

文章编号:1006-9941(2024)12-1287-11

## 近坑道口爆炸条件下温压炸药热效应与冲击波演化规律

纪玉国<sup>1</sup>,何勇<sup>2</sup>,谭仪忠<sup>1</sup>,李杰<sup>1</sup>,邵鲁中<sup>1</sup>,张俊男<sup>1</sup>,张国凯<sup>3</sup>,李干<sup>1</sup>

(1. 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; 2. 南京理工大学机械工程学院,江苏南京 210094; 3. 南京理工大学安全科学与工程学院,江苏南京 210094)

**摘要:** 为研究近坑道口爆炸条件下温压炸药(TBX)热效应和冲击波演化规律及影响因素,开展了TBX在坑道口外和堵口处空爆、贴地爆的爆炸试验,分析了火球尺寸、温度等热效应参数和超压峰值、正压时间、比冲量和波形等冲击波参数,并结合TNT爆炸试验结果分析了冲击波在坑道内的传播路径。结果表明,坑道堵口爆炸条件下,空爆的火球热效应和冲击波效应高于贴地爆。热效应方面,空爆火球的高度和峰值温度约为贴地爆的2倍和1.41倍,坑道内测得的温度峰值约为贴地爆的2.42倍,热流密度可超过贴地爆的19.3倍,空爆产生的后燃升温效果随药量增大而显著增大;冲击波方面,堵口空爆工况下温压炸药后燃效应产生的超压较贴地爆更强,冲击波反射、叠加路径更加充分,空爆对贴地爆的冲击波超压峰值、正压时间和比冲量当量系数分别约为1.3、1和1.1。热效应和冲击波效应的演化规律受到坑道约束作用和地面干预作用的综合影响,空爆条件下坑道约束作用更加明显,后燃效应更加显著,而贴地爆条件下地面的干预作用会削弱坑道约束作用,抑制铝粉和空气的混合,造成后燃强度降低。

**关键词:** 温压炸药;坑道口部;铝粉后燃;热效应;冲击波效应

中图分类号:

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2024207

### 0 引言

富含铝粉的温压炸药(TBX)通过爆轰和燃烧两种方式释放能量<sup>[1-2]</sup>,其所包含的高能炸药爆轰后铝粉向外抛撒并与空气混合<sup>[3]</sup>,发生持续的后燃反应<sup>[4]</sup>,产生压力波和大量的热能<sup>[5]</sup>,压力波与冲击波叠加使之形成了长持时作用<sup>[6]</sup>,后燃产生的热能也维持和扩大了火球高温效果。显著的热效应和长持时冲击波作用使温压炸药对于坑道、洞穴等狭长空间内的防护结构、设备和人员具有优良的毁伤能力,因此温压炸药在坑道

口部爆炸条件下的冲击波和热效应演化规律及其内在的形成机理十分值得关注。

国内有关温压炸药坑道口部爆炸条件下的毁伤元演化规律研究的重点集中在冲击波传播方面。学者们主要采用试验<sup>[7-9]</sup>和数值模拟<sup>[10-11]</sup>的方法研究相同装药条件下不同尺寸和截面形状坑道内温压炸药和TNT的冲击波参数,以上研究结果都证实了温压炸药在坑道内的冲击波威力高于TNT。

由于热效应测试技术的限制,目前有关坑道内的温压炸药热效应研究并不丰富,有关温压炸药爆炸火球高温区域的研究主要为敞开空间爆炸条件下高温区域的尺寸和个别时刻的温度分布特征<sup>[12-14]</sup>。对于坑道等封闭和半封闭空间,接触式测温方法(如热电偶)的测温结果在一定程度上能够反映温压炸药的热效应演化特征<sup>[15]</sup>。

温压炸药的非理想爆轰特性使其受空间约束作用明显,而坑道是一种典型的狭长受限空间,因此近坑道口爆炸条件下约束作用对温压炸药后燃效应的影响也得到了研究人员的关注。温压炸药在坑道口外、堵口处和口内三种典型位置空爆的毁伤元演化规律表明坑

收稿日期:2024-08-11;修回日期:2024-11-20

网络出版日期:2024-11-22

基金项目:国家自然科学基金(52278504;12072371);江苏省自然科学基金(BK20220141;BK20221528);陆军工程大学青年自主创新基金项目资助

