

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.05.003

坡度对爆炸冲击波传播影响的试验研究*

陈君 姬建荣 康昊 李毅卓 叶希洋

西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘要] 为了研究坡度对冲击波传播的影响,在试验场构建了不同坡度的斜坡地形,通过超压测试系统获取了斜坡地形的冲击波超压。对比发现,在坡头前,测点的超压峰值和超压峰值达到时间与平地时的冲击波参数基本相同,冲量增大;上坡时,超压峰值、冲量随着坡度的增大而增大,超压峰值到达时间随着坡度的增大而减小;下坡时,超压峰值、冲量随着坡度绝对值的增大而减小,超压峰值到达时间随着坡度绝对值的增大而增大。得到了不同坡度时冲击波超压峰值和超压峰值到达时间相应的工程计算公式。

[关键词] 坡度;冲击波峰值;冲击波峰值时间;斜坡

[分类号] TJ410.6

Experimental Study on the Influence of Slope on the Propagation of Explosion Shock Waves

CHEN Jun, JI Jianrong, KANG Hao, LI Yizhuo, YE Xiyang

Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] In order to study the influence of slope on the propagation of shock wave, slope topography with different slopes was constructed in the test site. The shock wave overpressure on the slope was obtained using the overpressure measuring system. It is found that, at the front of the slope, the peak overpressure and its reaching time on the slope are basically the same as the shock wave on the flat ground, and the impulse increases. In the uphill propagation, the peak overpressure and impulse increase with the increase of slope, while the arrival time of peak overpressure decreases with the increase of slope. In the downhill propagation, the peak overpressure and impulse decrease with the increase of absolute slope value, while the arrival time of peak overpressure increases with the increase of absolute slope value. The corresponding calculation formulas of peak overpressure and arrival time of peak overpressure at different slopes are obtained.

[KEYWORDS] slope; peak overpressure of shock wave; arrival time of peak overpressure of shock wave; slope

0 引言

爆炸冲击波对目标的毁伤程度不仅与弹药自身的威力有关,也与爆炸时的作用环境密切相关。对于无限空气介质,爆炸冲击波理论已有成熟的经验公式^[1]。而对于密闭或半密闭有限空间的冲击波传播理论,许多学者正在开展研究。

李秀地等^[2]通过数值模拟开展长坑道中化学爆炸冲击波压力的传播规律研究。张玉磊等^[3]通过试验研究半密闭环境下方形坑道内爆炸冲击波的传播规律。赵新颖等^[4]通过仿真和试验的方法研究密闭环境下温压炸药爆炸冲击波在爆炸堡内的传

播规律。杨亚东等^[5]通过建立长方体密闭结构内爆炸冲击波传播和叠加分析模型研究内爆炸冲击波的分布特性。

可以看到,学者们主要通过仿真和试验等途径进行了半密闭、密闭环境的爆炸冲击波传播规律研究。野外实战中,场景地面多为起伏不平的山地。研究爆炸冲击波实战地形下的传播规律对野外实战防护和毁伤评估具有现实意义。唐建曾^[6]通过激波管研究了坡地对冲击波传播规律的影响。而对于野外坡地对冲击波传播影响研究国外未见报道。

本文中,在试验场构建不同坡度的斜坡地形,在斜坡上布设超压测点,获取不同坡度的斜坡地面测点处的冲击波超压,研究斜坡地形对冲击波传播的

* 收稿日期:2022-11-15

第一作者:陈君(1978-),男,高工,主要研究方向为爆炸威力测试及毁伤评估。E-mail:1024653354@qq.com

影响,为实战防护和毁伤评估提供技术支持。

1 试验

1.1 试验布局

在试验场构建了相同宽度、不同坡度的斜坡地形。坡度 θ 分别为 0° (平整地面)、 $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 。在距坡头 2.50 m 处的硬质水平地面布设梯恩梯(TNT)球形药作为爆炸源。在距爆炸源行程距离 L 为 2.05、2.35、2.65、2.95、3.25、3.75、4.25、4.75、5.25、5.75、6.75 m 处布设 11 个超压测点,获取斜坡各处的冲击波超压 p 。

