

文章编号: 1003-1480 (2025) 01-0062-08

高原环境爆炸冲击波传播规律及计算模型研究

赵伟成, 翟红波, 李尚青, 毛伯永

(西安近代化学研究所, 陕西 西安, 710065)

摘要: 为研究高原地区的低温低压环境对冲击波传播特性的影响, 在海拔 1 500, 3 000, 4 500 m 环境下开展了 TNT 爆炸试验, 并使用有限元软件对高原环境 TNT 的爆炸冲击波进行数值仿真计算, 分析了不同海拔对冲击波传播特性的影响规律。对比了 Sadvoskyi, Kinney-Graham 和 Sachs 修正公式的超压峰值和比冲量计算结果与试验结果, 并采用 Sachs 修正中的温度修正项对 Sadvoskyi 高原超压峰值公式进行了修正。研究表明: 随着海拔的升高, 冲击波的波阵面速度加快, 到达时间提前, 每升高 1 km, 冲击波超压峰值下降约 2%~4%, 比冲量下降约 4%; 对超压峰值进行修正时, 3 种修正公式均具有一定的准确性; 对比冲量进行修正时, Kinney-Graham 修正的比冲量值随比例距离增加呈线性降低, 与试验结果吻合较差, 庞春桥与 Sachs 的修正结果随比例距离增加呈指数降低; 基于温度项修正的 Sadvoskyi 高原冲击波超压峰值经验公式的平均误差减小了 3.1%。该研究结果对于高海拔地区的弹药毁伤效能评估有参考意义。

关键词: 爆炸试验; 高原环境; 冲击波; 传播特性; 计算模型

中图分类号: TJ410; O382 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2025.01.011

Research on the Propagation Law and Calculation Model of Explosion Shock Wave in Plateau Environment

ZHAO Wei-cheng, ZHAI Hong-bo, LI Shang-qing, MAO Bo-yong

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

Abstract: In order to study the impact of low-temperature and low-pressure environment on the propagation characteristics of shock waves in plateau areas, TNT explosion tests were conducted at altitudes of 1 500, 3 000, 4 500 m. Finite element software was used to numerically simulate the explosion shock waves of TNT in plateau environments, and the influence of different altitudes on the propagation characteristics of shock waves was analyzed. The calculation results of overpressure peak value and specific impulse of Sadvosky, Kinney-Graham, and Sachs correction formulas were compared with test results, and the temperature correction term in Sachs correction was used to correct the Sadvoskyi plateau overpressure peak formula. The results show that as the altitude increases, the front velocity of the shock wave accelerates and the arrival time advances, the overpressure peak value of the shock wave decreases by about 2%~4% and the specific impulse decreases by about 4% every 1 km. As correcting the overpressure peak, all three correction formulas have certain accuracy. In terms of specific impulse correction, Kinney-Graham's corrected specific impulse value linearly decreases with proportional distance increasing, which is in poor agreement with test results, while the correction results for Pang Chunqiao and Sachs show an exponential decrease tendency. The average error of Sadvoskyi plateau overpressure peak empirical formula based on temperature correction term is reduced by 3.1%. The research results have certain reference significance for the evaluation of ammunition damage efficiency in high-altitude areas.

Key words: Explosion test; Plateau environment; Shock wave; Propagation characteristics; Computational model

近年来, 随着我国周边的安全形势变化, 对武器装备在多元化作战条件下的适应能力提出了新的要

收稿日期: 2023-11-21

作者简介: 赵伟成 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事毁伤评估技术研究。

通讯作者: 翟红波 (1987-), 男, 研究员, 主要从事毁伤评估技术研究。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (No.12102337)。

引用本文: 赵伟成, 翟红波, 李尚青, 等. 高原环境爆炸冲击波传播规律及计算模型研究[J]. 火工品, 2025(1): 62-69.

求,高原地区作为典型的低温低压环境,对于弹药的毁伤效能具有重要影响。

常规爆炸冲击波的传播机制与大气相关参数有密切联系,对高威力的非理想炸药影响尤为明显^[1]。随着海拔的升高,环境中的大气压力与温度不断降低,爆炸冲击波的波阵面速度、超压峰值等参数均发生变化。Sadovskiy^[2]结合大量的试验数据,基于环境气压变化修正了冲击波超压峰值计算公式。Kinney 等^[3]考虑了环境大气压力及温度变化影响,提出了距离和时间转换因子,并获得了基于转换因子的冲击波超压及比冲量计算模型。Sachs^[4]基于大气压力与温度的变化,提出了一种无量纲的修正方法,获得了超压、比例距离、时间和冲量的修正因子计算方法。Dewey 等^[5]在模拟海拔 0~15 km 环境下进行试验,获取了入射峰值压力及比冲量,验证了 Sachs 修正因子的有效性。国内学者庞春桥等^[6]在 Sadovskiy 公式与奥尔连科比冲量计算模型的基础上提出了修正的高原冲击波比冲量公式。陈龙明等^[7]通过密封罐模拟不同海拔的气压条件,进行爆炸冲击波测试实验,验证了 Sachs 修正因子的准确性,分析了环境气压及温度对爆炸冲击波参数的影响。李瑞等^[8]通过量纲分析,利用有限元软件分析了高海拔的低温低压环境对冲击波参数的影响规律,并建立了相应的计算公式。

