

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0230

海拔高度对长直坑道内爆炸冲击波传播的影响*

李勇^{1,2}, 雒泓宇^{1,2}, 冯晓伟³, 胡宇鹏³, 张军³, 李海涛^{1,2}

1. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044;
2. 重庆大学资源与安全学院, 重庆 400044;
3. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为有效表征不同海拔坑道内爆炸冲击波的传播特征, 利用非线性显式动力学有限元软件 AUTODYN, 研究了海拔高度对长直坑道内爆炸冲击波传播的影响规律, 探讨了高海拔环境对坑道内冲击波传播的影响, 基于量纲分析, 建立了适用于不同海拔高度典型坑道内冲击波峰值超压的计算模型, 并通过数值计算进行了验证。结果表明: 随着海拔高度升高, 坑道内爆炸冲击波波阵面传播速度与径向的冲击波参数偏差增大, 平面波形成距离增加, 冲击波峰值超压降低; 在 0~4000 m 范围内, 海拔高度每升高 1000 m, 冲击波冲量降低约 0.91%。结合 Sachs 无量纲修正方法和量纲分析, 推导出不同海拔高度冲击波峰值超压的理论分析模型, 模型计算结果与数值计算结果的相对偏差不大于 10%, 能够为高海拔环境下坑道内爆炸冲击波的传播提供理论依据。

关键词: 海拔高度; 坑道; 爆炸冲击波; 量纲分析; 传播特性

中图分类号: O382.1

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Influence of altitude on the propagation of explosion shock waves in a long straight tunnel

LI Yong^{1,2}, LUO Hongyu^{1,2}, FENG Xiaowei³, HU Yupeng³, ZHANG Jun³, LI Haitao^{1,2}

1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
3. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

Abstract: To effectively characterize the propagation characteristics of the explosion shock waves in tunnels at different altitudes, nonlinear explicit dynamics finite element software AUTODYN and dimensional analysis were used to study the influence of altitude on the propagation of explosion shock waves in long straight tunnels, and the influence characteristics of high altitude environments on the propagation of shock waves in tunnels were explored. First of all, the accuracy of the computational method was verified by comparing the peak overpressure and the time of overpressure rise of the small-scale shock tube test and the numerical simulation at the same measurement point. Then based on the AUTODYN-2D Euler symmetric algorithm and standard atmospheric parameters, the shock wave parameters of TNT explosion with 10 kg TNT spherical charge explosion in a tunnel with a diameter of 2.5 m and a length of 40 m at altitudes from 0 to 4000 m were computed, which were arranged with gauges with an axial interval of 2 m and a radial interval of 0.25 m, such as plane wave formation distance, peak overpressure, shock wave front propagation velocity, impulse, etc. In the end, a polynomial theoretic calculation model for shock wave peak overpressure in a tunnel at different altitudes was proposed with coefficients least-squares fitted from numerical simulation data at sea level, and the variables were obtained by dimensional analysis and the extended Sachs scaling law. The results show that, with the increase of altitude, the deviations between the propagation

* 收稿日期: 2023-06-29; 修回日期: 2023-11-20

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(2022YFC2905700); 国家自然科学基金(12202424)

第一作者: 李勇(1985—), 男, 博士, 副教授, yong.li@cqu.edu.cn

通信作者: 冯晓伟(1985—), 男, 博士, 副研究员, xiaowei_feng@126.com

velocity of the explosion shock wave front and the radial parameters of the shock wave in the tunnel increases, the formation distance of the plane wave increases, and the peak overpressure of the shock wave decreases. Within the altitude range of 0 to 4000 m, the average value of shock wave impulse decreases by about 0.91% for every 1000 m increase. By combining the extended Sachs scaling law with dimensional analysis, a theoretical analysis model for calculating peak overpressure of shock waves at different altitudes with no more than 10% deviation is derived, which can provide a theoretical basis for explosion shock wave propagation in tunnels at high altitudes.

Keywords: altitude; tunnel; explosion shock wave; dimensional analysis; propagation property

随着国民经济的发展,高海拔地区的桥梁、隧道等基础设施建设日益增多,工程实践中常常会在有限空间内对高海拔环境下的基础设施进行爆破作业,而炸药在该种情况下的效果评估亟需理论指导^[1]。冲击波作为爆炸效果评估的重要因素^[2],其参数受到气压、温度、密度等大气参数的影响,在高海拔地区呈现出不同于平原的传播特性^[3]。为了更好地了解高海拔坑道内爆炸冲击波的传播特性,为高海拔有限空间内工程爆破效果评估提供理论指导,有必要深入研究高海拔坑道内爆炸冲击波的传播规律。

与空中爆炸冲击波形成的规则球面形状不同,坑道内爆炸冲击波的形状具有从初始三维球面波过渡为一维平面波的三段式振荡变化过程^[4-5]。近年来,坑道内爆炸冲击波的传播规律引起了学者们的广泛关注,取得了一系列有价值的研究成果。Benselama 等^[4]和 Uystepruyst 等^[5]对不同截面长直坑道内的爆炸进行了数值计算,给出了用装药量与坑道等效直径表征的平面波形成距离模型。杨科之等^[6]对长坑道中的化爆流场进行了数值计算,归纳出冲击波超压与作用时间的计算公式,并结合量纲分析得到了一般情况下的冲击波冲量计算公式。李秀地等^[7]利用 LS-DYNA 有限元软件,基于 Hopkinson 比例定律^[8]建立了按一定比例缩小的全比例模型,模拟了长坑道中冲击波的传播规律。刘晶波等^[9]根据量纲分析理论确定了影响坑道内爆炸冲击波峰值超压的主要因素,拟合得到了距离爆炸中心点一定距离处空气冲击波峰值超压的计算公式。耿振刚等^[10]利用 AUTODYN 软件建立了温压炸药与 TNT 坑道内爆炸的二维轴对称数值模型,通过 TNT 爆炸实测数据验证了数值模型的准确性,发现温压炸药爆炸冲击波在坑道内的超压与冲量高于空旷地面数倍。张玉磊等^[11]开展了不同装药量的方形坑道内爆炸试验,发现虽然临近爆心区域的冲击波峰值超压满足立方根比例定律,但冲量不满足立方根比例定律。胡涛等^[12]利用 AUTODYN 软件对爆心位置与装药量对平面波形成位置的影响开展了数值计算研究,指出爆心到坑道口距离超过 1/3 坑道直径后平面波的形成位置不受爆心与坑道口距离的影响,平面波形成位置到爆心的比例爆距与坑道半径相对爆心的比例爆距成对数关系。

