

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0279

## 高原环境爆炸冲击波传播特性的实验研究\*

陈龙明<sup>1,2</sup>, 李志斌<sup>1</sup>, 陈 荣<sup>1</sup>, 邹道逊<sup>3</sup>

(1. 国防科技大学文理学院, 湖南 长沙 410073;

2. 军事科学院国防工程研究院, 北京 100850;

3. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 在评估弹药在高原的爆炸威力时, 需要考虑高海拔条件对炸药爆炸冲击波参数的影响。为研究高海拔低气压条件下的冲击波传播规律, 开展了模拟海拔高度  $h=500, 2\ 500, 4\ 500\text{ m}$  等 3 种气压条件下的爆炸冲击波测试实验。结果表明, 当环境气压每下降 20% 时, 冲击波超压、比冲量和到达时间平均降低约 9%、10% 和 6%。将使用 Sachs 因子修正后的计算结果与测试数据进行对比分析, 发现该方法能较好地预测不同环境条件下的爆炸冲击波参数。进一步分析了环境温度的影响, 发现初始温度升高会使到达时间提前, 本文实验的温度条件对超压和比冲量的影响并不显著。该研究结果对战斗部在高海拔的爆炸威力评估具有参考意义。

**关键词:** 爆炸冲击波; 高海拔; 爆炸实验; 传播特性

中图分类号: O382.1

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

## An experimental study on propagation characteristics of blast waves under plateau environment

CHEN Longming<sup>1,2</sup>, LI Zhibin<sup>1</sup>, CHEN Rong<sup>1</sup>, ZOU Daoxun<sup>3</sup>

(1. College of Liberal Arts and Sciences, National University of Defense Technology,

Changsha 410073, Hunan, China;

2. Institute of Defense Engineering, PLA Academy of Military Sciences, Beijing 100850, China;

3. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

**Abstract:** It is necessary to take into consideration the effects of elevated-altitude conditions on the propagation characteristics of blast waves when evaluating the explosion power of ammunitions under plateau environment. In order to study the propagation characteristics of blast wave under plateau environment with low pressure, experiments were carried out at simulated plateau environment at altitudes of 500, 2 500 and 4 500 m, respectively. Results show that when the ambient air pressure decreases by 20%, the overpressure, specific impulse and arrival time of blast wave decrease in average by about 9%, 10% and 6%, respectively. Calculated results corrected by Sachs' factor are compared with the test data. It is found that the method proposed in the present study can better predict the blast wave parameters under different environmental conditions. The effects of ambient temperature were also studied. It is concluded that the increase of the initial ambient temperature will reduce the arrival time of blast wave, however, the effects of ambient temperature on the overpressure and specific impulse are not significant. The results have reference significance for the evaluation of warhead explosion power at elevated altitude.

**Keywords:** blast wave; high altitude; explosion experiment; propagation characteristics

\* 收稿日期: 2021-07-02; 修回日期: 2021-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(11402299); 湖南省自然科学基金(2020JJ3037)

第一作者: 陈龙明(1996—), 男, 博士研究生, chenlongming14@nudt.edu.cn

通信作者: 李志斌(1985—), 男, 博士, 副教授, lizhibin@nudt.edu.cn

一些工程实践中, 炸药会在压力较低的大气环境中爆炸, 例如在高海拔地区修筑铁路、桥梁等项目中均涉及到爆破作业。高原地区的大气压力、温度、密度显著地低于平原地区, 装药在这种条件下的实际作用效果需要进行重新评估<sup>[1]</sup>。另一个与人们密切相关的例子是针对民航飞机的爆炸威胁, 国际民航组织建议当在民航飞机上发现有潜在爆炸危险的物体时, 飞机应下降到约 3 000 m 的高度, 并使飞机舱内和舱外压力相等(此时  $p_{3\,000\text{ m}} \approx 64\text{ kPa}$ )<sup>[2]</sup>。此时评估爆炸物产生的破坏效果需要考虑低压环境的影响, 该结果有助于优化飞机的防爆结构设计。

早期的研究中, Sachs<sup>[3]</sup> 提出了一套比例定律, 将爆炸冲击波的峰值超压、比冲量、正压持续时间与环境压力条件相关联。而后 Dewey 等<sup>[4]</sup> 进行了一系列模拟低大气压环境的实验, 测量了入射峰值压力和冲量, 实验模拟的海拔为 0~15 km (0~50 000 in), 该实验在此范围内验证了 Sachs<sup>[3]</sup> 的比例定律的有效性。为了研究环境压力高于海平面大气压时的冲击波特性, Veldman 等<sup>[5]</sup> 使用环境气压可变的球形密封容器对 C-4 炸药产生的爆炸冲击波正反射压力和比冲量进行了实验研究, 发现环境压力的上升将导致冲击波的正反射压力和比冲量显著增大。朱冠南等<sup>[6]</sup> 利用抽真空装置研究了低压环境中膛口冲击波的传播特性, 获得了模拟高空环境中的膛口冲击波分布规律。数值仿真也是一种较常用的研究方法, Izadifard 等<sup>[7]</sup> 利用商用 AUTODYN 软件对高海拔爆炸的数值计算结果进行了分析, 提出了不同海拔条件下冲击波参数(峰值超压、比冲量、正压持续时间)的修正因子。李科斌等<sup>[8]</sup> 利用有限元方法研究了真空度对爆炸近场特性的影响, 获得了不同真空度下爆炸特征参量的变化规律。聂源等<sup>[9]</sup> 基于数值计算结果, 建立了考虑环境温、湿度修正因子的爆炸冲击波参数的计算模型。关于环境因素对冲击波的影响, 多年来的研究都较为碎片化, 未形成良好的体系<sup>[10]</sup>。特别是针对高原冲击波特性的研究资料较匮乏, 存在可用实验数据较少等问题。

基于现有研究存在的不足, 高原低压环境下装药爆炸冲击波的传播特性需得到深入研究。本文中, 拟开展改变初始环境空气参数的爆炸冲击波实验研究, 探讨高原环境条件对爆炸冲击波相关参数的影响规律。

