DOI: 10.11883/1001-1455(2017)05-0951-06

球形装药动态爆炸冲击波超压场计算模型*

聂 源,蒋建伟,李 梅
(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081)

摘要: 为获得球形装药动态爆炸冲击波超压场计算模型,对静态爆炸冲击波超压 Baker 计算公式加入修正因子进行修正,并建立了构造包含装药运动速度、对比距离和方位角的修正因子函数的方法。为获得修正因子的函数表达式,采用高精度显式欧拉流体动力学软件 SPEED 针对具有典型运动速度的球形装药空中爆炸过程进行了数值模拟,得到了沿装药不同对比距离和方位角处的动态爆炸冲击波超压峰值。在对数值模拟结果处理的基础上,经过数据拟合获得了动态爆炸冲击波超压场计算模型。校验结果表明,该模型能较准确描述动态爆炸冲击波超压分布,具有普适性。

关键词: 冲击波超压;动态爆炸;装药运动速度;超压计算模型
中图分类号: O382.1 **国标学科代码**: 1303520 **文献标志码**: A

爆炸冲击波超压是衡量弹药战斗部爆炸威力的重要指标之一,由于装药随载体运动爆炸产生的冲击波超压测试较复杂,目前主要以地面静爆实验为主[1]。动态与静态爆炸冲击波场存在明显差异[1],静爆实验无法准确测量战斗部的实际威力,因此研究装药在动态爆炸条件下冲击波超压场及其计算模型非常必要。

目前,关于静态爆炸的冲击波超压计算模型较多,如根据爆炸相似律建立的 Henrych 公式[2]、Baker 公式[3]和 Sadovskyi 公式[4]等,而动态爆炸的超压计算模型却不多。在文献[5]中,根据能量相似原理,将炸药随载体运动的动能等效为附加装药量,并与实际装药量累加后代入静爆超压计算模型,该模型获得的冲击波超压值与方位角 θ(运动方向为 $\theta=0$)无关;张光莹等[1]对具有典型运动速度的装药在正向($\theta=0$)和反向($\theta=\pi$)处的冲击波超压峰值进行了数值计算,得到动态爆炸冲击波超压峰值具有方向性,但并未得出其计算模型。

本文中,在对数值模拟结果数据分析的基础上,通过建立装药运动速度、方位角和对比距离的修正因子,得到基于静态条件冲击波超压 Baker 计算模型的球形装药动态爆炸冲击波超压场计算模型,并采用数值模拟方法对不同尺寸的球形装药动态爆炸冲击波超压进行验证,试图表明该模型具有普适性。

1 模型建立

图 1 为具有运动速度 v 的球形装药在空中动态爆炸示意图,图中:M 为球形装药的装药量,kg;v 为装药运动速度,m/s;θ 为方位角,即爆心连线与装药运动方向的夹角,rad;R 为距爆心的距离,m;A 点为爆炸场中距爆心 R、θ 处任取的一点,则 A 点的对比距离 $Z=R/\sqrt[3]{M}$,m/kg$^{1/3}$。

记 Δp_0 为静态爆炸条件下(装药运动速度 $v=0$ 时),A 点的冲击波超压,MPa;$\Delta p_{v,Z,\theta}$ 为动态爆炸条件下(装药运动速度 $v\neq0$ 时),A 点的冲击波超压,MPa。

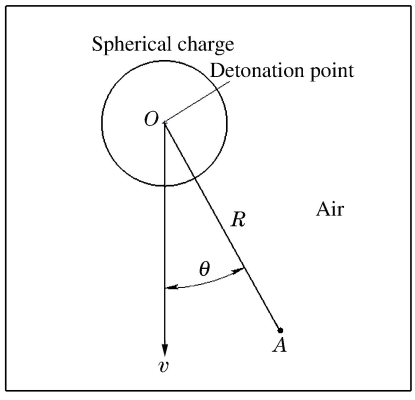

图 1 球形装药空中动态爆炸物理模型

Fig. 1 Physical model of spherical charge blasting in air

* **收稿日期**: 2016-01-29; **修回日期**: 2016-06-12
第一作者: 聂 源(1992—),男,博士研究生; **通信作者**: 蒋建伟,bitjjw@bit.edu.cn。