作者简介:纪玉国(1993-),男,讲师,主要从事冲击动力学与武器效应研究。e-mail: jiyuguo-LGD@qq.com

通信联系人:张国凯(1988-),男,教授,主要从事爆炸与防护技术研究。e-mail: gkzhang@njust.edu.cn

李干(1985-),男,副教授,主要从事冲击动力学与武器效应研究。e-mail: ligan-impact@qq.com

引用本文:纪玉国,何勇,谭仪忠,等.近坑道口爆炸条件下温压炸药热效应与冲击波演化规律[J].含能材料,2024,32(12):1287-1297.

JI Yu-guo, HE Yong, TAN Yi-zhong, et al. Evolution Laws of the Thermal Effect and Shock Wave Generated by Explosion of Thermobaric Explosive (TBX) Around the Tunnel Entrance[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(12):1287-1297.

道约束作用是影响毁伤元演化的重要因素<sup>[16]</sup>,内爆炸条件下装药量对后燃反应的强度具有显著影响<sup>[17]</sup>。在理论研究方面,能量密度因子的概念应用到了不同空间约束效果的冲击波传播规律研究当中<sup>[18]</sup>,说明了坑道约束作用会引起爆炸冲击波的增强。

以上研究对坑道内温压炸药冲击波、热效应以及其受到的坑道约束作用分析是通过空爆试验得到的,而除空爆外,温压炸药在坑道口部还经常会出现贴地爆炸的情况,但目前有关贴地爆的毁伤元演化规律及其受到的环境影响因素尚未见报道。为此,本研究开展了温压炸药在坑道口外和堵口处的空爆和贴地爆试验,并与TNT炸药坑道爆炸试验进行对比,获取近坑道口温压炸药后燃效应特征参数和毁伤元演化规律,分析坑道对温压炸药爆炸释能过程形成约束作用时地面的影响机制,以期对分析近坑道口爆炸条件下温压炸药的热效应和冲击波演化规律提供参考。

## 1 试验部分

### 1.1 样品制备与坑道装置

#### 1.1.1 样品制备

压装型RDX基温压炸药和熔铸型TNT由南京理工大学提供。其中,压装型RDX基温压炸药中RDX的质量分数为55%,铝粉(Al)的质量分数为30%,其余组分为黏结剂和助燃剂。其密度为 $1.90\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,爆速约为 $7800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,药柱质量为1 kg和2 kg,直径为81 mm和120 mm,长径比为1.26和0.83;熔铸型TNT的密度为 $1.55\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,爆速约为 $6300\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,本研究中TNT试验主要用于冲击波传播路径的补充分析,因此开展1 kg的TNT爆炸试验用于对照,药柱直径为95 mm,长径比为0.96。

#### 1.1.2 坑道装置

试验依托自主研发的大尺寸坑道试验平台展开<sup>[16-17]</sup>,坑道为钢筋混凝土结构,拱、直墙和地面均为混凝土表面,内部空间长30 m,截面为直墙拱形,具体尺寸如图1所示。

### 1.2 试验工况

本研究参考文献[19]设置贴地爆位置,区别于触地爆(如图2所示),主要体现为装药能量中心距离地面高度 $h_e$ 不同,共进行10次试验,试验工况如表1所示(D和W分别代表堵口和口外,K和T分别代表空爆和贴地爆)。温压炸药堵口空爆、贴地爆试验各2次,

