DOI: 10.11883/bzycj-2016-0340 文章编号: 1001-1455(2018)04-0735-08

考虑环境温、湿度的球形装药爆炸冲击波参数计算模型*

聂 源,蒋建伟,门建兵
(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: 为获得实际温、湿度环境中冲击波参数计算模型,计算了考虑温、湿度的理想气体状态方程参数,利用 SPEED 软件,针对典型状态空气中球形装药爆炸过程进行数值模拟,得到了温、湿度对爆炸冲击波参数的影响规律。结果表明,温度和相对湿度对冲击波超压的影响较小,而正压作用时间和冲量随温度和相对湿度的升高均呈线性递减关系,在高温高湿和寒冷干燥条件下,冲击波正压作用时间和冲量相差分别达 21.8% 和 18.4%。以经典工程计算模型为基础,通过引入含有温度、湿度和对比距离的修正因子,建立了考虑环境温、湿度的球形装药爆炸冲击波参数的计算模型。采用该模型计算得到的不同药量球形 TNT 爆炸冲击波参数与数值仿真结果吻合较好,可对装药在实际环境中威力评估提供参考。

关键词: 温度;相对湿度;冲击波参数;计算模型
中图分类号: O382.1 **国标学科代码:** 1303520 **文献标志码:** A

爆炸冲击波是弹药毁伤目标的主要毁伤元之一,冲击波超压峰值、正压作用时间和冲量是衡量弹药威力的主要指标。近几十年来,学者们通过开展爆炸相似理论、数值模拟以及大量试验研究建立了爆炸冲击波参数的工程计算模型,如 Henrych 公式[1]、Baker 公式[2]、Sadovskyi 公式[3]和 Izadifard 公式[4]等均能较好预测标准气象条件的冲击波参数。随着弹药实战环境向复杂、恶劣天气条件以及全气候、全天时使用发展,需获得诸如严寒干燥和高温高湿等真实环境中的威力效应。另外,不同环境条件中,空气密度和内能等参数也不同,势必导致爆炸冲击波参数的变化,因此,迫切需要开展考虑环境温度、湿度条件的爆炸冲击波参数研究。

目前有关不同温、湿度条件下冲击波参数的研究并不多见,两因素综合影响的系统研究尤其缺乏。顾垒等[5]和王琦等[6]分析认为,温度越高,波速越大,因此温度是影响爆炸冲击波参数的重要外界环境因素,但这些研究仅限于定性分析,未得到其影响规律。

本文中,采用数值模拟方法建立不同温度、相对湿度空气中爆炸冲击波仿真模型,在对大量工况进行数值模拟结果的基础上,分析温、湿度对爆炸冲击波参数的影响规律;然后,以 Izadifard 公式等工程计算模型为基础,通过引入含有温、湿度等因素的修正因子,建立不同温、湿度环境中球形装药爆炸冲击波参数的计算模型;最后,采用该模型计算不同药量球形 TNT 的爆炸冲击波参数,并将其与数值仿真结果进行对比,以验证工程计算模型的可靠性,以期为实际环境中装药爆炸威力评估提供参考。

1 模型建立方法

采用文献[7]中的方法,在标况下(p=101.325 kPa,T=20 ℃,H=0)球形装药爆炸冲击波参数的工程计算模型中加入包含温度和相对湿度的修正因子,以此获得考虑环境温、湿度的爆炸冲击波参数工程计算模型。假设在海平面附近,忽略密度、温度、含湿量的微小不均匀性,认为空气是均匀理想气体,并对球形装药在不同温、湿度环境中爆炸的物理模型相关参数如下:M 为装药量,kg;R 为距离爆心的

* **收稿日期:** 2016-11-05; **修回日期:** 2017-03-28
基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(11502020)
第一作者: 聂 源(1992—),男,博士研究生; **通信作者:** 蒋建伟,bitjjw@bit.edu.cn。

距离，m；Z 为对比距离，$Z=R/M^{1/3}$，$\mathrm{m/kg^{1/3}}$；T 为空气或大气的温度，℃；H 为空气相对湿度；p 为大气压强，kPa；Δp 为爆炸冲击波的超压峰值，MPa；τ 为正压作用时间，ms；I 为冲击波冲量，Pa·s。