目前,对高海拔环境下坑道内爆炸冲击波传播规律的研究较少,仅见一些关于高海拔环境中空爆冲击波传播规律研究的报道。Izadifard 等^[13]利用 AUTODYN 一维楔形模型模拟研究了高海拔低压环境对爆炸冲击波的影响,拟合得到了不同比例距离下海拔高度的超压与冲量修正因子。李科斌等^[14]通过改变 AUTODYN 中的空气密度模拟了低压环境下 ANFO(ammonium nitrate/fuel oil)炸药的空爆过程,发现可以用同一方程描述不同气压下的空爆近场峰值超压。李志敏等^[15]在可调真空度的小型密闭容器进行了不同气压的爆炸试验,发现在当量与爆心距不变的条件下,峰值超压随气压的降低而降低,且环境气压越低,冲击波传播越快。陈龙明等^[16]基于低压密封罐体进行了模拟多种海拔的爆炸试验,发现冲击波到达时间随气压的降低而减小,基于 Sachs 比例因子^[17]的修正方法能够较好地预测高海拔环境下的冲击波参数。Wang 等^[18]在小型密闭容器进行了不同气压的爆炸试验,发现冲击波传播速度随气压的降低而增大,爆炸气体产物总量与气压无关。汪泉等^[19]在柱形爆炸罐内开展了不同真空度的内爆试验,发现当罐体内的真空度增加时,冲击波超压与比冲量均有所降低,而初始环境压力越低,冲击波传播越快。李孝臣等^[20]在球形爆炸容器中开展了不同负压和装药量条件下的乳化炸药内爆试验,发现环境压力每降低 20 kPa,峰值超压平均下降 8.66%,且在常压下拟合的峰值超压-比冲量经验公式较传统经验公式的误差明显降低。张广华等^[21]在爆炸罐内进行了常压和真空状态下的爆炸试验,发现真空条件下正对爆炸产物传播方向所测的壁面反射压峰值和准静态压力峰值分别是侧向的 1.12 和 1.67 倍,具有明显

的方向性,而常压下所测壁面反射压峰值和准静态压力峰值分别是真空条件下的 1.74 和 5.17 倍。吴勇^[22]在球型爆炸罐中进行了不同真空度环境下的乳化炸药爆炸试验,发现乳化炸药的超压、冲量、正压作用时间等空爆参数均随真空度的升高而减小。

综上所述,对平原环境下坑道内部爆炸冲击波传播规律已有广泛研究,关于高海拔环境下爆炸冲击波的传播规律也获得了丰富的认识。然而,针对高海拔坑道内部环境中爆炸冲击波传播规律的研究工作较少,尚不足以支撑高海拔有限空间内工程爆破的爆炸作用研究。基于此,本文中,对不同海拔高度下坑道内爆炸冲击波传播特性进行数值计算分析,研究海拔环境对坑道内爆炸冲击波传播的影响规律,结合量纲分析建立海拔高度与冲击波传播的关联模型。

1 数值模拟方法

坑道爆炸现场原型试验具有成本高、周期长、反应时间极短、破坏性强、环境恶劣(高温高压)等特点,较难获得完整的冲击波传播数据。因此,数值模拟成为研究坑道内爆炸冲击波传播特性的重要手段,它可以直观地展示坑道内爆炸环境下的冲击波峰值超压、冲量、平面波形成距离等冲击波传播参量,通过定量计算和分析不同海拔环境下坑道内冲击波的传播特性,建立海拔环境参量与冲击波参量之间的关系。数值模拟的准确性和有效性需要试验验证,故首先开展了小型激波管内爆炸试验,获得了典型位置处的冲击波时程曲线。试验布局如图 1 所示,激波管总长 4 140 mm,两端出口直径分别为 103 和 87 mm。30 g 柱形 TNT 装药位于管道轴线,距口部 40 mm,直径 30 mm。在距口部 680 mm 处装有压力传感器,以测量激波管形成的冲击波超压。相应的冲击波超压演化历程($\Delta p-t$ 曲线)如图 2 所示,受激波管内爆炸出口介质流动的影响,压力传感器测试的曲线表现出明显的冲击波特征:冲击波阵面到达(t_1)之前,测试压力等于气压,超压为零;冲击波到达(t_2)后,超压经过时间 t_c 从零突跃至峰值 Δp_m ;冲击波阵面通过(t_3)后,超压呈指数衰减。

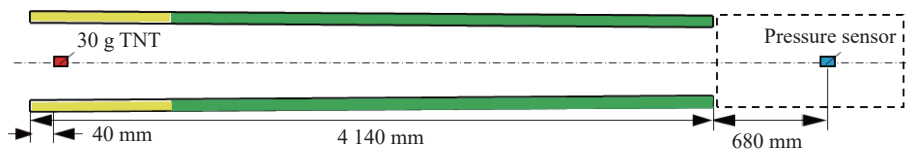


图 1 激波管试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental shock tube

数值计算的模型如图 3 所示。考虑模型的对称性,采用二维轴对称模型。空气域的尺寸为 6 240 mm×300 mm,四周采用流出边界模拟无限空气域,TNT 柱形装药位于管道内轴线上距口部 40 mm 处,网格尺寸为 2 mm×2 mm。激波管位于距空气域边界 100 mm 处,网格尺寸为 5 mm×5 mm。采用多物质流固耦合算法,其中空气与 TNT 采用 Euler 网格,激波管采用 Lagrange 网格。

TNT 炸药采用 JWL 状态方程^[23]描述,爆轰产物压力与内能、相对体积的关系为:

$$p_b = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中: p_b 为爆轰产物压力, V 为爆轰产物的相

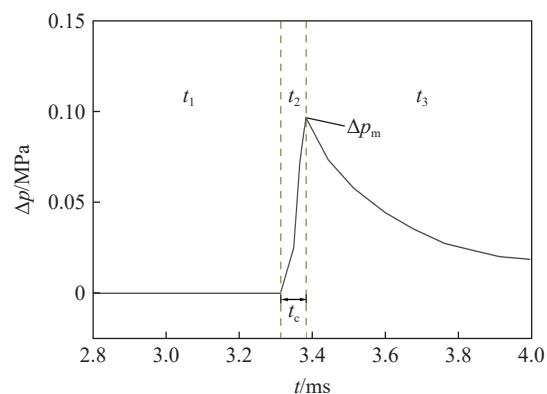


图 2 距端口 680 mm 处的冲击波超压测试曲线

Fig. 2 Curve of shock wave overpressure at 680 mm from the port

对体积, E_0 为炸药初始单位体积的内能, A 、 B 为表征爆轰产物压力的参数, R_1 、 R_2 、 ω 为无量纲特征参数。



图 3 激波管二维轴对称模型

Fig. 3 2D axisymmetric shock tube model

空气采用理想气体状态方程描述:

$$p_k = (\gamma - 1)\rho_k e_k \tag{2}$$

$$e_k = c_v T_k \tag{3}$$

式中: p_k 为空气压力, γ 为理想气体绝热指数, ρ_k 为空气密度, e_k 为空气初始比内能^[24], c_v 为空气的定容比热容, T_k 为气温。

激波管材料选用 4340 钢, 采用 Johnson-Cook 材料模型与 Linear 状态方程^[25] 描述:

$$\sigma_{eq} = (a + b\varepsilon_p^n) \left(1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_m - \theta_r} \right)^m \right] \tag{4}$$

$$p_{steel} = K \left(\frac{\rho}{\rho_{steel}} - 1 \right) \tag{5}$$

式中: σ_{eq} 为等效应力, ε_p 为等效塑性应变, $\dot{\varepsilon}$ 和 $\dot{\varepsilon}_0$ 分别为等效塑性应变率和参考应变率, θ 、 θ_r 、 θ_m 分别为材料的当前温度、室温以及材料熔化温度, a 为材料屈服强度, b 为应变硬化系数, n 为应变硬化指数, c 为应变率常数, m 为热软化系数, K 为材料的体积模量, ρ 和 ρ_{steel} 分别为材料的当前密度和初始密度, p_{steel} 为材料所受体积压力。

