

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.01.003

爆炸冲击波空中传播特征参量的优化拟合*

杨亚东 李向东 王晓鸣

南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室(江苏南京, 210094)

[摘要] 受测试技术和测试精度影响,空气中传播的爆炸冲击波特征参量的传统经验公式存在一定的差异,文中运用 LS-DYNA 有限元程序,以 TNT 为例,计算了空中爆炸冲击波的传播过程,采用仿真计算和文献数据相结合的方法得到了冲击波超压峰值、到达时间、持续时间和比冲量的改良预测公式;把空气中传播的冲击波分为升压阶段和降压阶段两部分考虑,以冲击波的各特征参数对冲击波的压力时程曲线进行了预测。结果表明,改良预测公式与试验数据较为吻合,且比早期的经验公式更为精确。运用这些新预测公式,可以对空中爆炸的冲击波特征参数和传播特性进行有效地预测。

[关键词] 爆炸力学;冲击波;超压峰值;到达时间;持续时间;比冲量

[分类号] O383+.1

引言

研究空气中的爆炸现象有着极其重要的意义,对其进行规律性的探索能有效地预测这类爆炸引起的破坏效应,可应用于防爆减灾,也能用于开发威力强大的兵器弹药。炸药在空气中的爆炸作为一种常见的爆炸形式很早就引起国内外研究者的重视。Brode^[1]和 Henrych^[2]等对空气中的爆炸现象进行了深入研究,各自提出了超压大小和正压持续时间等的预测经验公式,这些公式至今仍有较高的使用频率。Anderson 等^[3]通过到时传感器和 Hycam 旋转棱镜相机拍摄冲击波传过斑马靶纸时引起靶纸上的影像变形的的方法测试了 Composition B(60:40)炸药爆炸空气中传播时的到达时间。Wu 等^[4]研究了置于地面起爆的爆炸现象,给出了炸药地表爆炸时冲击波的传播形式。林大超等^[5]用解析方法引入超压传递的矢量速度函数,得到超压变化过程的基本方程。杨鑫^[6]和仲倩^[7]等依据试验数据对以往的超压经验公式进行了改进和修正。

由于受到测试技术和精度的影响,较早的预测公式与现代测试技术所测得的试验数据偏差较大。另外,对于爆炸冲击波传播过程中的到达时间和冲击波升压阶段也往往被忽略。本文采用数值仿真的方法对空中爆炸冲击波特征参量进行分析研究,结合近年来的文献数据对冲击波超压、到达时间、升压时间、降压时间和比冲量进行了拟合,提出了适合于空中爆炸冲击波压力时程曲线的计算公式。利用这

些拟合公式,可以进行空中爆炸冲击波特征参量的工程计算,并对指定位置处的冲击波压力时程曲线进行预测。

1 计算模型及材料参数

1.1 有限元模型及算法

有限元模型如图 1 所示,炸药使用 TNT,采用圆柱形装药,长径比接近 1:1。由于模型沿轴截面几何对称,因此以 1/8 模型进行建模,空气和炸药采用 Euler 六面体网格,在轴截面加入对称边界约束,空气顶部和外部柱面施加无反射边界来模拟无限空气域。

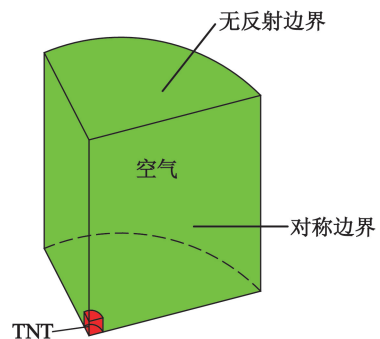


图 1 计算模型示意图

Fig. 1 Configuration of calculation model

1.2 材料模型及参数

TNT 炸药采用 High_Explosive_Burn 材料模型和 JWL 状态方程来描述,状态方程表达式为:

* 收稿日期: 2013-07-08

作者简介: 杨亚东(1979~),男,博士研究生,研究方向为弹药终点效应及目标毁伤技术。E-mail:luxiya_2000_2000@tom.com

通信作者: 李向东(1969~),男,教授,研究方向为弹药终点效应及目标易燃性。E-mail:lixiangd@mail.njust.edu.cn

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}. \quad (1)$$

式中: V 为相对体积; E 是初始内能; A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为常数。参数见表 1。