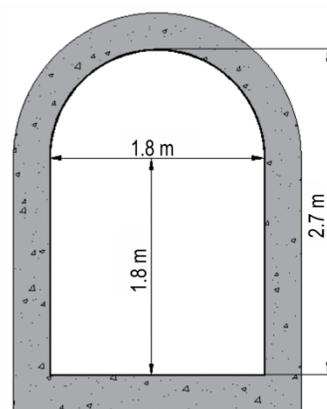


图1 坑道截面尺寸

Fig.1 Dimension of tunnel section

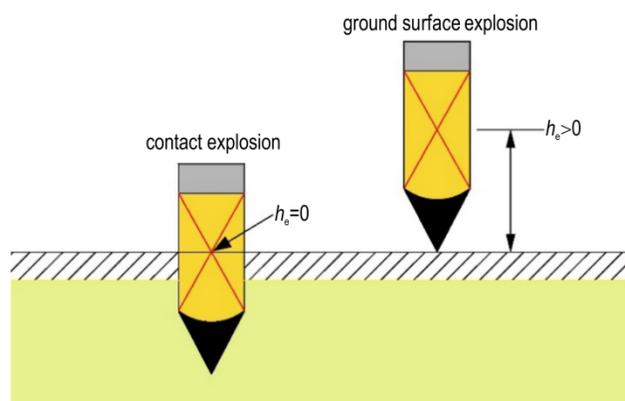


图2 触地爆炸和贴地爆炸药柱相对地面的位置图

Fig.2 Relative positions of contact explosion and ground surface explosion

口外空爆、贴地爆各1次。TNT堵口和口外的空爆、贴地爆试验各1次。空爆工况中,药柱高度为1.2 m。贴地爆工况中,药柱平放在地面上。

图3为不同爆炸模式中药柱与坑道端口相对位置示意图,堵口爆炸工况中药柱位于坑道口,口外爆炸工况中药柱位于坑道口外1 m处。

### 1.3 冲击波和热效应参数测量

冲击波和热效应参数测量试验平面布置示意及坑道内实物图如图4所示。坑道内共设置测点13个,编号为A1a~A13a,分布在距离坑道口3~27 m的范围内,通过1137B系列自由场压力传感器进行测量。热效应测试手段分为非接触式和接触式,非接触式测温用于观测火球演化过程,包括高速相机、红外热成像仪以及多谱线测温探头3种,接触式测温手段为热电偶,布置在A1a测点,用于评估火球区域在坑道内部的温度演化过程。

表 1 试验工况与药量参数

Table. 1 Experimental conditions and charge weight

sample	type	positions of explosion	mode of explosion	mass / kg
TBX-D-K-1kg	TBX	at tunnel entrance	air explosion	1
TBX-D-K-2kg	TBX	at tunnel entrance	air explosion	2
TBX-D-T-1kg	TBX	at tunnel entrance	ground surface explosion	1
TBX-D-T-2kg	TBX	at tunnel entrance	ground surface explosion	2
TNT-D-K-1kg	TNT	at tunnel entrance	air explosion	1
TNT-D-T-1kg	TNT	at tunnel entrance <td ground surface explosion	1	
TBX-W-K-1kg	TBX	outside tunnel entrance	air explosion	1
TBX-W-T-1kg	TBX	outside tunnel entrance	ground surface explosion	1
TNT-W-K-1kg	TNT	outside tunnel entrance	air explosion	1
TNT-W-T-1kg	TNT	outside tunnel entrance	ground surface explosion	1

