

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0486

温压炸药隧道内爆炸结构约束对冲击波及爆炸火团的影响规律

陈飞翔¹, 张国凯^{2*}, 何勇¹, 吴玉欣², 刘黎旺², 邓国强³

(1.南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094; 2.南京理工大学 安全科学与工程学院, 江苏 南京 210094; 3.军事科学院国防工程研究院, 北京 100850)

摘要: 为研究温压炸药隧道内爆炸冲击波传播规律和火团热效应, 基于 OpenFOAM 开展温压炸药隧道内爆炸数值模拟, 与温压炸药隧道内爆炸试验数据对比验证数值模拟精度, 研究沿隧道轴线距离、炸药质量对爆炸冲击波传播特性及火团热效应的影响。研究表明: 相同装药质量条件下, 沿隧道轴线距离大于 1/3 倍隧道等效圆直径时, 爆炸冲击波超压峰值衰减规律和平面波形成距离不随沿隧道轴线距离变化而变化, 冲击波平面波形成后, 冲量随沿隧道轴线距离的增加先增加后不变。沿隧道轴线相同距离处爆炸, 冲击波形成平面波距离随炸药质量的增加而增大; 平面波形成后, 冲击波超压峰值衰减规律不受装药质量影响, 但冲击波冲量随装药质量的增加而增长。受隧道口泄能效应的影响, 隧道内爆炸火团总是向近隧道口方向移动, 隧道壁面约束使得火团沿隧道轴线垂直方向发展受限; 火团轴线方向上出现高温尖端, 隧道内轴线方向温度分布具有对称性。进一步建立爆炸火团不同温度轴线方向上传播最大距离与炸药质量的拟合公式, 可预测典型温压炸药隧道内爆炸火球不同温度轴线方向上传播最大距离。

关键词: 温压炸药; 冲击波; 泄能效应; 火团温度; 隧道约束;

中图分类号: O382

国标学科代码: 13035

文献标识码: A

Study on the influence of explosive structure constraints on shock wave and explosive fireball in tunnel with thermobaric explosives

Chen Feixiang¹, Zhang Guokai^{2*}, He Yong¹, Wu Yuxin², Liu Liwang², Deng Guoqiang³

(1. Nanjing University of Science and Technology, School of Mechanical Engineering, Nanjing, Jiangsu 210094;

2. Nanjing University of Science and Technology, School of Safety Science and Engineering, Nanjing, Jiangsu 210094;

3. Institute of Defense Engineering, AMS, PLA, Beijing 100850, China)

Abstract: To investigate the propagation characteristics of blast shock waves and thermal effects of fireballs in tunnel explosions involving thermobaric explosives, numerical simulations were conducted using OpenFOAM. The simulation accuracy was validated through comparative analysis with experimental data from tunnel explosion tests. The effects of axial distance along the tunnel and explosive mass on shock wave propagation characteristics and fireball thermal effects were systematically studied. The results demonstrated that under identical charge mass conditions, when the axial distance exceeds 1/3 times the equivalent

*收稿日期: 2024-12-11; 修回日期: 2025-03-05;

基金项目: 国家自然科学基金 (52278504); 江苏省自然科学基金 (BK20220141); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (309231B8805);

第一作者: 陈飞翔 (2001-), 男, 硕士研究生, E-mail: fxchen@njust.edu.cn;

通信作者: 张国凯 (1988-), 男, 博士, 教授, 博士生导师. E-mail: gkzhang@njust.edu.cn.

tunnel diameter, the attenuation law of shock wave overpressure peak and planar wave formation distance remain independent of axial position. After planar wave formation, the impulse initially increases with axial distance before stabilizing. At equivalent axial distances, the planar wave formation distance increases with explosive mass. Post planar wave formation, the attenuation pattern of the shock wave overpressure peak remains unaffected by charge mass, while the impulse exhibits a growth trend proportional to the increase in charge mass. Under the influence of the tunnel portal energy dissipation effect (tunnel effect), explosion-induced fireballs exhibit a consistent propagation tendency toward the proximal tunnel portal. The confinement imposed by tunnel walls restricts the lateral expansion of the fireball perpendicular to the tunnel axis, while facilitating the formation of a high-temperature tip along the longitudinal axis. Especially, the temperature distribution along the tunnel axis maintains axial symmetry despite directional propagation biases. A fitting formula was established to characterize the relationship between the maximum axial propagation distance of explosion fireballs at different temperatures and the explosive mass, enabling the prediction of axial spread limits for fireballs at specific temperatures in typical thermobaric explosive detonations within tunnel-confined environments.

Key words: thermobaric explosive; shock wave; energy release effect; fireball temperature; tunnel restraint

温压炸药成分包含快速反应的理想组分 (TNT、RDX、CL-20 等) 和缓慢反应的非理想组分 (铝粉、粘结剂等)。理想组分爆轰反应完全后, 铝粉继续与爆炸产物及空气中的氧气发生后燃反应放热, 增强冲击波能量的同时可提高爆炸火团温度及持续时间。相比单质炸药而言, 温压炸药的冲击波衰减较慢, 超压及正压作用时间和冲量更高^[1]。在密闭建筑、地下工事等受限空间内, 温压炸药爆炸冲击波经壁面反射叠加和角隅汇聚后形成的超压峰值显著高于自由空间爆炸相同比例爆距时的数值, 同时由于铝粉的持续后燃产生相比单质炸药显著增强的准静态压力。因此, 温压炸药在密闭建筑、地下工事等受限空间内爆炸的毁伤效应相比单质炸药具有显著优势^[2]。隧道作为国防和民用基础设施中的典型受限空间^[3], 研究温压炸药隧道内爆炸冲击波传播规律和火团热效应演化特征具有重要意义。

温压炸药的爆炸过程可以分为 3 个阶段^[4]: 爆轰反应阶段、无氧燃烧阶段和有氧燃烧阶段, 爆轰反应主要进行高能炸药分子形式的氧化还原反应; 无氧燃烧阶段是爆轰产物与铝粒子的氧化还原反应; 前两个阶段主要贡献冲击波能; 有氧燃烧反应阶段的持续时间较长, 显著影响着爆炸冲击波的冲量以及爆炸火球持续时间, 进而增强热效应和压力强度。与传统高爆炸药相比, 温压炸药爆炸冲击波随传播距离衰减较慢。李世民等^[5]基于二次反应理论, 采用 AUTODYN 对温压炸药自由场爆炸进行了数值模拟研究, 发现相对于传统高能炸药 TNT, 温压炸药爆炸冲击波超压衰减较慢, 正压作用时间更长、正向冲量更高, 根据数值结果拟合得到了温压炸药自由场爆炸冲击波超压峰值随比例爆距的衰减公式。茅靳丰等^[6]通过对 100kg 温压炸药坑道口部爆炸数值模拟研究, 发现温压炸药爆炸冲击波衰减缓慢, 超压峰值最高可达同质量 TNT 的 1.52 倍, 并且拟合得到了超压峰值沿坑道纵深衰减经验公式。

温压炸药爆炸释能过程受环境影响显著。已有研究表明, 温压炸药毁伤效能更多体现在密闭空间或者半密闭空间^[7]。对温压炸药爆炸毁伤威力的评估主要包括冲击波超压、冲击波冲量、爆炸火团温度、爆炸火团尺寸和爆炸火团持续时间等参数。温压炸药在密闭和半密闭空间内爆炸时, 结构的约束会增强冲击波反射, 抑制爆轰产物扩散, 减少热损失, 增强铝粉与氧气发生有氧燃烧反应, 结构的约束效应能够使温压炸药的爆炸效应显著增强^[8]。耿振刚等^[9]利用 AUTODYN 软件建立了温压炸药坑道内爆炸的二维轴对称数值模型, 发现温压炸药爆炸冲击波在坑道内的超压峰值和冲量平均值分别为空旷地面的 13.55 倍和 15.21 倍。纪玉国等^[10]开展了不同质量温压炸药爆炸试验, 研究了温压炸药隧道内爆炸火团高温区域演化特征, 通过建立药量与隧道等效圆直径的关系表征隧道对火团的约束作用; Gogulya 等^[11]发现金属铝粉在内爆炸下能够被冲击波撞击到墙壁上形成新的燃烧区域。Maiz L 等^[12]应用光谱方法表征传统和创新的温压炸药在密闭和半密闭环境中产生的火团的热效应, 研究表明温压炸药相对于其他类型炸药, 具有更高的温度和更长的高温持续时间。闫潇敏等^[13]使用热电偶研究了

