

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0011

# 坑道内爆炸条件下温压炸药的爆炸特性 及其影响因素\*

纪玉国<sup>1,2</sup>, 张国凯<sup>1</sup>, 李干<sup>2</sup>, 邓树新<sup>1</sup>, 姚箭<sup>1</sup>, 李杰<sup>2</sup>, 王明洋<sup>1,2</sup>, 何勇<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094;

2. 陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾全国重点实验室, 江苏南京 210007)

**摘要:** 温压炸药在坑道内爆炸时会产生多种毁伤元, 对坑道内人员和设备造成严重威胁。基于不同药量的温压炸药爆炸试验, 对坑道内爆炸条件下温压炸药的爆炸特性开展了研究, 分析了爆炸热效应演化特征、冲击波传播规律和氧浓度降低情况, 讨论了坑道对铝粉后燃的约束作用规律以及形成高烈度后燃效应的药量条件。研究表明: 温压炸药火球辐射亮度高于 TNT, 且其火球温度峰值超过 TNT 温度峰值的 1.3 倍。在火球演化过程中, 火球在后燃阶段的温度峰值较火球形态刚稳定时提升超过 10%。在冲击波传播规律方面, 超压峰值与正压时间的 TNT 当量系数分别约为 1.4 与 1.65。另外, 铝粉后燃产生的压缩波对冲击波能够形成多种补充效果, 陡峭升压的压缩波能够使冲击波峰值升高, 持续时间长但升压速率慢的压缩波能够限制冲击波的衰减, 延长整体正压作用时间。受坑道约束作用, 温压炸药爆炸火球将与坑道壁面发生相互作用, 进而提高铝粉的燃烧烈度。当温压炸药质量立方根与坑道直径的比值大于  $0.28 \text{ kg}^{1/3}/\text{m}$  时, 将产生高烈度后燃效应。

**关键词:** 温压炸药; 坑道内爆炸; 后燃反应; 毁伤元; 约束作用

中图分类号: O382; TJ41 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

## Explosion characteristics of thermobaric explosive (TBX) detonated inside a tunnel and the related influential factors

Ji Yuguo<sup>1,2</sup>, Zhang Guokai<sup>1</sup>, Li Gan<sup>2</sup>, Deng Shuxin<sup>1</sup>, Yao Jian<sup>1</sup>, Li Jie<sup>2</sup>, Wang Mingyang<sup>1,2</sup>, He Yong<sup>1</sup>

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

2. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, Jiangsu, China)

**Abstract:** Multiple damage effects can be generated when thermobaric explosives (TBX) detonated inside a tunnel, posing serious threats to people and equipment. Based on the explosion tests with different explosive masses, the explosion characteristics of the TBX detonated inside a tunnel are investigated. The thermal effects of fireball and the propagation law of the shock wave inside the tunnel are analyzed, the reduction degree of oxygen concentration is elucidated as well. Besides, the constraint effect of the tunnel on the afterburning of aluminum powders and the explosive mass conditions for the formation of afterburning effects at high intensity are discussed. It is shown that the radiation brightness of the fireball induced by the TBX is higher than TNT, and the temperature peak of TBX fireball is 1.3 times higher than that of TNT. During the process of fireball evolution, the temperature peak of the TBX fireball in the afterburning stage can increase by more than 10% compared to the temperature peak at the moment when the fireball is just stable. Regarding the propagation law of shock waves, the TNT

\* 收稿日期: 2023-01-09; 修回日期: 2023-11-23

基金项目: 国家自然科学基金 (52278504); 江苏省自然科学基金 (BK20220141)

第一作者: 纪玉国 (1993—), 男, 博士, [jiyuguo8162@njjust.edu.cn](mailto:jiyuguo8162@njjust.edu.cn)

通信作者: 张国凯 (1988—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, [gkzhang@njjust.edu.cn](mailto:gkzhang@njjust.edu.cn)

equivalent coefficients of the overpressure peak and positive pressure time are approximately 1.4 and 1.65, respectively. In addition, the compressive waves generated by the afterburning of aluminum powders can provide various supplementary effects on the propagation of shock wave. The compressive wave with quickly rising process can be benefit for the increase in the pressure peak of the shock wave. In terms of the compressive wave with long duration and slow rising process, it can limit the attenuation of the shock wave and can extend the overall positive pressure time. Due to the constraint effect of the tunnel, the TBX fireball could interact with tunnel walls. As a consequence, the combustion intensity of aluminum powders will be enhanced. When the ratio between the cubic root of the TBX mass and the equivalent tunnel diameter is greater than  $0.28 \text{ kg}^{1/3}/\text{m}$ , the afterburning effect at high intensity will emerge.

**Keywords:** thermobaric explosive; explosion inside the tunnel; afterburning; damage element; restraint affect

坑道作为一种重要的地下防护结构<sup>[1]</sup>, 具有优良的结构抗力和掩蔽性。然而, 当炸药在坑道内爆炸后, 坑道壁面会对炸药爆炸过程形成约束作用<sup>[2-3]</sup>, 使爆炸效应进一步加强。当炸药富含高活性铝粉时, 铝粉燃烧产生的能量增益<sup>[4]</sup>可以显著提高冲击波和热效应, 也会产生耗氧窒息效应。因此, 研究温压炸药在坑道内的爆炸特性及其受到的约束作用具有重要意义。

温压炸药爆炸释放的能量包含爆轰能和燃烧能<sup>[4]</sup>, Arnold 等结合多次试验结果和铝粉的二次反应观点<sup>[5]</sup>, 将温压炸药的反应过程总结为无氧爆轰、无氧燃烧和有氧燃烧 3 个阶段, 整个释能过程受环境影响十分明显。有关温压炸药在开阔空间爆炸释能, 研究人员主要对冲击波传播规律进行了研究。Hahma 等<sup>[6]</sup>以冲击波超压峰值为评价指标, 获得了不同种类金属燃料有氧燃烧对温压炸药超压的作用规律。Mohamed 等<sup>[7]</sup>对一种 RDX 基温压炸药在开阔空间的冲击波传播过程进行了模拟, 冲击波曲线表明金属燃料的后燃烧过程会大幅延长正压时间。

温压炸药在密闭空间内爆炸时, 结构的约束效应能够使爆炸效应显著增强<sup>[8]</sup>, 冲击波增强的同时, 准静态压力也十分明显。Zhang 等<sup>[9]</sup>在大型爆炸罐内进行了纯 TNT 和 TNT 基炸药的内爆炸试验, 发现铝粉质量分数的提高能够产生更好的后燃烧能量释放效果。Peucker 等<sup>[10]</sup>在不同氧含量气氛的密闭环境中进行了纯 RDX 炸药和 RDX 基温压炸药的爆炸试验, 发现早期的铝粉释能可以增强爆炸波。数值计算方面, Kim 等<sup>[11]</sup>围绕温压炸药铝粉在密闭空间中的后燃烧过程开发了一种 Eulerian-Lagrangian 计算模型, 计算结果表明合理的铝粉粒径对温压炸药的输出效果影响十分明显。李根等<sup>[12]</sup>建立了一种有限差分-物质点耦合算法为核心的气固两相反应流模型, 对密闭空间中温压炸药的冲击波二次波峰现象、准静态压力等进行了研究。

温压炸药在坑道中的爆炸效应方面, 国内有关温压炸药在坑道内爆炸特性的研究主要集中在冲击波传播规律方面<sup>[13-15]</sup>。孔霖等<sup>[16]</sup>在直坑道内开展了相同药量的温压炸药与 TNT 爆炸实验研究, 结果表明温压炸药冲击波正压持续时间高于 TNT。李世民等<sup>[17]</sup>研究了 RDX 基温压炸药爆炸冲击波在直径 0.4 m 的圆形坑道内的传播过程, 发现温压炸药爆炸近区的冲击波超压峰值低于 TNT, 在之后的不断传播过程中, 温压炸药的峰值逐渐超过同位置 TNT 的峰值, 最高当量达到了 1.48 倍。苟兵旺等<sup>[14]</sup>搭建了一种由爆炸塔连接直坑道和 S 形坑道的复合坑道, 研究了温压炸药在直坑道和 S 形坑道内的空气冲击波超压演化过程, 发现坑道内温压炸药爆炸冲击波超压、比冲量整体高于 TNT。耿振刚等<sup>[13]</sup>、茅靳丰等<sup>[15]</sup>根据 Autodyn 中的 JWL-Miller 方程, 对多种尺寸坑道内不同当量的温压炸药爆炸冲击波衰减规律进行了研究, 计算结果显示温压炸药的超压峰值和正压时间都大于 TNT 的。

目前对温压炸药在坑道内爆炸特性的研究仍然以温压炸药的冲击波传播规律为主<sup>[13-18]</sup>, 对后燃引起的热效应演化特征和耗氧能力研究较少, 导致对温压炸药的理解并不十分全面; 坑道结构对冲击波传播、热效应演化和爆炸气体流动均会产生显著的约束作用, 关于约束作用对炸药爆炸和燃烧规律及内在机理的研究未见报道。本文中根据以上问题进行试验设计, 开展不同药量温压炸药的坑道口内爆炸试验, 并与 TNT 炸药坑道口内爆炸试验结果进行对比, 在已有研究的基础上进一步挖掘温压炸药后燃效应的特征现象和形成机理, 以期对温压炸药坑道内爆炸的多种毁伤元传播及演化规律模型提供支撑。