表 1 TNT 参数

Tab. 1 Parameters of TNT

参数	$\rho /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$A /$ GPa	$B /$ GPa	R_1	R_2	ω
TNT	1600	371.2	3.33	4.15	0.95	0.3

空气介质采用空白材料模型(Mat_Null)和线性多项式(Eos_Liner_Polynomial)状态方程描述。线性多项式状态方程表示单位初始体积内能的线性关系。压力值由下式给定:

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_0. \quad (2)$$

式中: $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$, $C_4 = C_5 = 0.4$; $\mu = \rho / \rho_0 - 1$, ρ / ρ_0 为现在密度与初始密度之比; E_0 为初始内能; 空气密度为 1.293 kg/m^3 。

2 空气中爆炸冲击波特征参数分析

爆炸冲击波在空气中的理想的压力时程曲线如图 2 所示。冲击波在 T_a 时刻到达, 压力在 T_r 的时间间隔内迅速地由 p_0 突跃至波阵面的峰值压力 $p_0 + \Delta p_f$, Δp_f 为超压峰值; 然后在时间 T_d 内, 压力以类似指数形式衰减到环境压力, 又在惯性力的作用下继续下降到负超压峰值, 再经过一定的时间又逐渐地回升到大气压力。由于负相相对于正相显得不那么重要, 且要精确地测量和计算负相特性较为困难, 故忽略负相的作用。

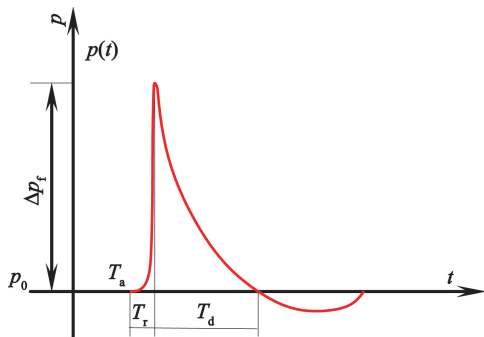


图 2 冲击波在空气中的理想压力时程曲线

Fig. 2 Typical curve of pressure time history in free-air

空气中传播的冲击波有以下几个重要的特征参量: 超压峰值 Δp_f 、到达时间 T_a 、正压持续时间 T_+ (分为升压时间 T_r 和降压时间 T_d)、比冲量 i_+ 、冲击波的压力时程曲线 $p(t)$ 等。这些特征参量通常用

比例距离 Z 来表达, 比例距离定义如下:

$$Z = R/Q^{1/3}. \quad (3)$$

式中: R 为冲击波传播的距离, m; Q 为 TNT 装药量, kg。

2.1 冲击波超压峰值的研究

冲击波的超压峰值遵循爆炸相似规律, 即超压峰值大小主要取决于离爆炸点的距离和装药质量的大小。许多学者对 TNT 爆炸产生的超压峰值提出了自己的拟合公式, 以下对较为常用的经验公式进行叙述。

Sadovskii^[8] 在 1952 年给出的冲击波峰值超压的表达式为 (单位: MPa):

$$\Delta p_f = \begin{cases} \frac{1.07}{Z^3} - 0.10, & Z \leq 1; \\ \frac{0.076}{Z} + \frac{0.255}{Z^2} + \frac{0.650}{Z^3}, & 1 < Z \leq 15. \end{cases} \quad (4)$$

Brode^[1] 于 1955 年引入的超压峰值预测公式为 (单位: MPa):

$$\Delta p_f = \begin{cases} \frac{0.67}{Z^3} + 0.10, & \Delta p_f > 1; \\ \frac{0.0975}{Z} + \frac{0.1455}{Z^2} + \frac{0.5850}{Z^3} - 0.0019, & 0.01 < \Delta p_f < 1. \end{cases} \quad (5)$$

Henrych^[2] 在大量实验的基础上于 1979 年给出以下形式的预测公式 (单位: MPa):

$$\Delta p_f = \begin{cases} \frac{1.407170}{Z} + \frac{0.553970}{Z^2} - \frac{0.035720}{Z^3} + \frac{0.000625}{Z^4}, & 0.05 \leq Z \leq 0.30; \\ \frac{0.61938}{Z} - \frac{0.03262}{Z^2} + \frac{0.21324}{Z^3}, & 0.3 < Z \leq 1; \\ \frac{0.0662}{Z} + \frac{0.4050}{Z^2} + \frac{0.3288}{Z^3}, & 1 < Z \leq 10. \end{cases} \quad (6)$$