试验布局如图 1 所示。

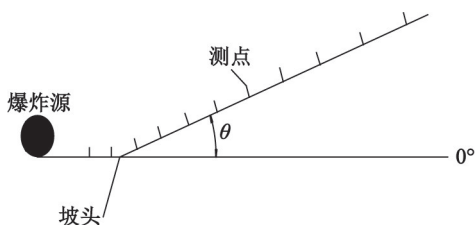


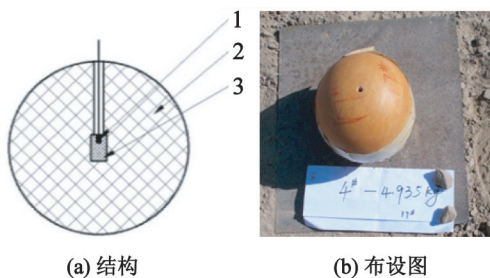
图 1 试验布局示意图

Fig. 1 Test layout

1.2 爆炸源

爆炸源为 TNT 压制而成的球形裸药。在球形爆炸源中心开孔,采用 15 g 的 JH14(炸药型号)作为传爆药,用微型导爆索起爆球形 TNT。球形爆炸源的密度为 (1.58 ± 0.02) g/cm³,药量为 (5.00 ± 0.08) kg。为了避免爆炸过程中地面炸坑能量消耗对试验结果的影响,试验前将球形 TNT 爆炸源放置在与地面平齐的 Q235 钢板(20 mm 厚)上起爆。

爆炸源结构及布设如图 2 所示。



1 - 微型导爆索;2 - 球形 TNT;3 - 传爆药。

图 2 爆炸源结构及布设图

Fig. 2 Structure and layout of the explosion source

1.3 超压测试系统

超压测试系统由壁面冲击波超压传感器、低噪声信号线、ICP 信号调理器、数据采集器等组成。壁面冲击波超压传感器的感应面与斜坡面平齐,即与

水平面的角度与坡度相同。传感器型号为 113B26,美国 PCB 公司,量程 3.5 MPa。数据采样频率设置为 1 MHz,系统带宽大于 100 kHz。

2 结果与分析

2.1 坡度对超压峰值的影响

同工况进行了多发试验,对试验数据求平均值。图 3 为坡头前 2 个、坡头后 3 个测点处的超压峰值对比曲线。

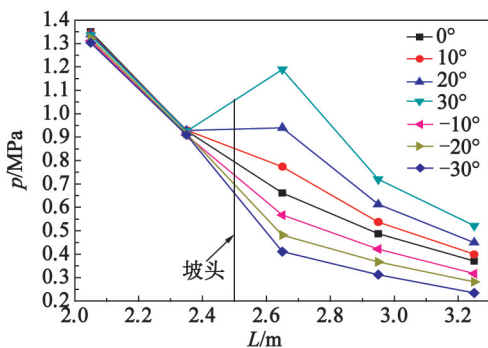


图 3 不同测点处的超压峰值对比

Fig. 3 Comparison of the peak overpressure at different measuring points

由图 3 可以看出:在坡头之前,不同工况时,2 个测点的超压峰值相差不大;在坡头之后,上坡超压峰值相比平地时明显增大,且随坡度的增大而增大;下坡超压峰值相比平地时明显减小,且随坡度绝对值的增大而减小。随着坡度的变化,超压峰值在坡头区域发生明显变化。

图 4 为斜坡上各测点处的超压峰值对比。

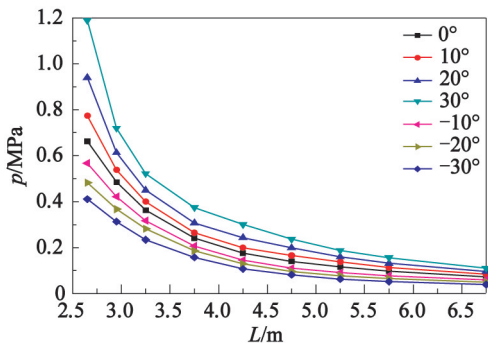


图 4 斜坡上各测点的超压峰值随行程的变化

Fig. 4 Variation of peak overpressure at different measuring points on the slope with distance