## 1 高原地区大气的特征参数

炸药在空气中爆炸时, 其周围大气是冲击波产生和传导的介质。因此, 初始的大气环境影响着冲击波的传播特性。当环境参数变化时, 装药爆炸的能量输出机制与冲击波传播机制也会发生改变。从平原地区到高原地区, 环境空气的密度、大气压和温度随着海拔的增高而发生改变, 其变化规律与标准大气的高度变化规律相似。标准大气规定: 在海平面上, 大气温度为 15 °C (即热力学温度  $T_0=288.15\text{ K}$ ), 压强  $p_0=101.325\text{ kPa}$ , 密度  $\rho_0=1.225\text{ kg/m}^3$ 。在对流层, 温度梯度为海拔每升高 1 km 温度降低 6.5 °C, 因此在高度  $h(\text{m})$  处的气温  $T_h(\text{K})$  可写为<sup>[11]</sup>:

$$T_h = 288.15 - 0.006\,5h \quad 0\text{ m} \leq h < 11\,000\text{ m} \quad (1)$$

根据气温  $T_h$  可以得到海拔高度  $h$  处的压力  $p_h$ 、密度  $\rho_h$  和声速  $c_h$ :

$$p_h = p_0(T_h/T_0)^{5.255\,88}, \quad \rho_h = \rho_0(T_h/T_0)^{4.255\,88}, \quad c_h = 20.05\sqrt{T_h} \quad (2)$$

根据上述关系, 可获得不同海拔高度处的大气参数(见表 1)。

表 1 大气参数

Table 1 Atmospheric parameters

$h/\text{m}$	$p_h/\text{kPa}$	$\rho_h/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$c_h/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$T_h/\text{K}$
0	101.33	1.23	340.29	288.15
1 000	89.88	1.11	336.43	281.65
3 000	70.11	0.91	328.58	268.65
5 000	54.02	0.74	320.53	255.65

图 1 给出了大气参数在高海拔地区与在海平面处的比值  $\beta$  随海拔高度的变化情况。可以看到, 大气压力、密度、温度和声速都随着海拔的增高而降低。其中大气密度和压强的减幅最大, 当海拔为 5 000 m 时, 空气密度和压强分别降低到海平面处的 60.1% 和 53.3%。

考虑到大气环境在不同的海拔条件下发生了显著的变化, 众多在平原大气中的爆炸实验数据无法直接应用于高原环境中, 有必要对大气特征参数对冲击波传播的影响进行研究。

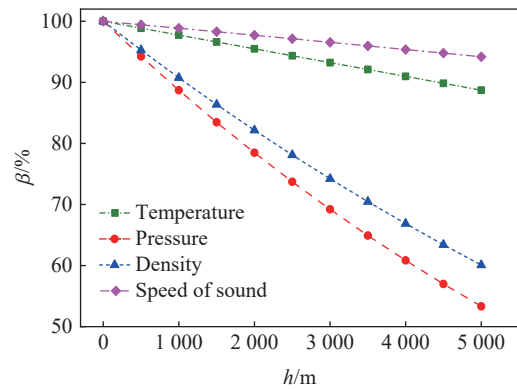


图 1 大气参数随海拔的变化趋势

Fig. 1 Atmospheric parameter changes at different altitudes

## 2 实验研究

利用抽气装置抽出密封罐内部空气, 在罐内模拟高原低压环境, 对 TNT 药球在密封罐内的爆炸冲击波压力进行测量, 以研究不同低压环境对爆炸冲击波的影响。

### 2.1 实验系统

由于实验中难以实现对大气温度的调节, 且气压对冲击波参数的影响程度远高于温度<sup>[4,6]</sup>, 因此实验中仅对高原低压环境进行了模拟。图 2 为实验装置的示意图, 实验中使用的密封罐罐体长 2.8 m, 直径为 2 m, 容积为 7.3 m<sup>3</sup>, 设计最高工作压力为 6 MPa。实验系统主要包括起爆系统、压力测试系统和低压环境模拟系统。起爆系统由同步机、高压脉冲发生器以及起爆雷管组成; 压力测试系统包括布置在罐体内的自由场冲击波传感器及其配套的信号适配仪和数据记录仪。起爆后, 传感器将测到的压力信号传输到信号适配仪, 传感器获得的微电荷信号被放大, 最后使用数据记录仪储存下来。低压环境模拟系统由真空泵和压力监测装置组成, 通过使用真空泵从罐体内抽出空气制造低压, 并根据压力监测器读数来调整压力以达到实验要求的压力水平。

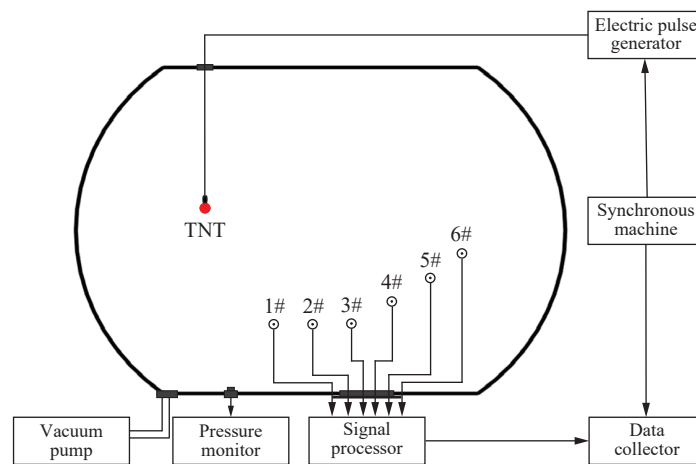


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of experimental device

爆炸测试中常用的装药类型一般为球形装药和圆柱形装药, 侯俊亮等<sup>[12]</sup>认为在一定距离内, 圆柱形装药工况在不同角度测到的入射冲击波压力有较大差异, 并且与球形装药相比, 在爆炸近区长径比为 1 的圆柱形装药轴向传播的冲击波超压值高出约 60%。考虑装药形状的影响, 实验中使用球形 TNT 装药, 起爆方式为中心起爆。装药球分为上下半球, 下半球预留凹槽放置传爆药柱, 上半球预制有雷管放

置孔。使用时, 上、下半球采用胶水粘合, 药球组合起来后吊装于预定位置并进行固定。杜红棉等<sup>[13]</sup>分析传感器外形结构对自由场冲击波测试的影响后认为, 圆盘式结构的传感器能获得较理想的超压峰值和波形, 因此本实验的传感器设计采用了边缘为对称双楔形、中间区域为平面的圆盘式结构, 内装压力传感器型号为 PCB113A21。传感器通过螺杆焊接于罐体底面的钢板上, 可通过螺杆顶端的固定螺母调节传感器的高度和敏感面方向, 安装时调整方向使冲击波阵面与圆盘平面垂直。