本研究在海拔 1 500, 3 000, 4 500 m 环境下进行了 TNT 爆炸试验,拟基于试验结果对 Sadovskiy、Kinney-Graham 及 Sachs 3 种高原爆炸冲击波修正公式进行对比,并使用有限元软件对不同环境气压参数下爆炸冲击波的传播规律进行数值模拟计算,分析高原环境参数对爆炸冲击波传播特性的影响规律,为高海拔地区的弹药毁伤效能评估提供参考。

1 高原静爆试验研究

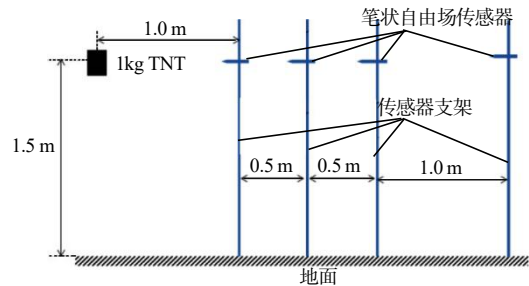
1.1 试验方案

为研究高海拔地区冲击波传播规律,在海拔 1 500, 3 000, 4 500 m 处分别进行了 2 发 1 kg TNT 的空中爆炸试验。将 TNT 吊装在距离地面 1.5 m 处,在

与爆心水平距离 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 m 处放置传感器支架,在支架距地面 1.5 m 高度处放置笔状自由场传感器,传感器尖端正对 TNT 装药。传感器型号及参数如表 1 所示,其布置示意图及现场照片如图 1 所示。

表 1 传感器型号及参数

比例距离 $Z/(m \cdot kg^{1/3})$	传感器型号	灵敏度 $/(mV \cdot MPa^{-1})$
1.0	PCB 137B22-SN13900	1.418
1.5	PCB 137B23-SN13864	14.410
2.0	PCB 137B23-SN14652	13.350
3.0	PCB 137B23-SN14651	14.180



(a) 传感器布置示意图



(b) 现场照片

图 1 传感器布置示意图及现场照片

Fig.1 Schematic diagram of sensor layout and site photos

1.2 试验结果

通过在海拔 1 500, 3 000, 4 500 m 处进行 TNT 爆炸试验,获得超压—时程曲线,如图 2 所示。由于在海拔 3 000 m 与 4 500 m 处试验时 3 m 处放置的传感器未测得有效数据,在分析时仅使用 1.0, 1.5, 2.0 $m \cdot kg^{1/3}$ 位置处的测试结果。对试验结果进行处理,获得的不同海拔处 1 kg TNT 爆炸产生的冲击波参数(超压峰值、正压作用时间及比冲量),如表 2 所示。

基于试验结果开展数值仿真计算,分析不同海拔处的冲击波传播规律。另外,使用 Sadovskiy、Kinney-Graham 及 Sachs 修正公式对试验海拔处的冲击波参数进行计算,对比 3 种经验公式的修正结果。

表2 不同海拔处1 kg TNT 爆炸冲击波参数

Tab.2 Shockwave parameters of 1 kg TNT explosion at different altitudes

海拔 <i>h</i> /m	比例距离 <i>Z</i> (m · kg ^{-1/3})	超压峰值 Δp_m /MPa	正压作用时 间 <i>t</i> -/ms	比冲量 <i>i</i> / (Pa·s)
1 500	0.90	1.008	0.576	149.92
	1.41	0.377	1.311	109.40
	1.96	0.189	1.776	70.36
3 000	0.94	1.085	0.731	138.91
	1.45	0.319	1.071	96.58
	1.92	0.213	1.488	74.12
4 500	0.92	0.967	0.686	158.85
	1.43	0.297	0.979	93.82
	1.92	0.174	1.454	69.07