由图 4 可以看出:在上坡($\theta = 10^\circ$ 、 20° 、 30°)情况下,斜坡上测点的超压峰值都会增大,且峰值会随着坡度的增加而增加,随着行程的增大而减小;相

反,在下坡($\theta = -10^\circ, -20^\circ, -30^\circ$)情况下,超压峰值会随着下坡角度绝对值的增加而减小,随着行程的增大而减小。这一结论与文献[6]的结果一致。文献[6]中,利用激波管在不同的迎坡角下获取的大量数据表明了激波沿地形变化的一般规律:冲击波遇到上坡时,坡面超压增大;遇到负坡时,超压峰值减小。杜红棉等^[7]提出,当空气中传播的冲击波遇到刚性壁面时,质点速度骤然变为零,壁面处质点不断聚集,使压力增加。赵新颖等^[4]认为,冲击波在有限空间遇到固体壁面会形成反射,在特定位置会出现聚焦现象,使冲击波超压峰值增加。与本文的结论一致。综上,同类型、同质量的炸药触地爆炸,由于坡度地形的影响,压力峰值与坡度有关。

为了研究斜坡地形时冲击波超压峰值增大或减小的程度,将斜坡测点的超压峰值与相同行程处测点的平地超压峰值作比值,获得超压峰值比。超压峰值比随行程的变化曲线,如图 5 所示。

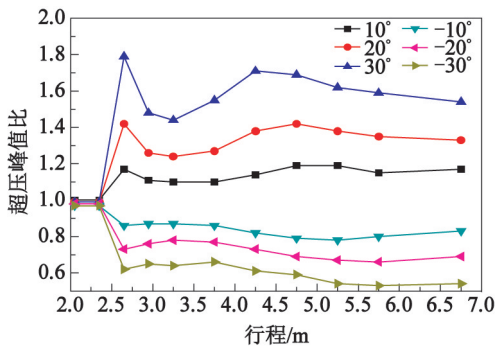


图 5 超压峰值比随行程的变化

Fig. 5 Variation of peak overpressure ratio with distance

由图 5 可以看出:上坡时,超压峰值比(超压增大程度)随上坡坡度的增大而增大,也就是上坡坡度越大,超压峰值增大程度越大。上坡时,超压峰值比呈现为振荡变化趋势:先增大,后减小,再增大,最后趋于平稳。下坡时,超压峰值比随下坡坡度绝对值的增大而减小。下坡时,超压峰值比同样表现为振荡变化趋势:先减小,再增大,再减小,最后趋于平稳。这可能是冲击波遇到斜坡后空气域突变或放射等因素所致。

文献[6]中,通过激波管试验数据获得了斜坡处超压峰值的经验公式。

上坡经验公式:

$$\Delta p_\theta = \eta_+ \Delta p_0 \quad (1)$$

$$\eta_+ = 1 + A\theta + B\theta^2, 0^\circ \leq \theta \leq 42^\circ; \quad (2)$$

$$A = 2.09 - 0.8 \Delta p + 0.08 \Delta p^2; \quad (3)$$

$$B = 0.53 + 0.83 \Delta p - 0.09 \Delta p^2. \quad (4)$$

式中: Δp_θ 为斜坡处超压峰值; η_+ 为增压系数(超压比); Δp_0 为入射压, $0.01 \text{ MPa} \leq \Delta p \leq 0.60 \text{ MPa}$ 。 θ 为坡度; A 、 B 分别为系数。

下坡经验公式:

$$\Delta p_\theta = \eta_- \Delta p_0 \quad (5)$$

$$\eta_- = \begin{cases} e^{-\theta(1.20+0.22\theta)}, & 0^\circ \leq \theta \leq 20^\circ; \\ 0.68 - 0.29\theta + 0.01\theta^2, & 20^\circ < \theta \leq 90^\circ. \end{cases} \quad (6)$$

式中: η_- 为减压系数。

由式(1)~式(4)可以看出,增压系数(超压比)是随坡度变化的二次函数。式(5)~式(6)表明,减压系数在 $0^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$ 时只与坡度相关,且是随坡度变换的指数衰减函数;在 $20^\circ < \theta \leq 90^\circ$ 时,是只与坡度相关的二次函数。