## 2.2 实验方法

在实验前, 采用 1 kg 的标准药球对传感器进行了动态标定。在正式实验中, 采用了 2 种规格的药球: (1) 药球半径  $r_{sp}$  为 35 mm, 质量  $m_{sp}$  为 292 g, 该规格的药球简记为 SR35; (2) 药球半径为 25 mm, 质量为 106 g, 该规格的药球简记为 SR25。罐体内的压力设置为 95、74 和 57 kPa, 分别对应海拔  $h$  为 500、2 500 和 4 500 m 处的大气压力。对每种规格的药球在不同气压条件下分别进行 2 次测试, 共计 12 组实验。实验的测点位置布局如图 3 所示, 通过调整传感器高度以避免地面形成的马赫波和其他壁面的反射波对入射冲击波产生影响, 确保传感器完整记录入射波正压区的压力时程数据。

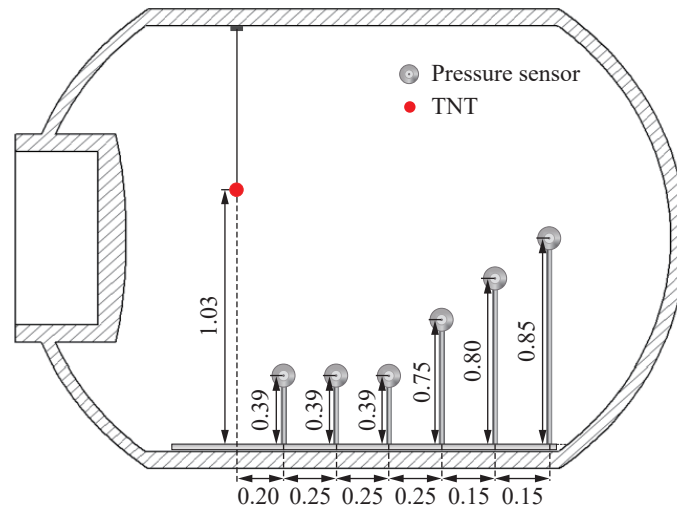


图 3 测点位置示意图(单位: m)

Fig. 3 Distribution of measuring points (unit: m)

实验时, 首先测量并记录药球球心至传感器敏感面的距离; 然后, 在舱门处使用密封圈和润滑脂进行密封并关闭密封罐舱门, 打开真空泵调整罐体内的压力达到实验预设值, 记录下气压值和温度值。压力稳定后, 启动同步机发出起爆信号引爆 TNT 药球并触发数据记录装置。待收集完数据, 打开阀门排尽罐内有毒气体准备下一次实验。

## 2.3 实验结果及分析

图 4 为在  $h=500, 2\ 500, 4\ 500$  m 等 3 种海拔(气压)条件下, 对 2 种规格的药球在 1#测点测到的原始压力时程曲线, 曲线中的首个峰值即为测得的入射冲击波超压峰值。入射冲击波到达后迅速衰减, 主峰后出现许多较小的压力峰, 显然数个较小的反射波早于下壁面反射的马赫波到达。由于罐体内存在小型凸起结构, 反射波形成了复杂的冲击波流场。就波形而言, 这些冲击波干扰对实验中所关心的入射冲击波形未构成较大的影响。随着初始压力的降低, 入射冲击波的峰值逐渐降低, 环境压力的改变显著影响了超压峰值。

实验共测得 72 条压力时程曲线, 对波形存在明显缺陷的压力曲线进行了剔除。为了尽量减小由于传感器震动等因素导致的测试干扰影响, 采用修正的 Friedlander 方程<sup>[14]</sup>对冲击波原始波形进行了拟合处理, 该方程为:

$$\Delta p(t) = \Delta p_s \left( 1 - \frac{t - t_a}{t_d} \right) e^{-\frac{b(t-t_a)}{t_d}} \quad (3)$$

式中:  $\Delta p(t)$  为超压时程曲线,  $\Delta p_s$  为超压峰值,  $t_a$  为到达时间,  $t_d$  为正压持续时间,  $b$  为衰减系数。

图 5 为使用波形修正方法对图 4(a) 中 (SR35 药球,  $h=500$  m) 的原始波形进行拟合后的结果。用 Friedlander 方程<sup>[14]</sup> 拟合得到的冲击波时程曲线能较好地消除原始数据中的毛刺等噪声, 并且与原始波形有较高的拟合度, 较好地还原了冲击波的压力曲线。

由于压力曲线存在噪声和震荡, 在原始数据中直接读取峰值和到达时间会带来一定的误差。Kinney 等<sup>[15]</sup> 提出了绘制对数超压-时间、超压-对数时间曲线图的判读方法 (见图 6), 即: 在冲击波正压区波形的初始和末端近似线性部分绘制一条最佳拟合直线, 并将其外推至到达时刻和零压位置, 从而可判读出超压和正压持续时间, 比冲量数据则通过对拟合压力时程曲线的积分得到。Ismail 等<sup>[16]</sup> 和张立恒等<sup>[17]</sup> 的研究都证明了该方法能较好地获取冲击波参数, 本文中也采用该方法获取冲击波威力参数数据。

