

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.06.002

爆炸冲击波作用于便携式防爆墙的绕射规律*

邵先锋^① 赵捍东^① 朱福林^② 吕晓明^③ 吴凡达^①

①中北大学机电工程学院(山西太原,030051)

②四川航天电子设备研究所(四川成都,611900)

③中国人民解放军军械研究所(河北石家庄,050000)

[摘要] 为研究爆炸冲击波作用于便携式防爆墙的绕射规律,利用 LS/DYNA 软件,采用欧拉耦合的方法,分析了 TNT 药量不同爆距相同、TNT 药量相同爆距不同以及 TNT 药量相同墙厚不同的条件下墙体对环流超压的影响规律,且拟合出了不同 TNT 药量时墙后超压峰值公式,并通过防爆墙墙前、墙后超压值与已知试验值对比,验证了计算模型的正确性。结果表明:环流超压峰值随着 TNT 药量的增加而增加,随着墙体厚度的增加而减少,且其超压峰值出现在墙后约 2 倍墙高位置处;当爆距大于 2.4 m 时,环流超压的峰值先递增、后递减,最大环流超压发生在约 2 倍墙高位置;当爆距小于 2.4 m 时,最大环流超压向墙体移动,距离墙体后面 1.0 m 左右。验证了其绕射规律与已知研究结果的一致性。

[关键词] 便携式防爆墙;爆炸冲击波;环流超压;绕射规律;数值模拟

[分类号] O383

Diffraction Laws of Explosion Shock Waves Acting on Portable Explosion-proof Walls

SHAO Xianfeng^①, ZHAO Handong^①, ZHU Fulin^②, LÜ Xiaoming^③, WU Fanda^①

① School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

② Sichuan Aerospace Electronic Equipment Research Institute (Sichuan Chengdu, 611900)

③ Ordnance Research Institute of PLA (Hebei Shijiazhuang, 050000)

[ABSTRACT] In order to study the diffraction laws of blast shock waves acting on portable flexible explosive-proof walls, LS/DYNA software was used with the Euler coupling algorithm to analyze effect of the portable explosive-proof wall on diffracted overpressure under conditions of different charge in the same distance, same charge in different distance and same charge in different wall thickness. Simulation with different TNT charges established the formula to calculate peak overpressure near the back wall, and the validity of the calculation model was verified by comparing the reflection overpressure at the front wall and diffraction overpressure at the back wall with experimental data. Results show that the diffraction peak overpressure is positively correlated with the charge, and is negatively correlated with explosion-proof wall thickness; the peak overpressure location is away from the back wall by about 2 times the height of the wall. When explosion distance is more than 2.4 meters, the diffraction peak overpressure at the back wall increases initially, reach to the maximum value at the distance of about 2 times the height of the wall and then decreases. When explosion distance is less than 2.4 meters, the peak overpressure at the back wall appears at a position about 1 meter away from the wall. The diffraction law is coincident with the experimental results.

[KEYWORDS] explosion-proof walls; shock waves; diffracted overpressure; diffraction laws; numerical simulation

引言

防爆墙是防护爆炸空气冲击波的一种重要设

施。钢筋混凝土防爆墙具有抵抗力强、防护效果好等优点,但此类墙体位置固定、建设周期较长。采用钢筋网、土工布、砂土组合的在车载条件下较易移动的便携式防爆墙质量轻、移动快速、部署灵活,且具

* 收稿日期:2017-07-23

作者简介:邵先锋(1990-),男,硕士研究生,主要从事弹药毁伤技术研究。E-mail:641808227@qq.com

通信作者:赵捍东(1960-),男,教授,主要从事弹药毁伤技术研究。E-mail:hd_zhao@nuc.edu.cn

有倾覆性,特别适合于野战环境下快速搭建防御工事,有效防护小当量爆炸物的冲击破坏。因便于移动安装,便携式防爆墙在民用领域的应用和研究也较广泛。严东晋等^[1]对建筑物外设置的防爆墙进行了分类,分析了不同类型的防爆墙在不同环境下防护性能的优越性;刘飞等^[2]分析认为装配式防爆墙是建筑物防护恐怖爆炸袭击的重要措施之一;为防护汽车炸弹对重要建筑物恐怖袭击,伍俊等^[3]设计了一种装配式防爆墙结构,可将其爆炸载荷降低为原来的五分之一;苏倩倩^[4]采用数值模拟的方法分析得出,在网壳建筑物周围快速设置防爆墙可以有效地减轻爆炸冲击对结构造成的损伤。