文献[6]中的经验公式与图 5 中的曲线变化趋势有差异。用 20° 上坡试验数据验证发现,式(1)~式(4)获得的增压系数整体偏大,偏差范围 16%~80%。用 -20° 下坡试验数据验证发现,式(5)~式(6)获得的减压系数多数偏小,偏差在-25%~7%之间。 -30° 下坡试验数据验证结果同样偏小,偏差在-22%~-8%之间。这可能与试验条件相关。

爆炸冲击波传播的研究更多关注的是对比距离、坡度和斜坡超压之间的关系。根据试验数据,拟合了对比距离 \bar{r} 、坡度 θ 与增(减)压系数 η 的关系,三维结果如图 6 所示。

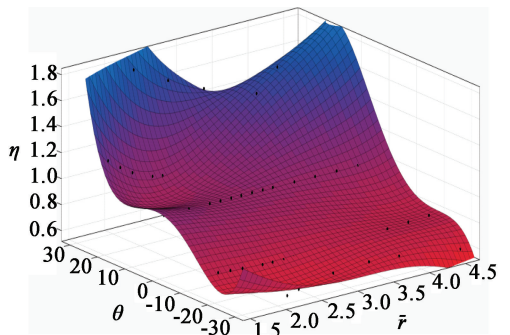


图 6 增(减)压系数与对比距离和坡度的关系

Fig. 6 Relationship between η and \bar{r} or θ

$$\begin{aligned} \eta(\bar{r}, \theta) = & 0.852 + 0.940 \bar{r} + 6.480 \times 10^{-2} \theta - 1.075 \bar{r}^2 - \\ & 9.680 \times 10^{-2} \bar{r} \theta + 1.140 \times 10^{-3} \theta^2 + 0.489 \bar{r}^3 + \\ & 4.410 \times 10^{-2} \bar{r}^2 \theta - 2.710 \times 10^{-3} \bar{r} \theta^2 + \\ & 8.670 \times 10^{-5} \theta^3 - 0.099 \bar{r}^4 - 7.340 \times \\ & 10^{-3} \bar{r}^3 \theta + 1.070 \times 10^{-3} \bar{r}^2 \theta^2 - 3.050 \times \\ & 10^{-5} \bar{r} \theta^3 + 3.480 \times 10^{-6} \theta^4 + 7.430 \times 10^{-3} \bar{r}^5 + \\ & 4.510 \times 10^{-4} \bar{r}^4 \theta - 1.030 \times 10^{-4} \bar{r}^3 \theta^2 + \\ & 1.040 \times 10^{-6} \bar{r}^2 \theta^3 - 1.080 \times 10^{-6} \bar{r} \theta^4. \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\eta(\bar{r}, \theta)$ 为增(减)压系数; \bar{r} 为对比距离; θ 为

斜坡坡度。

式(7)为增(减)压系数与对比距离和坡度的关系,拟合结果与试验结果偏差 $-6.08\% \sim 7.29\%$ 。

2.2 坡度对超压峰值到达时间的影响

图7为坡头前2个测点、坡头后1个测点处超压峰值到达时间的对比曲线。由图7可以看出:冲击波遇到斜坡前,超压峰值到达时间与通过平地时相比变化不大;上坡后,超压峰值到达时间减小;下坡后,超压峰值到达时间增大。

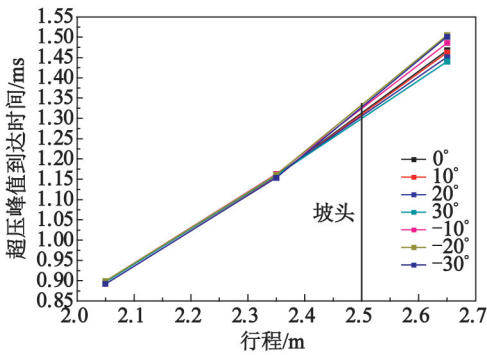


图7 不同测点处超压峰值到达时间的对比

Fig. 7 Comparison of the arrival time of peak overpressure at different measuring points