## 1 试验方案

试验平面布置图如图 1 所示。试验所用坑道长度为 30 m, 3~27 m 之间为主要的爆炸参数测试段, 每 2 m 布置一个测点, 测点编号为 A1~A13。坑道截面形状为直墙圆拱形(图 2), 直墙高度为 1.8 m, 圆拱直径为 1.8 m, 坑道截面宽度为 1.8 m, 截面积  $S=4.52 \text{ m}^2$ , 等效直径  $D_{\text{eq}}=2.4 \text{ m}$ 。

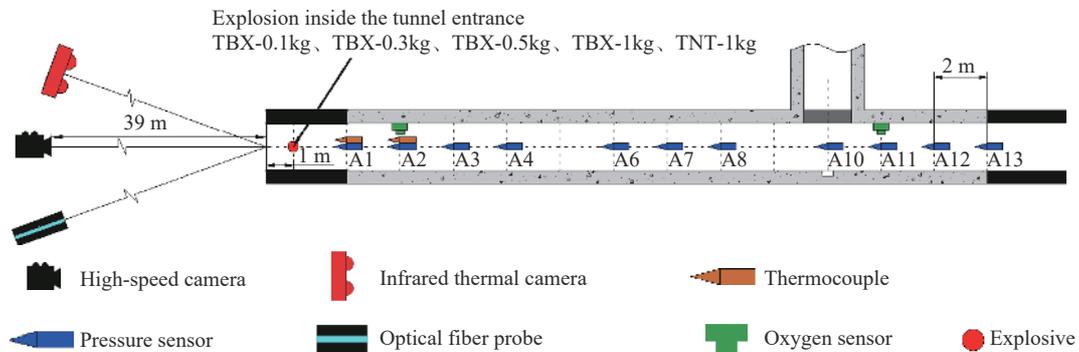


图 1 坑道内爆炸试验平面布置图

Fig. 1 Layout plan of tunnel experiment

测量内容主要包括冲击波、热效应参数和氧浓度, 试验为口内空爆试验, 药柱悬挂在距坑道端口 1 m 处, 炸高 1.2 m, 共进行 5 次试验, 工况及编号如表 1 所示。分别开展温压炸药和 TNT 爆炸特性对比研究, 其中温压炸药密度为  $1.90 \text{ g/cm}^3$ , 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黏结剂, 药柱长径比接近 1。TNT 密度为  $1.57 \text{ g/cm}^3$ , 药柱长径比为 1。

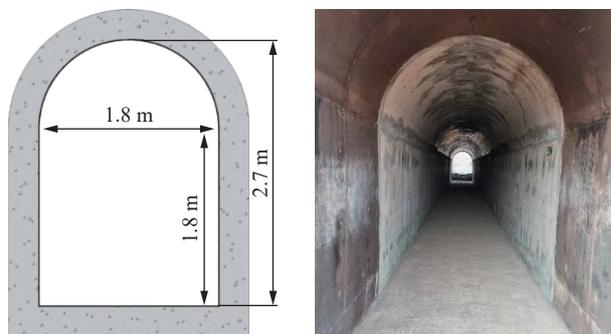


图 2 坑道截面及内部空间

Fig. 2 Section and internal space of the tunnel

表 1 试验工况  
Table 1 Test conditions

炸药	药量/kg	编号
TBX	0.1	TBX-0.1kg
TBX	0.3	TBX-0.3kg
TBX	0.5	TBX-0.5kg
TBX	1.0	TBX-1kg
TNT	1.0	TNT-1kg

由图 1 可知, 冲击波超压测点分别布置在坑道内的 A1~A4、A6~A8 和 A10~A13 测点; 热测试包括红外相机测温<sup>[19]</sup>、高速成像测温<sup>[20]</sup>、光纤测温<sup>[21]</sup>和热电偶测温<sup>[22]</sup>4 种方法, 高速成像、红外相机测温 and 光纤测温等非接触式测温布置在坑道口外 39 m 处, 热电偶温度传感器布置在坑道内的 A1 和 A2 测点; 氧浓度传感器布置在 A2 和 A11 测点。

冲击波测试方面。使用 PCB 公司生产的 ICP 型 137B 系列空气压力传感器(图 3(a))测量冲击波压力曲线, 采用瑞士 Elsys 公司生产的 Tran AX3 型数据采集仪(图 3(b)), 数据采集频率为 1 MHz。

热效应测试方面。红外相机(图 3(c))温度上限为 3000 °C, 采样频率为 30 Hz, 用于观测火球表面温度分布和火球尺寸。高速相机(图 3(d))通过控制曝光时间、透光率调整辐射亮度, 获得反映火球温度在毫秒尺度的演化过程<sup>[21]</sup>。根据文献 [20, 23] 中光圈、曝光时间和辐射亮度的对应情况, 本研究中高速相机的具体参数为: 曝光时间 18  $\mu\text{s}$ , 光圈 f22, 采集频率 3000 Hz。辐射亮度 RGB 值从最低(0, 0, 0)到最高(256, 256, 256)对应的温度为 1500~1800 °C, 低于 1500 °C 时图片显示为黑色, 高于 1800 °C 时火焰显示

为超过光学元件识别上限的白色;多谱线光纤系统的温度测量上限为 4000 °C,采集频率为 1 MHz,能够对爆炸火球的表面温度趋势进行定量描述。热电偶为偶丝直径 0.04 mm 的 S 型热电偶,响应频率大于 1 000 Hz,测量的温度上限可以达到 2 000 °C,能够在峰值为 0.8 MPa 以下的空气冲击波压力下正常工作 7~10 炮次。

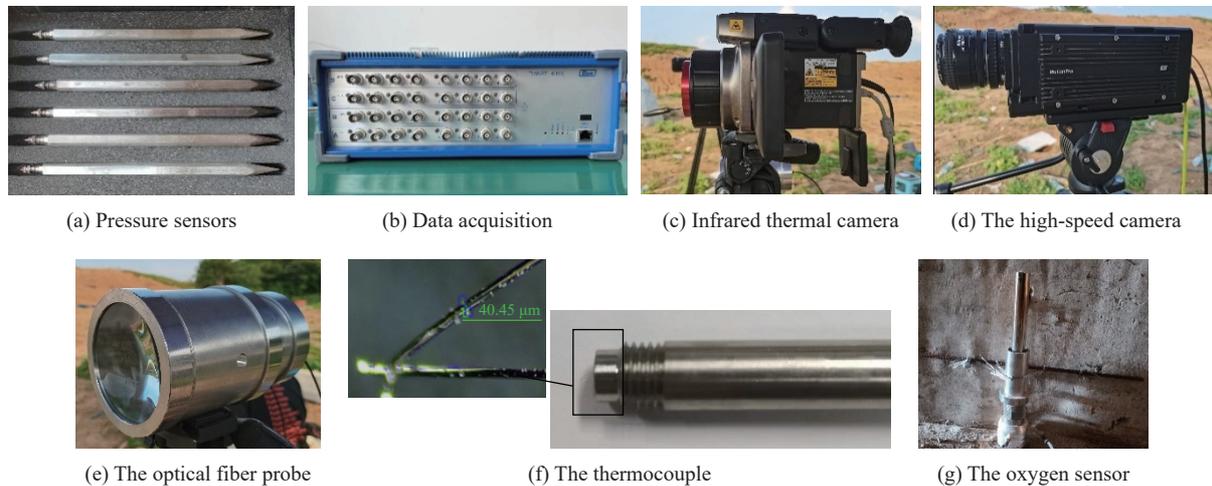


图 3 主要测量仪器设备

Fig. 3 Main measuring instruments and equipment

氧浓度测试方面。使用氧化锆电化学氧气传感器(简称氧气传感器)<sup>[24]</sup>,动态响应频率约为 100 Hz,能够在 0.8 MPa 以下的冲击波流场中正常工作。固定方式如图 3(g)所示,传感器贴坑道侧壁固定,从而降低对整个坑道流场的影响,探头表面与爆炸气流运动方向平行,以降低冲击波对设备造成毁伤的可能性。

## 2 热效应演化规律分析

### 2.1 爆炸火球高温区域演化特征

图 4 为 TBX-0.1kg、TBX-0.5kg、TBX-1kg 和 TNT-1kg 的爆炸火球在高速相机 1 500 °C 以及红外相机 500 °C 以上的辐射亮度和温度图片。高速相片显示 TBX-1kg 在火球 1 500 °C 以上的持续时间约为 40 ms, TBX-0.1kg 和 TBX-0.5kg 在 1 500 °C 以上的持续时间约为 35 ms,高速相片中的辐射亮度和红外相片的火焰范围和温度分布基本对应。

对图 4 中各工况下不同时刻高于 1 500 °C 的火球高温范围  $S_f$  进行统计,计算其与坑道截面积  $S_i$  的比值  $S_f/S_i$  在 1~40 ms 期间的变化过程,计算结果如图 5 所示。TBX-0.1kg 工况下,火球在 1 ms 后增长过程十分缓慢,在 15 ms 时达到最大,形状近似为圆形,面积约为坑道截面积的 0.54 倍,并没有与坑道壁面有相互作用过程。而在 TBX-0.5kg、TBX-1kg 工况下,火球在扩张过程中与坑道壁面形成了相互作用,铝粉与空气的混合状态得到了优化,火球面积一直保持增长至 15 ms,最大面积分别为坑道截面积的 2.2 倍和 3.73 倍,形状逐渐演变为椭球形。