目前,国内外对爆炸冲击波作用于刚性墙的绕射规律研究较多,而对爆炸冲击波作用于以砂土作填充物的柔性墙的墙后流场变化研究较少。Scherbatiuk等^[5]通过建立数值仿真模型,验证了填充砂土的防护墙所受冲击荷载的位移-时间响应曲线;张艳明等^[6]对地面弹药堆垛设置隔爆墙进行了试验研究,通过观察防爆墙迎爆面和整体结构的破坏程度确定了其防护性能;张志刚等^[7]介绍了便携式防爆墙的性能和实用价值,并提出了研究新型便携式防爆墙墙后冲击波超压分布和防爆墙的抗弹性能的必要性。蒋志刚等^[8]分析了土工防爆墙的倾覆稳定性,并推出了土工防爆墙在爆炸冲击波作用下的临界倾覆值。

本文中,在保证墙体未倾倒(倾角小于 15°)条件下,采用小当量TNT,利用LS/DYNA软件对爆炸冲击波作用于便携式防护墙墙后绕射规律的变化进行数值模拟和分析。

1 空中爆炸的有限元模型

1.1 材料模型^[9-11]

有限元模型由炸药、空气、钢筋网、土壤、土工布等构成。

1) 炸药。

TNT炸药采用High_Explosive_Burn材料模型及JWL状态方程描述,方程为

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

式中: p 为爆炸压力; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为常数; V 为相对体积; E 为初始内能。TNT炸药的参数取值见文献^[9]。

2) 空气。

空气采用Mat_Null材料模型以及Eos_Linear_Polynomial状态方程,其表达式为

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

式中: $m = \rho/\rho_0 - 1$; $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$; $C_4 = C_5 = 0.4$; $\rho_0 = 0.001\ 29\ \text{g/cm}^3$ 。

3) 钢筋网。

钢筋网采用半径为2 mm的Beam161梁单元,计算模型使用Johnson-Cook。在纵、横梁的交叉点处做焊接处理,且钢筋网与土工布选用自动接触。材料选Q235钢,其参数取值同文献^[9],失效应变取0.8,等效Von-Mises应力 σ 为:

$$\sigma = (A + B \varepsilon_p^n) \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_{p0}} \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (3)$$

式中: ε_p^n 为有效塑性应变; $\dot{\varepsilon}_p/\dot{\varepsilon}_{p0}$ 为无量纲应变率; T_m 为材料熔点; T_0 为参考温度; A 为屈服应力; B 为应变硬化常数; C 为应变率硬化系数; n 为应变硬化系数; m 为温度软化系数。

4) 土壤。

土壤的材料模型为Mat_Soil_And_Foam,参数取值同文献^[10]。

5) 土工布。

土工布采用2 mm厚的T-Shell 163壳单元,材料模型为Mat_Elastic。钢筋网与土工布选用自动接触,土壤和土工布之间添加面面接触,材料参数 $\rho = 0.4\ \text{g/cm}^3$, $E = 0.027\ \text{GPa}$, $\mu = 0.35$ 。