定义修正因子 δ 为动态爆炸冲击波超压相对静态爆炸冲击波超压的增量，即：

$$\delta=\frac{\Delta p_{v,Z,\theta}-\Delta p_0}{\Delta p_0} \tag{1}$$

用修正因子 δ 计算动态爆炸过程 A 点处的冲击波超压峰值 $\Delta p_{v,Z,\theta}$，变换式(1)得：

$$\Delta p_{v,Z,\theta}=(1+\delta)\Delta p_0 \tag{2}$$

静态爆炸冲击波超压 Δp_0 采用 Baker 公式进行计算[3]：

$$\Delta p_0=\begin{cases}\dfrac{2.006}{Z}+\dfrac{0.194}{Z^2}-\dfrac{0.004}{Z^3} & 0.05<Z<0.5\\ \dfrac{0.067}{Z}+\dfrac{0.301}{Z^2}+\dfrac{0.431}{Z^3} & 0.5<Z<70.9\end{cases} \tag{3}$$

修正因子 δ 是与装药运动速度 v、方位角 θ 和对比距离 Z 等 3 个因子有关的量，即 $\delta=f(v,Z,\theta)$，假设 3 个因子 v、Z 和 θ 相互独立[6]，则 δ 可表示为：

$$\delta=f(v)f(Z)f(\theta) \tag{4}$$

$f(v)$为在特定的方位角 θ^* 和对比距离 Z^* 处(θ^* 和 Z^* 均为任取)、不同装药运动速度 v 时的 δ 值，也就是：

$$f(v)=\delta_{v,Z^*,\theta^*} \tag{5}$$

$f(Z)$ 为在特定方位角 θ^*，取一系列装药运动速度 v 时、不同对比距离 Z 处的 δ 值与 $Z=Z^*$ 时 δ 值之比，也就是：

$$f(Z)=\frac{\delta_v,Z,\theta^*}{\delta_{v,Z^*,\theta^*}} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{v}=[v_1,v_2,\cdots,v_n]$，$v_1$、$v_2$、…、$v_n$为不同的装药运动速度。

$f(\theta)$为取一系列装药运动速度 v 和对比距离 Z 时，不同方位角 θ 处的 δ 值与 $\theta=\theta^*$ 时的 δ 值的比值，也就是：

$$f(\theta)=\frac{\delta_{v,\boldsymbol{Z},\theta}}{\delta_{v,\boldsymbol{Z},\theta^*}} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{Z}=[Z_1,Z_2,\cdots,Z_n]$，$Z_1$、$Z_2$、…、$Z_n$为不同的对比距离。

以上为基于 Baker 公式的动态爆炸冲击波超压场计算模型的建立方法。该计算模型得到的动态爆炸冲击波超压，可以作为入射超压用于计算反射超压，并且同样适用于不同炸药类型、装药形状的修正模型。

2 修正因子的获取

式(5)～(7)为构造修正因子函数的方法。为获得具体表达式，采用数值模拟方法对具有不同运动速度的标准球形装药在空气中动态爆炸进行数值模拟分析，根据式(5)～(7)采用数据拟合方法得到修正因子的函数表达式。

数值模拟采用高精度显式欧拉流体动力学软件 SPEED(shock physical explicit eulerian dynamic)，图 2 为 1 kg 的 TNT 球形装药在空气中动态爆炸的二维轴对称数值模型，其中装药运动速度 $\boldsymbol{v}=[400,800,1\,200,1\,600]$ m/s。

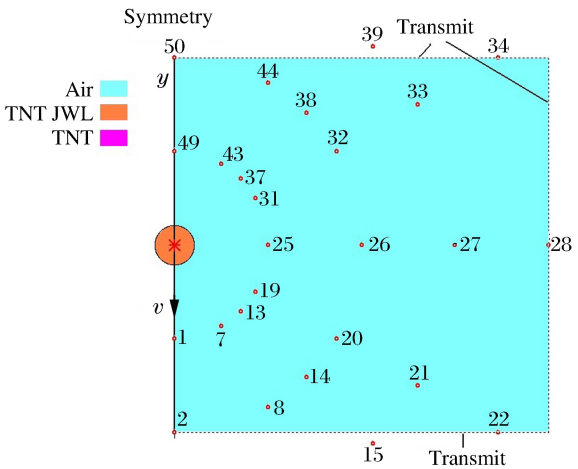

图 2 数值模拟模型

Fig. 2 Numerical simulation model

利用 SPEED 的自适应网格技术[7]，并设置空气域边界条件为透射边界。当冲击波到达边界网格时，边界单元内材料的速度达到一定范围，触发网格按一定放大系数向四周扩张[7]，以确保爆轰产物在欧拉区域内。