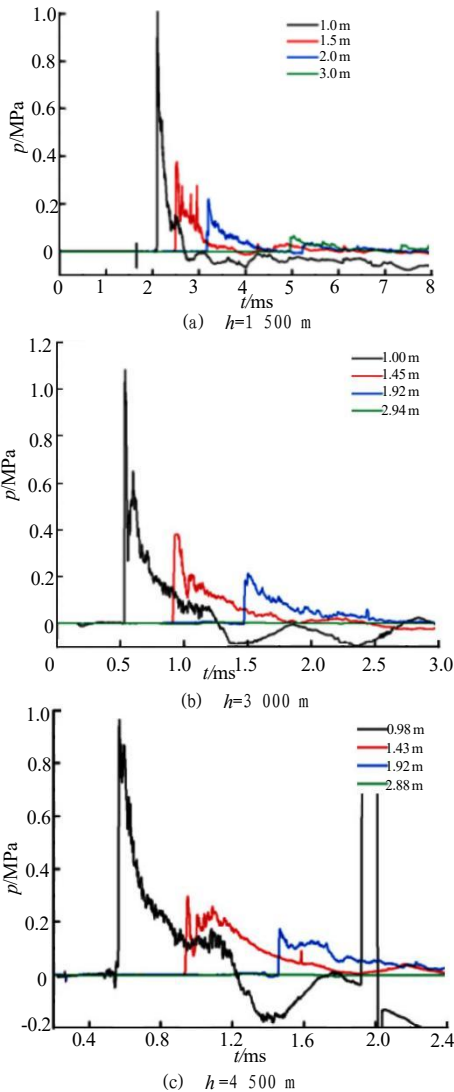


图2 不同海拔1 kg TNT 爆炸冲击波超压时程曲线

Fig.2 Overpressure vs time curve of shock wave of 1 kg TNT explosion at different altitude

2 不同海拔爆炸冲击波传播规律的数值模拟研究

2.1 数值仿真模型

使用 Autodyn 有限元计算软件, 建立 1 kg TNT

爆炸的一维楔形模型, 空气域半径为 3.1 m, TNT 采用长径比为 1 : 1 的柱形装药, 模型外表面设定为透射边界, 建立的有限元模型如图 3 所示。

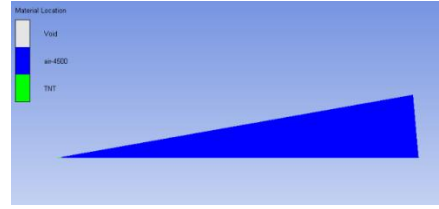


图3 高原环境 TNT 爆炸的有限元模型

Fig.3 Finite element model of TNT explosion in plateau environment

2.2 炸药及空气材料参数与状态方程

2.2.1 TNT 材料模型及状态方程参数

TNT 炸药爆炸的产物压力采用 JWL 状态方程进行描述, 其爆炸冲击波压力表达式^[9]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(1)中: P 为爆轰产物的压力; E 为单位体积内能; V 为相对体积; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为常数。具体参数设置如表 3 所示。

表3 TNT 炸药材料参数^[10-11]

Tab.3 TNT explosive material parameters

ρ /(kg · m ⁻³)	E_0 /GPa	P_{C1} /GPa	D		B /GPa	R_1	R_2	ω
			i (km · s ⁻¹)	A /GPa				
1 630	7.0	19.4	6.88	373.8	3.75	4.15	0.9	0.35

2.2.2 空气材料模型及状态方程参数

炸药在空气中爆炸时, 空气作为冲击波传播的介质, 其特征参数影响着冲击波的传播特性。当海拔产生变化时, 环境气体的物理特性及其相关参数会发生改变。基于标准大气的相关规定, 对不同海拔处的大气参数(温度、压力、密度、声速)按式(2)进行计算^[12]。

$$T_h = 288.15 - 6.5 h, \quad 0 \text{ km} \leq h \leq 11 \text{ km}$$

$$p_h = p_0 \left(\frac{T_h}{T_0} \right)^{5.25588}$$

$$\rho_h = \rho_0 \left(\frac{T_h}{T_0} \right)^{4.25588} \quad (2)$$

使用 Autodyn 进行计算时, 空气模型采用 Ideal gas 状态方程进行描述^[13]:

$$p = (\gamma - 1) \rho e \quad (3)$$

式(3)中: p 为大气压力; ρ 为空气密度; γ 为理想气体绝热指数; e 为空气的初始比内能。

另外, Ideal gas 中的参数包含空气的比热容, 其计算公式^[4]为:

$$c_v = \frac{e}{T} \quad (4)$$

式(4)中: c_v 为空气的比热容; T 为空气的绝对温度。

对于 1 500, 3 000, 4 500 m 海拔处, 空气的绝热指数 $\gamma=1.4$, 此时不同海拔对应的大气参数及计算得到的 e 、 c_v 数值如表 4 所示。

表 4 不同海拔下空气的特性参数

h /m	p /kPa	ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	T /K	e /($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	C_v /($\text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}^{-1}$)
0	101.33	1.23	288.15	2.068e5	714.75
1 500	84.56	1.06	278.40	1.994e5	714.51
3 000	70.11	0.91	268.65	1.926e5	714.32
4 500	57.73	0.78	258.90	1.850e5	714.16

2.3 网格尺寸收敛性分析

基于数值仿真模型, 分别计算网格尺寸为 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 mm 时 1 kg TNT 在海拔 0 m 处爆炸时, 距离爆心 1 m 处 (比例距离 $1 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$) 的超压峰值, 结果如图 4 所示。