1.2 冲击波超压计算公式

使用Hengrych提出的爆炸空气冲击波峰值超压计算公式^[12-13],由于爆炸时地面要吸收一部分能量,因此,计算时取1.8倍的TNT装药量(W)进行计算:

$$\Delta p_m = \frac{1.407\ 2}{\bar{R}} + \frac{0.554}{\bar{R}^2} - \frac{0.035\ 7}{\bar{R}^3} + \frac{0.000\ 625}{\bar{R}^4}, \quad 0.05 \leq \bar{R} \leq 0.30; \quad (4)$$

$$\Delta p_m = \frac{0.619\ 4}{\bar{R}} - \frac{0.033}{\bar{R}^2} - \frac{0.213}{\bar{R}^3}, \quad 0.3 < \bar{R} \leq 1.0; \quad (5)$$

$$\Delta p_m = \frac{0.066}{\bar{R}} + \frac{0.405}{\bar{R}^2} + \frac{0.329}{\bar{R}^3}, \quad 1 < \bar{R} \leq 10. \quad (6)$$

式中: $\bar{R} = R/\sqrt[3]{W}$,为比例距离, $\text{m/kg}^{\frac{1}{3}}$; Δp_m 为冲击波的峰值超压,MPa。

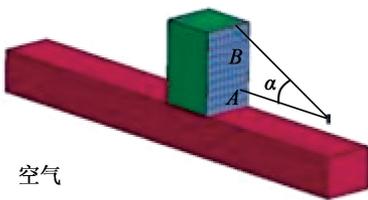
1.3 有限元模型

由于模型具有对称性,为提高计算速率,采用四分之一建模。取TNT炸药当量 $W = 2.0$ 、 2.4 、 3.0 、

4.0 kg 和 5.0 kg, 使用立方体装药, 四分之一模型位于空气域的一端, 离地面距离为 0.6 m。空气域大小 3 m × 3 m × 10 m, 墙体厚度 $T = 1$ m, 高度 $h = 2.1$ m。模型如图 1 所示。土壤单元与土工布单元之间共节点。钢筋网选 LS/DYNA 中的梁单元; 土工布使用薄壳单元, 根据经验, 大小为 1 cm; 土壤使用 Solid164 实体单元, 且都使用 Lagrange 方法建模; 空气和炸药采用 Solid164 实体单元和欧拉 (Euler) 网格建模, 单元尺寸分别为 2.0 cm 和 1.5 cm。同时, 使用多物质 ALE 算法, 通过 Constrained Lagrange_In_Solid 的约束条件, 使 Lagrange 单元和 Euler 单元之间实现流固耦合, 从而模拟爆炸冲击波对防护结构的影响^[14]。在冲击波的压力作用下, 防爆墙相对地面有滑移趋势, 因此, 在两者接触面间采用滑移接触。为了消除爆轰波在空气域边界处的反射带来的影响, 在其非对称边界面上添加 Non-Reflecting-Boundary 非反射边界模拟无限域。单位采用 cm-g- μ s 制。



(a) 试验布置



(b) 计算模型

图 1 试验和计算模型

Fig. 1 Experimental and computational model

2 计算模型的验证

2.1 网格大小的影响

为验证网格大小对计算模型的正确性, 取 W (TNT) = 3 kg, 在不同网格大小和比例距离条件下对近地面爆炸情况进行数值计算, 并与李冀琪公式^[15]、Hengrych 公式^[13]、国防工程设计经验公式^[16]等进行对比分析, 其较大比例距离处自由场冲击波超压的计算结果如图 2 所示。

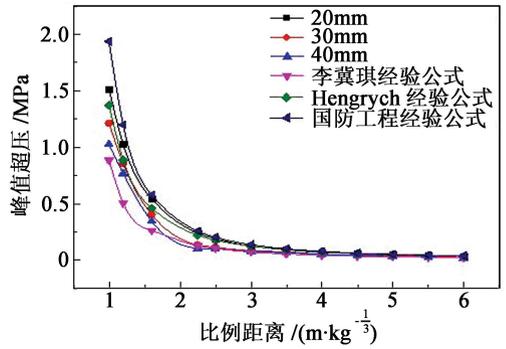


图 2 网格大小对计算值的影响

Fig. 2 Effect of element size on numerical simulation results

由图 2 可以看出, 距离爆炸中心越近, 偏差越大, 但随着比例距离的增加, 仿真数据与 Hengrych 经验公式计算的结果之间的误差最小, 且网格尺寸为 20 mm 时, 精确度最高。本文中, 取网格大小为 20 mm, 以 Hengrych 经验公式为标准进行计算。