Mills^[9] 于 1987 年引入了爆炸冲击波超压峰值的另一种表达式 (单位: MPa):

$$\Delta p_f = \frac{0.108}{Z} - \frac{0.114}{Z^2} + \frac{1.772}{Z^3}; \quad (7)$$

文献[10]延用了 Садовский 的空中爆炸冲击波超压计算公式 (单位: MPa):

$$\Delta p_f = \frac{0.084}{Z} + \frac{0.270}{Z^2} + \frac{0.700}{Z^3}, \quad \begin{cases} \frac{H}{\sqrt[3]{Q}} \geq 0.5, \\ 1 \leq Z \leq 10 \sim 15. \end{cases} \quad (8)$$

式中: H 为装药离地面的高度。

以上这些预测公式都是由早年的实验数据拟合得到的,受到测试技术和测试仪器的限制,所得的预测值和现代设备的测试值都存在较大偏差。本文结合仲倩^[7]和张陶^[11]利用高分辨率、高精度的测压系统测得的TNT空气中的超压峰值试验数据,对超压峰值进行了重新拟合,其拟合形式如下(单位:MPa):

$$\Delta p_f = \frac{0.1677}{Z} - \frac{0.2340}{Z^2} + \frac{2.9640}{Z^3}, 0.5 \leq Z \leq 10.0. \quad (9)$$

图3为冲击波超压峰值的各个预测公式对比关系。从图中可以看出,各个预测公式在爆炸近区的预测值差异较大,这主要是由于爆炸近区的爆轰产物对测试值有着显著的影响,使得各个试验的测试值差异较大;在爆炸远区,爆轰产物的影响减小,各个预测公式的预测值趋于一致;文献[7、11]中两组试验数据的契合度较高,据此数据拟合出的曲线,略高于先前学者的预测公式。

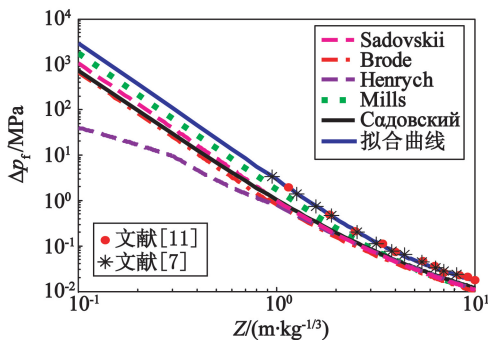


图3 冲击波超压峰值预测公式对比

Fig. 3 Comparison of peak pressure among predicted formulas

图4为冲击波超压峰值仿真结果与本文拟合公式的对比关系。由图可知,仿真结果在爆炸近区与拟合公式偏差较大,在爆炸远区两者较为一致。由此可知,仿真结果的偏差随比例距离的增加而逐渐

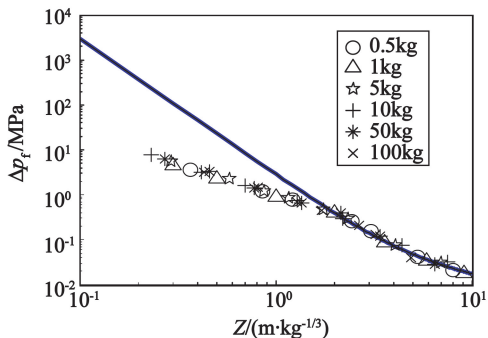


图4 冲击波超压峰值仿真结果与预测公式对比
Fig. 4 Simulated peak pressure compared with predicted formulas

减小。爆炸近区超压的预测工作存在较大的争议,且对于冲击波传播和反射的研究工作来说,近区预测工作的意义不大,因此,只着重关注爆炸远区超压预测工作的正确性。

2.2 冲击波的到达时间

Anderson^[3]、Wu^[4]和Kinney^[12]等对冲击波到达时间进行了相关报告,相对于超压峰值而言,冲击波到达时间的研究论文较少。本文结合仿真计算结果,以比例距离、装药质量和当地声速作为主要影响因素对自由场冲击波传播到达时间进行拟合,其拟合形式为:

$$T_a = 0.1856Z^{1.666}Q^{0.244}/c_a. \quad (10)$$

式中: c_a 为空气中的声速,取340 m/s。

图5为仿真计算得到的TNT冲击波在自由场传播的到达时间。在双对数坐标系下,冲击波的到达时间与比例距离呈线性关系,且在同一比例距离处,装药量越大,到达时间也就越长。