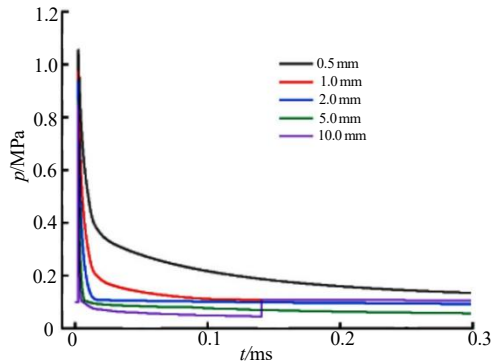


图 4 不同网格尺寸的计算结果
Fig.4 Calculation results for different mesh sizes

从图 4 的计算结果可以看出, 在 0.5~10.0 mm 范围内, 网格尺寸越小, 冲击波超压峰值的计算精度越高, 在 0.5~2.0 mm 网格尺寸范围内计算结果精度较高。由于小网格会增加计算时长, 所以在保证计算结果准确的前提下, 为了缩短计算时长, 提高计算效率, 选取网格尺寸为 1.0 mm 进行后续数值仿真计算研究。

2.4 数值模拟结果

2.4.1 地面反射超压影响

建立 $3.1 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$ 的二维空气域模型, 在炸高 1.5 m 处填充 $\phi 52.6 \text{ mm}$ 的 TNT, 在距离 TNT 中心 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 m 处分别设置测点 1~5, 获取冲击

波压力——时程曲线, 并分析爆炸冲击波的地面反射波对各测点测量结果的影响。TNT 爆炸时不同时刻的冲击波演化特性如图 5 所示。

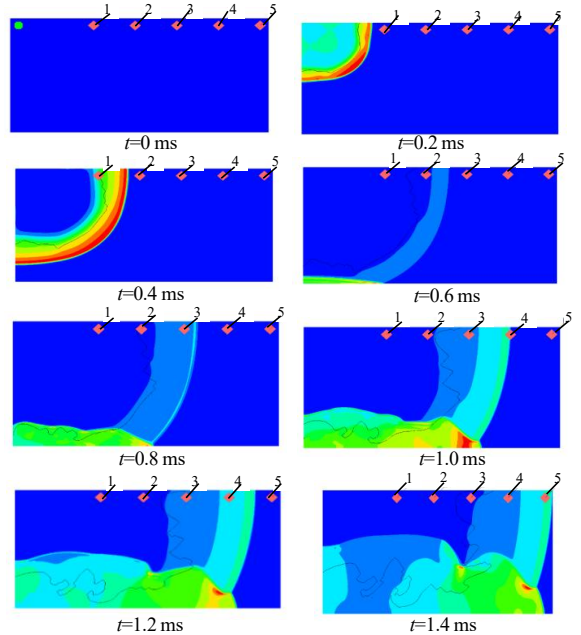


图 5 1 kg TNT 在炸高 1.5 m 处爆炸的冲击波演化过程
Fig.5 Evolution process of shock wave during explosion of 1 kg TNT at a height of 1.5 m

从图 5 中可以看出, 1 kg TNT 在炸高 1.5 m 处爆炸的冲击波演化过程中, 各测点测得的冲击波超压峰值仅为爆炸在空气中产生的入射冲击波, 地面反射冲击波对各测点的入射冲击波超压峰值测量无影响。后续数值计算结果即冲击波入射超压。

2.4.2 高原爆炸冲击波超压数值计算结果

通过数值仿真计算, 获得不同海拔下 TNT 静爆产生的超压峰值数据, 并与试验结果进行对比, 获取计算误差, 如表 5 所示。

表 5 冲击波超压峰值仿真计算结果与试验结果的误差
Tab.5 Errors of calculation results of shock wave overpressure peak and test results

h/m	$Z/(\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3})$	试验结果/MPa	仿真结果/MPa	误差/ $\mu\%$
1 500	0.90	1.008	1.069	6.1
	1.41	0.377	0.385	2.1
	1.96	0.189	0.185	-2.1
3 000	0.94	1.085	1.022	-5.8
	1.45	0.319	0.316	-0.9
	1.92	0.213	0.178	-16.4
4 500	0.92	0.967	0.972	0.5
	1.43	0.297	0.306	3.0
	1.92	0.174	0.171	-1.7

由表 5 可知, 仅在海拔 3 000 m, 比例距离为 1.92 $\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 处的试验与仿真结果误差较大, 其他工况下仿真计算结果与试验结果的误差绝对值在 6.1% 以内,

说明大气参数的设置具有一定的准确性,数值仿真计算结果能够较好地预测高原环境爆炸冲击波的传播过程。

对超压——时程曲线进行积分计算,获得 1 500, 3 000, 4 500 m 海拔下 1 kg TNT 爆炸冲击波在不同比例距离处的冲量数据。计算获得的冲击波参数如表 6 所示。

表 6 不同海拔下 1kg TNT 爆炸冲击波数值仿真计算结果
Tab.6 Numerical simulation results of 1kg TNT explosion shock wave at different altitudes

h/m		Z/(m·kg ^{-1/3})			
		1.0	1.5	2.0	3.0
0	$\Delta p_m/\text{MPa}$	0.884	0.335	0.172	0.075
	$i/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	130.171	89.517	73.095	50.558
	t_r/ms	0.753	1.001	1.350	1.776
1 500	$\Delta p_m/\text{MPa}$	0.854	0.325	0.164	0.070
	$i/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	126.018	84.638	68.858	47.593
	t_r/ms	0.830	1.022	1.383	2.182
3 000	$\Delta p_m/\text{MPa}$	0.821	0.316	0.158	0.066
	$i/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	121.931	79.942	64.554	44.654
	t_r/ms	0.960	1.226	1.662	2.313
4 500	$\Delta p_m/\text{MPa}$	0.786	0.306	0.151	0.062
	$i/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	118.482	75.773	60.440	42.188
	t_r/ms	1.001	1.134	1.486	1.999