半封闭隧道内温压炸药爆炸的热效应，温压炸药的后燃效应大大增加了冲击波冲量，并且爆炸火团温度更高、高温持续时间更长。

综上所述，尽管国内外研究人员已经对隧道内爆炸冲击波的传播规律进行了大量研究，但鲜有考虑沿隧道轴线距离和装药质量对温压炸药爆炸冲击波超压和冲量传播分布规律的影响研究，尤其是考虑隧道口泄能效应对火团及温度场演化规律的研究未见报道。本文结合试验及数值研究，探讨温压炸药隧道内沿隧道轴线不同距离处爆炸冲击波特性以及爆炸火团热效应。通过对爆炸冲击波参数和波形的分析，总结了沿隧道轴线距离和炸药质量对隧道内温压炸药爆炸冲击波传播规律的影响。通过系统地分析爆炸火团温度轴线方向上分布范围，建立爆炸火团不同温度下最大传播距离与沿隧道轴线距离、炸药质量之间的关系，阐明隧道口泄能效应对温压炸药在隧道内爆炸冲击波传播规律及火团演化特性的重要影响，研究成果可为隧道等半封闭空间内的温压炸药爆炸安全防护提供理论依据。

1 试验概况

为开展隧道内爆炸试验^[10]，研究团队前期搭建了钢筋混凝土直墙圆拱形两端开口隧道。如图 1 所示，隧道长度为 30m，直墙高度为 1.8m，隧道截面宽度和圆拱直径均为 1.8m，截面积 $S = 4.51\text{m}^2$ ，隧道截面等效圆直径 $D = 2.4\text{m}$ 。试验为隧道口内 1kg 温压炸药空爆试验，温压药柱悬挂在沿隧道轴线距离 1 m 处，爆心距地面高度为 1.2 m，温压炸药密度为 1.90g/cm^3 ，黑索金 (RDX) 和铝粉的质量分数分别为 55% 和 30%，其他成分为助燃剂和粘结剂，药柱长径比为 1:1。

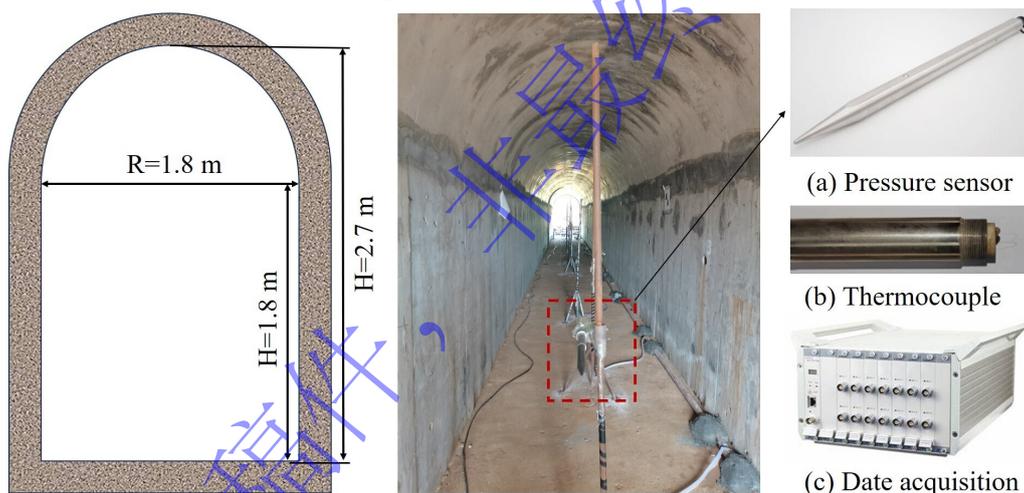


图 1 隧道截面尺寸及测量仪器设备

Fig. 1 Pit section dimensions and measuring equipment

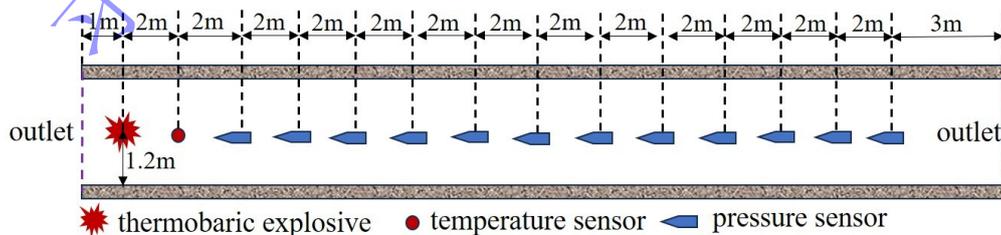


图 2 隧道内传感器布置图

Fig. 2 Layout of sensors in the tunnel

如图 2 所示, 冲击波压力传感器和热电偶温度传感器安装位置距地面高度为 1.2m, 冲击波压力传感器距炸药轴线距离为 4m、6m、8m、10m、12m、14m、16m、18m、20m、22m、24m、26m, 热电偶温度传感器距炸药轴线距离为 2m。

冲击波压力传感器使用 PCB 公司生产的 ICP 型 137B 系列空气压力传感器 (图 1 (a)), 响应频率超过 1MHz, 量程为 0.34 ~ 3.4 MPa; 热电偶为偶丝直径 40.45 μm 的 S 型热电偶(图 1 (b)), 响应频率大于 1000 Hz, 测量的温度上限可以达到 2000 $^{\circ}\text{C}$; 使用瑞士 Elsys 公司生产的 Tran AX3 型数据采集仪(图 1 (c)), 数据采集频率为 1MHz, 产生的电信号经过同轴电缆传输到数据采集集中, 使用专用数据处理软件进行处理和分析。

2 数值计算方法与验证

2.1 状态方程

JWL^[14]状态方程是由 Lee E.L.在 Jones 和 Wilkins 的工作基础上于 1965 年提出。能够较为准确地描述爆轰产物的膨胀驱动做功的过程。JWL 状态方程的一般形式为:

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

式中: P 为爆轰产物压力, V 为爆轰产物的相对体积, E 为内能密度, A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为材料常数。

空气的状态方程采用理想气体 (Ideal Gas) 状态方程近似描述, 具体表达式^[14]为:

$$p = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} \cdot E_0 \quad (2)$$

式中: p 为空气压力; ρ 为空气的密度; ρ_0 为空气初始密度, 取值为 $1.293 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$; γ 为空气的绝热指数, 取值为 1.4; E_0 为空气的初始比内能, 取值为 $2.068 \times 10^5 \text{ }\mu\text{J/mg}$ 。

2.2 后燃模型

本文采用基于热力学 BKW 方程^[15-18]预估炸药的 JWL 状态方程参数, 假定铝粉参与温压炸药爆轰阶段反应, 根据吉布斯最小自由能原理, 得到自由能最小的爆轰产物平衡组分, 根据平衡组分, 进一步计算爆压、爆热、等熵膨胀数据以及未参与爆轰反应铝粉的含量, 最终通过迭代求解得到 JWL 方程参数。这种方法既考虑了铝粉在爆轰阶段的作用, 也考虑了对有氧燃烧阶段的贡献。

假定铝粉的可燃燃烧同时发生, 则铝粉的燃烧时间等于单个铝颗粒的燃烧时间, 并且铝粉可燃燃烧的能量在该时间内完全释放, 铝颗粒燃烧时间表达式^[19]为:

$$t_{Al} = \frac{ad^n}{X_{eff} p^{0.1} T_0^{0.2}} \quad (3)$$

$$v_{Al} = \frac{E_{Al}}{t_{Al}} \quad (4)$$

式中: E_{Al} 为铝粉可燃燃烧的能量, 取 $3.3e6 \text{ J/kg}$; t_{Al} 为铝粉颗粒的燃烧时间, ms; v_{Al} 为后燃能量释放速率, J/kg/s; a : 0.00735; n : 1.8; X_{eff} : 空气中氧化剂的浓度: 取 0.2; p : 空气压力, 取 1; T_0 : 初始温度, 取 290K; d : 铝颗粒粒径, $23.83\mu\text{m}$ 。通过式 (4) 可计算得到后燃能量释放速率。JWL 参数计算结果如表 1 所示。

表 1 JWL 参数计算结果

Table 1 JWL parameter selection

A/GPa	B/GPa	ω	R_1	R_2	E/GPa	$E_{A1}/\text{J/kg}$	$v_{A1}/\text{J/kg/s}$
639	4.95	0.33	4.2	1.1	13.3	3.3e6	9.3e8

2.3 数值计算模型

如图 3 所示, 基于图 1 试验隧道, 建立对应的数值计算模型。炸药装药位置均位于隧道内, 温压炸药形状为圆柱体, 长径比 1:1, 爆心距地面高度 1.2m, 炸药沿隧道轴线距离为 X 。为加快计算速度, 考虑模型的对称性, 建立 1/2 隧道 3D 模型。计算模型网格尺寸为 $30\text{mm}\times 30\text{mm}$, 采用自适应加密网格, 加密层数为 3 层 (网格大小为 $3.75\text{mm}\times 3.75\text{mm}$), 为简化计算, 在建立数值计算模型时作如下假定:

(1) 地面、隧道壁面不通过弹塑性变形吸收爆炸能量, 通过将固体边界设置为刚性边界来模拟隧道结构对爆炸冲击波的反射;

(2) 将隧道外围空气边界和隧道出口设置为透射边界, 模拟其爆炸冲击波经隧道出口向外围大气扩散的过程。

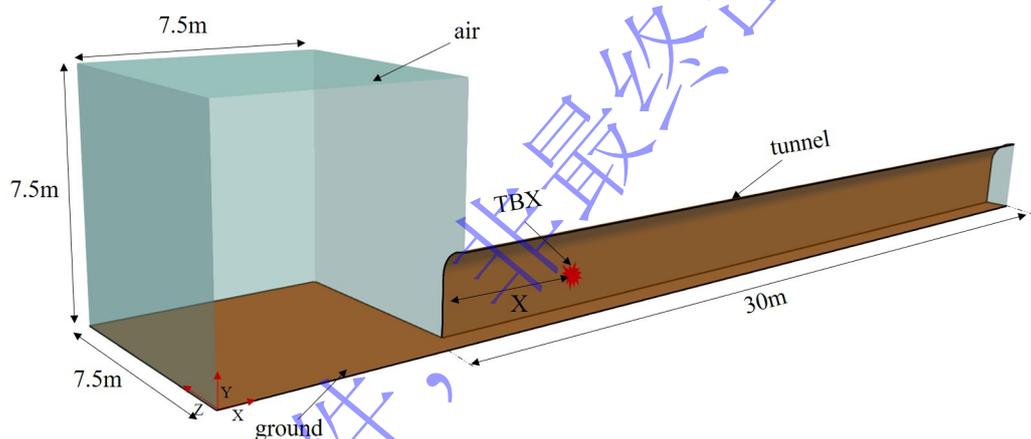


图 3 隧道内爆炸计算模型

Fig. 3 Calculation model of the explosion in the tunnel

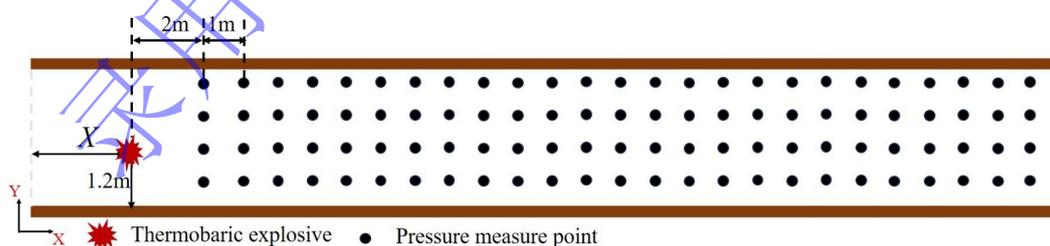


图 4 压力计算测点布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of measuring point layout for pressure and temperature calculation

如图 4 所示, 为研究温压炸药隧道内沿隧道轴线不同距离处爆炸冲击波特性, 在隧道内空气域中设立监测点。沿隧道轴线 X 方向 $2\text{m}\sim 29\text{m}$ 范围内, 间隔 1m 设置压力监测点; 沿垂直隧道轴线 Y 方向 $0.6\text{m}\sim 2.4\text{m}$ 范围内, 间隔 0.6m 设置压力监测点。

2.4 典型试验验证

基于上述数值模拟方法，开展典型试验验证。结合团队开展的温压炸药隧道口内爆炸试验实测数据^[10]与本文的数值模拟的计算结果对比，1kg 温压炸药沿隧道轴线距离 X 为 1m 处爆炸不同传播距离处冲击波最大超压峰值、超压时程曲线对比和热电偶温度时程曲线对比如图 5 所示，冲击波最大超压峰值和冲量对比结果见表 2。

通过对比分析，数值模拟与试验实测的各测点冲击波超压时程曲线吻合较好，冲击波最大超压峰值和冲量计算结果与试验结果的相对误差均在 8% 以内，平均误差分别为 4% 和 3.14%；热电偶温度最大峰值误差为 7.9%，数值计算模型的建立和炸药参数的选取合理。

表 2 冲击波最大超压峰值和冲量对比结果

Table 2 Shock wave maximum overpressure peak and impulse contrast results

传播距离/m	试验结果/MPa	计算结果/MPa	误差/%	试验结果 /MPa · ms	计算结果 /MPa · ms	误差/%
4	0.2788	0.2882	3.4	0.5987	0.6170	3.1
6	0.2009	0.1981	1.4	0.6197	0.5954	3.9
8	0.1415	0.1374	2.9	0.6982	0.7122	2.0
14	0.0932	0.0979	5.0	0.7408	0.7367	0.6
16	0.0929	0.0948	2.0	0.7048	0.7319	3.8
20	0.0787	0.0808	5.3	0.7551	0.7468	1.1
22	0.0731	0.0791	8.0	0.7024	0.7551	7.5

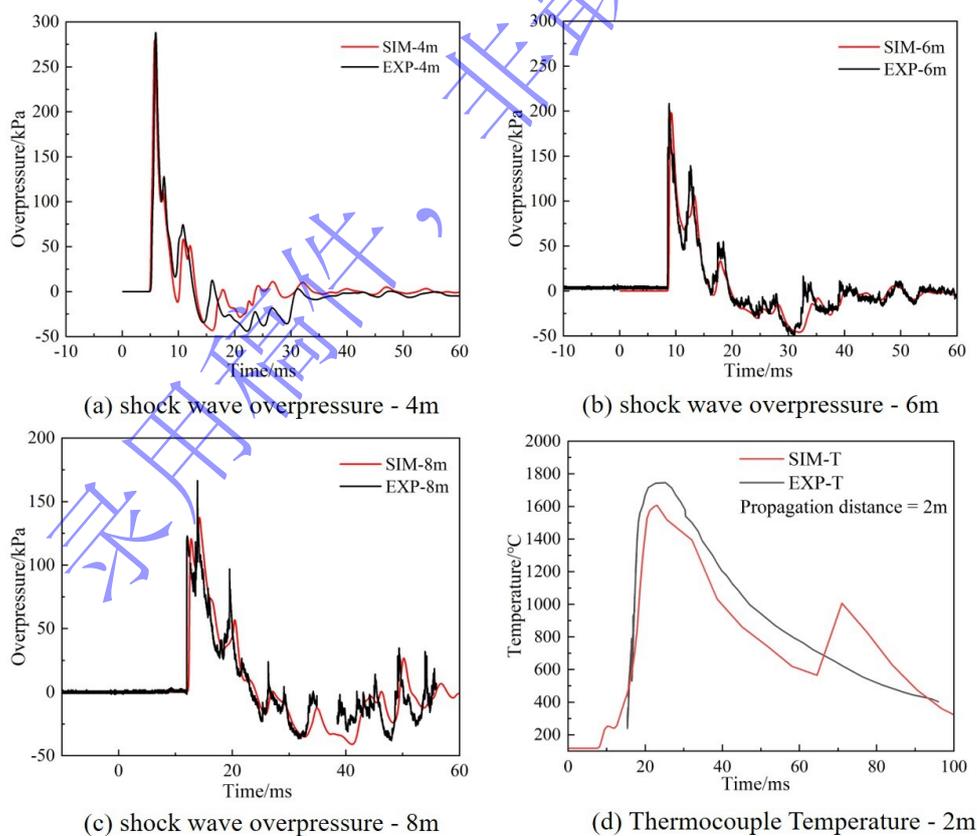


图 5 实验与仿真冲击波超压和热电偶温度对比结果

Fig. 5 Experimental and simulated shock wave overpressure and thermocouple temperature comparison results

3 沿隧道轴线距离对冲击波传播规律影响

3.1 隧道内爆炸冲击波传播规律

数值模拟结果显示，沿隧道轴线不同距离处爆炸冲击波传播过程相似，故以 1kg 温压炸药，沿隧道轴线距离 X 为 1m 处爆炸为例（见图 7），隧道内爆炸冲击波的传播^[20]可分为 3 个阶段：第 1 阶段为自由传播阶段，如图 7 (a) 所示，温压炸药起爆后，爆轰产物剧烈膨胀并迅速形成高强度椭球状冲击波阵面，其传播规律可使用空爆衰减定律描述；第 2 阶段为过渡阶段，冲击波与隧道结构相互作用显著，如图 7 (b) 所示，爆炸冲击波在隧道拱顶发生反射，部分反射波向爆心汇聚叠加，形成橄榄形的强压区向周围扩散，反射波传播速度比轴线传播的入射波快；如图 7 (c)~图 7 (d) 所示，壁面反射波追赶入射波形成马赫波，导致拱顶附近流场更复杂，马赫波强度与持续时间显著增加，压力云图呈现多峰结构；如图 7 (e)~图 7 (f) 所示，隧道内壁面多次反射的弱冲击波与主冲击波叠加，导致隧道截面等效中心处冲击波强度高于拱顶位置；如图 7 (g)~图 7 (h) 所示，隧道内弱冲击波与壁面发生反射，影响平面波的形成；第 3 阶段为一维传播阶段，如图 7 (i)~图 7 (k) 所示，冲击波能量进一步耗散，冲击波强度降低，形成稳定的平面波，可用平面波衰减规律描述。