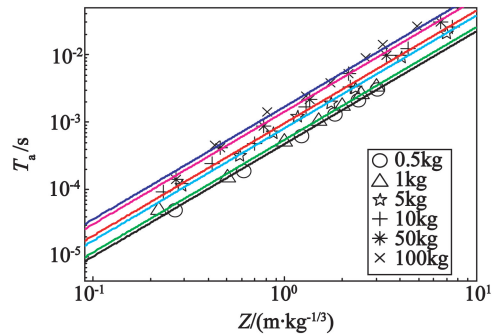


图5 TNT冲击波自由场传播到达时间

Fig. 5 Arrival time of TNT explosion shockwave in air

2.3 冲击波的正压持续时间

空气中冲击波压力从环境压力上升到压力峰值时所经历的时间定义为冲击波的升压时间,升压时间只和比例距离有关。

图6为TNT冲击波自由场传播的升压时间与比例距离的关系。升压时间的具体拟合形式为:

$$T_r = 7.9946 \times 10^{-5} Z^{0.85}. \quad (11)$$

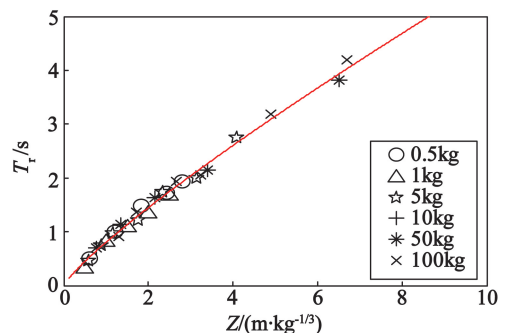


图6 TNT冲击波自由场传播升压时间

Fig. 6 Pressure rise time of TNT explosion shockwave in air

冲击波压力从峰值下降到环境压力时所经历的时间定义为冲击波的降压时间,降压时间与比例距离和装药量有关。

图 7 为 TNT 在自由场中的冲击波降压时间关系曲线,其拟合形式为:

$$T_d = 7.1673 \times 10^{-4} Z^{1.3425} Q^{0.3136} \quad (12)$$

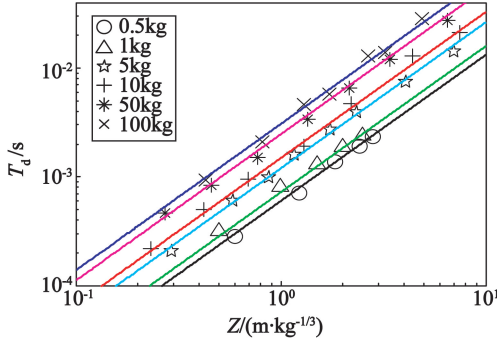


图 7 TNT 冲击波自由场传播降压时间

Fig. 7 Pressure decline time of TNT explosion shockwave in air

由式(11)、(12)知冲击波的正压持续时间为:

$$T_+ = T_r + T_d \quad (13)$$

图 8 为冲击波自由场中传播正压持续时间关系曲线。由图中可以看出在同一比例距离上,装药质量大的冲击波正压持续时间长;由式(11)~(13)计算可得,0.5 kg 装药升压时间在爆炸场近区占整个持续时间的 15.1%,在爆炸场远区降到 7.7%。当装药量上升到 100 kg 时,升压时间在爆炸场近区占整个持续时间的 3.8%,在爆炸场远区降到 1.2%。由此可知,升压时间随着比例距离的增加,在整个持续时间里所占的份额逐渐减小,装药量较小时,升压阶段不容忽视。

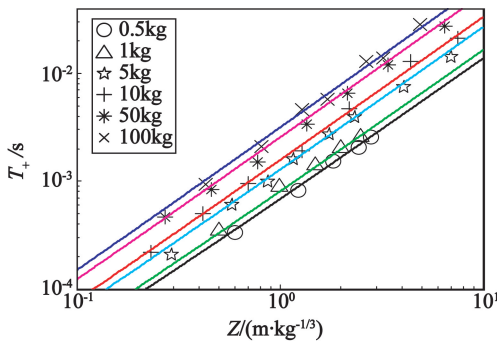


图 8 TNT 冲击波自由场传播正压持续时间

Fig. 8 Duration time of TNT explosion shockwave in air

图 9 为本文计算结果和 Henrych^[2]、Wu^[4]、文献[10]上的预测公式的对比关系图。从图中可以看出,本文预测公式在爆炸近区和 Henrych 的预测公式较为一致,在远区介于 Wu 和文献[10]两者之间,能够较好地爆炸冲击波在空气中的正压持续时间