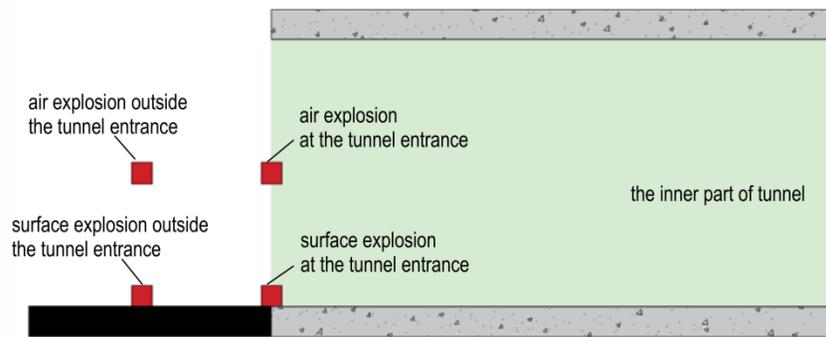


图 3 不同爆炸模式中药柱位置与坑道端口的相对位置关系

Fig.3 Positions of the charges relative to the tunnel entrance

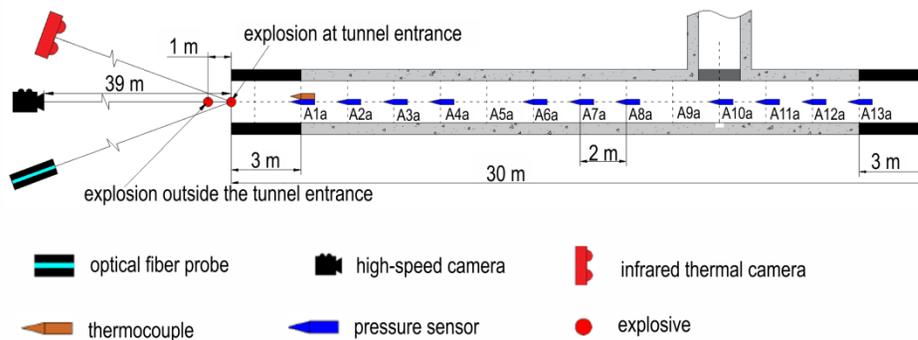


图 4 坑道试验平面布置图和实物图

Fig.4 Test arrangement

1.3.1 冲击波参数测量

传感器固定在立式传感器支架上,传感器尖端指向爆心,传感器与地面平行,从而确保测量结果为空气冲击波入射压,传感器量程在 0.34~1.7 MPa 之间,响应延迟小于 1 μs。

1.3.2 热效应测量

高速相机的采集频率为 3000 fps,参考文献[20]将曝光时间和光圈分别设置为 18 μs 和 F2.2,实现控制可识别的辐射亮度,能够反映 1500~1800 °C 温度范围的火球形态;红外相机的采集频率为 30 Hz,用于识

读固定时刻的火球温度和尺寸;多谱线光纤测温技术的响应频率大于 500 kHz,可以识别<sup>[21]</sup>铝粉燃烧产生的特定波长的光信号,从而可以用来分析后燃演化趋势;接触式热电偶温度传感器布置在坑道内部 A1a 点,响应频率大于 1000 Hz。

2 结果与分析

2.1 热效应演化规律

本研究采用高速相机和红外相机得到爆炸火球的

辐射亮度和温度演化过程,采用光纤和热电偶测量堵口空爆和堵口贴地爆在坑道内A1a测点的温度。从火球辐射亮度图片中获取火球像素数量,依据其与坑道截面尺寸对应关系计算得到火球尺寸,得到火球直径和高度在0~30 ms期间的变化趋势如图5所示,反映燃烧状态的火球辐射亮度和温度演化过程如图6所示。

图5显示火球在1~8 ms的过程中扩张迅速,在8~10 ms扩张速率降低,在10 ms后火球高度和直径基本保持稳定,而在火球扩张过程中,贴地爆和空爆的变化趋势并不一致。结合图6中0~8 ms的火球演化过程可知,空爆工况中,火球沿横向直径方向和竖向高度方向都有明显扩张;而贴地爆工况中,地面对火球演化方向有明显的诱导效果,直径方向的扩张速率和程度较火球高度方向更加明显,在8 ms时,贴地爆火球高度仅为1.68 m,为火球直径的0.34倍。

图6中显示空爆和贴地爆在10~25 ms期间的火

球亮度都处于稳定的后燃状态。图5显示空爆和贴地爆10~30 ms期间的火球直径分别约为5.24 m和5.08 m,高度分别约为3.86 m和1.93 m,可见相同时段内空爆工况火球高温区域约为贴地爆的2倍。图6中空爆工况中代表超过1800 °C的亮白色火焰范围始

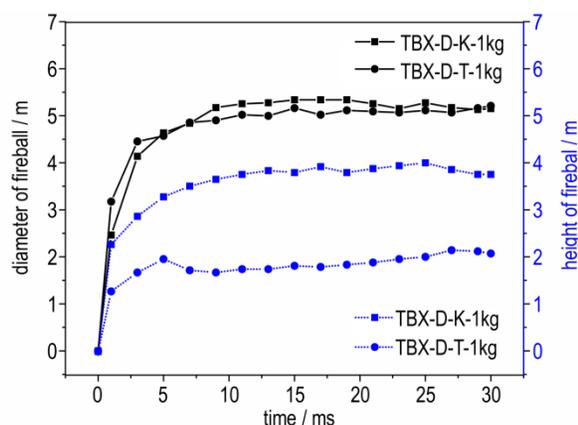


图5 不同时刻空爆、贴地爆温压炸药火球直径和高度

Fig.5 Diameter and height of TBX explosion fireballs in air and surface explosion over time

