的公式拟合系数
Table 1 Fitted coefficient of the thermobaric explosive and TNT

X	炸药	$X(t) = a + bt + ct^2 + dt^3 + et^4 + ft^5$						适用范围	精度/%
		a	b	c	d	e	f		
T/K	温压炸药	770.44	9 260.96	-39 416.3	78 783.23	-60 789.72	0.00	(0,0.5)	99.18
		1 978.81	-542.27	-637.71	487.33	-92.45	0.00	(0.5,2.0)	99.98
	TNT	834.91	9 537.68	-21 178.55	-47 994.83	0.00	0.00	(0,0.17)	99.97
		2 051.42	-3 094.47	2 613.86	-763.34	0.00	0.00	(0.17,1.50)	99.41
D/m	温压炸药	10.03	17.23	-19.80	5.98	0.00	0.00	(0,1.13)	97.69
		5.96	6.82	-0.75	0.00	0.00	0.00	(1.13,2.00)	99.18
	TNT	10.21	32.26	-210.36	819.56	-1 445.21	888.38	(0,0.6)	98.64
		60.30	-242.37	476.63	-453.00	208.51	-37.66	(0.6,1.5)	99.32
H/m	温压炸药	1.45	5.83	-0.95	0.00	0.00	0.00	(0,2)	99.57
	TNT	4.29	7.12	-0.21	0.00	0.00	0.00	(0,1.5)	99.49

3 火球热辐射动态模型计算结果

温压炸药实验环境温度为 24℃,相对湿度为 48%。24℃时水的饱和蒸气压为 2 987.87 Pa。将拟合得到的火球平均温度 $T(t)$ 、火球直径 $D(t)$ 、火球上升高度 $H(t)$ 公式分别代入式(3)、(4)及(6),得到火球表面辐射能 $E(t)$ 、几何视角系数 $F(x,t)$ 和大气传输率 $\tau(x,t)$ 的函数,再将这些函数代入式(1)得到 $q(x,t)$,采用数值积分计算方法分 3 个积分段:0~0.50、0.50~1.13、1.13~2.00 s 对 $q(x,t)$ 进行积分,得到不同距离 x 处的火球热辐射剂量 Q_t ,如表 2 所示。表中, $Q_{t,1}$ 中考虑了 CO_2 对热辐射的吸收影响, $Q_{t,2}$ 中没有考虑 CO_2 对热辐射的吸收影响。

TNT 的实验环境温度为 28℃,相对湿度为 38%。28℃时水的饱和蒸气压为 3 780.17 Pa。对得到的 $q(x,t)$ 分 3 个积分段:0~0.17、0.17~0.60、0.60~1.50 s 进行积分,得到 TNT 不同距离处的火球热辐射剂量,如表 2 所示。为了讨论 CO_2 对热辐射的吸收影响,应用式(5)的大气传输率公式分别计算得到温压炸药和 TNT 的热剂量 Q_T ,如表 2 所示。表中, $Q_{T,1}$ 中考虑了 CO_2 对热辐射的吸收影响, $Q_{T,2}$ 中没有考虑 CO_2 对热辐射的吸收影响。

由表 2 可知,不同距离处温压炸药的热辐射剂量可达 TNT 的 3.6~4.8 倍,温压炸药具有显著的热辐射毁伤效应; CO_2 对火球热辐射的计算结果存在一定的影响,最大差值百分比达到了 29.26%,因此应用火球热辐射动态模型计算炸药的热剂量时,应充分考虑 CO_2 对热辐射的吸收影响。

表 2 温压炸药和 TNT 的热剂量计算结果
Table 2 Thermal dose of thermobaric explosive and TNT

x/m	$Q_{\text{T},1}/(\text{kJ}/\text{m}^2)$	$Q_{\text{T},2}/(\text{kJ}/\text{m}^2)$	$\frac{Q_{\text{T},1}-Q_{\text{T},2}}{Q_{\text{T},2}}$	$Q_{\text{T},1}/(\text{kJ}/\text{m}^2)$	$Q_{\text{T},2}/(\text{kJ}/\text{m}^2)$	$\frac{Q_{\text{T},1}-Q_{\text{T},2}}{Q_{\text{T},2}}$	$\frac{Q_{\text{T},1}}{Q_{\text{T},2}}$
4	269.16	347.95	0.226 4	55.65	61.66	0.097 5	4.84
5	215.36	289.33	0.255 7	45.68	47.42	0.036 1	4.71
6	180.47	255.11	0.292 6	37.88	41.69	0.091 4	4.76
7	130.21	132.06	0.014 0	31.65	35.09	0.098 1	4.11
8	103.06	113.63	0.093 0	26.65	29.54	0.097 9	3.87
9	83.76	93.09	0.100 2	22.63	25.01	0.095 3	3.70
10	69.35	69.35	0.099 0	19.38	21.36	0.092 6	3.58

4 与静态模型计算结果对比分析

为了对动态模型和静态模型所得到的热辐射毁伤效应加以比较,采用目前较常用的 Baker 静态模型计算上述温压炸药的热辐射毁伤效应。用 Baker 模型计算热剂量的公式为

$$Q = \frac{D^2/L^2}{F + D^2/L^2} (bG) M^{1/3} T^{2/3} \tag{7}$$

式中: T 为火球温度,K; D 为火球直径,m; L 为目标到火球中心的距离,m; F 为常量 161.7; Q 为热剂量, J/m^2 ; bG 为常量 2.04×10^4 ; M 为火球消耗燃料质量,kg。