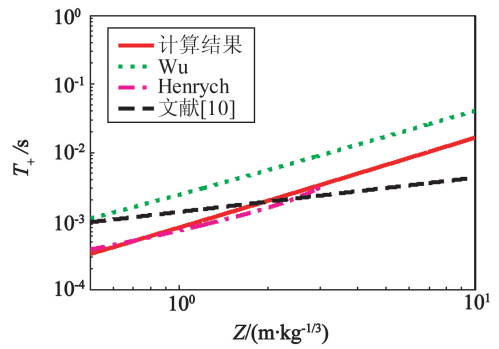


图 9 1kg TNT 爆炸冲击波自由场传播正压持续时间对比

Fig. 9 Comparison of duration time for 1kg TNT explosion in air

进行预测。

2.4 冲击波压力时程曲线

空气中的爆炸冲击波的理想压力时程曲线由升压阶段和降压阶段两个部分组成:升压阶段为一个陡峭曲线,从环境压力上升到压力峰值阶段;降压阶段呈指数形式,从压力峰值衰减到环境压力。升压阶段曲线由如下方程来描述:

$$p(t) = \Delta p_f \left(\frac{t}{T_r} \right) = 1.251 \times 10^4 t \Delta p_f Z^{-0.85}, \quad 0 \leq t \leq T_r \quad (14)$$

以指数形式衰减的降压阶段^[2,13]用如下方程来描述:

$$p(t) = \Delta p_f \left(1 - \frac{t - T_r}{T_d} \right) \exp \left[- \frac{a(t - T_r)}{T_d} \right], \quad T_d \leq t \leq T_r + T_d \quad (15)$$

式中: a 为控制衰减率的常数^[4]。

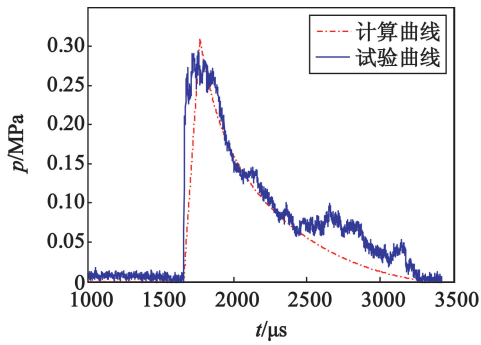
$$a = \begin{cases} 3.02 \Delta p_f^{0.38} + 6.85 \Delta p_f^{0.79} \exp \left(-4.55 \frac{t - T_r}{T_d} \right), & \Delta p_f \leq 1 \text{ MPa}; \\ 1.62 \Delta p_f^{0.30} + 5.13 \Delta p_f^{0.28} \exp \left(-1.05 \Delta p_f^{0.37} \frac{t - T_r}{T_d} \right), & 1 \text{ MPa} \leq \Delta p_f \leq 100 \text{ MPa}_0 \end{cases} \quad (16)$$

联立式(9)~(16),只要给出炸药的装药量和爆心距离 R ,就可以得出 R 处的压力时程曲线。

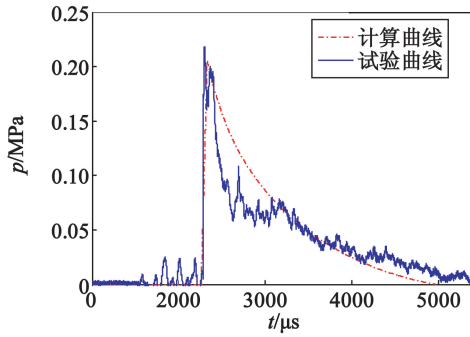
图 10 为冲击波自由场传播压力时程曲线的预测值与试验所测得的曲线的对比图。由图可知,试验测试曲线受到爆气体的振荡作用而没有预测曲线平滑,预测的升压时间略大于试验的升压时间,考虑到试验峰值的振荡过程,两者还是较为接近。另外,试验数据还可能受到测试环境和地面的影响,正压时间可能会略大于预测值。