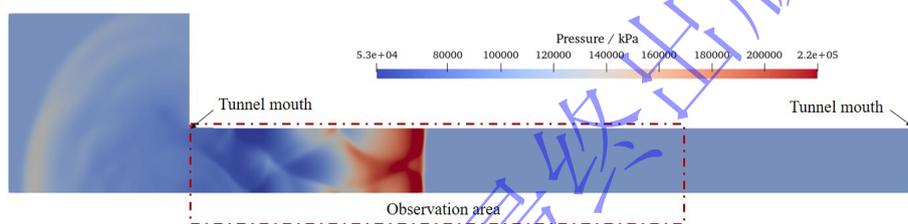


图 6 冲击波观测范围示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the observation range of the shock waves

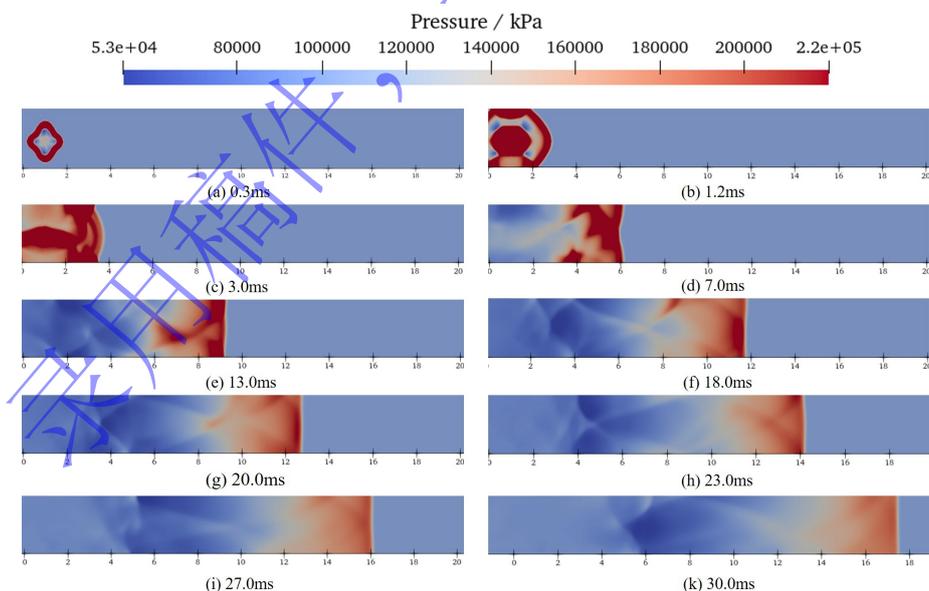


图 7 沿隧道轴线距离 X 为 1m 处爆炸典型时刻的压力云图

Fig. 7 Pressure cloud at typical moments of explosion at a distance X of 1m along the tunnel axis

3.2 沿隧道轴线距离对平面波形成距离的影响

1kg 温压炸药分别沿隧道轴线距离 X 为 1m、3m、5m 处爆炸，隧道内各测点冲击波超压峰值 ΔP_m 与传播距离的关系如图 8 所示。沿隧道轴线不同距离处爆炸冲击波超压峰值 ΔP_m 随传播距离的

增加而衰减。在冲击波传播前期，冲击波传播流场复杂，相同传播距离处径向各测点 ΔP_m 的偏差普遍较大，但传播一定距离后各测点 ΔP_m 的偏差减小。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%，作为稳定平面波的形成条件^[21]，给出 1kg 温压炸药沿隧道轴线距离 X 为 1m、3m、5m 处爆炸冲击波平面波的形成位置，发现平面波形成距离均为 14.5m，平面波形成距离与沿隧道轴线距离无关。

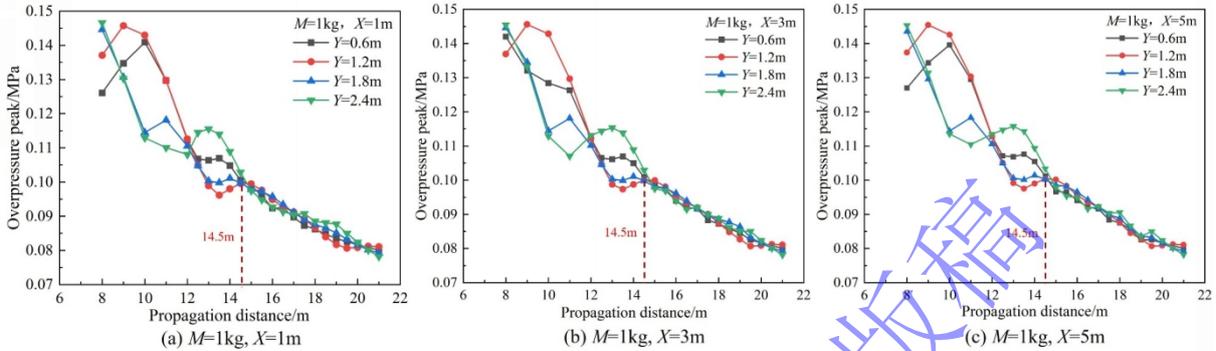


图 8 沿隧道轴线不同距离处爆炸冲击波超压峰值

Fig. 8 Peak overpressure of explosive shock wave at different distances along the tunnel axis

3.3 沿隧道轴线距离对冲击波特征参量的影响

如图 9 所示，通过计算 1kg 温压炸药分别沿隧道轴线距离 X 为 0m、0.5m、0.8m、1m、2m、3m、4m、5m 处爆炸，得到冲击波超压峰值 ΔP_m 与传播距离的关系。如上述图 7 所示，由于在平面波形成前，冲击波超压有振荡现象，冲击波传播流场复杂，难以定量描述规律。当 X 小于 0.8m 时，隧道中心测点冲击波超压峰值受沿隧道轴线距离的影响较大；相同传播距离处，冲击波超压峰值差别随着 X 的增大逐渐减小， X 大于 0.8m 后趋于稳定。

爆炸时从隧道端口泄出能量的大小与球状冲击波超出隧道端口的体积有关，隧道截面形状决定隧道内爆炸冲击波形状，因而可以将沿隧道轴线距离转换成隧道等效圆直径倍数^[22]，并由此来说明沿隧道轴线距离对隧道内冲击波超压峰值分布的影响。经以上分析可知，沿隧道轴线距离 X 小于 1/3 倍隧道等效圆直径 D 时，隧道内冲击波超压峰值分布会出现一定程度的差异；沿隧道轴线距离 X 大于 1/3 倍隧道等效圆直径 D ，冲击波超压峰值分布几乎不发生变化。

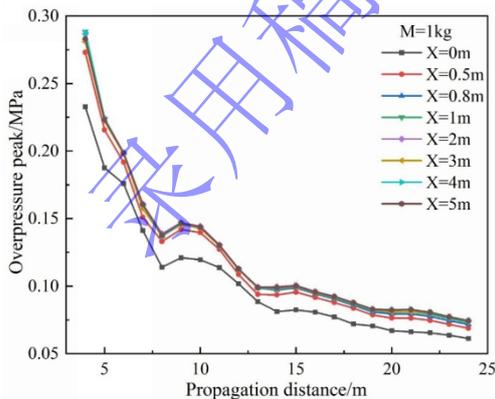


图 9 隧道轴线不同距离处爆炸超压峰值随传播距离变化

Fig. 9 Variation of peak X-explosion overpressure with propagation distance at different distances along the tunnel axis

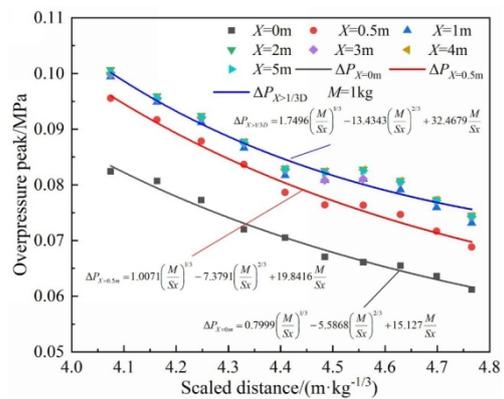


图 10 平面波形成后超压峰值随比例距离变化关系

Fig. 10 Change of overpressure peak with scaled distance after generate plane wave