TBX-0.5kg、TBX-1kg 工况下,靠近侧壁面的火焰为白色,表明附近温度超过 1 800 °C,代表坑道壁面约束导致的高烈度燃烧状态。根据图 4 计算得到各工况下白色火焰面积  $S_w$  与其对应火球面积  $S_f$  的比值  $S_w/S_f$  随时间的变化,计算结果如图 6 所示。不同药量温压炸药火球中白色火焰范围随时间的变化过程差异明显,TBX-0.1kg 工况下,白色火焰分布范围随时间不断减小,TBX-0.5kg 和 TBX-1kg 工况下,白色火焰范围在 1 ms 后不断增长,分别在 10、15 ms 时增长到最大。

图 4(d)中的 TNT 爆炸时,火球形状也近似椭圆,在约 20 ms 时高温范围最大,为坑道直径的约 2.5 倍,略高于 TBX-0.5kg 工况。在辐射亮度方面,火球表面一直环绕黑色碳尘,白色火焰分布范围以及

占火球总面积的比例都极低。红外相片中的火球结果显示, 15 ms 时, TNT-1kg 工况下火球的最高温度为 1667 °C, 相同时刻 TBX-1kg 工况下的温度峰值约为 TNT-1kg 的 1.3 倍。

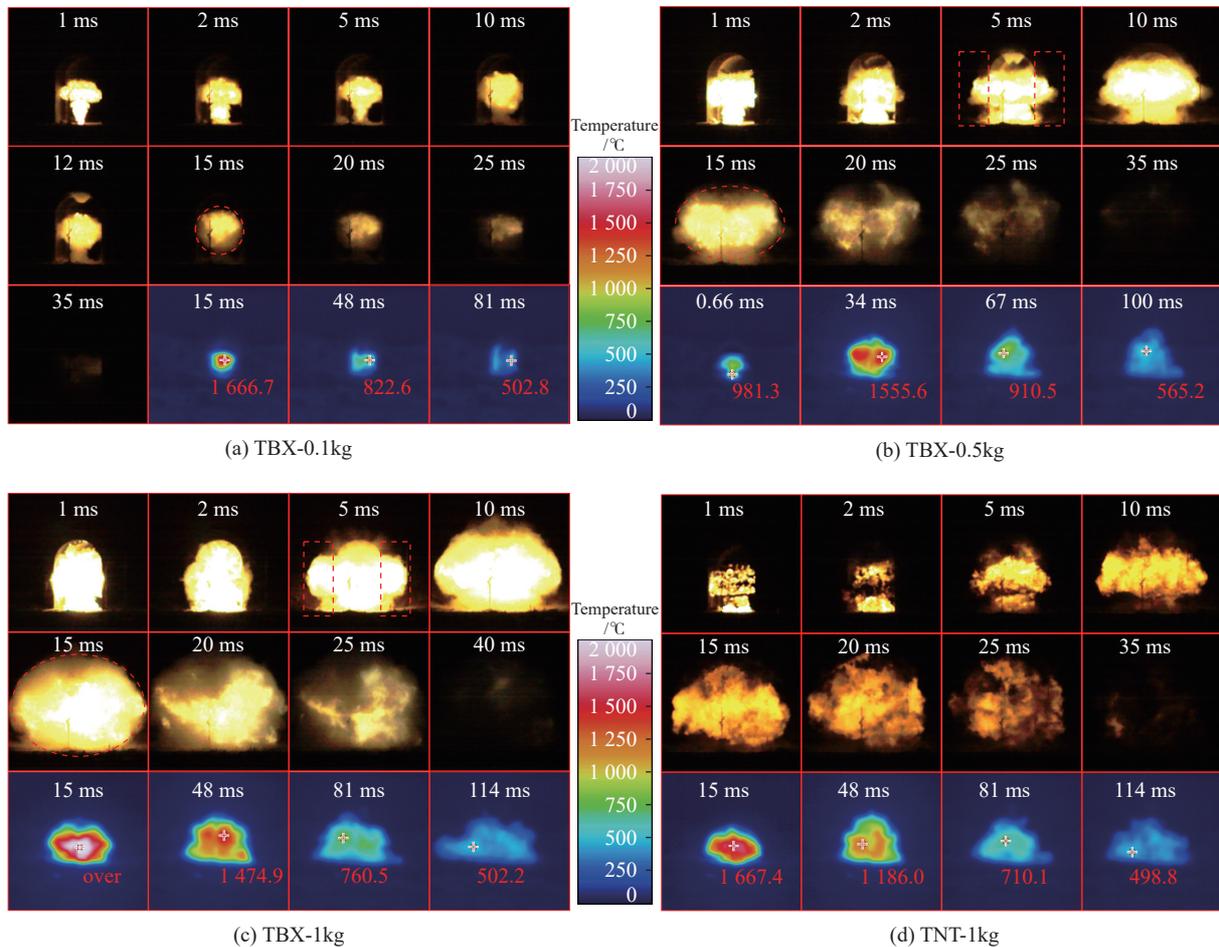


图 4 不同时刻高速相机拍摄火球辐射亮度(黑色背景)和红外相机拍摄火球温度(蓝色背景)

Fig. 4 Fireball radiance (black background) and surface temperature of the fireball (blue background) at different moments

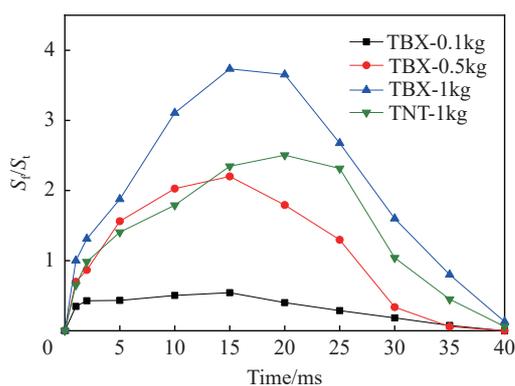


图 5 火球尺寸随时间变化过程

Fig. 5 Size change of fireball with time

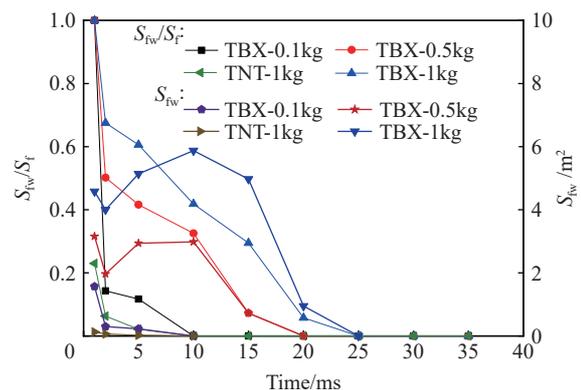


图 6 白色火焰占比随时间的变化过程

Fig. 6 Change of white flame with time

综合 3 次 TBX 试验高速拍得的火球演化过程可知, 药量能够影响坑道内温压炸药的后燃反应烈度, TBX-0.1kg 工况下火球勉强到达坑道侧壁面, 而 TBX-0.5kg 和 TBX-1kg 工况下火球中抛洒后的铝粉与坑道壁面能够相互作用, 使铝粉的燃烧环境得以保持和加强, 从而形成高烈度的后燃反应。在温压炸

药近坑道口爆炸试验研究中<sup>[23]</sup>, 口外爆炸工况中火球辐射亮度持续衰减, 没有出现口内爆炸工况中火球与坑道壁面的相互作用, 也说明了坑道约束作用对温压炸药中铝粉后燃反应的影响。结合图 4(d) 中 TNT-1kg 工况下火球的演化过程, 发现 TNT-1kg 工况下的火球形状与 TBX-0.5kg 和 TBX-1kg 工况下相似, 但并没有产生代表高烈度燃烧效应的明亮光信号, 一直被黑烟环绕, 相关现象可以结合 TNT 的爆轰化学反应方程式进行分析:



据式(1)可以得知, 图 4(d) 中火球表面分布大量爆轰后产生的黑色碳粉燃料, 但碳粉的活性远低于温压炸药中的铝粉, 碳粉的不充分燃烧在图 4(d) 中表现为黑烟环绕。

## 2.2 爆炸火球表面温度演化趋势

图 7 中展示了多谱线光纤测温系统得到各工况下火球表面的温度曲线。4 条曲线均显示瞬时温度峰值随着药量的增大而增大, 但升温时间有一定差别, TBX-0.1kg、TBX-0.3kg 和 TBX-0.5kg 的升温时间约为 200  $\mu$ s, TBX-1kg 工况下, 经过约 200  $\mu$ s 后升温至约 1400  $^{\circ}$ C, 而后经过约 300  $\mu$ s 的时间升温至 1800  $^{\circ}$ C。图 7 中瞬间升温后出现温度衰减的过程大致对应图 4 中火球尺寸最不稳定的前 5 ms, 这一阶段的火球随时间不断扩张。在 5 ms 后火球尺寸趋于稳定, 此后的燃烧过程能较好地表现不同药量下温压炸药的后燃特征。