TNT、空气与 4340 钢材料模型参数列于表 1~3, 其中: ρ_{TNT} 为 TNT 炸药的密度, D 为爆速, p_{C-J} 为爆压。在空气域沿管道轴线距右侧管口 680 mm 处设置监测点, 以获得超压随时间的变化关系。

表 1 TNT 炸药的模型参数

Table 1 Parameters of models for TNT

$\rho_{TNT}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	p_{C-J}/GPa	E_0/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
1630	6930	21	6	374	3.75	4.15	0.9	0.35

表 2 空气模型参数

Table 2 Parameters of models for air

$\rho_k/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	γ	T_k/K	$c_v/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$e_k/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$
1.225	1.4	288.2	717.6	2.068×10^5

表 3 4340 钢模型参数

Table 3 Parameters of models for 4340 steel

$\rho_{steel}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	a/MPa	b/MPa	n	c	m	$\dot{\varepsilon}_0/\text{s}^{-1}$	θ_m/K	θ_r/K	K/GPa
7830	792	510	0.26	0.014	1.03	1	1793	288.2	159

以试验中的冲击波峰值超压与超压上升时间作为标准, 验证数值计算结果的准确性。如图 4 所示, 数值计算曲线与试验曲线的形式基本一致, 监测点峰值超压的计算值 Δp_{mn} 与试验值 Δp_{me} 分别为 103.7 和

96.5 kPa, 误差约为 6.94%; 超压上升时间的计算值 t_{cn} 与试验值 t_{ce} 分别为 68.98 和 66.79 μs , 误差约为 3.17%, 且正压持续时间 t_d 吻合得较好, 表明本研究建立的数值计算模型能够有效地模拟坑道内冲击波的传播特性。

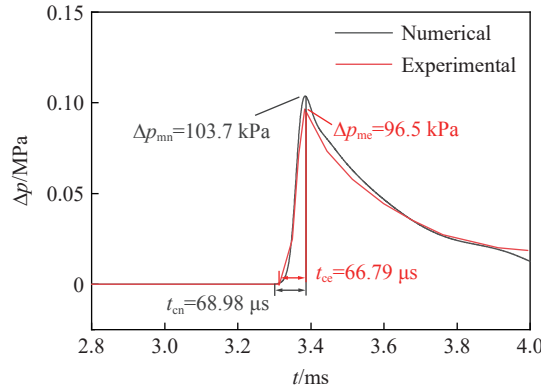


图 4 超压时程曲线的数值计算与试验结果对比

Fig. 4 Comparison between numerical simulation and experiment of overpressure-time curves

2 海拔高度对坑道内爆炸冲击波传播的影响

采用第 1 节介绍的数值模拟方法, 考虑高海拔的大气环境, 对不同海拔高度下大尺寸坑道内爆炸冲击波的传播过程进行数值模拟研究, 分析平面波的形成过程和海拔高度对平面波形成位置、峰值超压及冲量的影响规律。

2.1 高海拔坑道内爆炸冲击波的计算模型

选用的坑道直径为 2.5 m, 长为 40 m, 坑道外建立长为 40 m 的外流空气层, 以坑道左端封闭面轴心为原点建立坐标系, 建立二维轴对称坑道内爆炸数值计算模型^[26], 如图 5 所示。壁面施加刚性约束, 网格尺寸取 10 mm^[27], 10 kg 球形 TNT 装药 (位于 $x=1$ m) 在球心处起爆。沿轴向 x (4~40 m, 间隔 2 m) 和径向 y (0~1 m, 间隔 250 mm) 设置监测点, 输出冲击波的压力时程曲线。

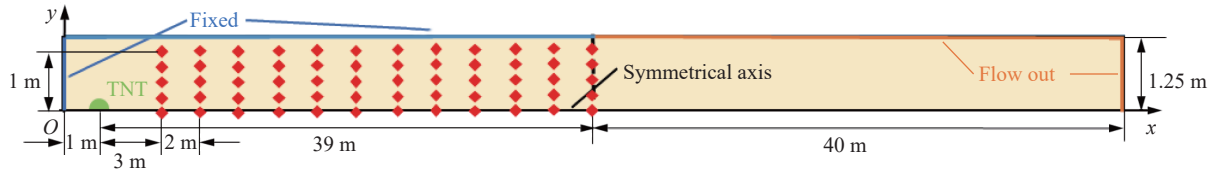


图 5 坑道二维轴对称模型

Fig. 5 2D axisymmetric tunnel model

空气密度、气压和气温随海拔的升高而降低^[28], 海拔 h (单位 m) 处的大气参数可写为^[13]:

$$T_{k-h} = 288.15 - 0.0065h \quad (6)$$

$$p_{k-h} = 101325 \left(\frac{T_{k-h}}{288.15} \right)^{5.25588} \quad (7)$$

$$\rho_{k-h} = 1.225 \left(\frac{T_{k-h}}{288.15} \right)^{4.25588} \quad (8)$$

式中: T_{k-h} 为当前海拔的气温, K; p_{k-h} 为当前海拔的气压, Pa; ρ_{k-h} 为当前海拔的空气密度, kg/m^3 。

根据式 (3)、(6)~(8), 可获得不同海拔高度 h ($0 \text{ m} \leq h \leq 4000 \text{ m}$) 处的大气参数, 见表 4, 其中, e_{k-h} 为当前海拔的空气初始比内能。

为了提高计算精度, 尽量使用较密的网格, 但这会增大计算量。因此, 需要考察计算模型网格的收敛性。在计算中, 以海拔 $h = 0 \text{ m}$, $x = 16 \text{ m}$, $y = 500 \text{ mm}$ 的监测点为例, 考察了 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 、 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 、 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 、 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 、 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 、 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 、 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 多种网格尺寸对计算结果的影响, 结果如图 6 和表 5 所示。粗网格引起的冲击波峰值超压 Δp_m 略微偏低, 冲击波阵面到达时间 t_a 略微延后; 随着网格尺寸的减小, Δp_m 和 t_a 逐渐趋于稳定。采用 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 网格尺寸计算的 Δp_m 和 t_a 相较于 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 时的误差 ($\delta_{\Delta p_m}$ 和 δ_{t_a}) 控制在 0.4% 以内, 较于 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 时的误差控制在 3.5% 以内, 可以认为计算结果在网格尺寸为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 时已趋近收敛。不同网格尺寸下的计算时间如图 7 所示, 可以看出, 网格尺寸为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 时的计算时间是网格尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 时的计算时间的 4 倍, 是网格尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 时的计算时间的 17 倍。综合考虑计算精度和计算时间, 本次计算模型网格尺寸取 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。