杨科之^[23]给出了隧道内爆炸冲击波超压峰值 ΔP_m 的计算模型：

$$\Delta P_m = k_1 \left(\frac{M}{Sx} \right)^{1/3} + k_2 \left(\frac{M}{Sx} \right)^{2/3} + k_3 \frac{M}{Sx} \quad (5)$$

式中： M 为隧道内爆炸的炸药质量，kg； $k_1 \sim k_3$ 为无量纲参数， S 为隧道截面积； x 为冲击波传播距离，m。

图 10 为 1kg 温压炸药沿隧道轴线不同距离处爆炸，平面波形成以后，对冲击波超压峰值 ΔP_m 进行最小二乘法拟合，得到沿隧道轴线不同距离处爆炸冲击波超压峰值 ΔP_m 的计算模型系数。

由于沿隧道轴线距离的不同，导致隧道结构与爆炸冲击波产生不同的耦合效果，沿隧道轴线距离越小，从端口泄出的能量越多。如图 11 所示，表明沿隧道轴线距离对于炸药能量泄出量具有决定性的影响，能量泄出量的不同引起了冲击波传播过程中波形的形态变化，这种变化在冲击波的初始峰值阶段表现不明显，但对后续冲击波经过壁面反射并在隧道中心叠加时的超压峰值强度产生了显著影响。沿隧道轴线距离的增大导致冲击波向坑道外泄出的能量降低，延长了隧道内传播的正向作用时间。

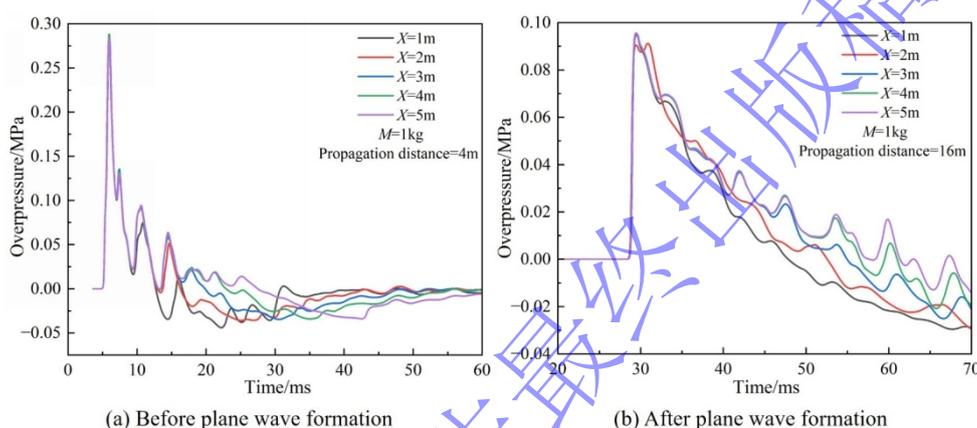


图 11 沿隧道轴线不同距离处爆炸冲击波超压曲线

Fig. 11 Blast shock wave overpressure curves at different distances along the tunnel axis

爆炸冲击波冲量 I 受超压峰值 ΔP_m 和正压作用时间 t_+ 的共同作用，需对爆炸冲击波冲量进行定量计算，以研究装药位置对坑道内爆炸冲量的影响。式 (6) 为计算冲击波冲量的 M·A·萨道夫斯基的公式^[24]，如图 12 为距爆心 14m 处冲击波超压-时间关系曲线与对应的冲量积分，冲击波正向超压-时间关系曲线所包含的面积即是空气冲击波的冲量 I 。

$$I = \int_{t_1}^{t_2} \Delta P(t) dt \quad (6)$$

式中： t_1 为冲击波正压开始时间； t_2 为冲击波正压结束时间； $\Delta P(t)$ 为冲击波超压。

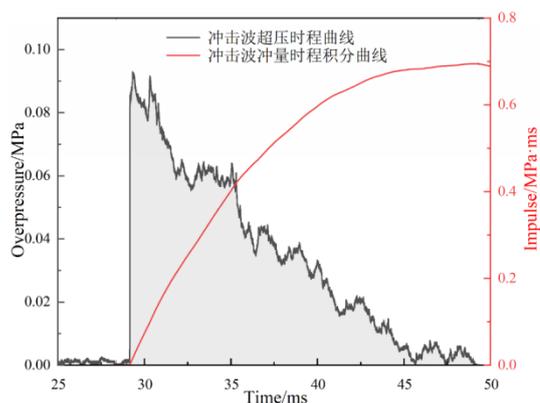


图 12 冲击波超压-时间关系曲线与对应的冲量积分
Fig. 12 Shock wave overpressure-time relationship curves with corresponding impulse integrals

图 13 (a) 描述了 1kg 温压炸药沿隧道轴线不同距离处爆炸冲击波冲量随传播距离的变化规律，从图 7 典型时刻冲击波压力云图中可以看出，冲击波冲量在平面波形成前，坑道壁面反射冲击波的叠加作用明显，不断增大冲击波的正相冲量^[11]，与图 11 (a) 冲击波平面波形成前冲击波超压时程曲线具有多峰的现象一致；由图 11 (b) 可知，平面波形成后，坑道壁面反射冲击波能量较弱，叠加作

用不明显，冲击波超压时程曲线多峰现象消失，此时冲击波能量耗散较慢，冲击波冲量基本保持不变；最后由于隧道口泄能效应使得近隧道口部，冲击波能量耗散速率加快，距隧道远端口轴线距离 5m 处，冲击波冲量开始减小。图 13 (c) 描述了平面波形成后的冲击波冲量随沿隧道轴线距离的变化关系，冲击波平面波形成后，当 X 小于 5m，冲量随着 X 的增加而增长；当 X 大于 5m 后，冲击波冲量数值基本保持不变，表明超过一定距离隧道口泄能效应对冲击波冲量的影响可以忽略。

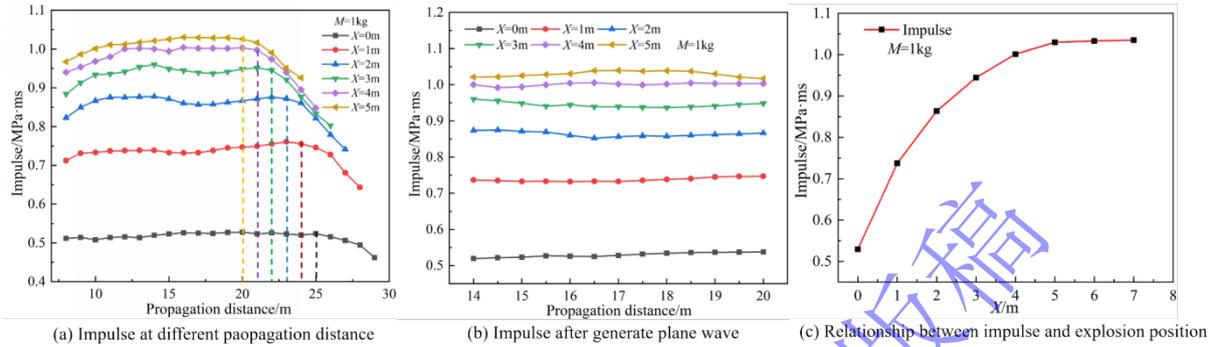


图 13 沿隧道轴线不同距离处爆炸冲量随传播距离变化关系

Fig. 13 Variation of blast impulse with propagation distance at different distances along the tunnel axis. distances X along the tunnel axis.