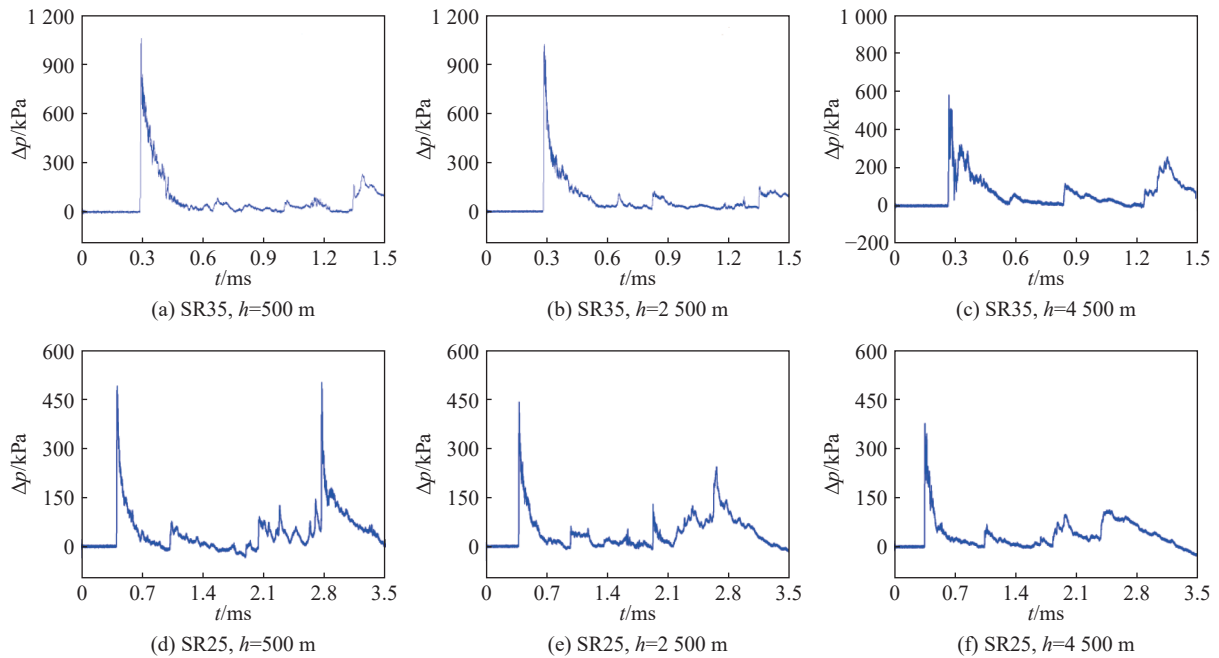


图 4 不同工况下在 1#测点测得的冲击波超压时程曲线

Fig. 4 Blast wave overpressure-time curves obtained by the pressure sensor at monitoring point 1# under experimental conditions

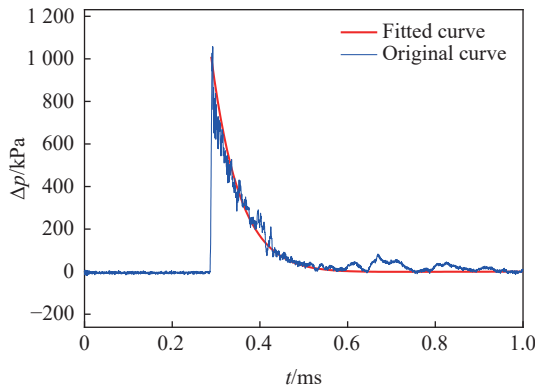


图 5 原始超压曲线及其拟合曲线

Fig. 5 Typical measured original overpressure curve and its fitted curve by the Friedlander formula



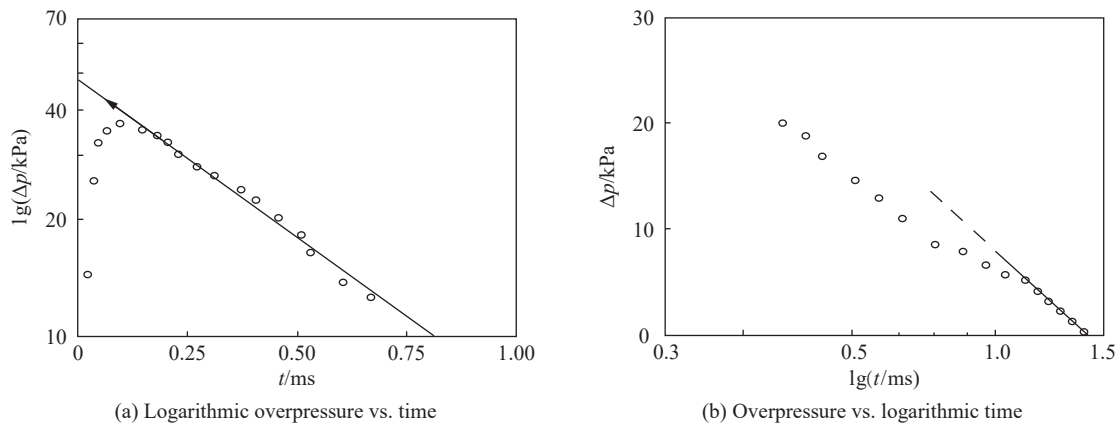


图 6 冲击波威力参数获取方法

Fig. 6 Acquisition methods of shock wave parameters

表 2 为 12 发实验的初始条件参数, 实验中使用了同一批次生产的药球, 罐体内的初始气压  $p_h$  通过真空泵进行精确调节, 初始大气压的最大波动小于 1%, 初始气温  $T_h$  受到实验当日气象条件的影响而存在一定差异。

图 7~9 为 2 种药量的实验数据绘制而成的散点图, 图中比例距离  $z$  为测点到爆心的距离  $R$  与装药质量  $m$  的 1/3 次方的比值, 即  $R/m^{1/3}$ ; 比例比冲量  $\bar{I}$  定义为比冲量  $I$  与装药质量  $m$  的 1/3 次方的比值, 即  $I/m^{1/3}$ ; 比例到达时间  $\bar{t}_a$  定义为到达时间  $t_a$  与装药质量  $m$  的 1/3 次方的比值, 即  $t_a/m^{1/3}$ 。

从图 7 可以看出, 3 种海拔条件下的冲击波超压数据都呈现指数衰减的趋势, 且随着海拔的升高, 不同比例距离处的超压值的变化趋势都满足  $\Delta p_{500\text{ m}} > \Delta p_{2\,500\text{ m}} > \Delta p_{4\,500\text{ m}}$ 。与海拔气压为 95 kPa 的冲击波超压数据相比: 海拔气压为 74 kPa 时, 超压平均降低约 10.1%; 海拔气压为 57 kPa 时, 超压平均降低约 17.3%。与此同时, 环境气压分别下降 22.1% 和 40.0%。因此, 环境气压每下降 20% 时, 冲击波超压平均降低约 9%。

从图 8 可以看出, 初始环境压力的下降对比例比冲量的数值产生了更显著的影响, 并且比例比冲量在不同比例距离处也满足  $\bar{I}_{500\text{ m}} > \bar{I}_{2\,500\text{ m}} > \bar{I}_{4\,500\text{ m}}$  的变化趋势。与海拔气压为 95 kPa 的冲击波比例比冲量数据相比: 海拔气压为 74 kPa 时, 比例比冲量平均降低约 12.4%; 海拔气压为 57 kPa 时, 比例比冲量平均降低约 20.8%。计算可得, 气压每下降 20% 时, 冲击波比例比冲量平均降低约 10%。