在图 7 中, TBX-0.3kg、TBX-0.5kg、TBX-1kg 的温度曲线中均可以观察到持续数毫秒、峰值较高的“后燃升温”趋势, 而 TBX-0.1kg 的温度曲线在相应时间段的后燃升温效果并不明显。TBX-0.5kg 和 TBX-1kg 工况下, 温度曲线中的后燃升温过程分别持续至约 9.12、14.2 ms, 与图 6 中高速相机图片中的白色火焰持续过程基本对应, 光纤测温结果中出现的后燃升温趋势与图 6 中 5~10 ms 和 5~15 ms 火球高温区域中铝粉高烈度燃烧且产生明亮白色火焰的过程对应, 表明坑道约束作用下, 铝粉与氧气能够形成更利于燃烧的混合状态, 致使火球高温区域出现后燃升温的效果。

火球直径和形态刚刚稳定时的温度可认为是爆轰以及铝粉早期反应为持续后燃提供的初始温度  $T_v$ , 在此初始温度条件下形成的后燃温度峰值  $T_p$  反映了铝粉后燃反应的升温能力, 由此可以定义升温系数  $k_h$  来进行量化:

$$k_h = \frac{T_p - T_v}{T_v} \times 100\% \quad (2)$$

计算得到 TBX-0.3kg、TBX-0.5kg、TBX-1kg 的  $k_h$  值分别为 11.88%、15.43% 和 13.73%, 均超过了 10%, 而 TBX-0.1kg 的升温系数约为 7.1%, 约为 0.3 kg 及以上药量的 1/2, 这一结果也能够说明 TBX-0.1kg 的热效应达不到其他药量的水平。

## 2.3 坑道内特征位置温度衰减规律

各工况下 A1 测点温度测试结果如图 8 所示。4 次温压炸药的热电偶温度峰值随药量的增大而增大, 依次为 40、122、897.19 和 1755.93  $^{\circ}$ C。但 TBX-0.3kg 和 TBX-0.1kg 相对于 TBX-0.5kg 和 TBX-1kg 的温度峰值存在数量级的差异, 这是由火球尺寸的差异造成的。药量大时, 铝粉抛洒的范围广, 且相同距离时抛洒铝粉的数量多, 铝粉的对流燃烧、热辐射和热传导的综合作用使热电偶温度迅速增长; 但药量小时, 铝粉燃烧效果差, 对热电偶的加热方式单一, 热电偶温度峰值低、持续时间短。

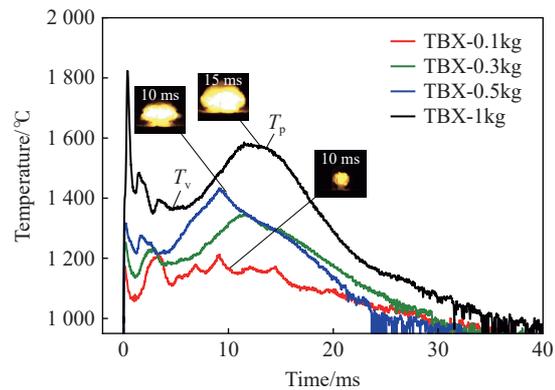


图 7 TBX-0.1kg、TBX-0.3kg、TBX-0.5kg、TBX-1kg 的多谱线测温结果

Fig. 7 Temperature measured of TBX-0.1kg, TBX-0.3kg, TBX-0.5kg and TBX-1kg by multi-wave lengths

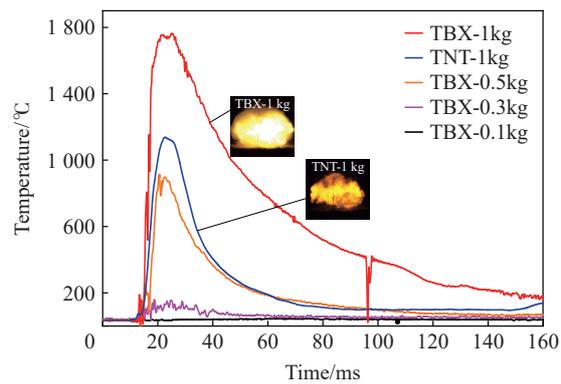


图 8 坑道内热电偶温度

Fig. 8 Temperature inside the tunnel measured by thermocouple

对比 TBX-1kg 和 TNT-1kg 发现, TBX-1kg 的温度峰值超过 TNT-1kg 峰值 618.33 °C, 1000 °C 以上的持续时间为 30.05 ms, 是 TNT 的 3.87 倍, 500 °C 以上的持续时间为 TNT 的 3.41 倍。二者的对比结果表明, 在坑道约束环境中, 温压炸药产生了更高烈度的后燃效应, 这与高速相片中 TBX-1kg 和 TNT-1kg 火球中的辐射度差异是对应的。

### 3 氧浓度变化特征分析

图 9 为 TBX-0.1kg、TBX-0.5kg、TBX-1kg 工况下, 在坑道内 A2 截面的氧浓度测试结果, 其中, TBX-0.5kg、TBX-1kg 在 A2 测点的氧浓度降低效果明显, TBX-1kg 工况中的氧浓度最低为 0, 其中零氧状态在 A2 截面持续了 6.57 s, 约在 36.25 s 后恢复到 18.1%; TBX-0.5kg 时的最低氧浓度为 1.79%, 约在 21.9 s 后恢复到 19.02%。TBX-0.1kg 没有采集得到完整的氧浓度变化过程, 但在 TBX-0.5 和 TBX-1kg 分别降低至 3.2% 和 0% 时, TBX-0.1kg 中氧浓度仅降低了 1.3%。

TNT-1kg、TBX-1kg 在坑道内 A11 截面的氧浓度测试结果如图 10 所示, 二者的氧浓度结果反映了温压炸药的耗氧优势。TNT 的最低氧浓度约为 15%, 而 TBX-1kg 最低氧浓度约为 7%, 氧浓度变化量为 TNT 的 2.33 倍, 氧浓度降低效果十分明显。

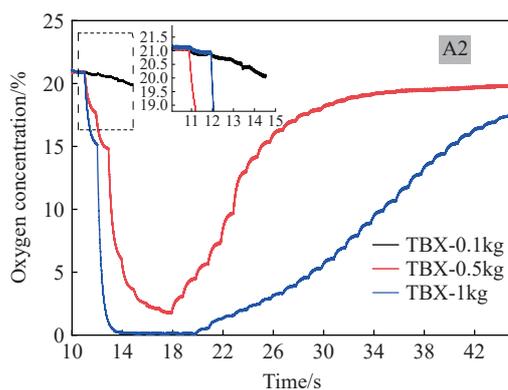


图 9 TBX-0.1kg、TBX-0.5kg、TBX-1kg 坑道内 A2 截面的氧浓度测试结果

Fig. 9 Oxygen measurement of TBX-0.1kg, TBX-0.5kg, TBX-1kg at Section A2

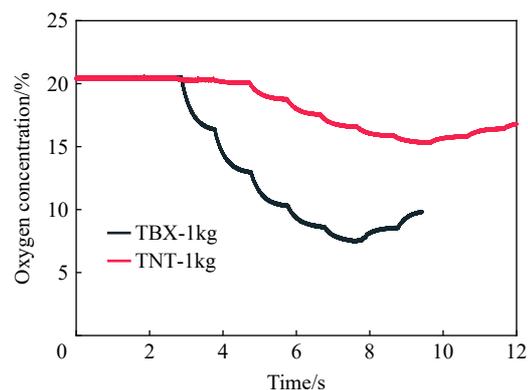


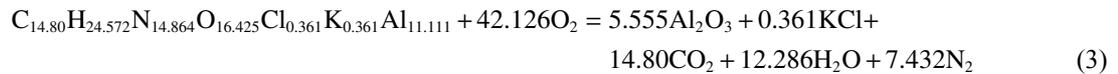
图 10 TBX-1kg、TNT-1kg 坑道内 A11 截面的氧浓度测试结果

Fig. 10 Oxygen measurement of TBX-1kg and TNT-1kg at Section A11

试验后对 TBX-1kg 工况下冲击波和氧浓度进行时序辨别, 发现氧浓度开始变化的时刻约在冲击波过后的 4 s 出现, 即图 9~10 中的氧浓度结果并不完全是动态燃烧的瞬间耗氧结果。这一观点可以从温

压炸药的化学反应方程式进行验证。

由 RDX、铝粉、助燃剂和黏结剂组成的 1 kg 温压炸药在完全释能条件下的方程式为:



TBX-1kg 完全释能后需要消耗 42.126 mol 的氧气, 由此可以计算得到需要消耗空气约 4.72 m<sup>3</sup>, 即消耗 1.04 m 坑道内的氧气。测试结果与燃烧耗氧在时间、空间上的差异说明氧浓度降低效果并不完全来源于温压炸药的爆炸及燃烧过程。根据温压炸药释能原理可知, 火球在燃烧过程中消耗了大量的氧气, 火球燃尽后形成低氧气体产物, 气体产物开始不断扩散。对于 TBX-1kg、TBX-0.5kg 和 TBX-0.1kg, 药量越大, 铝粉燃烧耗氧量越大, 形成的气体产物越多, 因此氧浓度越低, 维持低氧状态的时间也就越长。TBX-1kg 和 TNT-1kg 的氧浓度差别能够反映两种炸药的耗氧能力差异, 一方面, 温压炸药中铝粉后燃比 TNT 爆轰后产生燃料的耗氧能力更强, 另一方面, 燃烧形成的气体产物比 TNT 更多, 耗氧及气体产物的综合效果使得温压炸药的氧浓度降低效果比 TNT 有明显提升。