4 炸药质量对冲击波传播规律影响

4.1 炸药质量对平面波形成距离的影响

图 14 为 1kg ~ 5kg 温压炸药沿隧道轴线距离 X 为 5m 处爆炸冲击波超压峰值 ΔP_m 与传播距离的关系。不同质量温压炸药隧道内爆炸超压峰值 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 Y 方向上测点 ΔP_m 的偏差普遍较大，但传播一定距离后 ΔP_m 差异逐渐减小。如表 3 所示，平面波形成距离随炸药质量的增大而增加。

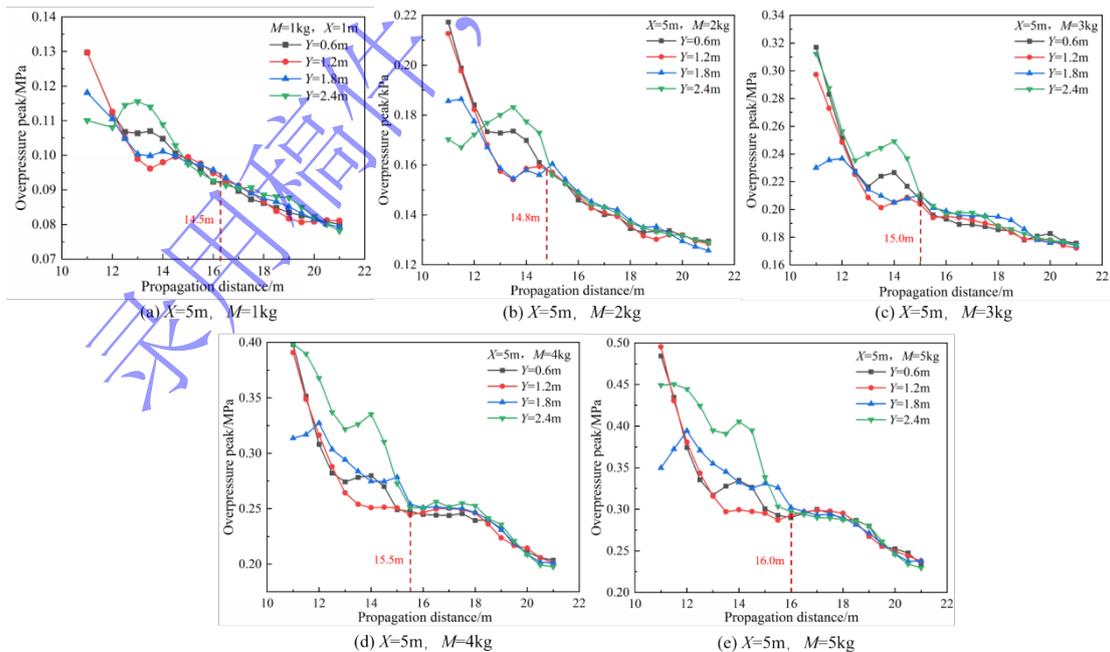


图 14 不同质量温压炸药爆炸超压峰值

Fig. 14 Peak overpressure at different thermobaric explosive qualities

表 3 不同质量温压炸药爆炸下平面波形成距离

Table 3 Plane wave formation distances at different quality of thermobaric explosives

M/kg	1	2	3	4	5
x/m	14.5	14.8	15.0	15.5	16.0

4.2 炸药质量对冲击波特征参量的影响

图 15 为 1kg ~ 5kg 温压炸药沿隧道轴距离 X 为 5m 处爆炸, 冲击波超压峰值 ΔP_m 随比例距离的变化关系。爆炸近区, 平面波尚未形成, 冲击波传播流场复杂。平面波形成后, 同一药量的冲击波超压峰值整体上随着传播距离的增加不断衰减。如图 16 所示, 平面波形成后, 不同质量炸药爆炸冲击波超压峰值随比例距离关系可近似用同一种计算模型表示, 计算模型如式 (7) 所示。

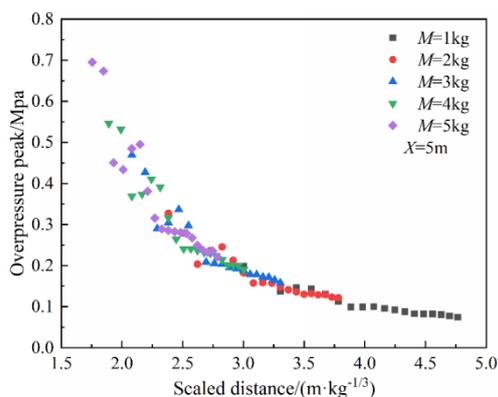


图 15 超压峰值随比例距离变化关系

Fig. 15 Relationship between peak overpressure and scaled distance

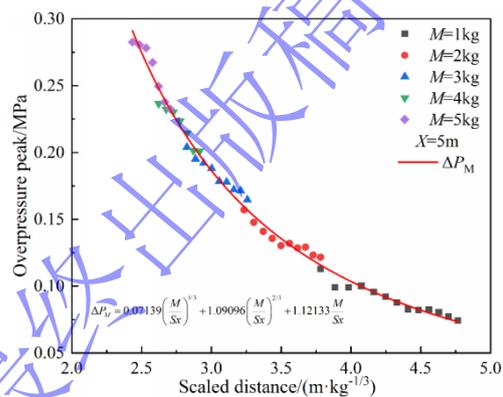


图 16 平面波形成后, 超压峰值随比例距离变化关系

Fig. 16 Relationship between peak overpressure and scaled distance after generate plane wave

$$\Delta P_{M=1kg\sim 5kg} = 0.07139 \left(\frac{M}{Sx} \right)^{1/3} + 1.09096 \left(\frac{M}{Sx} \right)^{2/3} + 1.12133 \frac{M}{Sx} \quad (X > 1/3D) \quad (7)$$

式中: D 为隧道截面等效圆直径, 取 2.4m。

上述图 8 所示, 当沿隧道轴距离 $X > 1/3 D$ 后, 冲击波超压峰值分布几乎不发生变化, 则式 (7) 不仅可以预测平面波形成后, 不同质量温压炸药沿隧道轴距离 X 为 5m 处爆炸冲击波超压峰值随传播距离的关系, 也可以预测不同质量温压炸药沿隧道轴线距离 $X > 1/3 D$ 处爆炸平面波形成后冲击波超压峰值。

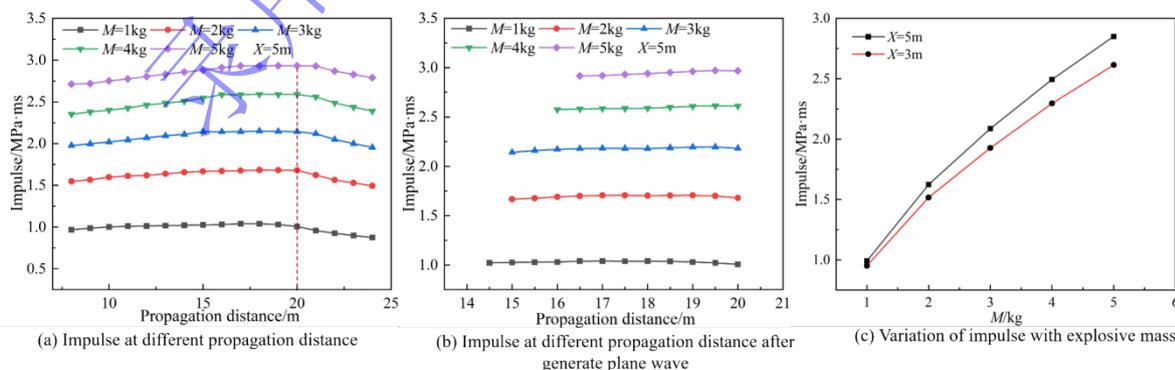


图 17 不同质量炸药爆炸冲量随传播距离变化关系

Fig. 17 Variation of blast impulse with propagation distance for different mass of explosives

图 17 (a) 为 1kg~5kg 温压炸药沿隧道轴距离 X 为 5m 处爆炸, 冲击波冲量随传播距离的变化规律; 图 17 (b) 为爆炸平面形成后, 冲击波冲量随传播距离的变化关系。可知 $M = 1\text{kg}$ 的平均冲量为 $1.03 \text{ MPa}\cdot\text{ms}$, $M = 2\text{kg}$ 的平均冲量为 $1.67 \text{ MPa}\cdot\text{ms}$, $M = 3\text{kg}$ 的平均冲量为 $2.14 \text{ MPa}\cdot\text{ms}$, $M = 4\text{kg}$ 的平均冲量为 $2.54 \text{ MPa}\cdot\text{ms}$, $M = 5\text{kg}$ 的平均冲量为 $2.93 \text{ MPa}\cdot\text{ms}$ 。由图 17 (c) 可知, 平面波形成后, 沿隧道轴线不同距离处爆炸冲击波冲量均随炸药质量的增加而增大, 但沿隧道轴线不同距离处爆炸冲击波冲量随质量的增长速率不同。

5 隧道内爆炸火团演化特征与传播距离

5.1 隧道内爆炸火团演化特征

图 18 为 5kg 温压炸药沿隧道轴线距离 X 为 5m 处爆炸火团演化过程, 可以清楚地观察到温压炸药爆炸火团演化过程。随着爆炸能量的快速释放, 火团迅速膨胀并向外扩张, 火团内部的温度梯度分布表明热量正向周围介质传递, 导致局部温度上升, 火团阵面近似球面。随着爆炸时间的发展, 火团半径逐渐增大, 由于受坑道壁面限制, 火团沿隧道轴线垂直方向发展趋势趋于停滞, 主要向轴线方向上延伸, 轴线方向上出现火团高温尖端, 以高温热辐射和热对流的方式加热周围空气。随着时间的增长, 火团温度逐渐降低、轴线方向上突出的火团高温尖端也逐渐消失, 此后火团面近似于平面, 流场相对稳定, 这一现象与冲击波在坑道内的传播极为相似。