表 2 初始实验条件

Table 2 Initial experimental conditions

组别	$h/m$	$r_{sp}/mm$	$m_{sp}/kg$	$p_h/kPa$	$T_h/K$
1	500	35	0.292	94.51	310.35
2	500	35	0.291	95.02	299.95
3	2 500	35	0.292	74.05	299.85
4	2 500	35	0.291	73.99	298.75
5	4 500	35	0.292	57.01	299.25
6	4 500	35	0.291	57.08	301.75
7	500	25	0.107	95.03	299.05
8	500	25	0.106	94.90	299.65
9	2 500	25	0.106	74.07	302.15
10	2 500	25	0.107	73.97	302.35
11	4 500	25	0.105	57.05	297.25
12	4 500	25	0.105	57.02	305.25

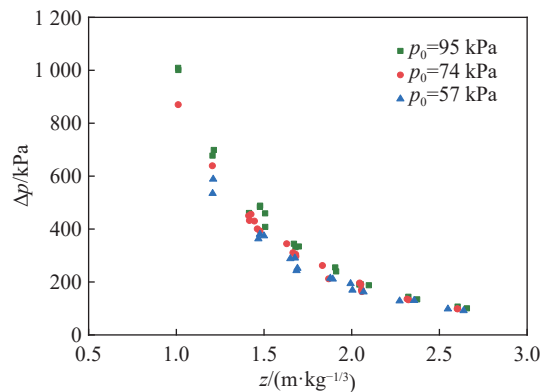


图 7 不同初始气压下, 不同比例距离处的冲击波超压实验数据

Fig. 7 Experimental blast wave overpressures at different scale distances under different initial atmospheric pressures

从图 9 可以看出, 随着气压的下降, 冲击波到达时间的变化趋势线从上至下依次排列, 并随比例距离的增大而单调增大。与海拔气压为 95 kPa 时的冲击波到达时间数据相比: 海拔气压为 74 kPa 时, 冲击波到达时间平均降低约 5.6%; 海拔气压为 57 kPa 时, 冲击波到达时间平均降低约 14.2%。计算可得, 气压每下降 20% 时, 冲击波到达时间平均降低约 6%。

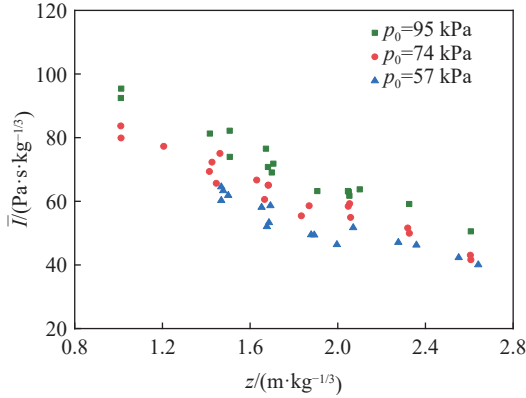


图 8 不同初始气压下, 不同比例距离处的冲击波比例比冲量的实验数据

Fig. 8 Experimental blast wave scaled specific impulses at different scaled distances under different initial atmospheric pressures

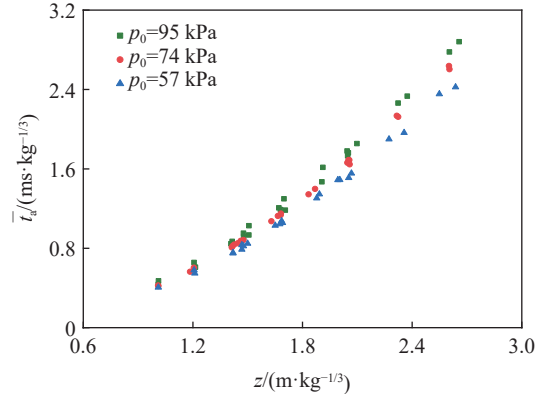


图 9 不同初始气压下, 不同比例距离处的冲击波到达时间的实验数据

Fig. 9 Experimental blast wave scaled arrival times at different scaled distances under different initial atmospheric pressures

值得注意的是, 不同比例爆距处的冲击波参数降低幅度存在差别。

Kinney 等<sup>[15]</sup> 基于实验数据提出冲击波超压计算公式:

$$\frac{\Delta p}{p_h} = \frac{808 \left[ 1 + \left( \frac{z}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left( \frac{z}{0.048} \right)^2} \sqrt{1 + \left( \frac{z}{0.32} \right)^2} \sqrt{1 + \left( \frac{z}{1.35} \right)^2}} \quad 0.053 \text{ m/kg}^{1/3} \leq z \leq 500 \text{ m/kg}^{1/3} \quad (4)$$

式中:  $\Delta p$  和  $p_h$  分别为冲击波超压和环境压力, kPa;  $z=R/m^{1/3}$  为比例距离,  $\text{m/kg}^{1/3}$ 。Kinney 公式<sup>[15]</sup> 也被用来估算实验中的冲击波参数<sup>[18]</sup>。将模拟海拔气压条件  $h=500 \text{ m}$  的实验结果与公式 (4) 的估算结果进行对比, 如图 10 所示。

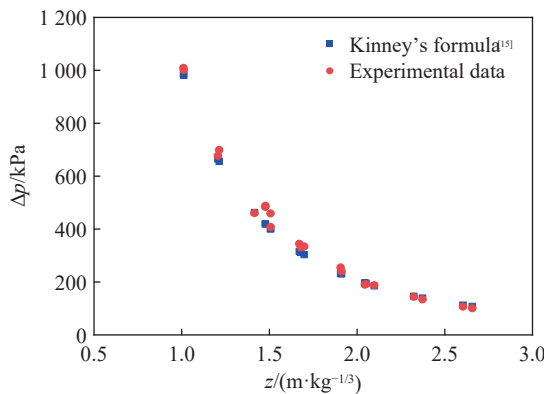


图 10 Kinney 公式的计算结果与实验数据对比

Fig. 10 Comparison of the results calculated by Kinney's formula<sup>[15]</sup> with experimental data

从图 10 可以看到, Kinney 公式<sup>[15]</sup> 估算的冲击波超压与实验数据符合比较好。海拔  $h=500 \text{ m}$  时, 气压约为 95 kPa, 与海平面的气压条件相近, 之间仅相差 5.9%。因此, 超压数据也与平原冲击波参数的计算结果接近。