## 4 冲击波传播规律

### 4.1 冲击波波形分析

图 11 为 TBX-0.1kg~TBX-1kg 在近坑道口 A1~A4 测点(爆心距 2~8 m)的压力曲线, 图 12 为 A7 测点(爆心距 14 m)的压力曲线。图 11 表现出多陡峭波峰的特点, 这是坑道内发生了多次、多种反射和汇聚的结果<sup>[2, 25]</sup>。A1 测点各峰之间的时间间隔较长, 约在数百微秒至数毫秒之间, 且随着药量的增

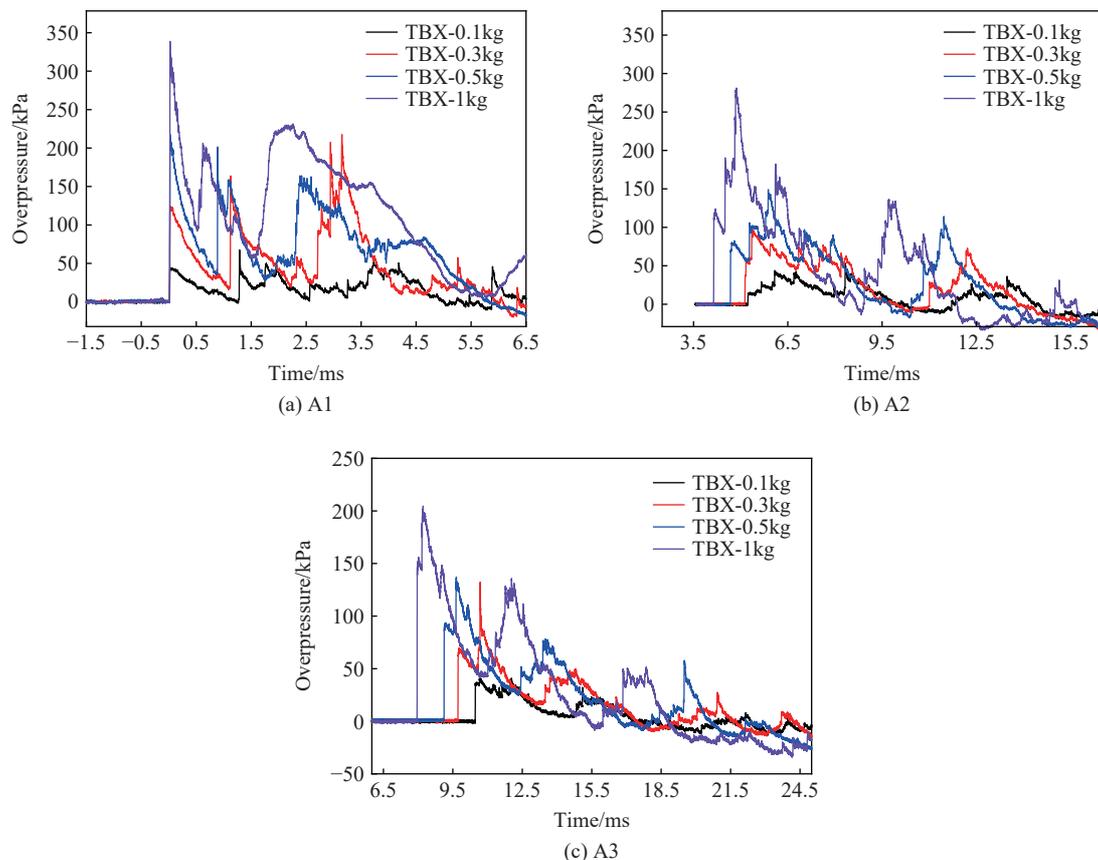


图 11 近坑道口测点压力曲线

Fig. 11 Stress curves of air shock wave near the tunnel entrance

大, A1 测点的反射波峰数量逐渐减少, 表明冲击波强度升高使冲击波传播过程更加连贯。而 A2 测点各峰的时间间隔比 A1 测点小, 且药量增长使得冲击波过后的陡峭升压效果更加明显。

多峰结构的压力曲线在冲击波向坑道内部传播的过程中逐渐发生波形调整, 随着传播过程趋于稳定, 图 11 表明各药量下 A3 测点处冲击波的多峰效果较 A1 和 A2 测点明显减弱, 随着冲击波在坑道内的进一步传播, 坑道内出现了平面波传播效果, 波形如图 12 所示。冲击波达到峰值后开始不断衰减, 没有反射干扰, 平面波出现的位置均在 A6 测点附近。

TBX-1kg 和 TNT-1kg 在近坑道口测点的压力曲线如图 13 所示。两种炸药在 A2 测点处的波形差别明显, 由图 11(b)可知, 4 m 位置(A2 测点)表现为连续的阶梯状陡峭升压, 这一现象在同一条件下的 TNT 爆炸试验中并没有出现。已有温压炸药和 TNT 开放空间爆炸对比结果表明<sup>[26]</sup>, 两种炸药冲击波波演化过程较为相似。因此坑道内爆炸条件下 A2 测点出现的波形特征是坑道对温压炸药爆炸释能过程约束作用的一种表现, 表明在良好坑道约束作用下, 温压炸药中高活性的铝粉燃烧产生的压缩波能够形成陡峭的升压效果, 后续陡峭压缩波速度快, 可以追赶温压炸药中高爆炸药爆轰产生的冲击波, 在坑道内约 2~3 倍等效直径的传播过程中直接形成冲击波超压峰值的升高。

通常情况下, 温压炸药中铝粉后燃产生的压缩波能够大幅延长冲击波的正压时间。如图 14 中 A3、A7 和 A11 测点的压力时程曲线, 在 A3 测点处, 冲击波的正压时间为 7.52 ms, 但多个压缩波涌入, 补充了主冲击波的正相作用过程, 使后续测点的冲击波正压时间大幅延长。

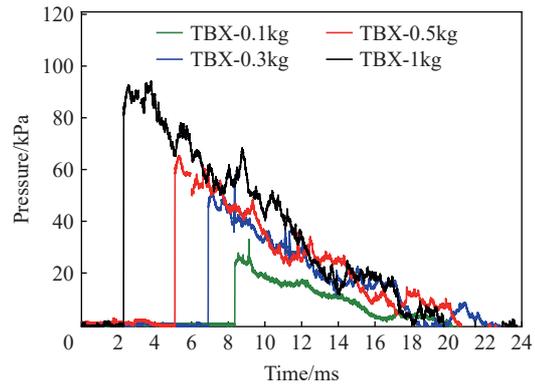


图 12 坑道内平面波的压力曲线

Fig. 12 Pressure curves of plane wave inside the tunnel

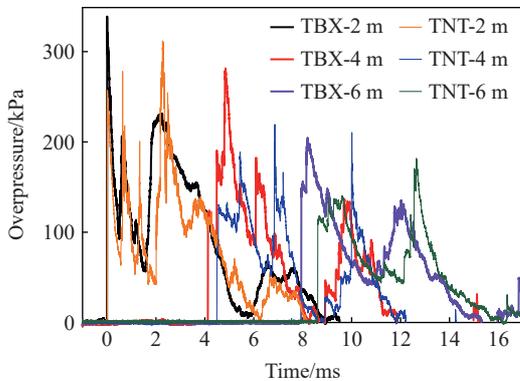


图 13 1 kg TBX、TNT 在坑道口内爆炸时, A1(2 m)、A2(4 m)和 A3(6 m)测点的压力曲线

Fig. 13 Pressure curves of 1kg TBX and TNT at A1 (2 m), A2 (4 m) and A3 (6 m) measuring points

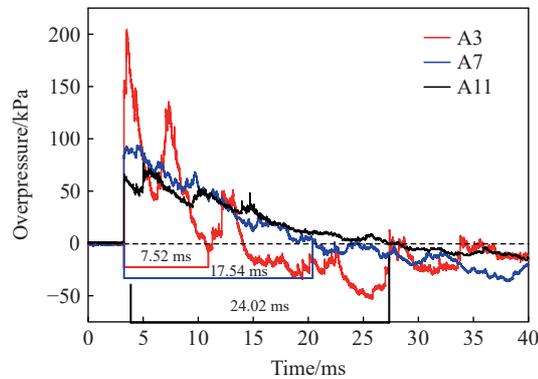


图 14 1 kg 温压炸药在 A3(2 m)、A7(4 m)和 A11(6 m)测点的空气压力时程曲线

Fig. 14 Pressure curves of 1 kg TBX at A3 (2 m), A7 (4 m) and A11 (6 m) measuring points

#### 4.2 冲击波参数分析

各工况下冲击波的超压峰值、正压时间随爆心距的变化关系如图 15~16 所示。各工况中, 除 A2 和 A3 测点出现了峰值升高外, 同一药量的冲击波峰值总体上随着传播距离不断衰减。

根据图 16 中正压时间随爆心距的变化可知, A1 测点冲击波的正压时间较 A2 测点更长, 这是由于 A1 测点包含多次规则斜反射的影响, 在之后的传播过程中, 正压时间随着传播距离的增大而增大, 药量引起的正压时间差异在 A4 测点(爆心距 8 m)后逐渐变得明显。结合图 14 可知, 铝粉后燃形成的压缩波与冲击波的叠加、融合效果好, 大幅延长了冲击波的正压时间, 且温压炸药的药量越大越明显。