表 4 海拔 0 ~ 4000 m 处的大气参数

Table 4 Parameters of the air at altitude from 0 to 4000 m

h/m	$\rho_{k-h}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	p_{k-h}/kPa	T_{k-h}/K	$e_{k-h}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
0	1.225	1013.25×10^2	288.15	2.068×10^2
1000	1.112	898.75×10^2	281.65	2.021×10^2
2000	1.006	794.95×10^2	275.15	1.974×10^2
3000	0.909	701.08×10^2	268.65	1.928×10^2
4000	0.819	616.40×10^2	262.15	1.881×10^2

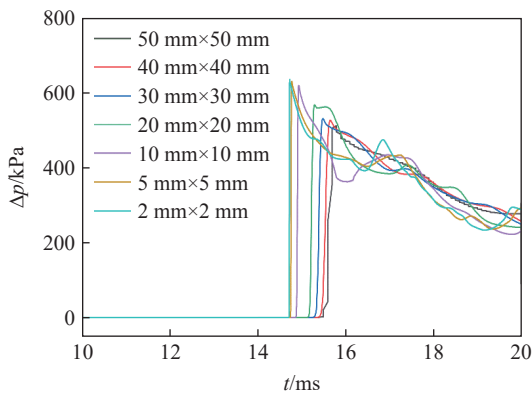


图 6 不同网格尺寸下的冲击波超压时程曲线

Fig. 6 Overpressure-time curves with different grid sizes

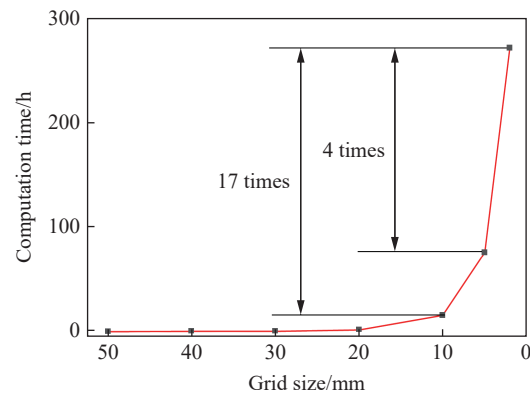


图 7 不同网格尺寸下的计算时间

Fig. 7 Computation time with different grid sizes

表 5 不同网格尺寸下冲击波参数计算结果

Table 5 Simulated results of shock wave parameters with different grid sizes

网格尺寸/mm	$x = 18 \text{ m}$				$x = 20 \text{ m}$			
	t_a/ms	$\delta_{t_a}/\%$	$\Delta p_m/\text{MPa}$	$\delta_{\Delta p_m}/\%$	t_a/ms	$\delta_{t_a}/\%$	$\Delta p_m/\text{MPa}$	$\delta_{\Delta p_m}/\%$
50×50	18.180	5.46	0.464	16.55	20.990	6.12	0.420	17.81
40×40	17.840	3.49	0.486	12.59	20.690	4.61	0.439	14.09
30×30	17.720	2.79	0.511	8.09	20.290	2.59	0.456	10.76
20×20	17.576	1.96	0.530	4.68	20.080	1.52	0.481	5.87
10×10	17.350	0.65	0.537	3.42	19.832	0.27	0.494	3.33
5×5	17.242	0.02	0.555	0.18	19.783	0.02	0.509	0.39
2×2	17.239		0.556		19.779		0.511	

2.2 不同海拔下坑道内爆炸冲击波的压力云图

数值模拟结果显示, 不同海拔高度下坑道内爆炸冲击波传播并形成平面波的过程相似, 故以 $h = 3000 \text{ m}$ 为例分析冲击波传播特性。坑道内爆炸冲击波的传播可分为 3 个阶段^[11]: 第 1 阶段为自由传播阶段, 如图 8(a) 所示, 装药起爆后产生球面波向外膨胀, 传播规律可使用空爆衰减定律描述; 第 2 阶段为

过渡阶段, 冲击波在坑道壁面来回反射(见图 8(b)), 在壁面处形成马赫波后, 压力与传播速度均大于入射波^[12], 能追赶轴线处入射的球形波阵面并叠加(见图 8(c)~(d)), 冲击波传播流场复杂, 难以定量描述规律; 第 3 阶段为一维传播阶段, 如图 8(e)~(f) 所示, 冲击波经过坑道壁面的反射整形, 逐渐形成较为规则的平面波, 可用平面波衰减规律描述。

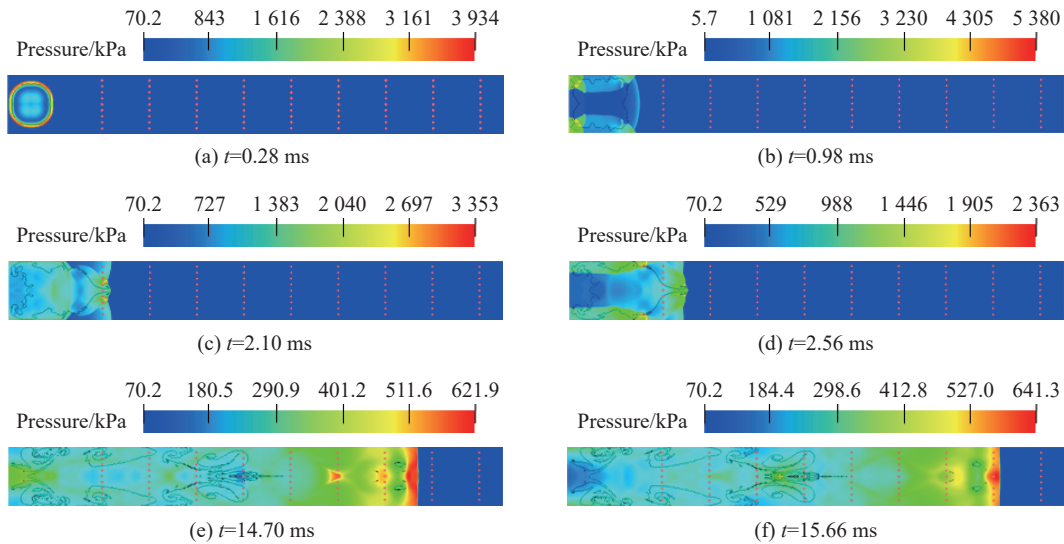


图 8 $h = 3000$ m 时冲击波压力云图

Fig. 8 Pressure nephograms of shock wave at $h = 3000$ m

2.3 海拔高度对平面波形成位置的影响

海拔高度为 0、1000、2000、3000、4000 m 等 5 种工况下坑道内径向各测点(y 取 0、250、500、750 和 1000 mm)的峰值超压 Δp_m 与传播距离的关系如图 9 所示。不同海拔高度下坑道内峰值超压 Δp_m 均随传播距离的增加而迅速衰减, 在冲击波形成和传播的前期, 相同传播距离处径向各测点 Δp_m 的平均偏差普