图8为斜坡上各测点超压峰值到达时间的对比。由图8可以看出:上坡时,超压峰值到达时间随坡度的增大而减小,随着行程的增大而增大,行程越大,区分越明显;下坡时,超压峰值达到时间随着坡度绝对值的增大而增大,随着行程的增大而增大,行程越大,区分越明显。通过试验数据,对不同坡度时超压峰值到达的时间比的均值进行拟合,得到了 α_θ 与 θ 的近似关系:

$$t_\theta = \alpha_\theta t_0; \quad (8)$$

$$\alpha_\theta = 1.0064 - 0.00311\theta. \quad (9)$$

式中: t_θ 为坡度为 θ 时超压峰值的到达时间; t_0 为

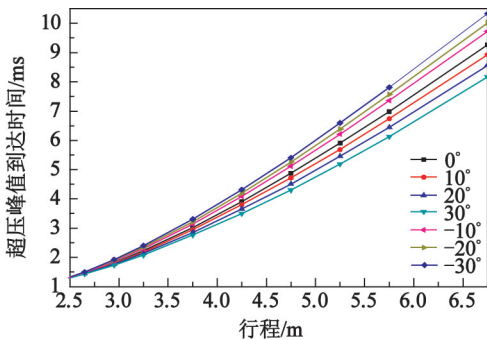


图8 斜坡上各测点超压峰值到达时间的对比

Fig. 8 Comparison of the arrival time of peak overpressure at different measuring points on the slope

坡度为 0° 时超压峰值的到达时间; α_θ 为超压峰值到达的时间比; θ 为斜坡坡度。

2.3 坡度对超压脉宽的影响

图9为平地 and 20° 、 -20° 斜坡相应行程测点处的超压脉宽的对比。从图9中可以看出,相比平地,上坡时超压脉宽变小,下坡时超压脉宽增大。脉宽的变化整体表现为振荡趋势。

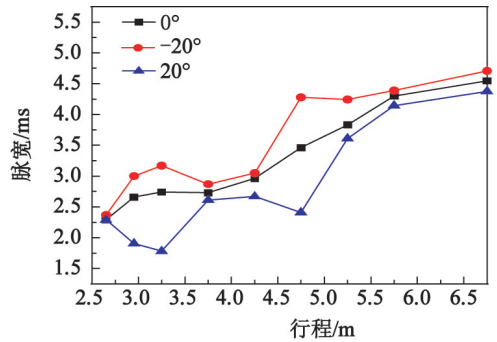


图9 不同坡度时各测点处的脉宽

Fig. 9 Pulse width at different measuring points at different slopes

2.4 坡度对超压冲量的影响

图10给出了平整地形和 20° 、 -20° 坡度斜坡时相应测点处冲量大小的比较。从图10中可以看出,坡头前、后上坡时冲量增大,下坡时冲量减小。冲击波过坡头后,冲量同样表现为上坡增大、下坡减小的趋势,冲量变化呈振荡趋势。

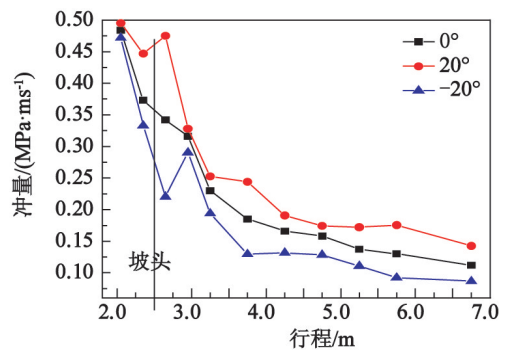


图10 不同坡度时各测点处的冲量

Fig. 10 Impulse at different measuring points at different slopes

3 结论

1)在坡头之前的斜坡平整段处,冲击波超压峰值、超压峰值到达时间与平地时的数据相当。

2)从坡头前测点开始,上坡超压冲量增大,且随坡度增大而增大;下坡超压冲量减小,且随坡度绝对值的增大而减小。

(下转第24页)

dispersal and its cavity effect [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014, 22(3): 353-358.

[11] 肖绍清. 分散药 T 型装药控制二次引爆型 FAE 云雾研究[J]. 火炸药学报, 2006, 29(2): 10-14.

XIAO S Q. Study on control cloud of twice-detonating FAE by T-type charge of burster [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(2): 10-14.

[12] 赵志国, 李建, 赵海平, 等. 某二次起爆型云爆战斗部防窜火技术研究[J]. 火箭与制导学报, 2021, 41(5): 123-128.