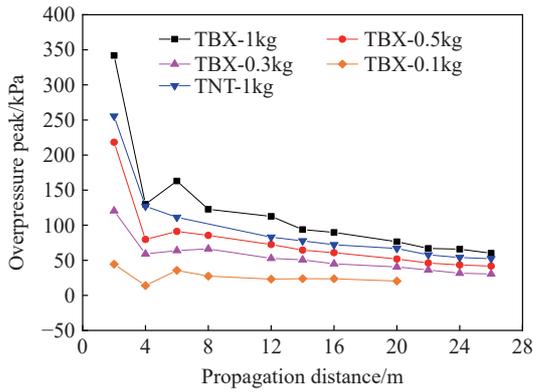


图 15 不同距离处的超压峰值

Fig. 15 Overpressure peaks at different distances

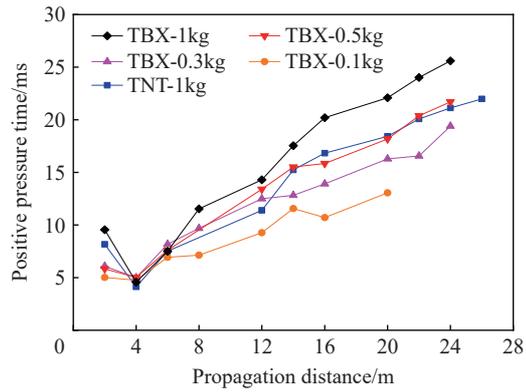


图 16 不同距离处的正压时间

Fig. 16 Positive pressure times at different distances

比冲量方面, 图 17 为不同药量的温压炸药和 TNT-1kg 工况中比冲量随传播距离的变化过程, 各工况的趋势基本相同。由于 A1 测点发生多次反射叠加, 因此比冲量值较其他位置更高, 随着规则反射造成的比冲量叠加消失, A2 测点比冲量较 A1 测点大幅下降, 随后开始随着传播距离的增加不断增长, 在 A7 测点后基本保持不变, 温压炸药冲击波比冲量按药量由大到小分别约为 698.08、425.79、288.24 和 120.65 kPa·ms。

对于 TNT, 在图 15 中, 超压峰值持续衰减, 超压峰值介于 TBX-0.5kg 和 TBX-1kg 之间; 在图 16 中, 正压时间随传播距离的增加不断增长, 在 12 m 时与 TBX-0.3kg 大致相同, 在 A7~A12 时与 TBX-0.5kg 大致相同, 正压时间整体的变化趋势与 TBX-0.5kg 相似, 与 TBX-1kg 差距明显; 图 17 显示 TNT 的比冲量变化趋势与各工况相同, 基本介于 TBX-0.5kg 和 TBX-1kg 之间。

TBX-0.1kg~TBX-1kg 的峰值、正压时间以及比冲量随爆心距的变化关系反映了药量对冲击波效果的影响, 在此基础上根据爆炸相似律建立不同药量冲击波参数与相关变量的单调关系。并通过冲击波当量系数  $\eta_{TBX}$  来评价冲击波参数的威力:

$$\eta_{TBX} = \frac{m_{\text{等效TNT}}}{m_{TBX}} \quad (4)$$

式中:  $m_{TBX}$  为温压炸药的质量,  $m_{\text{等效TNT}}$  为等效 TNT 的质量。

通常情况下坑道内冲击波峰值  $\Delta P_i$  可按以下形式进行拟合计算<sup>[1]</sup>:

$$\Delta P_i = A \left( \frac{m}{Sx} \right)^{1/3} + B \left( \frac{m}{Sx} \right)^{2/3} + C \frac{m}{Sx} \quad (5)$$

式中:  $m$  为坑道内爆炸的炸药质量;  $A, B, C$  为拟合系数,  $S$  为坑道等效截面积,  $m^2$ ;  $x$  为坑道内爆心距,  $m$ 。

TNT 在坑道口内爆炸产生的冲击波超压峰值  $\Delta P_{TNT}$ <sup>[1]</sup> 为:

$$\Delta P_{TNT} = 169.2 \left( \frac{m}{Sx} \right)^{1/3} + 26.9 \left( \frac{m}{Sx} \right)^{2/3} + 2031 \left( \frac{m}{Sx} \right) \quad (6)$$

将 TNT 的坑道冲击波超压试验结果以及 1、1.2、1.4 和 1.6 倍 TNT 当量的超压峰值计算结果绘制到图 18 中。试验得到的 TNT 超压峰值与式(6)基本吻合, TBX-0.3kg、TBX-0.5kg、TBX-1kg 各测点超压峰值的 TNT 等效当量系数在 1.2~1.6 之间, 多数温压炸药峰值试验结果的 TNT 等效当量系数为 1.4。对

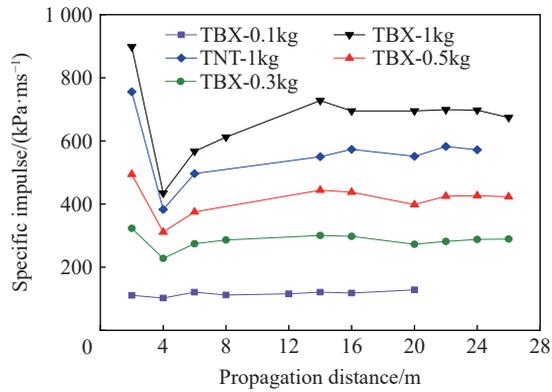


图 17 不同距离的比冲量

Fig. 17 Specific impulses at different propagation distances

TBX-0.3kg、TBX-0.5kg 和 TBX-1kg 爆炸冲击波超压  $\Delta P_{TBX}$  进行拟合, 计算公式如下:

$$\Delta P_{TBX} = 235.2 \left( \frac{m}{S_x} \right)^{1/3} - 515.8 \left( \frac{m}{S_x} \right)^{2/3} + 4500 \left( \frac{m}{S_x} \right) \quad (7)$$

参考文献 [25] 中正压时间的拟合计算方法, 对 TNT-1kg 正压时间  $\tau_{+TNT-intu}$  随  $m^{1/6}x^{1/2}$  的关系进行拟合计算得到以下公式:

$$\tau_{+TNT-intu} = 5.832m^{1/6}x^{1/2} - 7.59 \quad (8)$$

将坑道口内爆炸的所有试验工况下的正压时间随  $m^{1/6}x^{1/2}$  的变化绘制得到图 19。口内爆炸的 4 种药量中, 正压时间的变化趋势通过分段拟合更加合理, 相比于 TBX-0.1kg 的正压时间  $\tau_{+TBX-0.1kg}$ , TBX-0.3kg、TBX-0.5kg、TBX-1kg 的正压时间  $\tau_{+TBX-intu}$  呈现更快的线性增长趋势。两阶段的正压时间随  $m^{1/6}x^{1/2}$  的计算关系如下:

$$\tau_{+TBX0.1kg} = 5.178m^{1/6}x^{1/2} - 2.71 \quad (9)$$

$$\tau_{+TBX-intu} = 6.338m^{1/6}x^{1/2} - 6.249 \quad (10)$$

平面波传播段冲击波的比冲量衰减十分缓慢, 因此这一传播过程的比冲量可以当作常量进行分析, 该观点在相关文献 [25,27] 中也有相似的说明。依据文献 [25], 用爆炸能量表征冲击波超压比冲量  $I_+$  的方法, 在计算中以温压炸药质量  $m$  来表征爆炸能量, 经过多次试算后发现 TBX-0.3kg、TBX-0.5kg、TBX-1kg 的比冲量  $I_{+TBX-intu}$  与质量  $m$  之间可以用幂函数进行描述, 并得到以下拟合公式:

$$I_{+TBX-intu} = 699m^{0.7272} \quad 0.3 \text{ kg} \leq m \leq 1 \text{ kg} \quad (11)$$

将各温压炸药试验中的比冲量平均值绘制得到图 20, 同时将基于式(11)的 0.1~1 kg 温压炸药的比冲量计算结果绘制到图 20 上。图中显示 TBX-0.1kg 的比冲量  $I_{+TBX-0.1kg}$  位于式(11)计算结果的下方, 取与式(11)相同的指数时得到的拟合系数为 630, 计算公式为:

$$I_{+TBX-0.1kg} = 630m^{0.7272} \quad m = 0.1 \text{ kg} \quad (12)$$

根据温压炸药的成分可知, RDX 的含量为 55%, 相同质量 RDX 的爆热  $Q_{RDX}$  和 TNT 的爆热  $Q_{TNT}$  的关系可以用以下公式计算:

$$Q_{RDX} = 1.5Q_{TNT} \quad (13)$$

通常情况下可用爆热来代表冲击波能量, 由式(13)可知, 1 kg 温压炸药中 RDX 的爆热相当于 0.825 kg TNT 的爆热, 即在铝粉对冲击波峰值的形成没有贡献的情况下, 温压炸药冲击波峰值和正压时间的 TNT 当量系数为 0.825。但计算得到 TBX-0.1kg 的当量系数为 1, TBX-0.3kg、0.5kg 和 1kg 的峰值当量系数约为 1.4, 正压时间当量系数为 1.65, 表明除了温压炸药中高爆炸药爆轰的能量用于形成冲击波外, 有部分铝粉燃烧产生的能量也用于形成冲击波。已有相同配方温压炸药的试验结果表明 [26], 0.5 kg 温压炸药在开放空间中的超压峰值当量系数约为 1.1, 明显低于 1.4, 二者的对比结果说明, 铝粉燃烧后转化为冲击波的能量比例因受到坑道约束作用而提高。