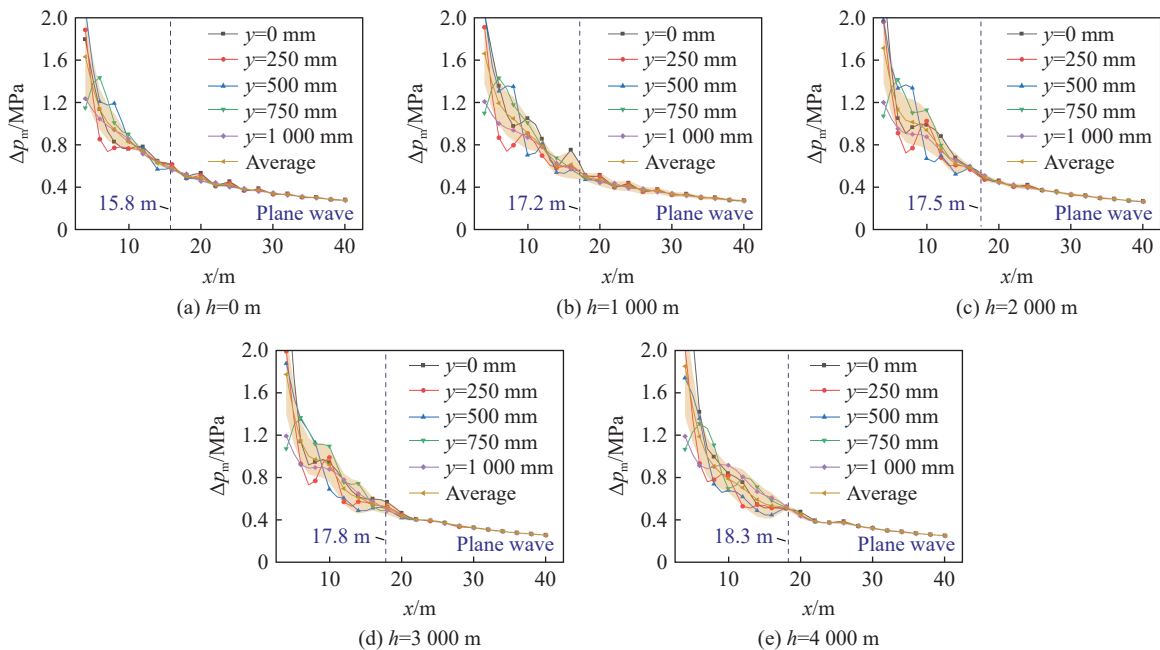


图 9 不同海拔高度下的峰值超压

Fig. 9 Peak overpressures at different altitudes

遍较大,但传播一定距离后基本重合。以相同传播距离处径向各测点峰值超压 Δp_m 的平均偏差小于 10%,且冲击波阵面到达时间 t_a 的标准偏差小于 $30 \mu s$ 作为稳定平面波的形成条件^[26],给出了不同海拔高度工况下坑道内爆炸平面波的形成位置,如表 6 所示,平面波形成距离随海拔高度升高逐渐增加。

表 6 不同海拔高度下平面波形成距离

Table 6 Plane wave formation distances at different altitudes

h/m	0	1000	2000	3000	4000
x/m	15.8	17.2	17.5	17.8	18.3

基于相邻轴向测点的间距和冲击波阵面到达时间差得到该距离段内的冲击波阵面平均传播速度 v ,如图 10 所示。与空爆类似, v 随海拔高度升高而增加,主要是因为海拔高度升高时,气压与空气密度降低,空气中分子间碰撞的运动行程加大,更有利于冲击波阵面的运动^[29]。

坑道内径向不同位置处冲击波阵面到达时间 t_a 的标准偏差计算结果如图 11 所示,随着海拔高度 h 的升高, t_a 的标准偏差增大。与 $h=0 m$ 处的 t_a 相比, $h=2000 m$ 时 t_a 的标准偏差平均增大 161.26%, $h=4000 m$ 时 t_a 的标准偏差平均增大 299.51%。这说明,随着海拔高度的升高,坑道径向不同位置处冲击波传播速度的差异增大,冲击波阵面平整度降低。

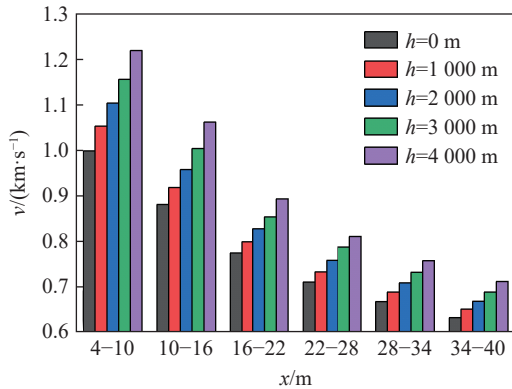


图 10 各测点区间段内冲击波阵面的平均速度

Fig. 10 Average velocities of shock wave in different intervals

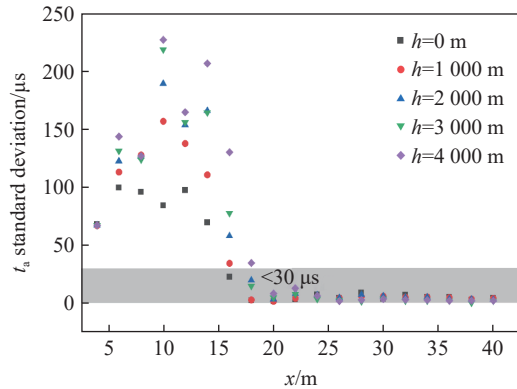


图 11 冲击波阵面到达时间的标准偏差

Fig. 11 Standard deviation of shock wave front arrival time

综上所述,随着海拔高度的升高,坑道内各距离段的冲击波阵面平均传播速度 v 和到达时间 t_a 的标准偏差均增加,导致冲击波与坑道壁面的反射叠加更复杂,波形更杂乱。因此,平面波形成距离随海拔高度升高而增加。

2.4 海拔高度对冲击波参量的影响

对不同海拔高度坑道内轴向同一传播距离的径向各测点 Δp_m 取平均,得到冲击波峰值超压平均值 $\overline{\Delta p_m}$,其随传播距离的变化规律如图 12 所示。平面波形成前,冲击波超压有振荡现象^[30],海拔高度对峰值超压平均值 $\overline{\Delta p_m}$ 的影响没有明显规律;平面波形成后,随着海拔的升高,同一轴向位置处的 $\overline{\Delta p_m}$ 降低,且随着轴向传播距离的增加, $\overline{\Delta p_m}$ 逐渐降低。不同海拔高度下, x 为 20、22、24 m, y 为 500 mm 处测点的爆炸冲击波波形如图 13 所示。平面波形成后,冲击波超压曲线呈现以首峰为最高峰值的多峰复杂波形,随着轴