采用 Φ_k 表示爆炸冲击波参数，下标 k 可取 1、2、3，分别表示关于冲击波超压峰值、正压作用时间、冲量的函数。设 $(\Phi_k)_0$ 为标准条件空气中爆炸冲击波参数，$(\Phi_k)_{T,H,Z}$ 考虑温、湿度的爆炸冲击波参数，并定义修正因子 δ_k 为考虑温、湿度的冲击波参数 $(\Phi_k)_{T,H,Z}$ 相对标况下冲击波参数 $(\Phi_k)_0$ 的增量，即：

$$\delta_k=[(\Phi_k)_{T,H,Z}-(\Phi_k)_0]/(\Phi_k)_0 \tag{1}$$

变换式(1)得：

$$(\Phi_k)_{T,H,Z}=(1+\delta_k)(\Phi_k)_0 \tag{2}$$

修正因子 δ_k 与温度、相对湿度和对比距离有关，假设这 3 个因素相互独立，则：

$$\delta_k=f_k(T,H,Z)=f_k(T)f_k(H)f_k(Z) \tag{3}$$

式中：$f_k(T)$ 为冲击波参数的温度修正项，表示在特定的大气相对湿度 H^* 中和特定的对比距离 Z^* 处（H^* 和 Z^* 均为任取），爆炸冲击波参数的增量 δ_k 随温度 T 的函数，即：

$$f_k(T)=(\delta_k)_{T,H^*,Z^*} \tag{4}$$

$f_k(H)$ 为冲击波参数的相对湿度修正项，定义为在特定对比距离 Z^* 处，温度取一系列不同值时，相对湿度为 H 时增量与 $H=H^*$ 时增量之比的函数，即：

$$f_k(H)=\frac{(\delta_k)_{\boldsymbol{T},H,Z^*}}{(\delta_k)_{\boldsymbol{T},H^*,Z^*}} \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{T}=[T_1,T_2,\cdots,T_n]$，其中 T_1、T_2、…、T_n 为不同温度。

$f_k(Z)$ 为冲击波参数的对比距离修正项，定义为温度和相对湿度取一系列不同值时，对比距离为 Z 时增量与 $Z=Z^*$ 时增量比值的函数，即：

$$f_k(Z)=\frac{(\delta_k)_{\boldsymbol{T},\boldsymbol{H},Z}}{(\delta_k)_{\boldsymbol{T},\boldsymbol{H},Z^*}} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{H}=[H_1,H_2,\cdots,H_n]$，其中 H_1、H_2、…、H_n 为不同相对湿度。

2 修正因子的获取

随着数值模拟技术的发展，非线性动力学软件具有成熟的计算方法和准确的材料模型研究爆炸冲击波的传播过程，数值模拟得到的结果与试验结果吻合较好[8-9]。因此，本文中对装药在典型相对湿度和温度环境中的爆炸过程进行数值模拟，得到不同温、湿度条件下冲击波超压峰值、正压作用时间和冲量，进一步分析获得不同温、湿度环境中爆炸冲击波参数的计算模型。

2.1 数值模拟方法

采用高精度冲击物理显式欧拉动力学软件 SPEED 模拟海平面（$p=101.325$ kPa）上装药在不同温、湿度环境中的爆炸过程。TNT 球形装药在空气中爆炸的二维欧拉轴对称仿真模型如图 1 所示，其中空气域填充不同温度和相对湿度的空气，对称轴边界满足反射边界条件，其余边界满足透射边界条件，在不同距离 R 处设置观测点，以获得压力-时间曲线。通过对网格尺寸的敏感性分析可知，当初始网格尺寸取为 0.3 mm 时，满足计算精度和计算效率的需求。在软件中设置自适应网格，当冲击波到达边界网格时，触发网格按一定放大系数向四周扩张[10]，以确保爆轰产物在欧拉区域内。

空气采用理想气体状态方程[4]进行描述：

$$p=(\gamma-1)\rho e \tag{7}$$

在标准大气压（$p=101.325$ kPa）下，考虑温度和相对湿度的空气理想气体状态方程参数计算方法参见文献[11-12]。

饱和蒸汽压 p_s：

$$\ln p_s=5.321-(3.147-2.959\times10^{-3}x+4.191\times10^{-4}x^2-1.830\times10^{-7}x^3+8.244\times10^{-8}x^4)\frac{643-T}{T} \tag{8}$$