沿装药典型方位角 $\boldsymbol{\theta}=[0,\pi/6,\pi/4,\pi/3,\pi/2,2\pi/3,3\pi/4,5\pi/6,\pi]$ 和 $\boldsymbol{Z}=[0.25,0.5,0.75,1,2,3,4,5,6]$ m/kg$^{1/3}$ 处设置了观测点。

TNT 炸药采用 JWL 状态方程，其一般压力形式[8]为：

$$p=A\left(1-\frac{\omega}{R_1\bar{V}}\right)\mathrm{e}^{-R_1\bar{V}}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2\bar{V}}\right)\mathrm{e}^{-R_2\bar{V}}+\frac{\omega E}{\bar{V}} \tag{8}$$

式中：E 为单位初始体积的内能，$E=\rho_0 e$；$\bar{V}$ 为相对比容，$\bar{V}=V/V_0=\rho_0/\rho$；$A$、$B$、$R_1$、$R_2$、$\omega$ 为由实验确定的常数。

TNT 炸药的 JWL 状态方程参数分别为：$\rho_0=1.63$ g/cm^3，$A=373.8$ GPa，$B=3.747$ GPa，$R_1=4.15$，$R_2=0.90$，$\omega=0.35$，$E_0=6.00$ GPa。

空气采用理想气体状态方程[6]：

$$p=(\gamma-1)\rho e \tag{9}$$

式中：p 为气体压力；γ 为多方气体指数，$\gamma=1.4$；ρ 为密度；e 为内能，$e=206.8$ J/g。

对上述工况进行计算，图 3 为典型工况在典型时刻的压力云图。从图 3 可见，动态爆炸冲击波超压场与静态爆炸的不同，动态爆炸冲击波超压随方位角的增大而减小。

提取各工况中各观测点的超压曲线，根据式(1)、(5)、(6)和(7)进行数据处理。为便于分析，取 $\theta^*=0$ 和 $Z^*=1.5$ m/kg$^{1/3}$，并对参量做归一化处理。

图 4 为根据式(5)计算得到的 $f(v)$ 及其拟合曲线。从图 4 可见，$f(v)$ 与装药运动速度 v 呈现线性关系，经最小二乘法拟合得到：

$$f(v)=0.53v/c_0 \tag{10}$$

式中：c_0 为声速，取 340 m/s。

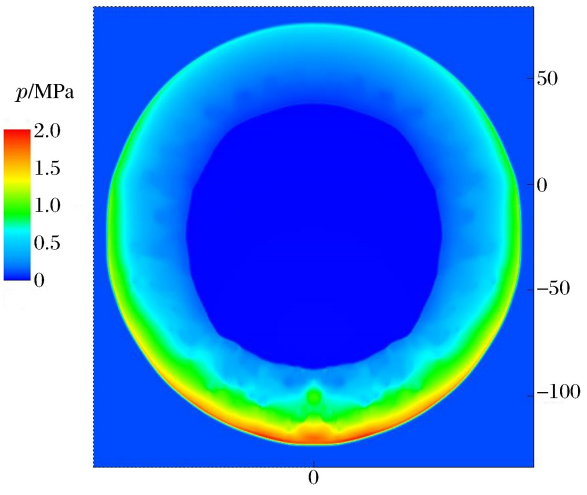

图 3　$v=1\,200$ m/s 的装药爆炸后 500 μs 时的压力云图

Fig. 3　Overpressure contour of initiated charge with $v=1\,200$ m/s in 500 μs

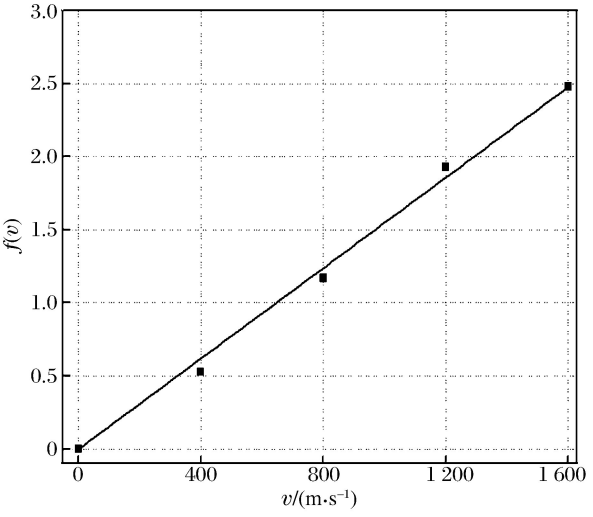

图 4　$f(v)$ 值及拟合曲线

Fig. 4　Values of $f(v)$ and fitted curve

图 5 为根据式(6)计算得到的不同 v 时的 $f(Z)$ 曲线和平均值及拟合曲线。从图 5(a)可知，不同 v 时的 $f(Z)$ 曲线形状相似，随 Z 的增大均呈现先增长后递减最终趋于零的规律，且在 $Z=1$ m/kg$^{1/3}$ 处，$f(Z)$ 达到极大值。取不同 v 时 $f(Z)$ 曲线的平均值，得到图 5(b)，经分段拟合得到：