对海拔 0, 500, 1 000, 1 500, 2 000, 2 500, 3 000, 3 500, 4 000, 4 500, 5 000 m 处 1 kg TNT 爆炸产生的冲击波进行数值模拟计算,并对计算结果汇总得到不同海拔下冲击波的超压峰值,如图 6 所示,不同海拔处的冲击波比冲量如图 7 所示。

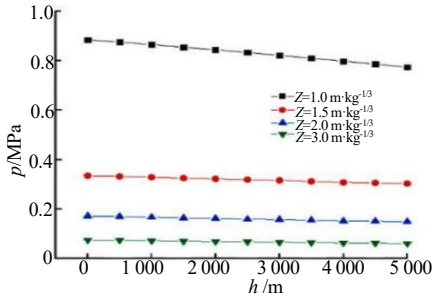


图 6 不同海拔处的冲击波超压峰值

Fig.6 Shock wave overpressure peak at different altitudes

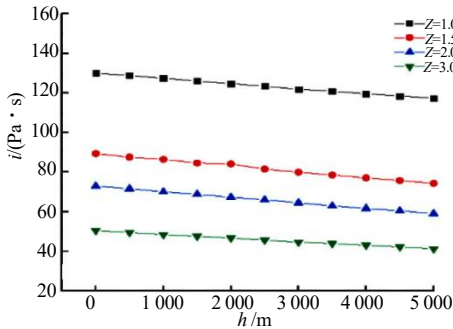


图 7 不同海拔处的冲击波比冲量

Fig.7 Specific impulse of shock wave at different altitudes

数值仿真计算结果表明,随着海拔升高,空气的

大气压、密度和温度等参数降低,爆炸产生的冲击波到达时间提前,但冲击波的超压峰值及比冲量随海拔升高呈线性降低。

随着比例距离的增大,冲击波超压峰值等参数受海拔影响逐渐减小,3.0 m·kg^{-1/3}处,海拔每升高 1 km,超压峰值降低约 0.003 MPa,仅为 1.0 m·kg^{-1/3}的 15%。但比冲量的差值受海拔影响较小,3.0 m·kg^{-1/3}处,海拔每升高 1 km,比冲量降低约 2 Pa·s,约为 1.0 m·kg^{-1/3}处的 75%。

3 不同海拔爆炸冲击波特征参数计算

3.1 不同海拔处冲击波特征参数计算的公式

平原地区爆炸产生的冲击波特征参数经过多年的研究已经较为成熟, Brode^[14]、Henrych^[15]、Sadovskiy^[2]基于理论、数值模拟及大量的试验结果给出了不同的冲击波超压计算经验公式,但其计算精度和使用范围互有差异。这是由于早期试验的测试仪器简单,而超压测试对测试仪器的精度、灵敏度等要求较高,从而导致获得的试验结果偏差较大^[16]。因此,将高原地区的 TNT 空中爆炸试验结果与 Sadovskiy、Kinney-Graham 及 Sachs 3 种高原爆炸冲击波修正公式的计算结果进行对比,分析不同修正结果的准确性。

3.1.1 Sadovskiy 修正公式

针对高原环境下爆炸产生的冲击波传播特性, Sadovskiy 给出了超压峰值计算修正式^[2]:

$$\Delta p_{m_0} = 0.084 \frac{\sqrt[3]{w}}{r} \left(\frac{p_h}{p_0} \right)^{2/3} + 0.27 \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{r} \right)^2 \left(\frac{p_h}{p_0} \right)^{1/3} + 0.7 \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{r} \right)^3, 1 \leq \frac{r}{\sqrt[3]{w}} \leq 10 \sim 15 \quad (5)$$

式(5)中: Δp_{m_0} 为爆炸冲击波的超压峰值; w 为 TNT 当量; r 为爆距; p_h 和 p_0 分别为当地海拔与海平面处的大气压。

庞春桥等^[6]基于 Sadovskiy 高原超压峰值的修正方法和奥尔连科比冲量计算模型,给出了基于气压修正的高原冲击波比冲量计算公式:

$$i = 200 \frac{\sqrt[3]{W^2}}{R} \left(\frac{p_h}{p_0} \right)^{1/3} \quad (6)$$

Sadovskyi 公式仅考虑了高原大气压力的降低对冲击波传播特性的影响,但在高原环境中大气参数的变化大,除大气压力外,温度变化对冲击波传播过程也存在着重要的影响,使得 Sadovskyi 公式的适用范围有限。