基于 Sachs 比例定律<sup>[3]</sup>, Swisdak<sup>[19]</sup> 提出了考虑大气初始压力和温度影响的入射冲击波超压、反射冲击波超压、比冲量、到达时间和持续时间、比例距离的环境影响修正方法:

$$\Delta p_h = \Delta p_{ref} S_p, \quad \Delta p_{r,h} = \Delta p_{r,ref} S_p, \quad I_h = I_{ref} S_i, \quad t_{a,h} = t_{a,ref} S_t, \quad t_{d,h} = t_{d,ref} S_t, \quad z_h = z_{ref} S_d \quad (5)$$

式中:  $S_p = p_h / p_{ref}$  为压力修正因子,  $S_i = (p_h / p_{ref})^{2/3} (T_{ref} / T_h)^{1/2}$  为比冲量修正因子,  $S_t = (p_h / p_{ref})^{1/3} (T_{ref} / T_h)^{1/2}$  为时间修正因子,  $S_d = (p_h / p_{ref})^{1/3}$  为比例距离修正因子; 所有物理量中, 带下标  $h$  的表示参数在高海拔  $h$  高度处的值, 带下标  $ref$  的表示参数在参考海拔高度处的值。

选取初始气压  $p_h = 95 \text{ kPa}$  ( $h = 500 \text{ m}$ ) 的实验数据作为参考值, 利用式 (5) 的修正方法计算不同初始气压时的冲击波超压、比冲量和到达时间, 并与实验值进行对比, 结果如图 11 ~ 13 所示。

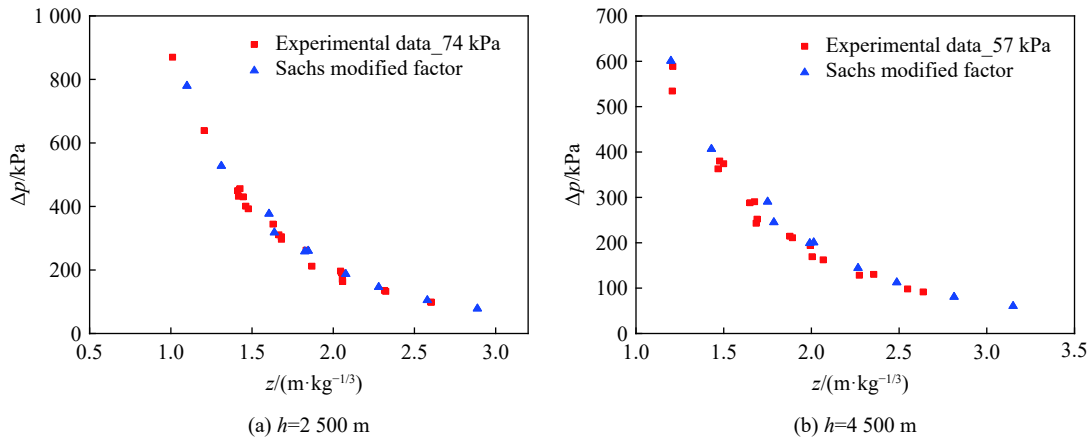


图 11 不同海拔条件下, 不同比例距离处, 冲击波超压修正值与实验值的对比

Fig. 11 Comparison of modified and experimental blast wave overpressures at scaled distances under different altitudes

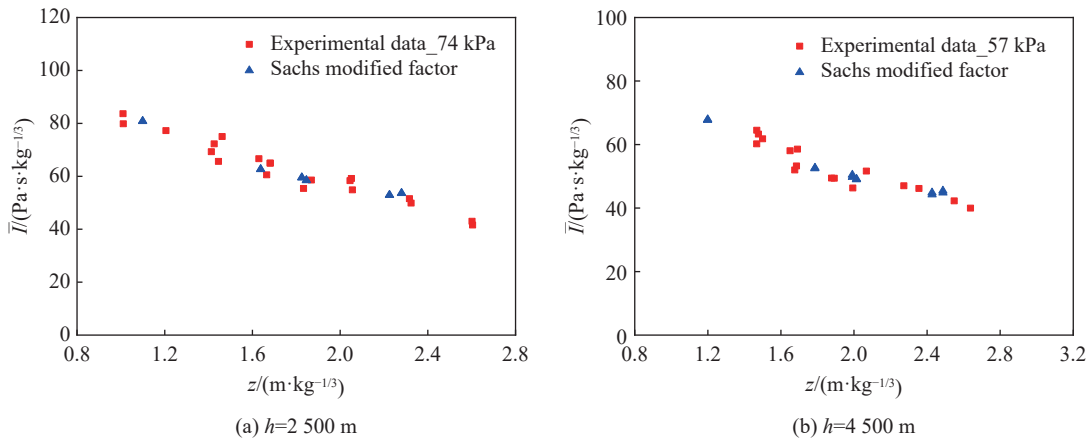


图 12 不同海拔条件下, 不同比例距离处, 冲击波比例比冲量的修正值与实验值的对比

Fig. 12 Comparison of modified and experimental blast wave scaled specific impulses at scaled distances under different altitudes

以图 12 为例, 虽然比冲量的实验数据表现出一定的波动, 而修正的结果处于平均值附近。从图中可以看到, 使用 Sachs 修正方法得到的结果与实验数据符合得很好。该结果表明, 在得到某一战斗部在一定海拔的爆炸冲击波参数后, 可利用该修正方法推广得到不同环境条件下的冲击波参数。Sachs 修正方法考虑了环境气压和温度的影响, 而高海拔地区的大气环境与平原环境之间的主要差异在于大气压力和温度存在显著的变化。因此该修正方法对于高原地区的装药爆炸威力估计有着重要的意义。



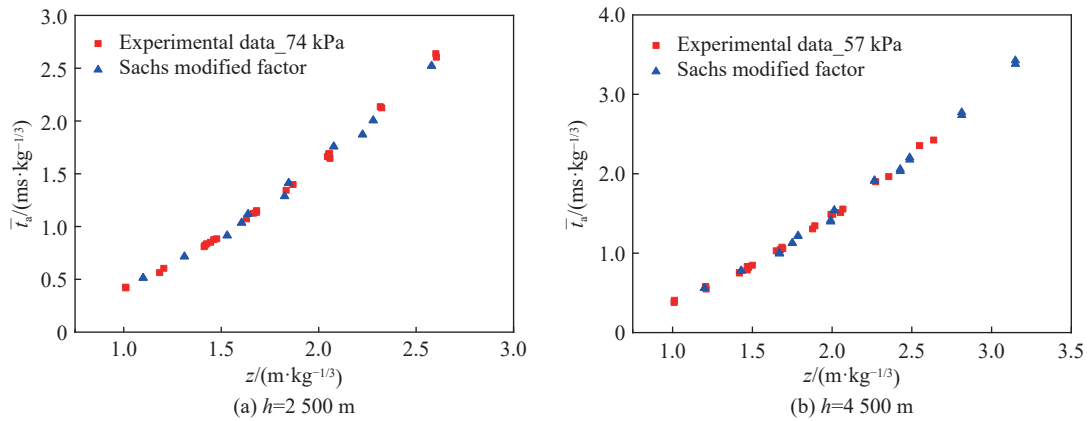


图 13 不同海拔条件下,不同比例距离处,冲击波到达时间的修正值与实验值的对比

Fig. 13 Comparison of modified and experimental blast wave arrival time at scaled distances under different altitudes