$$f(Z)=\begin{cases}1.32Z & Z<1\\ \dfrac{1}{0.27+0.48Z} & Z\geqslant 1\end{cases} \tag{11}$$

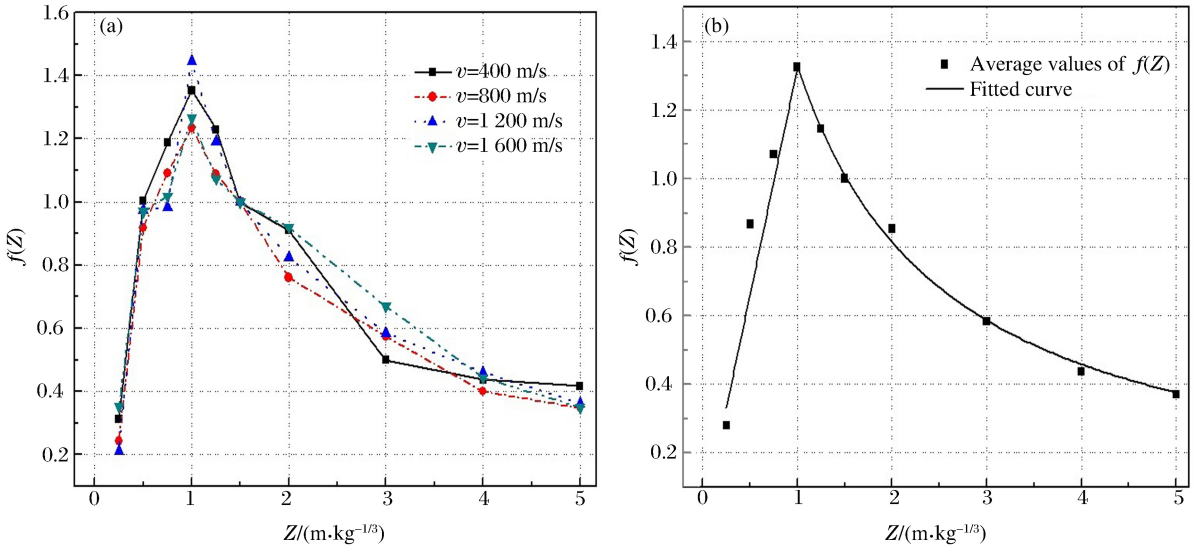

图 5 不同 v 时的 $f(Z)$曲线和平均值及拟合曲线

Fig. 5 Calculated curve of $f(Z)$ in different v and their average value and fitted curve

图 6 为根据式(7)计算得到的不同 v 和 Z 时的 $f(\theta)$曲线和平均值及拟合曲线。从图 6(a)可见,不同 v 和 Z 时的 $f(\theta)$曲线形状相似,$f(\theta)$均随 θ 的增大而非线性减小。取不同 v 和 Z 时 $f(\theta)$曲线的平均值,得到图 6(b),经拟合得到 $f(\theta)$与 θ 符合三角函数的变化趋势:

$$f(\theta)=0.32+0.80\sin\left(\frac{\theta+2.42}{3.58}\pi\right) \tag{12}$$

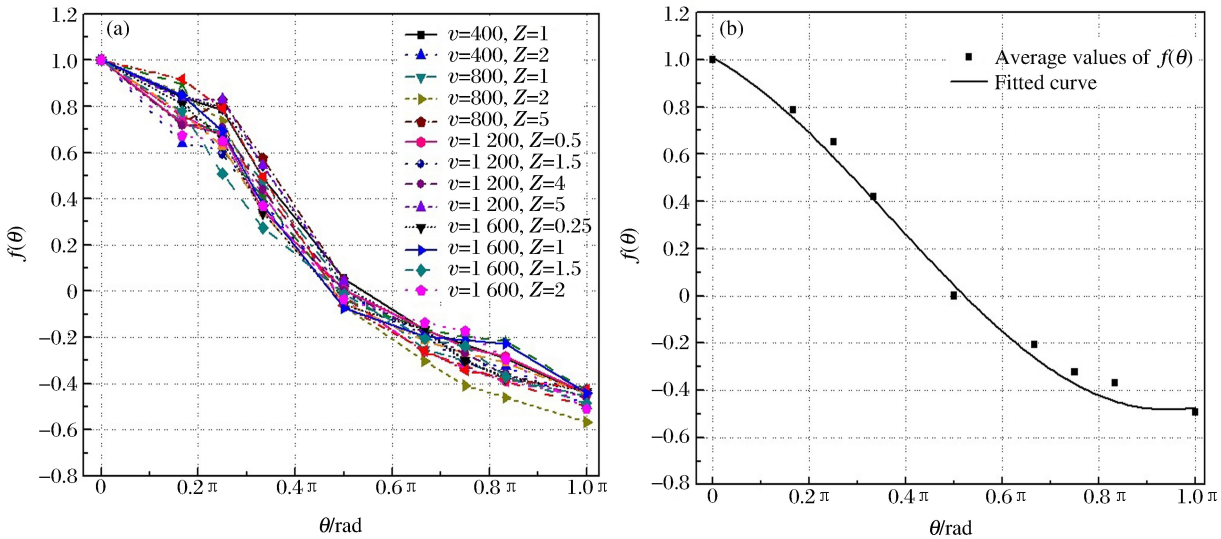

图 6 不同 v 和 Z 时的 $f(\theta)$曲线和平均值及拟合曲线

Fig. 6 Curve of $f(\theta)$ in different v and Z, and their average value and fitted curve

综上,得到了考虑动态爆炸条件下冲击波超压修正因子 δ 的计算公式(4)、(10)、(11)和(12),将该系数应用于式(2),则得到基于 Baker 公式的动态爆炸冲击波超压场计算模型:

$$\Delta p_{v,Z,\theta}=\begin{cases}\left\{1+(0.53Ma)(1.32Z)\left[0.32+0.80\sin\left(\dfrac{\theta+2.42}{3.58}\pi\right)\right]\right\}\times \\ \qquad\left(\dfrac{2.006}{Z}+\dfrac{0.194}{Z^2}-\dfrac{0.004}{Z^3}\right) & 0.05<Z<0.5 \\ \left\{1+(0.53Ma)(1.32Z)\left[0.32+0.80\sin\left(\dfrac{\theta+2.42}{3.58}\pi\right)\right]\right\}\times \\ \qquad\left(\dfrac{0.067}{Z}+\dfrac{0.301}{Z^2}+\dfrac{0.431}{Z^3}\right) & 0.5\leqslant Z<1 \\ \left\{1+(0.53Ma)\left(\dfrac{1}{0.27+0.48Z}\right)\left[0.32+0.80\sin\left(\dfrac{\theta+2.42}{3.58}\pi\right)\right]\right\}\times \\ \qquad\left(\dfrac{0.067}{Z}+\dfrac{0.301}{Z^2}+\dfrac{0.431}{Z^3}\right) & 1\leqslant Z\leqslant 70.9\end{cases} \tag{13}$$

3　模型校验

式(13)是以典型药量为参考得到的动态爆炸冲击波超压场计算模型，为检验该模型能否计算不同药量的动态爆炸冲击波超压，同样采用 SPEED 软件建立两种工况(工况 1，M=15 kg，v=900 m/s，工况 2，M=230 kg，v=300 m/s)的空中动态爆炸模型，经数值模拟得到典型方位角和对比距离处的动态爆炸冲击波超压峰值。

图 7 为在工况 1、2 条件下，数值模拟和计算模型式(13)得到的在不同方位角和对比距离处的动态爆炸冲击波超压峰值对比图。从图中可见，该修正因子修正后的动态爆炸冲击波超压与数值模拟结果基本吻合，所以该计算模型能正确反映动态爆炸冲击波超压特性，具有普适性。