3.1.2 Kinney-Graham 修正公式

Kinney 基于大气压力与温度参数对冲击波超压和冲量进行了修正^[3], Kinney-Graham 超压计算公式为:

$$\frac{\Delta p_{m_h}}{p} = \frac{808 \left[1 + (f_d Z / 4.5)^2 \right]}{\sqrt{1 + (f_d Z / 0.048)^2} \sqrt{1 + (f_d Z / 0.32)^2} \sqrt{1 + (f_d Z / 1.35)^2}} \quad (7)$$

$$0.053 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3} \leq Z \leq 500 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$$

式(7)中: p 为环境压力; Z 为比例距离; f_d 为距离转换因子。

$$f_d = \sqrt[3]{\frac{p_h T_0}{p_0 T_h}} \quad (8)$$

同时, Kinney 还提出了一种比冲量的换算方法:

$$i = i_0 \frac{p_h W^{1/3}}{p_0 f_t} \quad (9)$$

$$f_t = \sqrt[3]{\frac{p_h}{p_0} \frac{T_h}{T_0}} \quad (10)$$

$$i_0 = \frac{6.7 \sqrt{1 + (f_d Z / 0.23)^4}}{(f_d Z)^2 \sqrt[3]{1 + (f_d Z / 1.55)^3}} \quad (11)$$

Kinney-Graham 公式在使用距离转换因子对冲击波超压及比冲量进行修正时,同时考虑了高原地区大气压力及温度的变化,基于二者变化对高原爆炸冲击波参数进行修正。

3.1.3 Sachs 修正公式

基于多种大气参数的变化, Sachs^[4]提出了无量纲修正方法,考虑大气初始压力和温度等变化的影响, Swisdak^[5]基于 Sachs 比例定律,提出了考虑大气初始压力和温度影响的比例距离及冲击波特征参数的计算修正方法:

$$Z_h = Z_0 \times S_d; \quad \Delta p_h = \Delta p_0 \times S_p; \quad (12)$$

$$t_h = t_0 \times S_t; \quad i_h = i_0 \times S_i$$

式(12)中: Z_h 、 Δp_h 、 t_h 、 i_h 分别为海拔 h 处的比例距离、超压峰值、正压作用时间和比冲量; Z_0 、 Δp_0 、 t_0 、 i_0 分别为海平面位置处的比例距离、超压峰

值、正压作用时间和比冲量; S_d 、 S_p 、 S_t 、 S_i 分别为比例距离、超压峰值、正压作用时间和比冲量的修正因子。修正因子的计算方式如下:

$$S_d = (p_0 / p_h)^{1/3}; \quad S_p = p_h / p_0; \quad (13)$$

$$S_t = (p_0 / p_h)^{1/3} (T_0 / T_h)^{1/2}; \quad S_i = (p_h / p_0)^{2/3} (T_0 / T_h)^{1/2}$$

式(13)中: T_0 为海平面处的温度; T_h 为海拔 h 处的温度。

从修正因子中可以看出, Sachs 修正公式对于超压峰值的修正与 Sadovskyi 修正公式相似,仅考虑了高原地区的大气压力的变化,但在对正压作用时间与比冲量的修正时同时考虑了大气压力与温度的变化。由于 Sachs 修正因子是基于核装药点爆炸的理想情况下获得的,其对于小当量炸药爆炸产生的冲击波的适用情况还需要进一步分析。以上3种高原冲击波参数修正方法对于高原地区战斗部的毁伤效能评估有着重要的参考价值。

3.2 不同海拔处冲击波的特征参数计算结果及对比

基于以上3种经验公式对高原爆炸冲击波的特征参数进行计算,并与试验数据进行对比。Sachs 修正使用的超压峰值和比冲量初始值由 Sadovskyi 平原冲击波超压峰值计算公式获得。

3.2.1 不同海拔处的冲击波超压峰值计算

通过不同修正公式得到的超压峰值理论计算结果如图8所示,将计算结果与试验结果进行对比并分析误差,结果如表7所示。

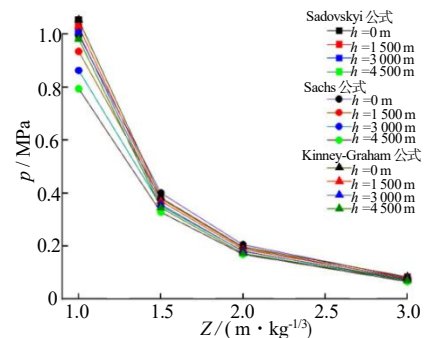


图8 不同修正方法的超压峰值计算结果
Fig.8 Calculation results of overpressure peak using different correction methods

通过对比表7中利用不同修正方法计算获得的高原爆炸冲击波超压峰值结果,可以看出当装药量较小时,在不同比例距离下, Sadovskyi 修正公式的结果

中，随着海拔的升高，相同比例距离处的超压峰值变化较小；相同海拔处 Kinney-Graham 修正公式的计算结果较小。对比 3 种修正方式的误差，可以看出基于 Sachs 修正因子得到的结果整体误差小于 Sadovskiyi 修正公式和 Kinney-Graham 修正公式的误差。

表 7 超压峰值理论计算值与试验结果的误差

Tab.7 Error between calculation value and test results of overpressure peak value