第 1~2 组 (SR35) 和第 11~12 组 (SR25) 实验的时环境气温发生了较大的改变, 温度分别相差  $10.4$  和  $8.0\text{ }^\circ\text{C}$ , 相比而言, 初始气压的变化量最大值仅为  $0.5\text{ kPa}$ 。图 14~16 分别给出了第 1~2 组和第 11~12 组实验中环境温度对超压、比冲量和到达时间的影响。

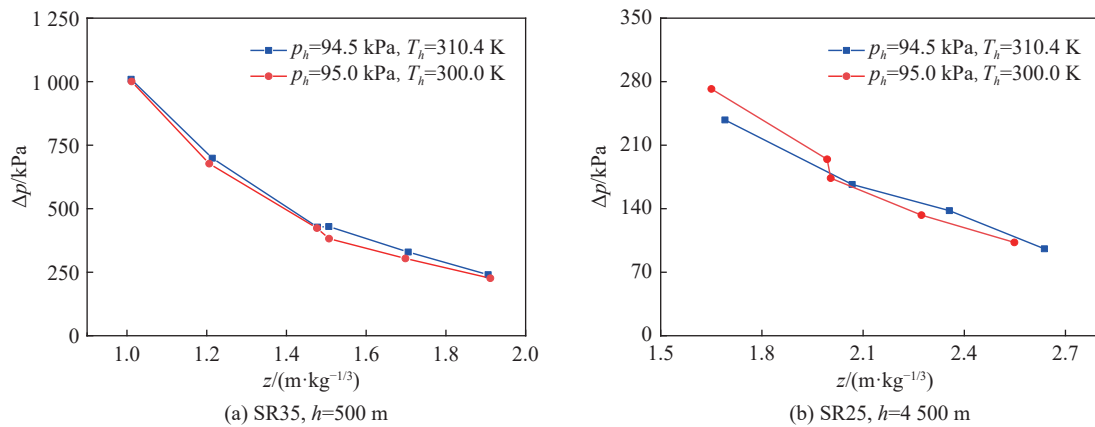


图 14 环境温度对冲击波超压的影响

Fig. 14 Effect of ambient temperature on blast wave overpressure

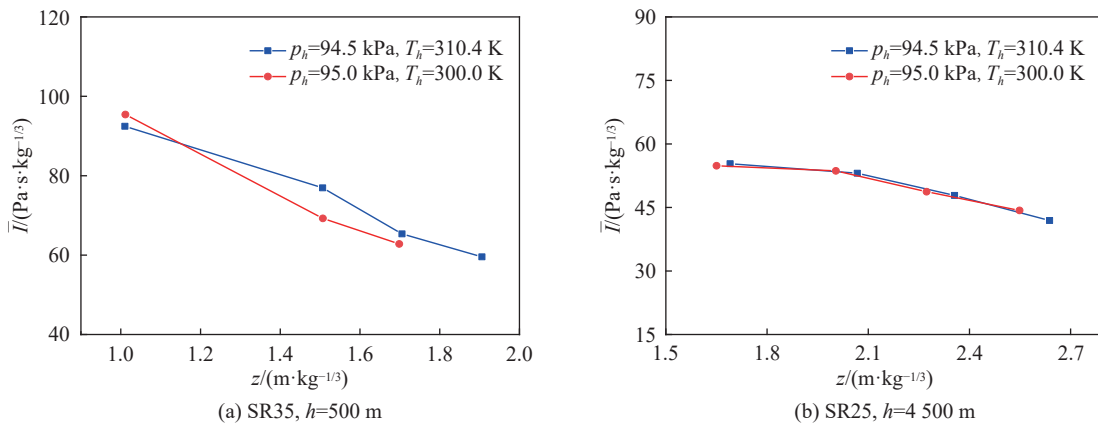


图 15 环境温度对冲击波比冲量的影响

Fig. 15 Effect of ambient temperature on blast wave specific impulse

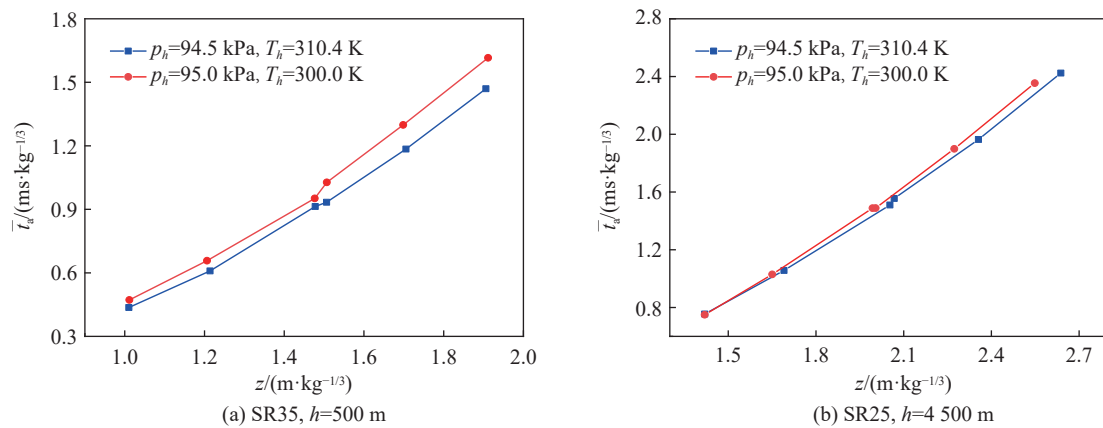


图 16 环境温度对冲击波到达时间的影响

Fig. 16 Effect of ambient temperature on blast wave arrival time

从图 14~15 可以看出, 此范围内的初始温度变化对超压和比冲量的影响并不显著: 一方面可能是因为同一组爆炸数据可利用的数据数量不足; 另一方面可能是因为超压和比冲量数据对温度的敏感度较低, 而冲击波测试的精度往往难以达到很高, 温度的实际影响容易被实验误差所掩盖。而从图 16 可以看到, 环境温度的改变使到达时间规律性变化。初始环境温度较高时, 到达时间较小, 并且实验温度差越大, 到达时间减小的幅度越大。需要指出的是, 因为测量系统的响应时间往往是微秒级的, 相对于毫秒级的到达时间而言, 误差相对小得多, 因此到达时间  $t_a$  的测量精度是 3 个冲击波参数之中最高的, 从而到达时间曲线显著地反映了温度的影响。