2.2 墙前、墙后超压值的验证

参考文献[17], 取图 1(b) 中墙前 A、B 处反射超压平均值, 以及墙后 1 m 处环流超压值验证计算模型的正确性。取墙后 1 m 处环流超压值, 是因为冲击波的传播距离越大, 仿真计算误差越小, 其计算模型的精确越低。

表 1、表 2 是 W (TNT) = 0.8 kg, 爆距为 2、3 m 和 4 m 时, 反射超压和环流超压的仿真值与试验值, 其最大误差在 10% 以内, 能够验证本次计算模型的正确性。

表 1 反射超压

Tab. 1 Reflection overpressure

爆距/m	仿真值/MPa	试验值/MPa	误差/%
2	0.519 6	0.521 4	3.5
3	0.164 8	0.174 5	5.6
4	0.148 6	0.154 6	3.9

表 2 环流超压

Tab. 2 Diffraction overpressure

爆距/m	仿真值/MPa	试验值/MPa	误差/%
2	0.019	0.021	9.5
3	0.012	0.011	10.0
4	0.011	0.010	10.0

3 冲击波绕射规律的分析

3.1 不同爆距时环流超压的变化规律

取 TNT 的有效炸药量 $W = 0.8$ kg, 爆距 R 为 2.0、2.3、2.4、2.5、3.0 m 和 4.0 m 时, 分析墙后 6

个测力点的环流超压的变化情况,从而获得墙后环流超压的变化规律,测力点距墙1 m,间隔为1 m,如图3所示。

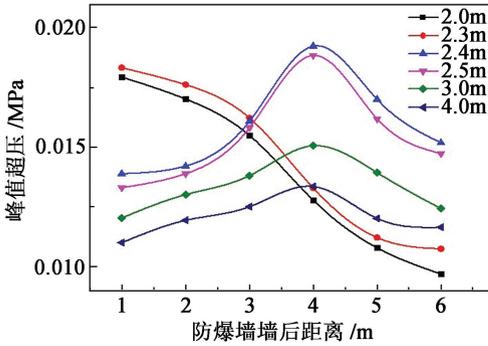


图3 不同爆距时环流超压峰值的分布规律

Fig. 3 Distribution of diffraction peak overpressure at the back wall at different explosion distances

从图3可以看出,当有效装药量 $W(\text{TNT}) = 0.8 \text{ kg}$,爆距 $R = 2.4 \text{ m}$,即 $\alpha = 32^\circ$ 时,环流超压在墙后约4 m处达到最大值。当 $\alpha < 32^\circ$,即 $R > 2.4 \text{ m}$,环流超压呈近似的正态分布,先逐渐增大再逐渐减小,其最大值约在2倍的墙高处(约墙后4 m的位置)出现;当 $\alpha > 32^\circ$,即 $R < 2.4 \text{ m}$ 时,随着爆距的减小,环流超压呈非线性衰减趋势,直到达到空气平衡状态,其最大值出现在墙后约1 m处,这是由于 α 角度引起的,使最大环流超压向墙体移动,在墙角处形成局部高压。

3.2 不同炸药量时环流超压的变化规律

在仿真环境相同的条件下,分析 $W(\text{TNT})$ 为2、3、4 kg 和5 kg 时环流超压的变化规律。由于 $R = 2.4 \text{ m}$ 时,环流超压在墙后约4 m处达到最大值,因此本次计算中取 $R = 2.4 \text{ m}$ 。分析墙后6个测力点的环流超压的变化情况,从而获得墙后环流超压的变化规律,如图4所示。