式中：$x=(T-453)/10$。

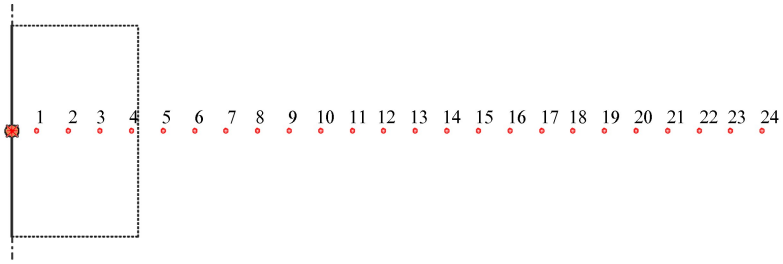


图 1 数值仿真模型

Fig. 1 Numerical simulation model

水汽分压 p_V：

$$p_V = Hp_s \tag{9}$$

比湿 q：

$$q = 622\frac{p_V}{p_0 - 0.378p_V} \tag{10}$$

定容比热容 c_{Vm}：

$$c_{Vm} = c_{pm} - R_m \tag{11}$$

$$c_{pm} = (1-q)c_{pd} + qc_{pv} \tag{12}$$

$$R_m = 287.1(1+0.608q) \tag{13}$$

式中：c_{pm}为定压比热容；c_{pd}和 c_{pv}分别为空气和水蒸气的定压比热容，可通过查气体物理性质表得到；R_m 为比气体常数。

绝热指数 γ：

$$\gamma = c_{pm}/c_{Vm} \tag{14}$$

空气密度 ρ：

$$\rho = p/(R_m T) \tag{15}$$

空气初始内能 e：

$$e = c_{Vm}(T+273.15) \tag{16}$$

根据式(8)～(16)计算可得典型温度和相对湿度条件下的理想气体状态方程参数如表 1 所示。

表 1 典型温度和相对湿度的空气参数

Table 1 Parameters of ideal gas equation of state for air at typical temperature and relative humidity

T/℃	H/%	ρ/(kg·m^{-3})	γ	c_{Vm}/(J·kg^{-1})	e/(J·g^{-1})
−40	0	1.514	1.399 266	719.070 0	167.651 2
−20	0	1.394	1.399 266	719.070 0	182.032 6
0	0	1.292	1.399 266	719.070 0	196.414 0
20	0	1.204	1.399 266	719.070 0	210.795 4
	100	1.193	1.397 167	729.296 2	213.793 2
40	0	1.127	1.399 266	719.070 0	225.176 8
	100	1.096	1.392 724	751.939 9	235.470 0

仿真模型中 TNT 炸药的爆轰产物采用 JWL 状态方程，其一般压力形式[13]：

$$p_e = A\left(1-\frac{\omega}{R_1 v}\right)e^{-R_1 v} + B\left(1-\frac{\omega}{R_2 v}\right)e^{-R_2 v} + \frac{\omega E}{v} \tag{17}$$

式中：p_e 为爆轰产物的压力；E 为炸药体积内能；v 为相对比容；A、B、R_1、R_2、ω 为常数，由试验方法确定。表 2 给出了 TNT 炸药的 JWL 状态方程参数。

表 2 TNT 炸药 JWL 状态方程参数[13]

Table 2 Parameters of JWL equation of state for TNT explosive[13]

$\rho_0/(\mathrm{g\cdot cm^{-3}})$	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa
1.67	373.8	3.747	4.15	0.90	0.35	6.00

2.2 结果与分析

采用上述数值模拟方法，选择三阶计算精度，分别对 1 kg TNT 球形装药在温度范围－50～50 ℃、相对湿度范围(0～100)%空气中的爆炸过程进行数值模拟。

图 2～3 分别给出了典型对比距离($Z^*=1.5\ \mathrm{m/kg^{1/3}}$)处不同相对湿度时超压峰值 Δp 随温度的变化曲线和不同温度时超压峰值 Δp 随相对湿度的变化曲线。由图 2～3 可知：随着温度和相对湿度的增大，超压峰值均基本保持不变，高温高湿($T=50$ ℃，$H=100\%$)和寒冷干燥($T=-50$ ℃，$H=0$)条件下的超压峰值仅相差 2.91%。