图 13~14 和 18 中的冲击波参数都表明了铝粉燃烧对冲击波有显著增益, 图 4~8 中的热效应参数则表明了铝粉燃烧产生的显著热效应, 但热效应和压力效应并不是完全同步的。坑道口部火球燃烧至 40 ms 时, 冲击波已在坑道内传播了 20 m 左右, 此时燃烧仅产生热效应, 对冲击

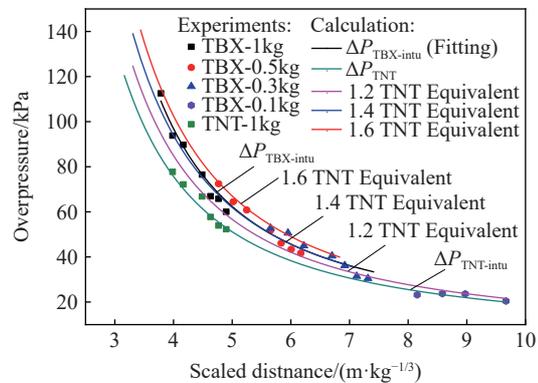


图 18 不同药量温压炸药的超压峰值随比例爆距的变化  
Fig. 18 Change of overpressure peak with scaled distance

波传播没有明显影响, 表明铝粉燃烧速率随反应时间出现了下降。下降到一定程度后, 尚未反应的铝粉通常难以达到燃烧条件, 导致了铝粉反应度不能达到百分之百<sup>[28]</sup>。

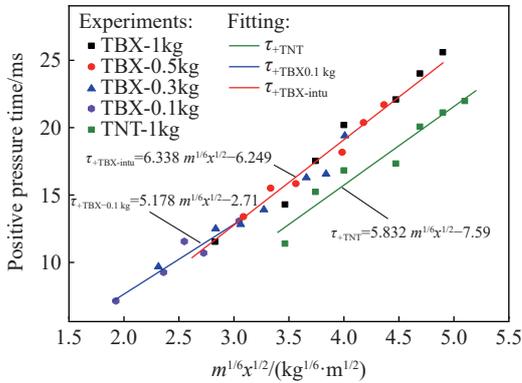


图 19 正压时间随  $m^{1/6}x^{1/2}$  的变化

Fig. 19 Change of positive pressure time with  $m^{1/6}x^{1/2}$

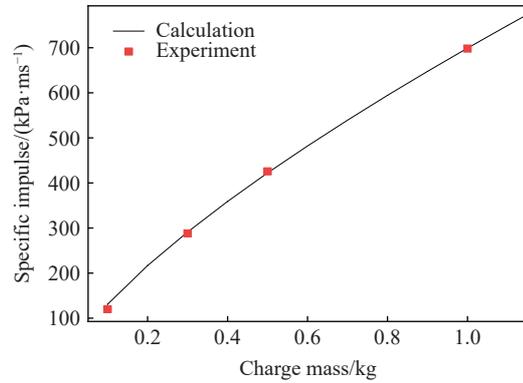


图 20 比冲量随药量的变化

Fig. 20 Specific impulses at different charge masses

### 5 讨论: 坑道约束作用下产生高烈度后燃效应的药量条件

温压炸药火球是处于抛洒和燃烧状态的铝粉与其他气体产物的混合集团<sup>[4]</sup>, 铝粉燃烧过程中受到的约束作用特征可以根据火球的演化过程进行分析。图 21 中 TBX-0.5kg 和 TBX-1kg 在 2~6 ms 的火球燃烧过程分析表明: 坑道约束作用体现在冲击波流场、燃烧反应场以及燃料粒子运动场三个方面, 具体过程可以结合相关理论<sup>[25]</sup> 和已有研究<sup>[4]</sup> 进行分析。一方面, 环向全包围的坑道为冲击波提供了充分的反射路径, 形成的反射波能够使铝粉和空气形成更好的混合状态, 形成有利于铝粉持续燃烧的高温环境; 再者, 铝粉随爆生气体抛洒至坑道壁面附近时, 运动趋势受坑道壁面影响后发生变化, 导致壁面附近的铝粉与空气的混合状态提高, 使燃烧烈度进一步提高, 燃烧过程的良性循环也使得火球横向扩张更加明显, 并且出现了代表高温效应的白色火焰; 此外, TBX-0.5kg 工况下出现在坑道拱顶、主火球外的新火焰表明, 携有大量动能的铝粉在冲击坑道壁面后, 变得更加破碎, 活性有所提高, 达到着火点的条件降低, 整体热效应水平大幅提高。

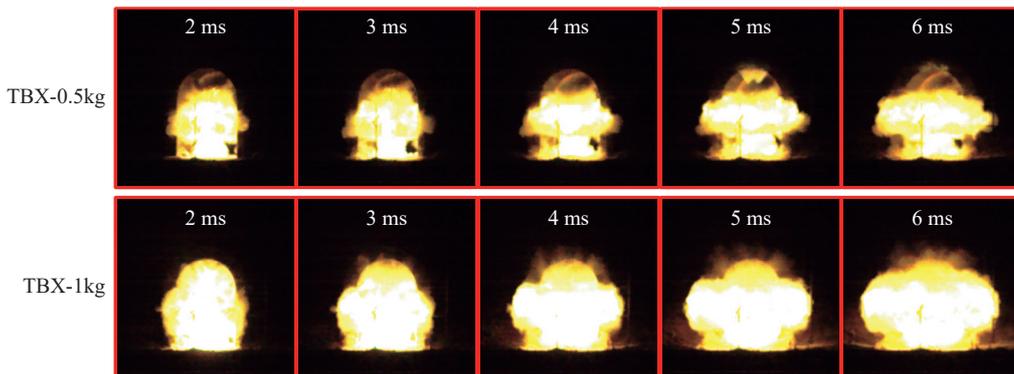


图 21 TBX-0.5kg 和 TBX-1kg 在 2~6 ms 的火球演化过程

Fig. 21 Fireball evolution process of TBX-0.5kg and TBX-1kg during 2~6 ms

综合分析热、冲击波和耗氧等表征铝粉后燃效应的毁伤元参数发现, 药量对坑道约束作用下的后燃效果具有明显影响。有关燃烧效果的评估在火灾分析中有较多体现<sup>[29]</sup>, 燃烧烈度是主要评判标准之一。结合火球辐射亮度特征可知, 本文中提到的高烈度后燃效应是指在坑道约束作用下能够发生剧烈的燃烧过程, 产生的多项毁伤元参数与同一试验条件的普通后燃效应有明显区分。用于分析后燃效果的毁伤元参数如图 22 所示, 包括峰值当量系数  $\eta_{\Delta p}$ 、比冲量拟合系数  $\eta_I$ 、正压时间拟合系数  $\eta_\tau$  等冲击波效应

参数, 升温系数  $k_h$ 、火球温度  $T_f$ 、白色火焰比值  $S_{fw}/S_f$ 、白色火焰持续时间  $\tau_{fw}$  等热效应参数。图 22 中所示结果都表明 TBX-0.1kg 爆炸毁伤元参数水平明显低于其他药量, 燃烧烈度低于其他工况, 由此判断温压炸药铝粉形成高烈度后燃效应需要满足一定的药量条件。

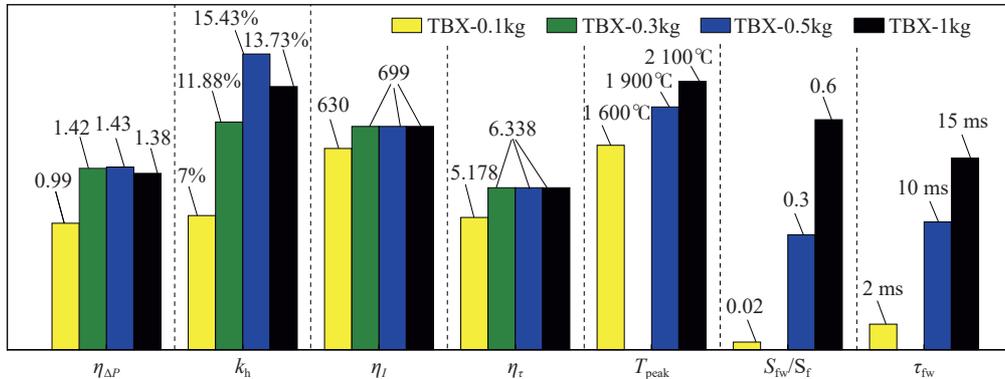


图 22 不同药量温压炸药的主要冲击波效应参数和热效应参数

Fig. 22 Main parameters of shock wave effect and thermal effect under different charge masses

结合坑道约束作用特点可知, 高烈度后燃效应的药量条件是通过建立药量与坑道直径的关系来表征坑道对火球的约束作用。通常情况下火球直径  $D_{ITBX}$  与药量  $m$  满足立方根的数量关系<sup>[25-26]</sup>, 因此坑道内爆炸条件下, 相似配方温压炸药在坑道约束作用下形成高烈度后燃效应的条件可以表达为:

$$\frac{\sqrt[3]{m}}{D_{et}} \geq \frac{\sqrt[3]{0.3}}{2.4} \approx 0.28 \text{ kg}^{1/3}/\text{m} \quad (14)$$