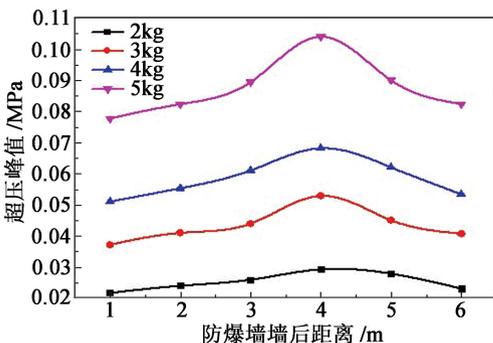


图4 不同TNT药量条件下的环流超压峰值曲线

Fig. 4 Curves of the diffraction peak overpressure with different TNT charges

从图4可以看出,防爆墙墙后的环流超压值随

着装药量的变化呈近似的正态分布;且随着炸药量的增加,这种分布趋势更明显。由这4条变化的曲线可以得出,在防爆墙后面约4 m位置处出现冲击波压力的最大值,且该值随着装药质量的增加而变大,因该位置处的最小值大于空爆条件下的冲击波压力值(约0.024 6 MPa),说明在此位置处由于入射波和反射波相互作用产生了马赫波,使该处的冲击波压力大为增强。超过马赫波范围后,其冲击波压力又随着传播距离的增大而逐渐变小。

3.3 墙厚对环流超压的影响

为研究墙厚对环流超压的影响,在墙高不变的条件,取 $W(\text{TNT}) = 5 \text{ kg}$, $R = 2.4 \text{ m}$,墙厚 $T = 0.6$ 、 0.8 m 和 1.0 m 进行数值模拟。图5给出了不同厚度的防爆墙在爆轰载荷作用下,墙体后面6个测力点的超压峰值变化规律。

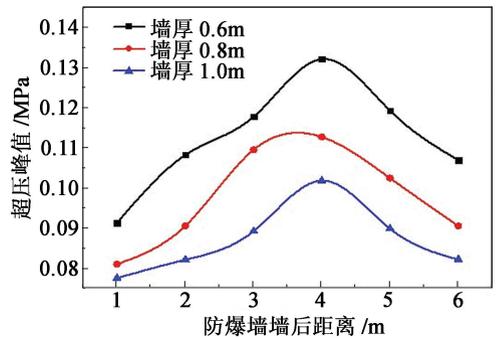


图5 变墙厚条件下的环流超压峰值曲线

Fig. 5 Curves of diffraction peak overpressure under different wall thickness

从图5可以看出,在不同墙厚条件下,环流超压峰值的变化规律呈近似的正态分布,其最大值出现在约两倍的墙高位置处,说明墙厚不会改变环流超压的分布规律;且随着墙体厚度的增加,环流超压值降低,说明增加墙体厚度能达到较好的防护效果。

3.4 环流超压峰值与炸药量的关系

由上述分析可知,防爆墙后6个测力点的环流超压峰值与炸药量的大小密切相关,分析其变化规律得到如图6所示的关系曲线。

由图6可以看出,随着装药量的增加,墙后各点的超压峰值均呈非线性增加的趋势。因此,运用 Matlab 拟合超压峰值与装药量之间的关系,其中: y 为超压峰值,MPa; x 为装药量,kg。分析得到的方程为式(7)~式(12)。

$$y_1 = 0.000\ 613\ 86x^3 - 0.005\ 864x^2 + 0.032\ 818x - 0.025\ 72; \quad (7)$$

$$y_2 = 0.000\ 939\ 56x^3 - 0.009\ 073x^2 + 0.044\ 035x - 0.035\ 72; \quad (8)$$

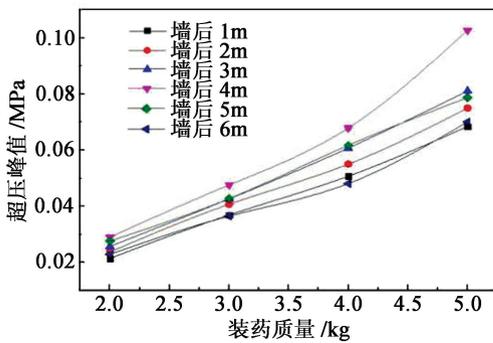


图6 环流超压峰值和TNT药量的关系

Fig. 6 Relationship between diffraction peak overpressure and TNT charges

$$y_3 = 0.000\ 031\ 68x^3 + 0.000\ 523x^2 + 0.013\ 621x - 0.003\ 91; \quad (9)$$

$$y_4 = 0.002\ 179\ 80x^3 - 0.018\ 836x^2 + 0.071\ 407x - 0.055\ 78; \quad (10)$$

$$y_5 = -0.005\ 014\ 00x^3 + 0.005\ 685x^2 - 0.003\ 269x + 0.015\ 80; \quad (11)$$

$$y_6 = 0.001\ 491\ 80x^3 - 0.013\ 517x^2 + 0.052\ 270x - 0.039\ 76. \quad (12)$$