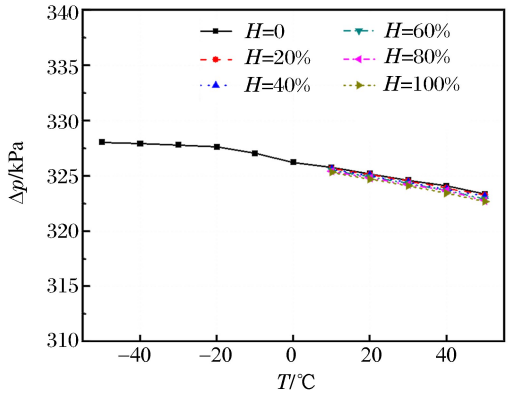


图 2 Δp-T 曲线

Fig. 2 Δp-T curves

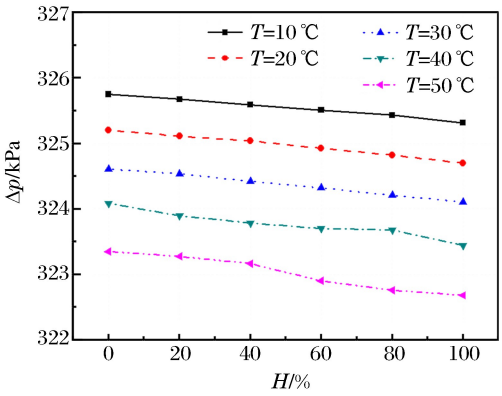


图 3 Δp-H 曲线

Fig. 3 Δp-H curves

由爆炸冲击波的冲击绝热线推导出爆炸冲击波峰值压力 p_m：

$$p_\mathrm{m}=\frac{2}{\gamma+1}\rho(D^2-c^2) \tag{18}$$

式中：D 为冲击波波速，c 为空气中声速。由表 1 中结果可知，γ 在不同温度和相对湿度时基本不变。将声速 $c=(\gamma RT)^{1/2}$ 和式(13)、式(15)代入式(18)可得：

$$p_\mathrm{m}=\frac{2}{\gamma+1}\frac{p_0}{287.1(1+0.608q)T}(D^2-\gamma RT) \tag{19}$$

当气压恒定，随着温度和相对湿度的增大，空气的密度减小，导致爆炸冲击波在空气介质中的传播特性改变。由于冲击波波速 D^2 与温度 T 成正比，因此 p_m 仅与相对湿度 H 有关。由式(19)可知，当相对湿度 H 从零增大到 100%时，比湿 q 从 10^{-5} 增大到 10^{-1} 量级，冲击波超压峰值减小量不超过 10%。

图 4～5 分别给出了 $Z^*=1.5\ \mathrm{m/kg^{1/3}}$ 处，不同相对湿度时的 τ-T 曲线和不同温度时的 τ-H 曲线。由图 4～5 可知，随着温度和相对湿度的增大，正压作用时间呈线性递减关系，但是相对湿度对正压作用时间的影响程度不及温度的影响程度。当相对湿度 $H=0$ 时，$T=50$ ℃和 $T=-50$ ℃条件下正压作用时间比 $T=20$ ℃下分别减小 4.8%和增大 13.8%。当温度 $T=50$ ℃时，相对湿度 $H=100\%$条件下正压作用时间比 $H=0$ 时减小 1.9%。这是由于当温度升高，相对湿度增大，空气密度减小，其可压缩性增强，冲击波在传播时能量耗散速度加快[14]，同时冲击波波阵面后稀疏波的传播速度增大，导致在相同对比距离处正压作用时间减小。