### 3 结束语

首先分析了海拔因素对大气条件产生的影响, 获得了高海拔大气的特征参数表达式。为研究环境参数对冲击波传播的影响, 开展了一项模拟  $h=500, 2\ 500, 4\ 500\text{ m}$  高原大气压的爆炸冲击波测试实验。实验结果表明, 随着大气压的下降, 冲击波超压、比冲量和到达时间都随之而降低。当环境气压每下降 20% 时, 冲击波超压、比冲量和到达时间平均降低约 9%、10% 和 6%。利用测试结果对 Swisdak 等提出的冲击波参数环境影响修正方法进行了检验, 该修正方法能较好地预测不同初始条件下的冲击波参数。最后讨论了温度对冲击波参数的影响, 发现初始温度升高会使冲击波到达时间随之减小, 但在本文实验条件下, 温度对超压和比冲量的影响不显著。

### 参考文献:

- [1] 邓国强. 常规爆炸空气冲击波参数海拔高度影响分析 [J]. 防护工程, 2019, 41(3): 26–32.  
DENG G Q. Analysis on the altitude effects of air shock wave parameters of conventional explosion [J]. Protective Engineering, 2019, 41(3): 26–32.
- [2] SILNIKOV M V, CHERNYSHOV M V, MIKHAYLIN A I. Blast wave parameters at diminished ambient pressure [J]. *Acta Astronautica*, 2015, 109: 235–240. DOI: 10.1016/j.actaastro.2014.12.007.
- [3] SACHS R G. The dependence of blast on ambient pressure and temperature: 466 [R]. Aberdeen Proving Ground, MD, USA: Ballistic Research Laboratories, 1944.
- [4] DEWEY J, SPERRAZZA J. The effect of atmospheric pressure and temperature on air shock: 721 [R]. Aberdeen Proving Ground, MD, USA: Ballistic Research Laboratories, 1950.
- [5] VELDMAN R L, NANSTEEL M W, CHEN C C T, et al. The effect of ambient pressure on blast reflected impulse and overpressure [J]. *Experimental Techniques*, 2017, 41(3): 227–236. DOI: 10.1007/s40799-017-0171-8.
- [6] 朱冠南, 王争论, 马佳佳, 等. 低压环境下膛口冲击波实验研究 [J]. *兵工学报*, 2014, 35(6): 808–813. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.06.009.

- ZHU G N, WANG Z L, MA J J, et al. Research on muzzle shock wave in low pressure environment [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(6): 808–813. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.06.009.
- [7] IZADIFARD R A, FOROUTAN M. Blastwave parameters assessment at different altitude using numerical simulation [J]. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 2010, 34(1): 25–41. DOI: 10.3906/muh-0911-39.
- [8] 李科斌, 李晓杰, 闫鸿浩, 等. 不同真空度下空中爆炸近场特性的数值模拟研究 [J]. *振动与冲击*, 2018, 37(17): 270–276. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.17.038.
- LI K B, LI X J, YAN H H, et al. Numerical simulation for near-field characteristics of air explosion under different degrees of vacuum [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(17): 270–276. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.17.038.
- [9] 聂源, 蒋建伟, 门建兵. 考虑环境温、湿度的球形装药爆炸冲击波参数计算模型 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(4): 735–742. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0340.
- NIE Y, JIANG J W, MEN J B. Calculation models for parameters of spherical charge blasting shock wave considering ambient temperature and humidity [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(4): 735–742. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0340.
- [10] 庞春桥, 陶钢, 周佩杰, 等. 高原环境下爆炸冲击波参数的有效预测方法 [J]. *振动与冲击*, 2018, 37(14): 221–226. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.14.031.
- PANG C Q, TAO G, ZHOU P J, et al. Effective method for predicting the parameters of shock waves in plateau environment [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(14): 221–226. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.14.031.
- [11] 钱翼稷. 空气动力学 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [12] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0645.2013.06.002.
- HOU J L, JIANG J W, MEN J B, 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. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0645.2013.06.002.
- [13] 杜红棉, 祖静, 马铁华, 等. 自由场传感器外形结构对冲击波测试的影响研究 [J]. *振动与冲击*, 2011, 30(11): 85–89. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2011.11.018.
- DU H M, ZU J, MA T H, et al. Effect of mount configuration of free-field transducers on shock wave measurement [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(11): 85–89. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2011.11.018.
- [14] BAKER W E, COX P A, WESTINE P S, et al. *Explosion hazards and evaluation* [M]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Scientific Pub. Co., 1983.
- [15] KINNEY G F, GRAHAM K J. *Explosive shocks in air* [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-86682-1.
- [16] ISMAIL M M, MURRAY S G. Study of the blast wave parameters from small scale explosions [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1993, 18(1): 11–17. DOI: 10.1002/prop.19930180103.
- [17] 张立恒, 王少龙, 颜澎, 等. 爆炸冲击波测试数据处理方法研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2010, 30(3): 107–110. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2010.03.032.
- ZHANG L H, WANG S L, YAN P, et al. Study on blast wave test data processing methods [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2010, 30(3): 107–110. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2010.03.032.
- [18] 中国工程物理研究院, 第二炮兵驻中国工程物理研究院型号办, 第二炮兵装备研究院, 等. 面杀伤导弹战斗部静爆威力试验方法: 第 3 部分: 冲击波超压测试: GJB 6390.3—2008 [S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2008.
- [19] SWISDAK JR M M. *Explosion effects and properties: part 1: explosion effects in air* [R]. Silver Spring, MD, USA: Naval Surface Weapons Center White Oak Lab, 1975.

(责任编辑 张凌云)