## 6 结 论

针对内爆炸坑道约束作用规律, 开展了不同药量温压炸药的坑道内爆炸试验, 并与 TNT 爆炸试验对比分析, 得到了温压炸药坑道内爆炸毁伤元的特征现象和演化规律, 讨论了坑道约束对温压炸药爆炸及燃烧过程的作用规律, 得到了形成高烈度后燃效应的药量条件, 主要结论如下。

(1) 坑道内爆炸条件下, 高速相片火球中大范围、持续的白色火焰, 光纤测温曲线超过 10% 的后燃升温幅度等热效应特征都是坑道约束作用下铝粉燃烧产生高烈度后燃效应的表现。

(2) 冲击波参数方面, 可将  $(m/Sx)^{1/3}$  和  $m^{1/6}x^{1/2}$  为变量建立温压炸药坑道内爆炸条件下的冲击波峰值和正压作用时间计算方法; 形成平面波传播后, 比冲量基本保持稳定不变, 可通过比冲量与装药质量  $m$  的幂函数式对坑道内比冲量进行表征。

(3) 坑道内爆炸条件下, 温压炸药铝粉后燃压缩波对冲击波能够形成多种补充效果: 陡峭升压的压缩波能够追赶冲击波, 在约 2~3 倍等效直径的传播过程中使冲击波峰值升高; 持续时间长但升压速率慢的压缩波能够限制冲击波的衰减, 延长整体正压作用时间。

(4) 坑道内爆炸条件下, 温压炸药质量立方根  $\sqrt[3]{m}$  与坑道直径  $D_{et}$  的比值  $\sqrt[3]{m}/D_{et}$  大于  $0.28 \text{ kg}^{1/3}/\text{m}$  时, 环向全包围的坑道壁面能够对温压炸药后燃过程形成更加明显的约束作用, 提高铝粉后燃反应速率和强度, 产生高烈度后燃效应。

(5) 坑道内爆炸条件下, 温压炸药爆炸产生的热效应、冲击波效应和耗氧效果都明显优于 TNT。温压炸药火球燃烧更充分, 辐射亮度明显高于 TNT, 红外火球温度峰值超过 TNT 的 1.3 倍, 冲击波峰值和正压时间约为 TNT 的 1.4 和 1.65 倍, 测得的氧浓度降低值约为 TNT 的 2.33 倍。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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(1/2/3): 609–616. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.05.056.
- [3] 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.
- [4] 胡宏伟, 宋浦, 邓国强, 等. 温压炸药的特性及发展现状 [J]. *力学进展*, 2022, 52(1): 53–78. DOI: 10.6052/1000-0992-21-021.
- HU H W, SONG P, DENG G Q, et al. Characteristics of thermobaric explosives and their advances [J]. *Advances in Mechanics*, 2022, 52(1): 53–78. DOI: 10.6052/1000-0992-21-021.
- [5] ARNOLD W, ROTTENKOLBER E. Thermobaric charges: modeling and testing [C]//Proceedings of the 38th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, Germany, 2007: V02.
- [6] HAHMA A, PALOVUORI K, ROMU H. Experimental studies on metal fueled thermobaric explosives [C]//Proceedings of the 35th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, Germany: ICT, 2006.
- [7] MOHAMED A K, MOSTAFA H E, ELBASUNEY S. Nanoscopic fuel-rich thermobaric formulations: chemical composition optimization and sustained secondary combustion shock wave modulation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 301: 492–503. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.09.019.
- [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] ZHANG F, ANDERSON J, YOSHINAKA A. Post-detonation energy release from TNT-aluminum explosives [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2007, 955(1): 885–888. DOI: 10.1063/1.2833268.
- [10] PEUKER J M, KRIER H, GLUMAC N. Particle size and gas environment effects on blast and overpressure enhancement in aluminized explosives [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(2): 2205–2212. DOI: 10.1016/j.proci.2012.05.069.
- [11] KIM C K, LAI M C, ZHANG Z C, et al. Modeling and numerical simulation of afterburning of thermobaric explosives in a closed chamber [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2017, 18(7): 979–986. DOI: 10.1007/s12541-017-0115-3.
- [12] 李根, 卢芳云, 李翔宇, 等. 基于气固两相反应流的温压炸药能量释放规律数值模拟及实验验证 [J]. *火炸药学报*, 2021, 44(2): 195–204. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202012021.
- LI G, LU F Y, LI X Y, et al. Numerical simulation and experimental verification on the energy release law of thermostatic explosive based on gas-solid two-phase reaction flow [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2021, 44(2): 195–204. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202012021.
- [13] 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.
- [14] 苟兵旺, 李芝绒, 闫潇敏, 等. 复杂坑道内温压炸药冲击波效应试验研究 [J]. *火工品*, 2014(2): 41–45. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2014.02.014.
- GOU B W, LI Z R, YAN X M, et al. Experimental study on shock wave effects of thermo-baric explosive in complex tunnel [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2014(2): 41–45. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2014.02.014.
- [15] 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.
- [16] 孔霖, 苏健军, 李芝绒, 等. 不同装药坑道内爆炸冲击波传播规律的试验研究 [J]. *火工品*, 2012(3): 21–24. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2012.03.006.
- KONG L, SU J J, LI Z R, et al. Test study on explosion shock wave propagation of different explosives inside tunnels [J].

- Initiators & Pyrotechnics*, 2012(3): 21–24. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2012.03.006.
- [17] 李世民, 李晓军, 李洪鑫. 温压炸药坑道内爆炸冲击波的数值模拟研究 [J]. *应用力学学报*, 2012, 29(5): 595–600. DOI: 10.11776/cjam.29.05.B086.  
LI S M, LI X J, LI H X. Numerical simulation study of airblast of thermobaric explosive explosion in tunnel [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2012, 29(5): 595–600. DOI: 10.11776/cjam.29.05.B086.
- [18] 徐利娜, 雍顺宁, 王凤丹, 等. 直坑道内爆炸冲击波超压传播规律研究 [J]. *测试技术学报*, 2014, 28(2): 114–118. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7449.2014.02.005.  
XU L N, YONG S N, WANG F D, et al. Study of blast wave overpressure propagation inside straight tunnel [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2014, 28(2): 114–118. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7449.2014.02.005.
- [19] 田培培. 温压药剂爆炸高温场特性红外测试技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2016.  
TIAN P P. The research on characteristics of high temperature explosion field of thermobaric explosive with infrared testing technology [D]. Taiyuan: North University of China, 2016.
- [20] 许仁翰, 周钺捷, 狄长安. 基于高速成像的爆炸温度场测试方法 [J]. *兵工学报*, 2021, 42(3): 640–647. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.03.021.  
XU R H, ZHOU Y J, DI C A. A temperature measuring method for explosive temperature field based on high-speed imaging technology [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(3): 640–647. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.03.021.
- [21] 仲倩, 王伯良, 王凤丹, 等. 温压炸药爆炸过程的瞬态温度 [J]. *含能材料*, 2011, 19(2): 204–208. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.02.018.  
ZHONG Q, WANG B L, WANG F D, et al. Explosion temperature of thermobaric explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2011, 19(2): 204–208. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.02.018.
- [22] LIU Z P, LIU S H, ZHAO J X, et al. A transient heat flux sensor based on the transverse Seebeck effect of single crystal  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  [J]. *Measurement*, 2022, 198: 111419. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111419.
- [23] 纪玉国, 张国凯, 李干, 等. 坑道口部温压炸药爆炸热效应与冲击波传播规律实验研究 [J]. *南京理工大学学报*, 2022, 46(6): 649–658. DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2022.46.06.001.  
JI Y G, ZHANG G K, LI G, et al. Experimental study on thermal effect and shock wave propagation of thermobaric explosives at tunnel entrance [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2022, 46(6): 649–658. DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2022.46.06.001.
- [24] LV S S, ZHANG J Q, NI H J, et al. Research status and progress of oxygen sensor [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1345(3): 032029. DOI: 10.1088/1742-6596/1345/3/032029.
- [25] 奥尔连科 И И. 爆炸物理学 [M]. 孙承纬, 译. 北京: 科学出版社, 2011.  
OPJIEHKO И И. Explosion physics [M]. SUN C W, trans. Beijing: Science Press, 2011.
- [26] 肖伟. 助燃剂对含铝炸药爆炸特性的影响及其释能规律研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [27] 陈海天, 李秀地, 郑颖人. 内爆炸坑道中冲击波冲量试验 [J]. *后勤工程学院学报*, 2008, 24(2): 6–8, 13. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7843.2008.02.002.  
CHEN H T, LI X D, ZHENG Y R. Scale model tests to determine in-tunnel blast impulse from he-charges inside the tunnel entrance [J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2008, 24(2): 6–8, 13. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7843.2008.02.002.
- [28] 丁彤, 裴红波, 郭文灿, 等. RDX 基含铝炸药爆轰波结构实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(6): 062301. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0217.  
DING T, PEI H B, GUO W C, et al. Experimental study on detonation wave profiles in RDX-based aluminized explosives [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(6): 062301. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0217.
- [29] KEELEY J E. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage [J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2009, 18(1): 116. DOI: 10.1071/WF07049.

(责任编辑 曾月蓉)