综合温度和相对湿度来看，高温高湿和寒冷干燥条件下的正压作用时间相差可达 21.8%。

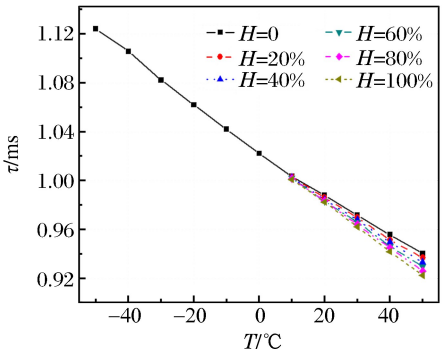


图 4　τ-T 曲线

Fig. 4　τ-T curves

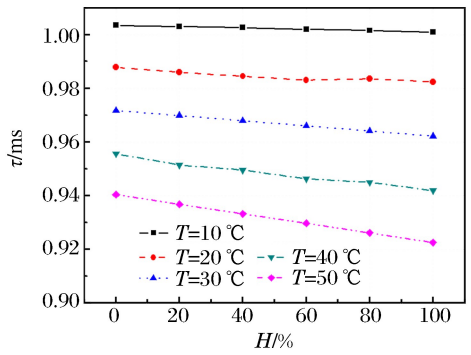


图 5　τ-H 曲线

Fig. 5　τ-H curves

图 6 和图 7 分别为 $Z^*=1.5\ \mathrm{m/kg^{1/3}}$ 处，不同相对湿度时 I-T 曲线和不同温度时的 I-H 曲线。由图 6～7 可见，温度和相对湿度对冲量的影响与正压作用时间相同，即冲量随温度和相对湿度的增大呈线性递减关系。高温高湿和寒冷干燥时的冲量比标准条件下的冲量分别减小 8.53%和增大 7.76%，极端条件下的冲量相差可达 18.4%。

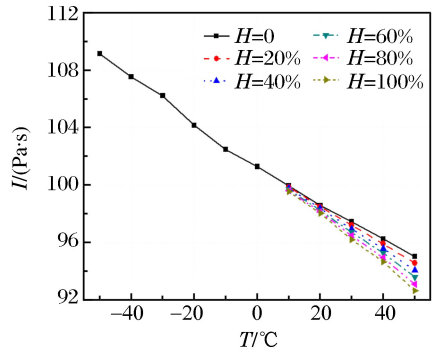


图 6　I-T 曲线

Fig. 6　I-T curves

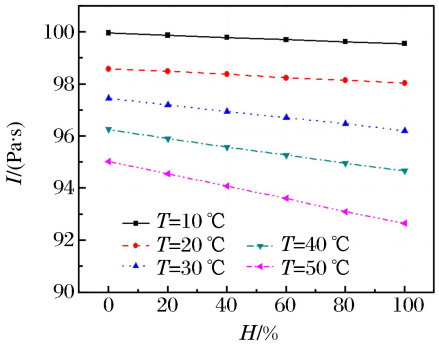


图 7　I-H 曲线

Fig. 7　I-H curves

2.3　修正因子及模型

由于温度和相对湿度对冲击波超压峰值的影响较小，可不做修正，仅对正压作用时间和冲量进行修正。取 $Z^*=1.5\ \mathrm{m/kg^{1/3}}$ 和 $H^*=0$，对上述数值模拟结果根据式(4)～(6)处理，分别得到正压作用时间的温度、相对湿度和对比距离修正项曲线，分别见图 8～10，经拟合得到：

$$f_2(T)=-0.001\,91T+0.038\,2 \tag{20}$$

$$f_2(H)=\begin{cases}1 & T<20\ ℃\\ 0.004\,7H+1 & T\geqslant 20\ ℃\end{cases} \tag{21}$$

$$f_2(Z)=1 \tag{22}$$

将式(20)～(22)和 Izadifard 公式代入式(2)，得到不同温、湿度空气中冲击波正压作用时间 τ：

$$\frac{\tau}{M^{1/3}}=\begin{cases}[1+f_2(T)f_2(H)](4.64Z^2-3.86Z+0.854) & 0.50\leqslant Z_r<0.82,T\geqslant 20\ ℃\\ [1+f_2(T)f_2(H)](-2.97X^3+6.27X^2+0.358X+0.763) & 0.82\leqslant Z_r<2.5,T\geqslant 20\ ℃\\ [1+f_2(T)f_2(H)](0.608X^3-2.38X^2+5.62X-0.22) & Z_r\geqslant 2.5,T\geqslant 20\ ℃\\ [1+f_2(T)](4.64Z^2-3.86Z+0.854) & 0.50\leqslant Z_r<0.82,T<20\ ℃\\ [1+f_2(T)](-2.97X^3+6.27X^2+0.358X+0.763) & 0.82\leqslant Z_r<2.5,T<20\ ℃\\ [1+f_2(T)](0.608X^3-2.38X^2+5.62X-0.22) & Z_r\geqslant 2.5,T<20\ ℃\end{cases} \tag{23}$$