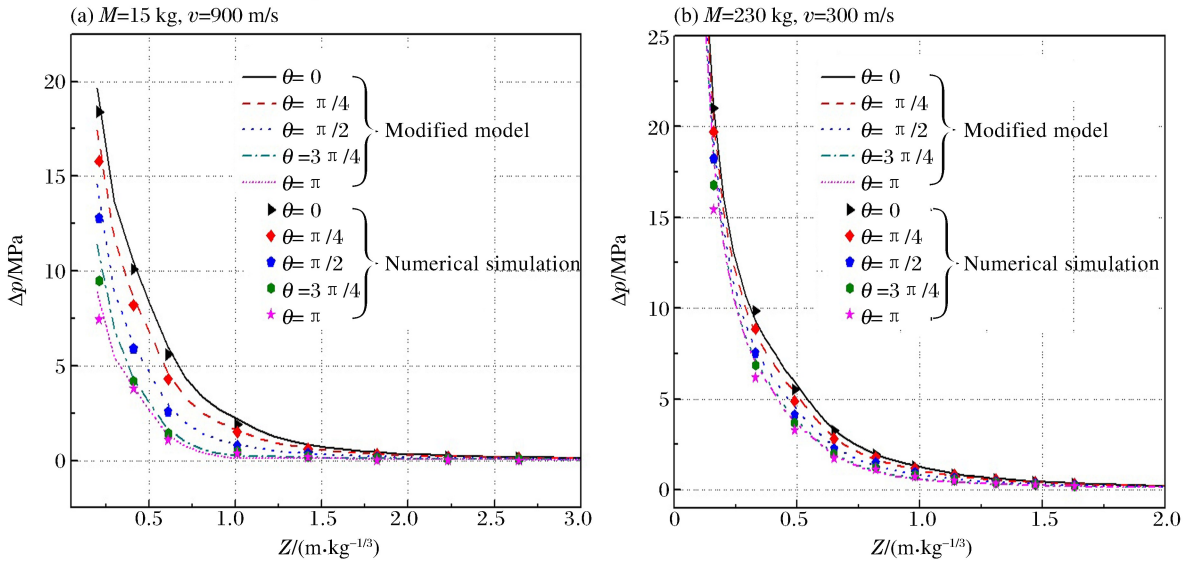

图 7　数值模拟和计算模型的计算结果对比

Fig. 7　Comparison of numerical simulation results with calculation model result

4　结　论

(1)引入包含装药运动速度 v、对比距离 Z 和方位角 θ 的修正因子，对 Baker 公式进行修正，并建立了构造修正因子函数的方法，得到球形装药动态爆炸冲击波超压场计算模型，即式(2)、(4)～(7)。

(2)基于数值模拟结果的数据处理，得到了球形装药动态爆炸冲击波超压场计算模型表达式(13)。对该模型的校验结果表明，计算模型能准确计算不同药量、不同装药运动速度的球形装药动态爆炸冲击波超压，具有普适性。

参考文献:

[1] 张光莹,周旭,黄咏政,等.动爆冲击波特性分析方法研究[C]//第四届全国计算爆炸力学会议论文集.2008:282-287.

[2] Henrych J, Abrahamson G R. The dynamics of explosion and its use[M]. New York: Elsevier Scientific Pub Co, 1979:218.

[3] Baker W E. Explosions in air[M]. Austin: University of Texas Press, 1974:6-10.

[4] Sadovskyi M A. Mechanical action of air shock waves of explosion, based on experimental data[M]. Moscow: Izd Akad Nauk SSSR, 1952:1-2.

[5] 北京工业学院八系.爆炸及其作用[M].北京:工业出版社,1978.

[6] Izadifard R A, Foroutan M. Blastwave parameters assessment at different altitude using numerical simulation[J]. Turkish Journal of Engineering & Enviromental Sciences, 2010,34(1):25-41.

[7] NUMERICS GmbH. SPPED user's Manual[Z]. 2012.

[8] Lee E, Finger M, Collins W. JWL equation of state coeffients for high explosives: UCID-16189[R]. 1973.

Overpressure calculation model of sphere charge blasting with moving velocity

Nie Yuan, Jiang Jianwei, Li Mei

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology*, *Beijing Institute of Technology*, *Beijing* 100081, *China*)

Abstract: In order to establish a calculation model for the dynamic blast overpressure field, a correction factor was introduced into the Baker formula, a model for calculating the peak overpressure only in a static blast. The method to obtain the correction factor containing the moving velocity, the azimuth and the scaled distance was established. For getting the function of the correction factor, spherical charge models with the typical moving velocity were established using the shock physical explicit Eulerian dynamic (SPEED) to simulate the dynamic blast process in the air. The peak overpressure in the typical azimuth and scaled distance was obtained. Based on the numerical results, a new calculation model was constructed using the data fitted. The result of the numerical simulation indicates that the corrected formula is a universal calculation model, capable of predicting the peak overpressure in dynamic blast.

Keywords: shockwave overpressure; dynamic blast; moving velocity; overpressure calculation model

(责任编辑 丁 峰)