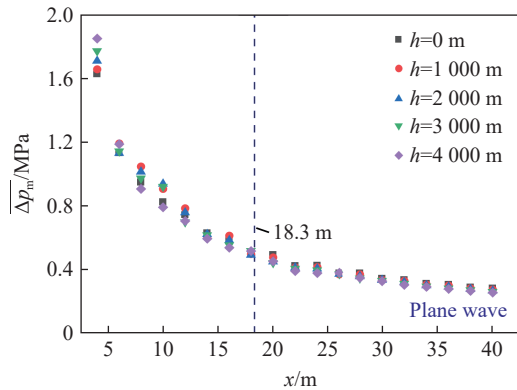


图 12 冲击波峰值超压平均值

Fig. 12 Average of peak overpressures

向传播距离的增加,波形的振荡峰值相对减小,逐渐转化为单峰波形,与文献 [11] 中坑道内爆炸冲击波的传播规律相同。

爆炸冲量 I 受峰值超压 Δp_m 和正压作用时间 t_a 的共同作用,需对爆炸冲量进行定量计算,以研究海拔高度对坑道内爆炸冲量的影响。根据图 13 计算爆炸冲量,如图 14 所示。平面波形成后,爆炸冲量随海拔升高而降低;对于同一海拔高度,爆炸冲量随传播距离的增大而单调减小。与 $h=0$ m 处的爆炸冲量相比, $h=2000$ m 时的爆炸冲量平均降低 1.77%, $h=4000$ m 时的爆炸冲量平均降低 4.14%。海拔高度 h 每升高 1000 m,爆炸冲量平均降低 0.91%,与文献 [16, 30] 中的研究成果基本一致。

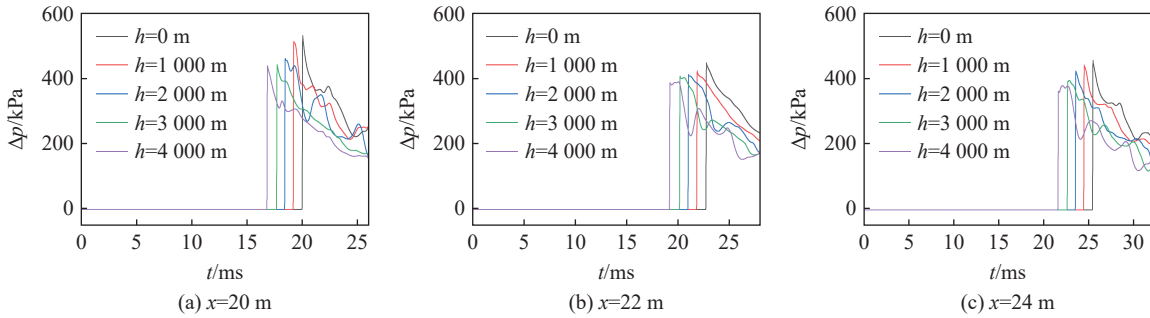


图 13 不同监测位置的波形对比

Fig. 13 Comparison of shock waves at typical points

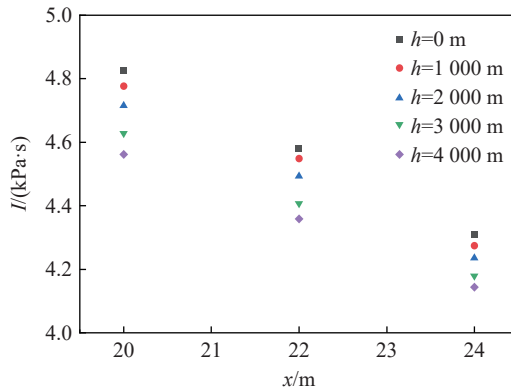


图 14 不同监测位置的冲击波冲量

Fig. 14 Shock wave impulses of typical points

3 高海拔环境下坑道内爆炸冲击波的传播模型

为了研究海拔高度对坑道内爆炸冲击波传播的影响规律,须确定高海拔坑道内爆炸冲击波峰值超压的主要影响因素。根据量纲分析理论,分析冲击波峰值超压的影响参量,进而研究冲击波峰值超压与影响参量的函数关系。

坑道内爆炸形成的冲击波对目标的毁伤主要取决于冲击波的特征参量,包括峰值超压 Δp_m 、冲量 I 、冲击波阵面到达时间 t_a 等,影响坑道内爆炸冲击波参量的物理量有炸药释放能量 E 、气压 p_{k-h} 、空气密度 ρ_{k-h} 以及有效传播体积 $S\Delta x$,其中 S 为坑道截面积, Δx 为计算点到坑道封闭端的距离。忽略空气介质的黏性与热传导,坑道内爆炸冲击波参量可以表示为大气参数的函数形式:

$$\begin{cases} \Delta p_m = f_1(E, p_{k-h}, \rho_{k-h}, S \Delta x) \\ I = f_2(E, p_{k-h}, \rho_{k-h}, S \Delta x) \\ t_a = f_3(E, p_{k-h}, \rho_{k-h}, S \Delta x) \end{cases} \quad (9)$$

由 Π 定理^[31] 可知,上述 7 个物理量有 3 个基本量纲: M、L 和 T,对应 3 个独立的参考物理量。选择 E 、 p_{k-h} 、 ρ_{k-h} 作为参考物理量,各物理量的量纲幂次如表 7 所示。对表 7 进行初等变换,可得到表 8。

表 7 坑道内爆炸各物理量的量纲幂次

Table 7 Dimensional power coefficients of physical quantities in the problem of explosion in tunnel

基本量纲	E	p_{k-h}	ρ_{k-h}	$S\Delta x$	Δp_m	I	t_a
M	1	1	1	0	1	1	0
L	2	-1	-3	3	-1	-1	0
T	-2	2	0	0	-2	-1	1

表 8 坑道内爆炸各物理量的量纲幂次(初等变换)

Table 8 Dimensional power coefficients of physical quantities in the problem of explosion in tunnel (elemental transformation)

参考物理量	E	p_{k-h}	ρ_{k-h}	$S\Delta x$	Δp_m	I	t_a
E	1	0	0	1	0	1/3	1/3
p_{k-h}	0	1	0	-1	1	1/6	-5/6
ρ_{k-h}	0	0	1	0	0	1/2	1/2

根据 Π 定理^[31], 由表 8 可得出爆炸冲击波峰值超压 Δp_m 、冲量 I 与冲击波阵面到达时间 t_a 的无量纲表达式:

$$\begin{cases} \frac{\Delta p_m}{p_{k-h}} = f_1 \left(\frac{S\Delta x}{E} p_{k-h} \right) \\ \frac{I}{E^{1/3} \rho_{k-h}^{1/6} p_{k-h}^{1/2}} = f_2 \left(\frac{S\Delta x}{E} p_{k-h} \right) \\ \frac{p_{k-h}^{5/6} t_a}{E^{1/3} \rho_{k-h}^{1/2}} = f_3 \left(\frac{S\Delta x}{E} p_{k-h} \right) \end{cases} \quad (10)$$

空气的理想气体状态方程如下:

$$p_{k-h} M_r = \rho_{k-h} R T_{k-h} \quad (11)$$

式中: R 为理想气体常数, M_r 为空气平均相对分子质量。

TNT 爆炸释放能量 E 与装药量 m 线性相关, 1 kg TNT 爆炸释放的能量为 4 621.6 kJ^[32]。根据 E 与 m 的线性关系和式 (11), 式 (10) 可转化为:

$$\begin{cases} \frac{\Delta p_m}{p_{k-h}} = f_1 \left(\frac{S\Delta x}{m} p_{k-h} \right) \\ \frac{T_{k-h}^{1/2} I}{m^{1/3} p_{k-h}^{2/3}} = f_2 \left(\frac{S\Delta x}{m} p_{k-h} \right) \\ \frac{p_{k-h}^{1/3} T_{k-h}^{1/2} t_a}{m^{1/3}} = f_3 \left(\frac{S\Delta x}{m} p_{k-h} \right) \end{cases} \quad (12)$$