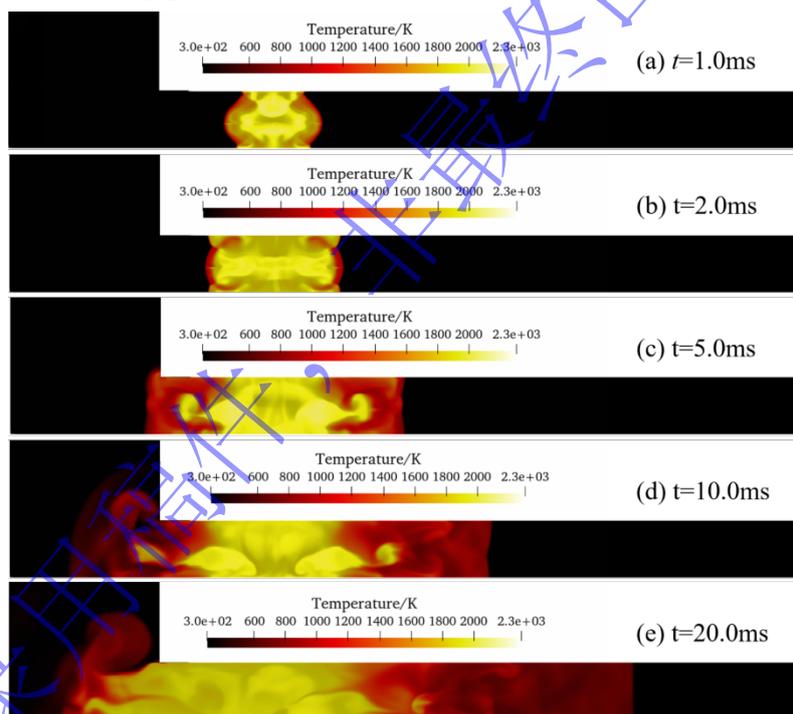


图 18 5kg 温压炸药沿隧道轴线距离 X 为 5m 处爆炸火团演化过程

Fig. 18 5kg temperature and pressure explosives along the tunnel axis at a distance of 5m from the explosion of the fire mass evolution process

图 19 (a) 为 5kg 温压炸药沿隧道轴线距离 X 为 5m 处爆炸, 隧道内不同时刻轴线方向上温度随传播距离的变化关系, 隧道内轴线方向上的温度分布呈现“几”字型的变化规律。5ms 时高温火团核心温度在隧道内为 2000K 左右, 隧道外为 700K 左右; 10ms 时高温火团核心温度在隧道内为 1800K 左右, 隧道外为 1300K 左右; 20ms 时高温火团核心温度在隧道内为 1600K 左右, 隧道外为 1500K 左右; 随着时间的增加, 隧道口内的温度持续下降, 由于火团总是向近隧道口方向移动 (图 18), 则隧

道口外的温度随着时间的增加出现先上升后下降的现象。火团不同温度轴线方向上传播距离 L 随时间的变化关系如图 19 (b) 所示, 15ms 时, 火团 1500K 温度边界达到最大, 轴线方向上传播最大距离为 6.1m; 20ms 时, 1000K 温度边界达到最大, 轴线方向上传播最大距离为 7.1m。

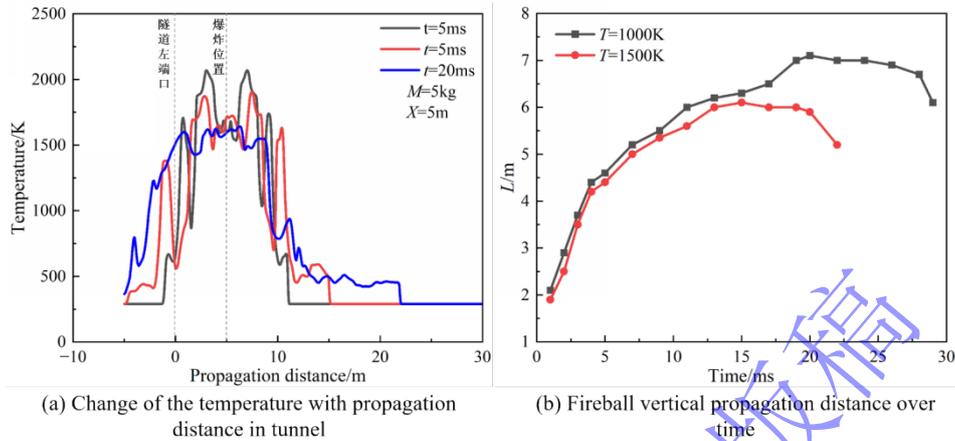


图 19 温压炸药隧道内爆炸
Fig. 19 Explosion in tunnel of 5kg thermobaric explosive

5.2 隧道内爆炸火团传播距离

温压炸药爆炸过程中形成的高温火团具有较长的持续时间和较高的温度, 能够导致显著的热辐射效应, 进而对目标区域内的人员造成直接热损伤。图 20 为不同质量温压炸药沿隧道轴线不同距离处爆炸, 火团不同温度轴线方向上传播距离随时间变化关系。爆炸火团不同温度轴线方向上传播距离 L 随时间的变化规律相似, 轴线方向上传播距离 L 均随着时间的增加先增加, 然后达到峰值开始降低。火团不同温度下轴线方向上最大传播距离 L_{max} 如表 4 所示。

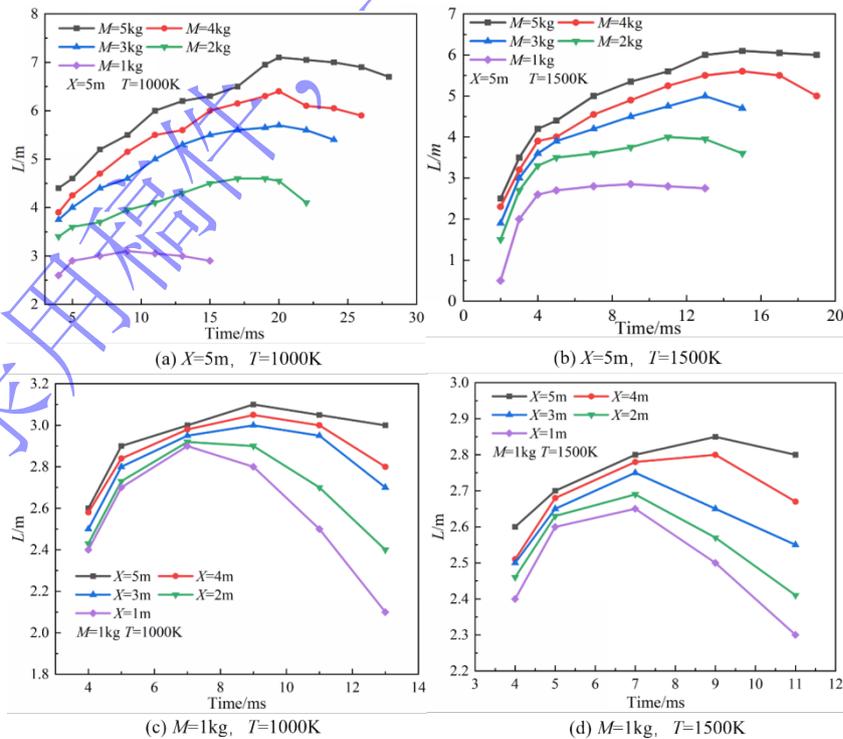


图 20 温压炸药爆炸火团不同温度轴线方向传播距离

Fig. 20 Fireball propagation distance in the direction of different temperature axes in the explosion of thermobaric explosives

表 4 火团不同温度下轴线方向上最大传播距离

Table 4 Maximum propagation distance in the axial direction at different temperatures of the fireball

温压炸药质量 M/kg	L_{\max}/m		炸药位置 X/m	L_{\max}/m	
	1000K	1500K		1000K	1500K
1	3.1	2.83	1	2.9	2.65
2	4.6	4.0	2	2.92	2.69
3	5.7	5.0	3	3.0	2.75
4	6.4	5.6	4	3.05	2.80
5	7.1	6.1	5	3.1	2.83

诸多学者在火团模型及其热辐射效应方面进行了深入探索，并发展了多种理论模型以描述其物理行为^[25,26]，对于各种火团的热辐射效应，火团直径 D 是重要参数之一，基本形式如下

$$D = aM^b \quad (8)$$

式中： M 为炸药质量； a 、 b 均为常数。

隧道内爆炸火团不同温轴线方向上传播最大距离与炸药质量之间的关系可近似用式 (8) 描述，改进后的模型如下：

$$L_{\max} = aM^b \quad (9)$$

式中： L_{\max} 为火团隧道内轴线方向上最大传播距离。

根据式 (9)，得到隧道内不同质量温压炸药隧道内爆炸，火团不同温度轴线方向上传播最大距离与药量的关系，如式 (10) 所示。

$$\begin{cases} L_{\max} = 3.22M^{0.5} & (T = 1000\text{K}) \\ L_{\max} = 2.88M^{0.48} & (T = 1500\text{K}) \end{cases} \quad (10)$$