<i>h</i> /m	<i>Z</i> /(m ·kg ^{-1/3})	试验 结果 ΔP_m /MPa	Sadovskiyi ΔP_m /MPa	误差 μ_1 /%	Kinney- Graham ΔP_m /MPa	误差 μ_2 /%	Sachs ΔP_m /MPa	误差 μ_3 /%
1 500	0.90	1.008	1.357	34.6	0.935	-7.2	1.029	2.1
	1.41	0.377	0.430	14.2	0.379	0.5	0.370	-1.9
	1.96	0.189	0.197	4.3	0.194	2.6	0.188	-0.4
3 000	0.94	1.085	1.183	9.0	0.864	-20.4	1.005	-7.4
	1.45	0.319	0.389	21.8	0.381	19.4	0.389	21.8
	1.92	0.213	0.198	-7.1	0.199	-6.6	0.198	-7.1
4 500	0.92	0.967	1.226	26.8	0.828	-14.4	1.036	7.1
	1.43	0.297	0.389	31.0	0.365	22.9	0.389	31.0
	1.92	0.174	0.190	9.0	0.185	6.3	0.190	9.0

3. 2. 2 不同海拔处的冲击波比冲量计算

通过不同修正公式得到的比冲量理论计算结果如图 9 所示，将计算结果与试验结果进行对比并分析误差，结果如表 8 所示。

表 8 比冲量理论计算值与试验结果的误差

Tab.8 Error between calculation value and test results of specific impulse

<i>h</i> /m	<i>Z</i> /(m ·kg ^{-1/3})	试验 结果 <i>i</i> /(Pas)	庞春 桥 <i>i</i> /(Pas)	误差 μ_1 /%	Kinney- Graham <i>i</i> /(Pas)	误差 μ_2 /%	Sachs <i>i</i> /(Pas)	误差 μ_3 /%
1 500	0.90	149.92	209.22	39.6	107.46	-28.3	169.88	11.8
	1.41	109.40	133.54	22.1	95.59	-12.6	113.26	3.4
	1.96	70.36	96.07	36.5	80.64	14.6	84.94	17.2
3 000	0.94	138.91	188.18	35.5	95.51	-31.2	143.34	3.1
	1.45	96.58	121.99	26.3	85.61	-11.4	98.86	2.3
	1.92	74.12	92.13	24.3	74.77	0.8	74.66	0.7
4 500	0.92	158.85	180.22	13.5	85.31	-46.3	122.67	-29.5
	1.43	93.82	115.94	23.6	77.49	-17.4	84.07	-11.6
	1.92	69.07	86.35	25.0	68.09	-1.4	62.61	-10.3

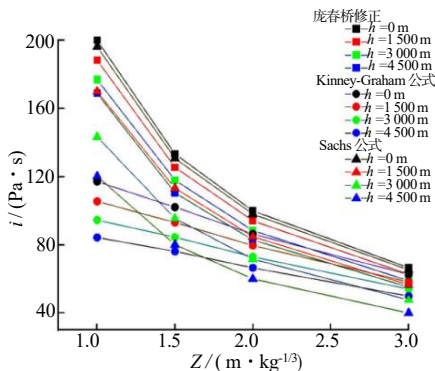


图 9 不同修正公式的比冲量计算结果

Fig.9 Calculation results of specific impulse using different correction formulas

对比利用不同修正方法计算获得的高原爆炸冲击波比冲量可以看出，Kinney-Graham 公式的计算结果中，比冲量随比例距离增加线性降低，庞春桥与

Sachs 的修正结果中比冲量随比例距离的增加呈指数降低，且在比例距离较远处 Kinney-Graham 公式的修正结果偏小，误差比庞春桥与 Sachs 的修正结果偏大。

4 不同海拔爆炸冲击波超压峰值计算模型

低温低压作为高海拔地区的典型特点，在 Sadovskiyi 与 Sachs 提出的修正方法中，针对高原冲击波超压峰值的修正仅考虑了大气压力的变化。基于 Sachs 公式修正因子中的温度项，结合试验测试结果，将 Sadovskiyi 高原冲击波超压峰值计算公式修正为式

$$\Delta p_m = 0.084 \frac{\sqrt[3]{w}}{r} \left(\frac{p_h}{p_0} \right)^{2/3} \left(\frac{T_0}{T_h} \right) + 0.27 \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{r} \right)^2 \left(\frac{p_h}{p_0} \right)^{1/3} \left(\frac{T_0}{T_h} \right)^{1/2} + 0.7 \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{r} \right)^3 \quad (14)$$

通过式 (14) 对海拔 1 500, 3 000, 4 500 m，比例距离为 1.0, 1.5, 2.0 m · kg^{-1/3} 位置处的冲击波超压峰值进行计算，将获得的超压峰值与试验数据进行对比，结果如表 9 所示。