式(7)~式(12)是由炸药质量 x ($1\text{ kg} \leq x \leq 5\text{ kg}$) 拟合得到的防爆墙墙后各点的环流超压峰值, 仅适用于小当量 TNT 爆炸产生的墙后环流超压, 对于大当量 TNT 爆炸产生的墙后环流超压, 可通过爆炸相似比而得到, 需要进一步的研究分析。

4 结论

采用 LS/DYNA 软件对冲击波作用于便携式防爆墙的绕射规律进行了研究, 得到如下结论:

1) 当 TNT 药量不变、爆距变化时, 爆距为 2.4 m (即 $\alpha = 32^\circ$) 时, 环流超压峰值最大; 当 $\alpha < 32^\circ$ 时, 环流超压峰值先增大再变小, 在约 2 倍墙高位置处 (约墙后 4 m 处) 环流超压峰值最大; 当 $\alpha > 32^\circ$ 时, 环流超压峰值的位置向墙体移动, 在墙后约 1 m 位置处形成局部高压。

2) 当爆距一定、TNT 药量变化时, 随着 TNT 药量的增加, 环流超压峰值也增加, 且其最大值出现在墙后约 2 倍墙高位置处。

3) 随着墙体厚度的增加, 环流超压峰值越来越小, 且最大值出现在墙后约 2 倍的墙高位置处。

参考文献

[1] 严东晋, 丁娜娜. 建筑物外部防爆墙的研究应用现状

[C]//第5届全国工程结构安全防护学术会议论文集. 南京, 2005.

[2] 刘飞, 任辉启, 王肖均, 等. 抗爆墙在地面重要建筑物反爆炸恐怖袭击中的应用[J]. 防护工程, 2004, 26(6): 20-25.

[3] 伍俊, 刘晶波, 杜义欣. 汽车炸弹爆炸下装装配式防爆墙弹塑性动力计算与数值分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(4): 394-400.

WU J, LIU J B, DU Y X. Elastic-plastic dynamic calculation and numerical analysis of assembling blast resistant wall under effect of vehicle bombs[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27(4): 394-400.

[4] 苏倩倩. 带防爆墙网壳的抗爆性能与爆炸响应简化计算方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

SU Q Q. Defense performance of reticulated domes with explosion-protection wall and simplified calculation method for explosive response[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[5] SCHERBATIUK K, RATTANAWANGCHAROEN N. Experimental testing and numerical modeling of soil-filled concertainer walls[J]. Engineering Structures, 2008, 30(12): 3545-3554.

[6] 张艳明, 罗兴柏, 刘国庆, 等. 地面弹药堆垛设置隔爆墙试验研究[J]. 爆破器材, 2014, 43(3): 52-56.

ZHANG Y M, LUO X B, LIU G Q, et al. Experimental research on the explosive-proof walls setting in front of the ammunition stack on ground[J]. Explosive Materials, 2014, 43(3): 52-56.

[7] 张志刚, 李明钊, 葛涛, 等. 新型拼装式防爆墙研究的若干进展[J]. 爆破, 2015, 32(3): 176-182.

ZHANG Z G, LI M Z, GE T, et al. Research progress in new kind of assembling anti-blast wall[J]. Blasting, 2015, 32(3): 176-182.

[8] 蒋志刚, 孔晓鹏, 谭清华, 等. 土工防爆墙倾覆稳定性分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(10): 86-90.

JIANG Z G, KONG X P, TAN Q H, et al. Overtum stability analysis of geotechnical explosive-proof walls[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(10): 86-90.