2.5 冲击波比冲量

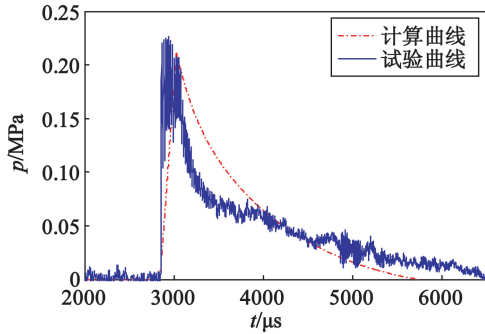
空气冲击波比冲量 i 是冲击波对目标破坏作用



(a)



(b)



(c)

(a) $Q=0.326\text{ kg}, R=1.581\text{ m}$; (b) $Q=0.552\text{ kg}, R=2.236\text{ m}$; (c) $Q=0.998\text{ kg}, R=2.693\text{ m}$

图 10 压力时程曲线预测值与试验对比

Fig. 10 Comparison of pressure time histories between prediction and experiment

的重要参数之一,比冲量的大小直接决定了冲击波破坏作用的程度。由仿真结果得到的空气冲击波比冲量(单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}$)的拟合形式为:

$$\frac{i}{Q^{1/3}} = \begin{cases} 78.89 + \frac{11.21}{Z} + \frac{129.87}{Z^2} - \frac{13.25}{Z^3}, & 0.4 \leq Z \leq 1.3; \\ -0.146 + \frac{206.350}{Z}, & 1.3 \leq Z \leq 5.0. \end{cases} \quad (17)$$

图 11 为比冲量拟合曲线与试验数据的对比。由图 11 可知,在双对数坐标中,冲击波比冲量由非线性段和线性段组成。当 $Z < 1.3\text{ m/kg}^{1/3}$ 时,冲击波比冲量随比例距离增大衰减得快;当 $Z > 1.3\text{ m/kg}^{1/3}$ 时,冲击波比冲量随比例距离增大衰减得

慢。0.326 kg 装药在 1.581 m 处的比冲量略高于拟合曲线,这是由于此处的压力曲线在 2400 μs 处有一个向上的扰动(波形见图 10)。引起这种扰动的原因可能是爆炸场中溅起的泥沙产生的震动,使得波形不太理想;其余两种装药按比例距离换算后的比冲量和拟合曲线较为一致。

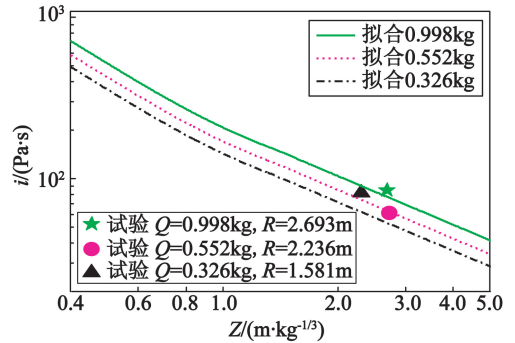


图 11 比冲量拟合曲线与试验对比

Fig. 11 Comparison of impulses between prediction and experiment

图 12 给出了 1 kg TNT 空中爆炸冲击波比冲量的对比关系。由图可以看出,本文计算结果在爆炸场的近区介于 Henrych^[2] 和文献[10]之间,在远区与文献[10]较为接近,且变化趋势相同。从图中还可以看出,本文的预测公式的适用范围比 Henrych 的更广。

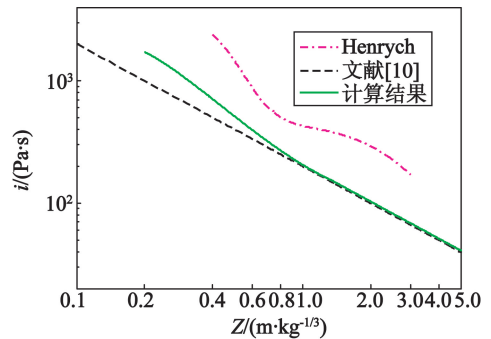


图 12 1kg TNT 爆炸冲击波比冲量对比

Fig. 12 Comparison of impulses for 1kg TNT explosion in air

总的来说,本文的冲击波超压峰值、到达时间、持续时间、压力时程曲线和比冲量的拟合形式与试验结果符合较好,反映了本文的计算方法和拟合方式具有相当的准确性,能够对空中爆炸冲击波特征参量进行预测计算。