6 结论

本文结合开展的温压炸药隧道内爆炸试验验证了数值模拟计算模型，通过数值模拟，系统地研究了温压炸药隧道内爆炸冲击波传播规律和火团热效应演化特征，主要结论如下：

- (1) 建立了典型温压炸药沿隧道轴线不同距离处爆炸平面波形成后冲击波超压峰值的预测模型，相同装药质量条件下，沿隧道轴线距离 X 大于 1/3 倍隧道等效直径时，爆炸冲击波超压峰值衰减规律和冲击波平面波形成距离与 X 无关；冲击波平面波形成后，冲量在 X 小于 5m 时随距离增加而增大，当 X 大于 5m 后冲量保持恒定。
- (2) 典型温压炸药同一隧道轴线距离处爆炸，冲击波平面波形成距离随炸药质量的增加而增大，平面波形成后爆炸冲击波超压峰值衰减规律不受装药质量影响，但冲击波冲量随装药质量的增加而增长，且沿隧道轴线不同距离处爆炸冲击波冲量随质量的增长速率不同。
- (3) 由于隧道壁面的约束作用，爆炸火团在隧道轴线垂直方向上发展受限，轴线方向形成了高温尖端，轴线方向上温度分布呈现“几”字型变化；由于隧道口的泄能效应导致火团总是向隧道口方向移动，导致隧道口外温度出现随时间先上升后下降，隧道内温度随时间下降。
- (4) 通过分析不同质量典型温压炸药沿隧道轴线不同距离处爆炸火团在隧道内的温度分布，发现火团不同温度下轴线方向传播距离随时间的变化规律相似，均表现为先增加至峰值后开始降低；进一步建立爆炸火团不同温度轴线方向上传播最大距离与炸药质量的拟合公式，可预测典型温压炸药隧道内爆炸火球不同温度轴线方向上传播最大距离。

参考文献

- [1] TÜRKER L. Thermobaric and enhanced blast explosives (TBX and EBX) [J]. *Defence Technology*, 2016, 12(6): 423-445. DOI: 10.1016/j.dt.2016.09.002.
- [2] SHIN J, PANG S, KIM W. Enhancing blast mitigation in tunnels with expansion chamber subjected to high explosives detonations for protecting underground facilities [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, 147: 105720. DOI: 10.1016/j.tust.2024.105720.
- [3] CHEN F, MAO J, ZHOU J, et al. Thermal Environment inside a Tunnel after Thermobaric Explosion [J]. *Shock and Vibration*, 2017, 2017: 1-11. DOI: 10.1155/2017/5427485.
- [4] 刘泉, 姚箭, 宋先钊, 等. 初始环境压力对 RDX 基温压炸药冲击波超压和温度的影响 [J]. *北京理工大学学报*, 2024, 44(9): 913-922. DOI: 10.15918/j.tbit.1001-0645.2023.218.
LIU Q, YAO J, SONG X Z, et al. Influence of initial ambient pressure on shockwave overpressure and temperature of RDX-based thermobaric explosive [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2024, 44(9): 913-922. DOI: 10.15918/j.tbit.1001-0645.2023.218.
- [5] 李世民, 李晓军, 郭彦朋. 温压炸药自由场爆炸空气冲击波的数值模拟研究 [J]. *爆破*, 2011, 28(3): 8-12. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2011.03.003.
LI S M, LI X J, GUO Y P. Numerical simulation study on airblast of thermobaric explosive explosion in free air [J]. *Blasting*, 2011, 28(3): 8-12. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2011.03.003.
- [6] 茅靳丰, 陈飞, 侯普民. 温压炸药坑道口部爆炸冲击波毁伤效应研究 [J]. *力学季刊*, 2016, 37(1): 184-193. DOI: 10.15959/j.cnki.0254-0053.2016.01.022.
MAO J F, CHEN F, HOU P M. Study on shock wave damage effects of thermobaric explosive explosion in tunnel entrance [J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2016, 37(1): 184-193. DOI: 10.15959/j.cnki.0254-0053.2016.01.022.
- [7] TRZCIŃSKI W A, MAIZ L. Thermobaric and enhanced blast explosives – properties and testing methods [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2015, 40(5): 632-644. DOI: 10.1002/prep.201400281.
- [8] 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. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.03.004.
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. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.03.004.
- [9] 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.
- [10] 纪玉国, 张国凯, 李干, 等. 坑道内爆炸条件下温压炸药的爆炸特性及其影响因素 [J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(3): 118-132. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0011.
JI Y G, ZHANG G K, LI G, et al. Explosion characteristics of thermobaric explosive (TBX) detonated inside a tunnel and the related influential factors [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(3): 118-132. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0011.
- [11] Gogulya M F, Brazhnikov M A. Pressure and temperature of the detonation products of explosive materials containing aluminum of various dispersities [J]. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2010, 4(5): 773-787. DOI: 10.1134/S1990793110050131.
- [12] Maiz L, Trzciński W A, Paszula J. Optical spectroscopy to study confined and semi-closed explosions of homogeneous and composite charges [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 88: 111-119. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2016.08.006.
- [13] 闫潇敏, 苏健军, 李芝绒, 等. 坑道内温压炸药的爆炸热效应研究 [J]. *火工品*, 2015(1): 22-25. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2015.01-0022-04.

- YAN X M, SU J J, LI Z R, et al. Experimental Study on Explosive Thermal Effect of Thermal-baric Explosives in Tunnel [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2015(1): 22-25. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2015.01-0022-04.
- [14] 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.
- [15] 曹同堂, 周霖, 张向荣, 等. DNAN 基熔铸炸药 JWL 状态方程参数的预估方法 [J]. *北京理工大学学报自然版*, 2017, 37(2): 141-145. DOI: 10.15918/j.tbit.1001-0645.2017.02.006.
- CAO T T, ZHOU L, ZHANG X R, et al. Prediction method of parameters of JWL equation of state for DANA-based fusion-cast explosives [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2017, 37(2): 141-145. DOI: 10.15918/j.tbit.1001-0645.2017.02.006.
- [16] 陈朗, 冯长根, 赵玉华, 等. 含铝炸药爆轰数值模拟研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2001, 21(4): 415-419. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0645.2001.04.003.
- CHEN L, FENG C G, ZHAO Y H, et al. Numerical Simulation of the Detonation of Aluminized Explosives [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2001, 21(4): 415-419. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0645.2001.04.003.
- [17] 薛再清, 徐更光, 王廷增, 等. 用修正的 KHT 状态方程预报炸药爆轰性能 [J]. *北京理工大学学报*, 1998, 18(3): 290-294. DOI: 10.15918/j.tbit.1001-0645.1998.03.002.
- XUE Z Q, XU G G, WANG T Z, et al. Using revised KHT equation of state to predict explosive detonation property [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 1998, 18(3): 290-294. DOI: 10.15918/j.tbit.1001-0645.1998.03.002.
- [18] 项大林, 荣吉利, 李健, 等. 基于 KHT 程序的 RDX 基含铝炸药 JWL 状态方程参数预测研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2013, 33(3): 239-243. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0645.2013.03.005.
- XIANG D L, RONG J L, LI J, et al. JWL equation of state parameters prediction of RDX-based aluminized explosive based on KHT code [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2013, 33(3): 239-243. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0645.2013.03.005.
- [19] 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 asquar tunnel [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2020, 28(1): 46-51. DOI: 10.11943/CJEM2018305.
- [20] BIDABADI M, POORFAR A K, WANG S, et al. A comparative study of different burning time models for the combustion of aluminum dust particles [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 105: 474-482. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.022.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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(1): 37-40. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1455.2003.01.007.
- YANG K Z, YANG X M. Shock waves propagation inside tunnels [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003(1): 37-40. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1455.2003.01.007.
- [24] J.II.奥尔连科主编. *爆炸物理学* [M]. 孙承纬, 译. 北京: 科学出版社, 2011.

- ОРЛЕНКОЛП. Explosion physics [M]. Translated by Sun Chengwei. Beijing: Science Press, 2011.
- [25] Kang L, Liu J, Yao Y, et al. Enhancing risk/safety management of HAN-based liquid propellant as a green space propulsion fuel: A study of its hazardous characteristics [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 177: 921-931. DOI: 10.1016/j.psep.2023.07.054.
- [26] Liu W, Bai C, Liu Q, et al. Effect of metal dust fuel at a low concentration on explosive/air explosion characteristics [J]. Combustion and Flame, 2020, 221: 41-49. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.07.025.

录用稿件，
非最终出版稿