综上所述, 在高海拔环境下, 坑道内爆炸冲击波峰值超压 Δp_m 主要受气压 p_{k-h} 影响。

杨科之等^[6] 给出了平原环境下坑道内峰值超压 Δp_m 的计算模型形式:

$$\Delta p_m = k_1 \left(\frac{m}{S\Delta x} \right)^{1/3} + k_2 \left(\frac{m}{S\Delta x} \right)^{2/3} + k_3 \frac{m}{S\Delta x} \quad (13)$$

式中: $k_1 \sim k_3$ 为无量纲参数。

根据式 (12), 式 (13) 需引入海拔高度因素。通过 Sachs 无量纲修正方法^[17] 引入无量纲超压 $\bar{p} = \Delta p/p_{k-h}$ 以及无量纲传播体积 $\bar{V} = p_{k-h} S\Delta x/m$, 获得适用于不同海拔高度下坑道内峰值超压 Δp_m 计算模型的通用形式:

$$\frac{\Delta p_m}{p_{k-h}} = k_1 \left(\frac{m}{S\Delta x p_{k-h}} \right)^{1/3} + k_2 \left(\frac{m}{S\Delta x p_{k-h}} \right)^{2/3} + k_3 \frac{m}{S\Delta x p_{k-h}} \quad (14)$$

对 $h = 0$ m 处的峰值超压 Δp_m 进行最小二乘法拟合, 得到高海拔环境下直径为 2.5 m 的坑道内峰值超压 Δp_m 的计算模型系数:

$$\frac{\Delta p_m}{p_{k-h}} = -1.015 \left(\frac{m}{S\Delta x p_{k-h}} \right)^{1/3} + 5.319 \left(\frac{m}{S\Delta x p_{k-h}} \right)^{2/3} + 0.393 \frac{m}{S\Delta x p_{k-h}} \quad (15)$$

为验证该模型对高海拔的适用性, 将表 4 中的大气参数代入式 (15), 计算获得不同海拔高度下的坑道内爆炸冲击波峰值超压 Δp_m 。 Δp_m 的理论分析与数值计算对比如图 15 所示。

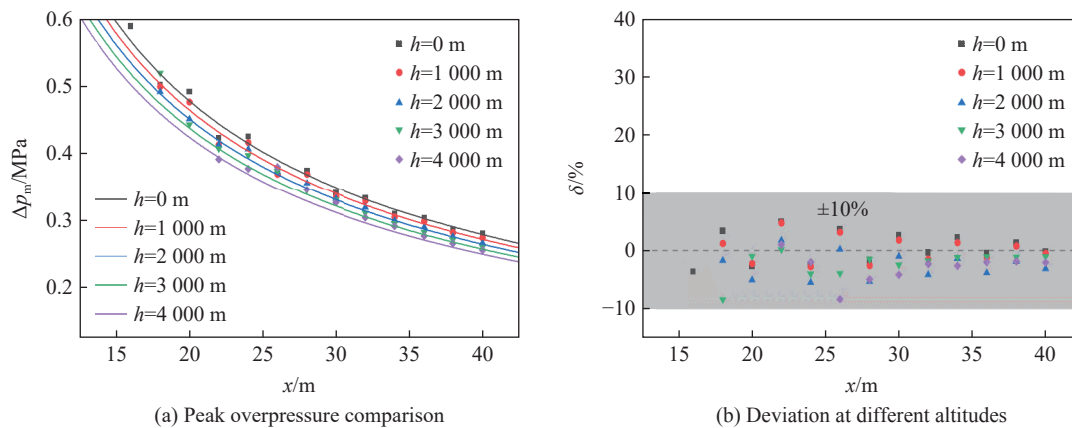


图 15 不同海拔高度下理论与数值计算峰值超压比较

Fig. 15 Comparison of peak overpressure between theory and numerical simulation at different altitudes

由图 15 可知,平面波形成后,不同海拔高度下坑道内爆炸冲击波峰值超压 Δp_m 的数值计算结果与理论分析结果的相对偏差(δ)最大值约为 10%,理论分析与数值计算结果吻合得较好。

因此,本研究中所建立的冲击波峰值超压传播模型可用于高海拔坑道内爆炸冲击波峰值超压的预测。在得到平原环境坑道内爆炸冲击波参数后,可根据该模型得到相同坑道在高海拔的冲击波参数。

4 结 论

利用小当量激波管试验验证了数值计算方法的有效性,基于 AUTODYN 有限元软件与量纲分析,计算和分析了不同海拔坑道内爆炸冲击波的平面波形成位置、峰值超压和冲量,得到了海拔高度对坑道内爆炸冲击波参量的影响规律,主要结论如下:

(1) 不同海拔高度环境下坑道内爆炸冲击波峰值超压沿传播方向均呈现衰减趋势,冲击波传播一定距离后形成稳定的平面波,平面波形成距离随海拔高度升高而增加;

(2) 海拔高度影响坑道内爆炸冲击波参量,平面波形成后,不同海拔高度下冲击波峰值超压随传播距离增加而减小,相同传播距离时峰值超压随海拔高度升高而降低,海拔高度每升高 1 000 m,冲量平均降低约 0.91%;

(3) 本研究建立的理论分析模型与数值模拟结果符合良好,可用于高海拔坑道内爆炸冲击波峰值超压的预测。

参考文献:

- [1] 赵晓莉,夏斌,刘尊义,等. 模拟高原环境对炸药爆速影响的试验研究 [J]. *爆破器材*, 2015, 44(2): 36–39. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2015.02.009.
ZHAO X L, XIA B, LIU Z Y, et al. Experimental research on detonation velocity of explosive in simulated plateau environment [J]. *Explosive Materials*, 2015, 44(2): 36–39. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2015.02.009.
- [2] 李秀地. T 型坑道中爆炸冲击波传播规律的数值模拟 [J]. *后勤工程学院学报*, 2011, 27(4): 8–12. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7843.2011.04.002.
LI X D. Numerical simulation for blast propagation and attenuation inside T-shaped tunnel from HE-charges detonation [J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2011, 27(4): 8–12. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7843.2011.04.002.
- [3] 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.
- [4] BENSELAMA A M, WILLIAM-LOUIS M J P, MONNOYER F, et al. A numerical study of the evolution of the blast wave shape in tunnels [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 181(1): 609–616. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.05.056.