ZHAO Z G, LI J, ZHAO H P, et al. The study of the technology of premature combustion from a twice-detonating FAE warhead [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2021, 41(5): 123-128.

[13] 王永旭, 解立峰, 贾晓亮, 等. 阻燃介质在炸药驱动燃料分散中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(4): 51-58.

WANG Y X, XIE L F, JIA X L, et al. Application of flame retardant medium in fuel dispersion driven by explosive [J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(4): 51-58.

[14] 贾承志, 张奇. 云爆燃料分散过程窜火机理的数值模拟[J]. 含能材料, 2020, 28(3): 248-254.

JIA C Z, ZHANG Q. Numerical simulation on the mechanism of premature-combustion in the process of FAE fuel dispersion [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2020, 28(3): 248-254.

[15] 李丹琳, 陈英杰, 马灿林, 等. 常用灭火剂灭火性能及原理[J]. 广东化工, 2014, 41(13): 165-166.

LI D L, CHEN Y J, MA C L, et al. The performance and fire extinguishing principle of common type of fire extinguishing agent [J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, 41(13): 165-166.

(上接第 17 页)

3) 上坡时,超压峰值和冲量比平地时的数据增大,超压峰值和冲量随坡度的增大而增大,超压峰值和冲量的增大程度呈现振荡变化趋势;下坡时,超压峰值和冲量比平地时的数据减小,超压峰值和冲量随下坡坡度绝对值的增大而减小,超压峰值和冲量的减小程度呈现振荡变化趋势。

4) 上坡时,超压峰值到达时间比平地时的数据减小,超压峰值到达时间随上坡坡度增大而减小;下坡时,峰值到达时间比平地时的数据增大,超压峰值到达时间随下坡坡度绝对值的增大而增大。

5) 超压脉宽上坡时减小,下坡时增大。

6) 得出不同坡度地形时冲击波超压峰值、超压峰值到达时间与平整地面时相应值的关系式;在本文给出的条件范围内,可用于工程实际计算。

参 考 文 献

[1] 张国伟. 终点效应及靶场试验[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2009.

[2] 李秀地, 郑颖人, 李列胜, 等. 长坑道中化爆冲击波压力传播规律的数值模拟[J]. 爆破器材, 2005, 34(5): 4-7.

LI X D, ZHENG Y R, LI L S, et al. Simulation of the pressure attenuation of chemical shock wave in long tunnels[J]. Explosive Materials, 2005, 34(5): 4-7.

[3] 张玉磊, 王胜强, 袁建飞, 等. 方形坑道内爆炸冲击波传播规律[J]. 含能材料, 2020, 28(1): 46-51.

ZHANG Y L, WANG S Q, YUAN J F, et al. Experi-

mental study on the propagation law of blast waves in a square tunnel [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2020, 28(1): 46-51.

[4] 赵新颖, 王伯良, 李席, 等. 温压炸药爆炸冲击波在爆炸堡内的传播规律[J]. 含能材料, 2016, 24(3): 231-237.

ZHAO X Y, WANG B L, LI X, et al. Shockwave propagation characteristics of thermobaric explosive in an explosion chamber [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016, 24(3): 231-237.

[5] 杨亚东, 李向东, 王晓鸣. 长方体密闭结构内爆炸冲击波传播与叠加分析模型[J]. 兵工学报, 2016, 37(8): 1449-1455.

YANG Y D, LI X D, WANG X M. An analytical model for propagation and superposition of internal explosion shockwaves in closed cuboid structure [J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(8): 1449-1455.

[6] 唐建曾. 冲击波对工程结构及装备的动载试验研究[J]. 流体力学实验与测量, 2000, 14(3): 42-46, 51.

TANG J Z. Experimental study on dynamic loading of shock wave on structure and equipment [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2000, 14(3): 42-46, 51.

[7] 杜红棉, 曹学友, 何志文, 等. 近地爆炸空中和地面冲击波特性和验证[J]. 火箭与制导学报, 2014, 34(4): 65-68.

DU H M, CAO X Y, HE Z W, et al. Analysis and validation for characteristics of air and ground shock wave near field explosion [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2014, 34(4): 65-68.