3 结论

1) 采用仿真计算和文献数据相结合的方法,以 TNT 为例,对空中爆炸冲击波特征参量进行了研究,得到了冲击波超压峰值、到达时间、持续时间和比冲量的预测公式,通过与试验数据的分析比较,可知预

测值与试验数据较为吻合,整体性能优于早期的经验公式,这些预测公式能够较好地运用于空中爆炸的工程计算。

2)装药量较小时,升压阶段能够占到整个正压持续的 15.1%,所占比例不容忽视;升压阶段与正压持续时间比例会随着装药量和比例距离的增大而减小;把空气中的冲击波时程曲线分为升压阶段和降压阶段两部分考虑,能够更加精确地对冲击波压力时程曲线进行描述。

参 考 文 献

- [1] Brode H L. Blast wave from a spherical charge [J]. *Physics of Fluids*, 1959, 2(2): 217-229.
- [2] Henrych J. The dynamics of explosion and its use [M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979.
- [3] Anderson J G, Katselis G, Caputo C. Analysis of a generic warhead part I: experimental and computational assessment of free field overpressure [R]. Commonwealth of Australia: Weapons Systems Division, 2002.
- [4] Wu Chengqing, Hao Hong. Modeling of simultaneous ground shock and airblast pressure on nearby structures from surface explosions [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(6): 699-717.
- [5] 林大超,白春华,张奇.空气中爆炸时爆炸波的超压函数[J].*爆炸与冲击*, 2001, 21(1): 41-46.
Lin Dachao, Bai Chunhua, Zhang Qi. Overpressure functions of blast waves for explosions in air [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2001, 21(1): 41-46.
- [6] 杨鑫,石少卿,程鹏飞.空气中 TNT 爆炸冲击波超压峰值的预测及数值模拟 [J]. *爆破*, 2008, 25(1): 15-18, 31.
- Yang Xin, Shi Shaoqing, Cheng Pengfei. Forecast and simulation of peak overpressure of TNT explosion shock wave in the air [J]. *Blasting*, 2008, 25(1): 15-18, 31.
- [7] 仲倩,王伯良,黄菊,等. TNT 空中爆炸超压的相似律 [J]. *火炸药学报*, 2010, 33(4): 32-35.
Zhong Qian, Wang Boliang, Huang Ju, et al. Study on the similarity law of TNT explosion overpressure in air [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2010, 33(4): 32-35.
- [8] Sadovskii M A. Mechanical action of air shock waves of explosion, based on experimental data [M]. Moscow: Izd Akad Nauk SSSR, 1952.
- [9] Tolba A F F. Response of FRP-retrofitted reinforced concrete panels to blast loading [D]. Canada: Carleton University, 2001.
- [10] 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.
- [11] 张陶,惠君明,解立峰,等. FAE 爆炸场超压与威力的实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2004, 24(2): 176-181.
Zhang Tao, Hui Junming, Xie Lifeng, et al. Experimental research on the overpressure and power in the FEA blast field [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(2): 176-181.
- [12] Kinney G F, Graham K J. Explosive shocks in air [M]. Berlin: Springer Verlag, 1985.
- [13] Baker W E. Explosions in Air. Part One [M] // *Engineering Design Handbook*. Alexandria: Army Materiel Command, 1974: 1-288.

Optimum Fitting for Characteristic Parameters of Blast Shockwaves Traveling in Air

YANG Yadong, LI Xiangdong, WANG Xiaoming

ZNDY Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] Deviations between conventional empirical formula of the characteristic parameters for TNT explosion shockwave in air are affected by testing technology and precision. The spreading processes of TNT explosion shockwave in air are numerically simulated by the finite element analysis software LS-DYNA, and the improved predicted formula of peak pressure, arrival time, duration time and impulse of explosion shockwave are obtained by using the method of combining simulation calculation with literature data. The TNT explosion shockwave is characterized by taking both pressure rise and decline stage into account, and the pressure time histories are predicted by using the air blast characteristic parameters. The results show that, the improved predicted formula correlate well with experimental results, and the new formulas are more accurate than earlier empirical formulas. The characteristic parameters and propagation characteristics of explosion shockwave in air can be effectively predicted by using those new prediction formulas.

[KEY WORDS] explosion mechanics; shockwave; peak pressure; arrival time; duration time; impulse