根据红外热成像仪和高速录像测试结果可知: $T=2\,547.85\text{ K}$, $D=12.16\text{ m}$,将测试数据带入到式(7),即可求出静态模型热剂量值,计算结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,用 Baker 静态模型公式计算的热剂量显著大于动态模型计算结果。因为静态模型计算时,前提条件是假设火球直径和火球温度为常量,为测试过程获得参量的最大值,未考虑火球上升高度和火球作用时间的影响。而实际爆炸过程中,火球各表征参量随时间的变化不断变化,均为时间函数。阚金玲^[7]通过表面最大热辐射量法,分析认为静态模型计算结果显著偏高的原因是火球直径、体积及温度等参数均在不停的变化,应用静态模型进行毁伤效应评估不合理。因此利用动态模型计算得到的热剂量和毁伤效应评估的结果更合理,理论上可以计算出一个相对接近实际的毁伤威力圈。

5 结 论

- (1)以 Martinsen 动态模型为基础,对火球表面辐射能和大气传输率参数的选取和表征进行了分析和改进,形成了基于动态观测实验数据的火球动态模型。该模型更能体现出爆炸火球的动态特性;与静态模型相比,动态模型可以模拟火球的动态变化过程,更合理地评估火球热辐射毁伤效应。
- (2)根据红外热成像仪所测数据,对温压炸药火球表面的平均温度、直径及上升高度等表征参量进行了定量描述,以拟合公式方式揭示了其变化规律,建立了温压炸药火球动态模型计算方法。
- (3)火球动态模型计算结果表明,与 TNT 相比,温压炸药的热剂量可达 TNT 的 3.6~4.8 倍,具有较为明显的高温热毁伤优势,在封闭或半封闭空间,可作为主要的毁伤方式之一打击目标。

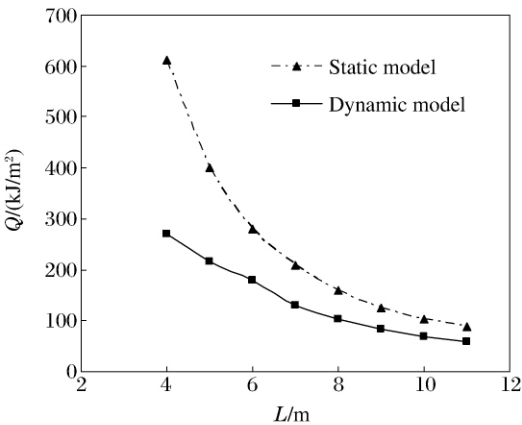


图 3 静态模型与动态模型计算结果对比
Fig. 3 Comparison of results calculated with the static model and dynamic model

参考文献:

- [1] 李秀丽,惠君明,张琳. 光谱法遥感测定温压炸药爆炸温度的研究[J]. 弹道学报, 2008, 20(2): 91-94.
LI Xiu-li, HUI Jun-ming, ZHANG Lin. Explosion temperature measurement of thermobaric explosive by remote sensing spectroscopic method[J]. Journal of Ballistics, 2008, 20(2): 91-94.
- [2] 何志光. FAE 爆炸火球热辐射效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004: 29-37.
- [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 Xue-yong, LI Bin, XIE Li-feng. Study on thermal damage of thermobaric explosive[J]. Chinese Journal of Explosive & Propellants, 2008, 31(1): 16-19.
- [4] Martinsen W E, Marx J D. An improved model for the prediction of radiant heat flux from fireball[C]// Proceedings of CCPS International Conference and Workshop on Modeling Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials. San Francisco, California, 1999: 605-621.
- [5] 张董莉, 刘茂, 王炜, 等. 火球热辐射后果计算动态模型的应用[J]. 安全与环境学报, 2007, 7(4): 132-135.
ZHANG Dong-li, LIU Mao, WANG Wei, et al. On the dynamic model application to the fireball radiation consequence calculation[J]. Journal of Safety and Environment, 2007, 7(4): 132-135.
- [6] Phani K R. LNG fires: A review of experimental results, models and hazard prediction challenges[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 140: 444-464.
- [7] 阚金玲. 液固复合云爆剂的爆炸和毁伤特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008: 43-47.

Application of a dynamic model to thermal damage estimation of thermobaric explosives*

ZHONG Qian, WANG Bo-liang, HUNAG Ju, FANG Ying-ying, HUI Jun-ming
(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: The explosion fireball's descriptive parameters of a thermobaric explosive and TNT were measured by an infrared imager. According to the experiment data, a dynamic model of fireball thermal radiation was studied, and the change of the fireball's size and position was quantitatively described. Based on the dynamic model, the thermal damages of the thermobaric explosive and TNT fireballs were analyzed. The results show that the thermal dose of the thermobaric explosive is 3.6—4.8 times as much as that of TNT, which indicates that the thermobaric explosive has advantages in the thermal damage effect. Compared with a static model, the dynamic model is more reasonable to estimate the thermal effect of explosive-fireball, since it can describe the movement of fireball

Key words: mechanics of explosion; thermal radiation; dynamic model of fireball; thermobaric explosive; static model of fireball

* Received 28 April 2010; Revised 13 October 2010

Corresponding author: WANG Bo-liang, boliangwang@163.com