式中：Z_r 为无量纲化的对比距离，$Z_r=Z/(\mathrm{MPa\cdot m^{-1/3}})$；$X=\lg Z_r$。

图 11～13 分别为冲量的温度、相对湿度和对比距离修正项函数曲线，拟合得到：

$$f_3(T)=-0.001\,468T+0.029\,36 \tag{24}$$

$$f_3(H)=\begin{cases}1 & T<20\ ℃\\ 0.007\,12H+1 & T\geqslant 20\ ℃\end{cases} \tag{25}$$

$$f_3(Z)=1 \tag{26}$$

将修正项式(24)～(26)和 Izadifard 公式代入式(2)，得到不同温、湿度大气条件下冲击波冲量 I 的计算模型：

$$\lg\left[\frac{I}{M^{1/3}f_3(T)}\right]=\begin{cases}-3.423X^4-10.143X^3-7.558X^2-1.614X+2.14 & Z_r<0.8,T<20\ ℃\\ -0.070X^2-0.853X+2.153 & Z_r\geqslant 0.8,T<20\ ℃\\ -3.423X^4-10.143X^3-7.558X^2-1.614X+2.14 & Z_r<0.8,T\geqslant 20\ ℃\\ -0.070X^2-0.853X+2.153 & Z_r\geqslant 0.8,T\geqslant 20\ ℃\end{cases} \tag{27}$$