表 9 修正公式计算值与试验数据对比

Tab.9 Comparison between calculation value of modified formula and test data

<i>h</i> /m	<i>Z</i> /(m · kg ^{-1/3})	Δp_m /MPa	Δp_{ms} /MPa	误差 μ_6 /%	平均 误差 $\bar{\mu}_d$ /%	Δp_{mT} /MPa	误差 μ_T	平均 误差 $\bar{\mu}_T$ /%
1 500	0.90	1.008	1.029	34.6		1.339	32.9	
	1.41	0.377	0.370	14.2		0.423	12.1	
	1.96	0.189	0.188	4.3		0.193	2.0	
3 000	0.94	1.085	1.005	9.0		1.153	6.3	
	1.45	0.319	0.389	21.8	15.4	0.375	17.6	12.3
	1.92	0.213	0.198	-7.1		0.190	-11.0	
4 500	0.92	0.967	1.036	26.8		1.183	22.4	
	1.43	0.297	0.389	31.0		0.370	24.6	
	1.92	0.174	0.190	9.0		0.178	2.5	

注： Δp_m 为试验测试结果； Δp_{ms} 为 Sadovskiyi 高原冲击波超压峰值修正公式计算结果； Δp_{mT} 为加入了温度修正项的 Sadovskiyi 高原冲击波超压峰值修正公式计算结果。

表 9 中对误差结果取绝对值计算平均误差，由于 $h=1 500$ m, $Z=1$ m · kg^{-1/3} 处误差大于 30%，计算时不予考虑。

从表 9 中的误差结果可以看出，结合了 Sachs 修正因子中的温度修正项后，Sadovskiyi 高原冲击波超压峰值经验计算公式与试验结果吻合较好，不同海拔超压峰值的计算结果的平均误差降低了 3.1%。即针对不同海拔下爆炸产生的冲击波，该公式能够较好地

计算出其在较近比例距离处的超压峰值。

5 结论

为研究不同海拔处爆炸冲击波的传播规律,在海拔 1 500, 3 000, 4 500 m 处开展了 TNT 的静爆试验,并通过有限元软件对不同海拔处冲击波的传播过程进行数值仿真计算,获取了海拔对冲击波传播特性的影响规律。另外,基于试验结果,对比了不同高原冲击波特征参数计算的公式,获得的结论如下:

(1) 随着海拔升高,冲击波的到达时间提前,但冲击波的超压峰值及冲量降低,当海拔从 500 m 升高至 5 000 m, $Z=1 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 处的冲击波超压峰值降低了约 0.1 MPa。随着比例距离的增大,冲击波超压峰值等参数受海拔影响逐渐减小。

(2) 经验公式在计算冲击波特征参数时均具有一定的准确性,对超压峰值进行修正时, Sadvoskyi 与 Sachs 都采用气压比作为修正因子, Kinney-Graham 公式则额外考虑了温度的影响,在比冲量的修正上, Kinney-Graham 修正的比冲量值随比例距离增加呈线性降低,庞春桥与 Sachs 的修正结果随比例距离增加呈指数降低。

(3) 根据 Sachs 修正因子公式中的温度修正项对 Sadvoskyi 高原冲击波超压公式进行修正,提出了一种不同海拔处冲击波超压峰值的计算方法,计算结果与试验结果吻合较好。

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(03): 26-32.
- [2] Sadvoskyi M A. Mechanical action of air shock waves of explosion based on experimental data[M]. Moscow: Izd Akad Nauk SSSR, 1952.
- [3] Kinney G F, Graham K J, Raspet R. Explosive shocks in air [M]. Berlin: Springer, 1985.
- [4] Sachs R G. The dependence of blast on ambient pressure and temperature[R]. Aberdeen Proving Ground, Maryland: Tech. Rep. BRL, 1944.
- [5] Dewey J, Sperrazza J. The effect of atmospheric pressure and temperature on air shock and appendixes I and II[R]. Aberdeen Proving Ground, Maryland: Ballistic Research Laboratories, 1950.
- [6] 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.
- [7] 陈龙明, 李志斌, 陈荣, 等. 高原环境爆炸冲击波传播特性的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(05): 114-124.
- [8] 李瑞, 李孝臣, 汪泉, 等. 低温和低压环境下炸药爆炸冲击波的传播特性[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(2): 16-26.
- [9] E.L. Lee, H.C. Homig, J.W. Kury. Adiabatic expansion of high explosive detonation products[R]. California, University of California, 1968.
- [10] 宋浦, 杨凯, 梁安定, 等. 国内外 TNT 炸药的 JWL 状态方程及其能量释放差异分析[J]. 火炸药学报, 2013, 36(02): 42-45.
- [11] Lee E, Finger M, Collins W. JWL equation of state coefficients for high explosives[R]. Lawrence Livermore National Laboratory Report, 1973.
- [12] 钱翼稷. 空气动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [13] 辛春亮. 有限元分析常用材料参数手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- [14] Brode, Harold L. Blast Wave from a Spherical Charge[J]. Physics of Fluids, 1959, 2(2): 217.
- [15] Henrych J. The dynamics of explosion and its use [M]. Amsterdam: Elsevier, 1979.
- [16] 仲倩, 王伯良, 黄菊, 等. TNT 空中爆炸超压的相似律[J]. 火炸药学报, 2010, 33(4): 32-35.