- [5] UYSTEPRUYST D, MONNOYER F. A numerical study of the evolution of the blast wave shape in rectangular tunnels [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 34: 225–231. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.03.003.
- [6] 杨科之, 杨秀敏. 坑道内化爆冲击波的传播规律 [J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(1): 37–40.
YANG K Z, YANG X M. Shock waves propagation inside tunnels [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(1): 37–40.
- [7] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2005.05.002.
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. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2005.05.002.
- [8] KINNEY G F, GRAHAM K J. Explosive shocks in air [M]. Berlin: Springer, 1962: 107–118. DOI: 10.1007/978-3-642-86682-1.
- [9] 刘晶波, 闫秋实, 伍俊. 坑道内爆炸冲击波传播规律的研究 [J]. *振动与冲击*, 2009, 28(6): 8–11. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2009.06.003.
LIU J B, YAN Q S, WU J. Analysis of blast wave propagation inside tunnels [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(6): 8–11. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2009.06.003.
- [10] 耿振刚, 李秀地, 苗朝阳, 等. 温压炸药爆炸冲击波在坑道内的传播规律研究 [J]. *振动与冲击*, 2017, 36(5): 23–29. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.05.005.
GENG Z G, LI X D, MIAO C Y, et al. Propagation of blast wave of thermobaric explosive inside a tunnel [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(5): 23–29. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.05.005.
- [11] 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. DOI: 10.11943/CJEM2018305.
ZHANG Y L, WANG S Q, YUAN J F, et al. Experimental study on the propagation law of blast waves in a square tunnel [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2020, 28(1): 46–51. DOI: 10.11943/CJEM2018305.
- [12] 胡涛, 蒋海燕, 吴国东, 等. 坑道内爆炸平面波形成位置的数值分析 [J]. *火炸药学报*, 2023, 46(7): 632–638. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202211022.
HU T, JIANG H Y, WU G D, et al. Numerical analysis of the formation position of the explosion plane wave in the tunnel [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2023, 46(7): 632–638. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202211022.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 李志敏, 汪旭光, 汪泉, 等. 负压环境对炸药爆炸冲击波影响的实验研究 [J]. *火炸药学报*, 2021, 44(1): 35–40. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202007025.
LI Z M, WANG X G, WANG Q, et al. Experimental study on the effect of negative pressure environment on explosion shock wave [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2021, 44(1): 35–40. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202007025.
- [16] 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(5): 053206. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0279.
CHEN L M, LI Z B, CHEN R, et al. An experimental study on propagation characteristics of blast waves under plateau environment [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(5): 053206. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0279.
- [17] SACHS R G. The dependence of blast on ambient pressure and temperature: 466 [R]. Aberdeen Proving Ground: Ballistic Research Laboratories, 1944. DOI: 10.21236/ada800535.
- [18] WANG F Q, WANG Q, WANG Y J, et al. Propagation rules of shock waves in confined space under different initial pressure environments [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 14352. DOI: 10.1038/s41598-022-18567-0.
- [19] 汪泉, 陆军伟, 李志敏, 等. 负压条件下柱形爆炸罐内爆炸波传播规律 [J]. *兵工学报*, 2021, 42(6): 1250–1256. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.06.015.
WANG Q, LU J W, LI Z M, et al. Propagation law of explosion wave in columnar explosion tank under vacuum conditions [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(6): 1250–1256. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.06.015.
- [20] 李孝臣, 汪泉, 谢守冬, 等. 负压条件下球形爆炸容器内乳化炸药冲击波参数研究 [J]. *火炸药学报*, 2023, 46(3): 252–259.

- DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202207001.
- LI X C, WANG Q, XIE S D, et al. Study of shock wave parameters of emulsified explosives in spherical explosive containers under negative-pressure conditions [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2023, 46(3): 252–259. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202207001.
- [21] 张广华, 李彪彪, 沈飞, 等. 真空条件下炸药爆炸特性试验研究 [J]. *火炸药学报*, 2020, 43(3): 308–313. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.201903005.
- ZHANG G H, LI B B, SHEN F, et al. Experimental research on the explosion performance of explosives under vacuum conditions [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2020, 43(3): 308–313. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.201903005.
- [22] 吴勇. 负压环境对乳化炸药爆轰性能影响及爆炸焊接应用研究 [D]. 安徽, 淮南: 安徽理工大学, 2022. DOI: [10.26918/d.cnki.ghngc.2022.000418](https://doi.org/10.26918/d.cnki.ghngc.2022.000418).
- WU Y. Effect of negative pressure on detonation performance of emulsion explosive and application of explosive welding [D]. Huainan, Anhui: Anhui University of Science & Technology, 2022. DOI: [10.26918/d.cnki.ghngc.2022.000418](https://doi.org/10.26918/d.cnki.ghngc.2022.000418).
- [23] LEE E L, HORNIG H C, KURY J W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products: UCRL-50422 [R]. Livermore: Lawrence Radiation Laboratory, University of California, 1968. DOI: [10.2172/4783904](https://doi.org/10.2172/4783904).
- [24] JOHN SHEPHERD P. A course in theoretical physics [M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd. , 2013: 116–117. DOI: [10.1002/9781118516911](https://doi.org/10.1002/9781118516911).
- [25] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31–48. DOI: 10.1016/0013-7944(85)90052-9.
- [26] 张军, 黄含军, 王军评, 等. 炸药驱动式爆炸管的载荷计算 [J]. *装备环境工程*, 2021, 18(5): 21–27. DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.05.004.
- ZHANG J, HUANG H J, WANG J P, et al. Simulation on the blast load inside the explosively driven shock tube [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2021, 18(5): 21–27. DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.05.004.
- [27] 高轩能, 吴彦捷. TNT 爆炸的数值计算及其影响因素 [J]. *火炸药学报*, 2015, 38(3): 32–39. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2015.03.006.
- GAO X N, WU Y J. Numerical calculation and influence parameters for TNT explosion [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2015, 38(3): 32–39. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2015.03.006.
- [28] 尤祖明, 祝逢春, 王永旭, 等. 模拟高原环境条件下 C_5-C_6 燃料的爆轰特性研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(6): 1303–1309. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0185.
- YOU Z M, ZHU F C, WANG Y X, et al. Detonation characteristics of C_5-C_6 fuels under simulated plateau-condition [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(6): 1303–1309. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0185.
- [29] 高玉刚, 赵晓莉, 徐龙, 等. 高海拔压力环境对炸药猛度影响的实验研究 [J]. *火工品*, 2013(5): 36–39. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2013.05.009.
- GAO Y G, ZHAO X L, XU L, et al. Experimental research on brisance of explosive in simulated high altitude environment [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2013(5): 36–39. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2013.05.009.
- [30] 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): 022301. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0188.
- LI R, LI X C, WANG Q, et al. Propagation characteristics of blast wave in diminished ambient temperature and pressure environments [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(2): 022301. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0188.
- [31] LEMONS D S. A student's guide to dimensional analysis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2017: 33–48. DOI: [10.1017/9781316676165](https://doi.org/10.1017/9781316676165).
- [32] RAMAMURTHI K. TNT equivalence and yield from explosions [M]// RAMAMURTHI K. Modeling Explosions and Blast Waves. Cham: Springer International Publishing, 2021: 309–319. DOI: [10.1007/978-3-030-74338-3_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-74338-3_12).

(责任编辑 王小飞)