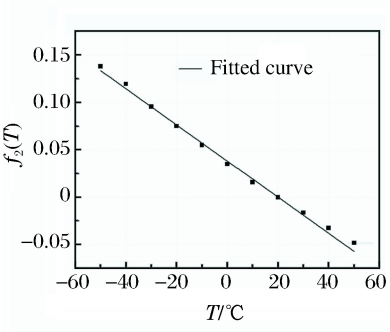


图 8 $f_2(T)$-T 曲线

Fig. 8 $f_2(T)$-T curves

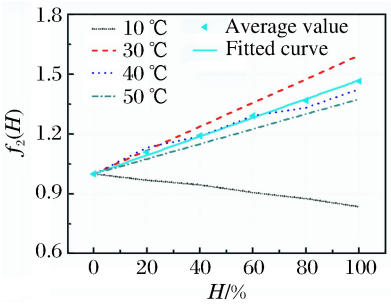


图 9 $f_2(H)$-H 曲线

Fig. 9 $f_2(H)$-H curves

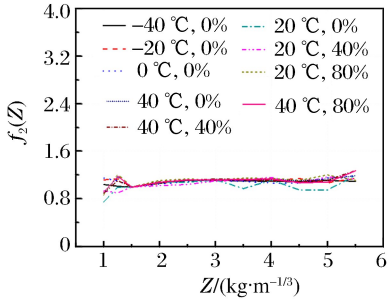


图 10 $f_2(Z)$-Z 曲线

Fig. 10 $f_2(Z)$-Z curves

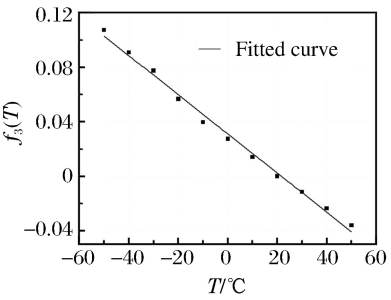


图 11 $f_3(T)$-T 曲线

Fig. 11 $f_3(T)$-T curves

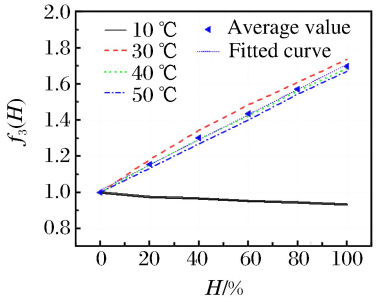


图 12 $f_3(H)$-H 曲线

Fig. 12 $f_3(H)$-H curves

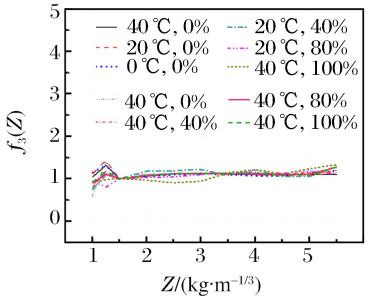


图 13 $f_3(Z)$-Z 曲线

Fig. 13 $f_3(Z)$-Z curves

3 模型校验

为检验该计算模型对不同药量的适用性，采用 SPEED 软件和本文中考虑温、湿度的理想气体状态方程参数，对 M=15 kg 和 M=230 kg 的 TNT 装药分别在 T=50 ℃，H=80%和 T=−40 ℃，H=0%的条件下进行计算，得到爆炸冲击波参数。

图 14 为计算模型式(23)与数值模拟所得正压作用时间的比较。由图 14 可知，针对不同药量，计算模型与数值模拟结果吻合较好。

图 15 为计算模型式(27)与数值模拟所得冲量的比较。从图 15 中可以看出，式(27)得到的冲量在 Z<1 m/kg$^{1/3}$范围内误差较大(小于 7%)，但是，当 Z>1 m/kg$^{1/3}$时，计算模型与数值模拟结果吻合较好。由此可知，该模型能用于不同药量炸药在温、湿度环境中的冲击波参数预测，具有普适性。

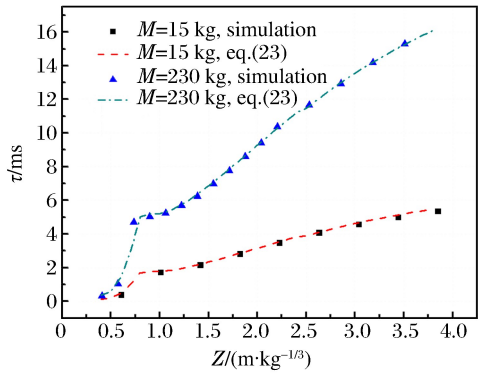


图 14　计算模型与数值模拟得到的正压作用时间对比

Fig. 14　Comparison between numerical simulation and calculation results of τ

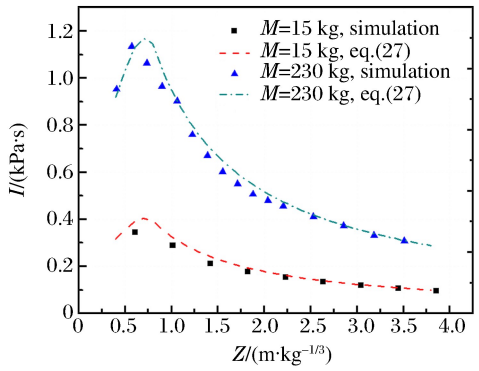


图 15　计算模型与数值模拟得到的冲量对比

Fig. 15　Comparison between numerical simulation and calculation results of I

4　结　论

（1）获得了考虑温、湿度的理想气体状态方程参数，为实际气体的数值模拟提供了准确的参数。

（2）得到了温度和相对湿度对爆炸冲击波参数的影响规律。冲击波超压峰值受温度和相对湿度的影响较小，而正压作用时间和冲量随温度和相对湿度的升高均呈线性递减关系。其中，高温高湿和严寒干燥条件下的正压作用时间比标准条件下的正压作用时间分别减小 6.6％和增大 13.8％，冲量分别减小 8.53％和增大 7.76％；极端条件下的正压作用时间相差 21.8％，冲量相差 18.4％。

（3）以 Izadifard 公式为基础，采用数据拟合得到含有温、湿度和对比距离的修正因子，建立了不同温、湿度环境中球形装药爆炸冲击波正压作用时间和冲量的计算模型。经不同药量 TNT 炸药的计算模型结果与数值仿真结果对比，验证了该模型的普适性，可以为评估不同药量装药在实际环境中的威力指标提供参考。

参考文献：

[1]　HENRYCH J，ABRAHAMSON G R. The dynamics of explosion and its use[M]. New York：Elsevier Scientific Publishing，1979.