[9] 朱福林. 野战环境下便携式防爆墙抗爆性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2017: 27-30.

ZHU F L. Research on anti-blast performance of portable explosion-proof walls in the field environment[D]. Taiyuan: North University of China, 2017: 27-30.

[10] 陈鑫, 高轩能. 炸药近地爆炸的数值模拟及影响参数的分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2014, 35(5): 570-575.

CHEN X, GAO X N. Numerical simulation and analysis

[9] LI X, LIN Q H, ZHAO X Y, et al. Compatibility of 2,4,6,8,10,12-hexanitrohexaazaisowurtzitane with a selection of insensitive explosives[J]. Journal of Energetic Materials, 2017,35(2):188-196.

[10] 王瑞, 孟子晖, 薛敏, 等. DSC 法研究高能炸药 TEX 与推进剂组分的相容性[J]. 火炸药学报, 2015, 38(2):66-69.

WANG R, MENG Z H, XUE M, et al. Compatibility of high energetic explosive TEX with components of propellants by DSC method[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2015, 38(2):66-69.

[11] 张燕, 黄韵东, 陈雪飞. DNMT 与 RDX 的相容性研究[J]. 山东化工, 2015, 43(4):10-11.

ZHANG Y, HUANG Y D, CHEN X F. Study on compatibility of DNMT and RDX[J]. Shandong Chemical Industry, 2015, 43(4):10-11.

[12] KAWAMOTO A M, PARDINI L C, REZENDE L C. Synthesis of copper chromite catalyst[J]. Aerospace Science and Technology, 2004,8(7):591-598.

[13] 杨钊飞, 赵凤起, 李鑫. 含能材料相容性评定方法研究进展[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(3):141-146.

YANG Z F, ZHAO F Q, LI X. Research progress on methods of evaluating of energetic materials compatibility[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015, 36(3):141-146.

[14] 范海波, 刘艳林, 杨荣杰, 等. 芳炔树脂/POSS 固化相容性及热稳定性研究[J]. 材料工程, 2014(3):1-6.

FAN H B, LIU Y L, YANG R J, et al. Compatibility and thermostability between polyarylacetylene composites and polyhedral oligomeric silsesquioxanes[J]. Journal of Materials Engineering, 2014(3):1-6.

[15] TIŢA B, FULIAŞ A, BANDUR G, et al. Compatibility study between ketoprofen and pharmaceutical excipients used in solid dosage forms[J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2011, 56(2):221-227.

(上接第 10 页)

of influence parameters for explosions near ground[J]. Journal of Huaqiao University(Natural Science), 2014, 35(5):570-575.

[11] 年鑫哲, 张耀, 孙传怀, 等. 空气冲击波作用于柔性防爆墙的透射和绕射效应分析[J]. 工程力学, 2015, 32(3):241-248, 256.

NIAN X Z, ZHANG Y, SUN C H, et al. Analysis of transmission and diffraction effects of air shock waves upon flexible explosion-proof walls [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(3):241-248, 256.

[12] 宁建国, 王成, 马天宝. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京:国防工业出版社, 2010.

NING J G, WANG C, MA T B. Explosion and shock dynamics[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2010.

[13] HENRYCH J, ABRAHAMSON G R. The dynamics of explosion and its use[M]. Amsterdam:Elsevier Scientific Pub. Co., 1979.

[14] WU C Q, HAO H. Modeling of simultaneous ground shock and air blast pressure on nearby structures from surface explosions [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(6):699-717.

[15] 李翼祺, 马素贞. 爆炸力学[M]. 北京:科学出版社, 1959:260.

[16] 张国伟. 终点效应及其应用技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2006.

[17] 穆朝民, 任启辉, 李永池, 等. 爆炸冲击波作用于墙体及对墙体绕射的实验研究[J]. 实验力学, 2008, 23(2):169-174.

MU C M, REN Q H, LI Y C, et al. Experimental study of blast wave reflection and diffraction on a shelter wall [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 23(2):169-174.