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

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

[4]　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.

[5]　顾垒，向文飞. 爆炸空气冲击波超压影响因素分析及控制[J]. 爆破，2002，19(2)：15-17.
GU Lei，XIANG Wenfei. Analyses on influential factors about airblast overpressure and its control[J]. Blasting，2002，19(2)：15-17.

[6]　王琦，石全，史宪铭，等. 基于均匀实验设计的温压战斗部爆炸冲击波毁伤仿真研究[J]. 军械工程学院学报，2011，23(3)：31-37.
WANG Qi，SHI Quan，SHI Xianming，et al. Research on damage model of thermo-baric warhead to underground objects based on the uniform design[J]. Journal of Ordnance Engneering College，2011，23(3)：31-37.

[7]　聂源，蒋建伟，李梅. 球形装药动态爆炸冲击波超压场计算模型[J]. 爆炸与冲击，2017，37(5)：951-956.
NIE Yuan，JIANG Jianwei，LI Mei. Overpressure calculation model of sphere charge blasting with moving velocity [J]. Explosion and Shock Waves，2017，37(5)：951-956.

[8]　侯俊亮，蒋建伟，门建兵，等. 不同形状装药爆炸冲击波场及对靶板作用效应的数值模拟[J]. 北京理工大学学报，2013，33(6)：556-561.

HOU Junliang, JIANG Jianwei, MEN Jianbing, et al. Numerical simulation on blast wave field and deformation of thin plate under different-shape charge loading[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013,33(6): 556-561.

[9] 李加贵,边小华,张雷.爆炸冲击波传播的数值模拟与试验数据对比[J].山西建筑,2006,32(8):106-107.
LI Jiagui, BIAN Xiaohua, ZHANG Lei. Numerical simulation of blast wave propagation in tunnel compared with experiment data[J]. Shanxi Architecture, 2006,32(8):106-107.

[10] NUMERICS GmbH. SPPED user's manual[M/OL]. 2012[2016-08-07]. http://www.alpha-numerics.de/.

[11] HOBGOOD J S. Introduction to atmospheric thermodynamics[M]. Cambridge: Cambridge Univercity Press, 2002,84(47):520-520.

[12] 陈创买,郭英琼.气象常用参数和物理量查算表[M].北京:气象出版社,1980.

[13] LEE E L, FINGER M, COLLINS W. JWL equation of state coeffients for high explosives: UCID-16189[R]. CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1973.

[14] 张社荣,孔源,王高辉.水下和空中爆炸冲击波传播特性对比分析[J].振动与冲击,2014,33(13):148-153.
ZHANG Sherong, KONG Yuan, WANG Gaohui. Comparative analysis on propagation characteristics of shock wave induced by underwater and air explosions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014,33(13):148-153.

Calculation models for parameters of spherical charge blasting shock wave considering ambient temperature and humidity

NIE Yuan, JIANG Jianwei, MEN Jianbing

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

Abstract: In this study we firstly calculated the parameters of equation of state (EOS) for ideal gas considering temperature and relative humidity to obtain the calculation models for parameters of the blasting shock wave in ambient temperature and humidity. Then, we established the spherical charge model using the SPEED software to simulate the blasting processes in typical air conditions. The results show that the temperature and relative humidity have little influence on the shock wave overpressure, and that both the positive phase duration and the impulse, which are 21.8% and 18.4% smaller in high temperature and humidity than those in the cold and dry air, respectively, decrease linearly with the increase of the temperature and relative humidity. Furthermore, based on classical engineering calculation models, we established the calculation models for the shock wave parameters in spherical charge blasting considering ambient temperature and humidity by introducing correction factors such as temperature, relative humidity and scaled distance. From these models we obtained the blasting shock wave parameters with different doses of spherical TNT. The parameters were found quite consistent with those from numerical simulation, thereby suggesting that the calculation models can serve as reference for power assessment in real environments.

Keywords: temperature; relative humidity; shock wave parameters; calculation models

(责任编辑 王玉锋)