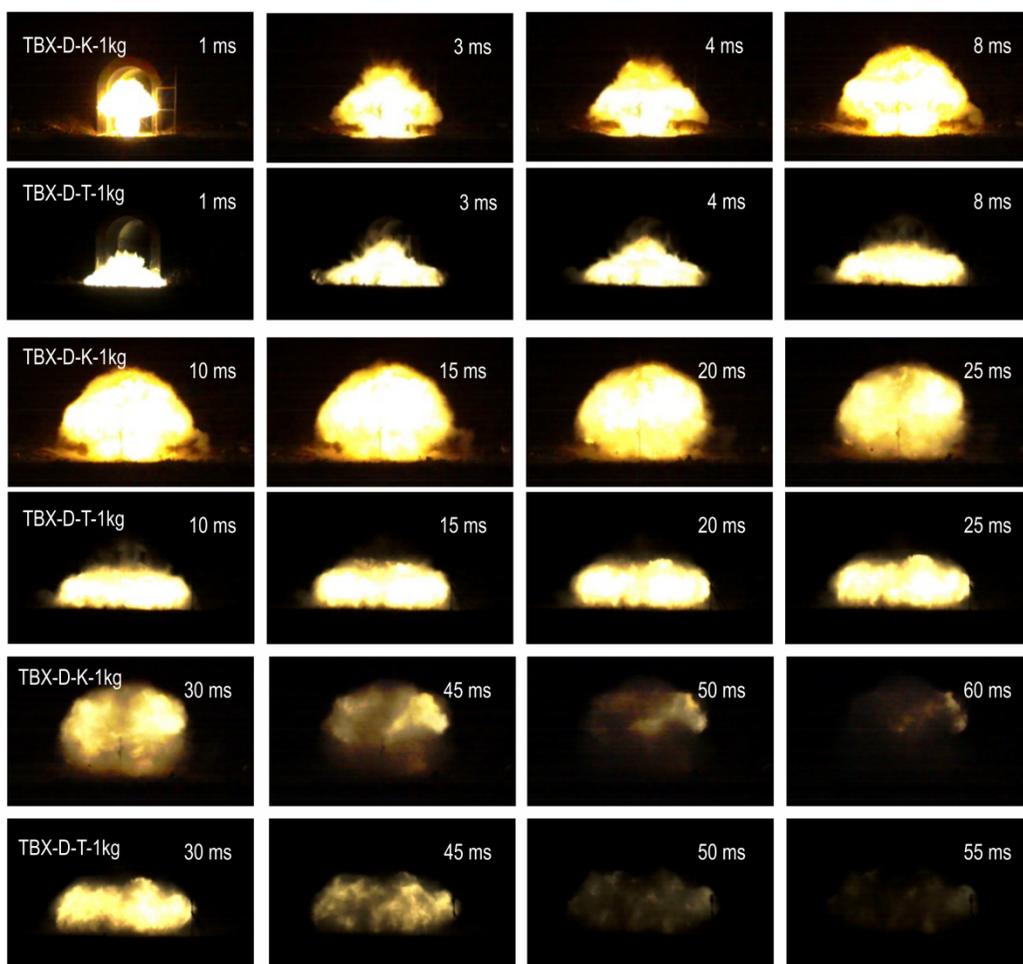


图6 TBX-D-K-1kg 和 TBX-D-T-1kg 火球演化过程

Fig.6 Fireball evolution of TBX-D-K-1kg and TBX-D-T-1kg

终大于贴地爆工况,表明空爆火球高温区域的温度和持续时间均高于贴地爆。

如图7为温压炸药空爆和贴地爆火球红外热成像测试结果,结合高速相机中的火球演化过程可以大致判断红外测量结果分别为36,69,102和135 ms。红外火球测量结果与图6火球演化过程基本对应,在火球形状方面,空爆火球直径和高度

寸差异相对较小,而贴地爆火球形状呈现明显的长条形;在火球温度方面,空爆火球的36 ms时的峰值温度约为2100 °C,为贴地爆的1.5倍,超过1000 °C以上的持续时间约为102 ms,而贴地爆仅约为69 ms。从图7中的红外摄像结果可知相同时刻空爆火球高温区域范围、峰值温度和高温持续时间等均高于贴地爆。

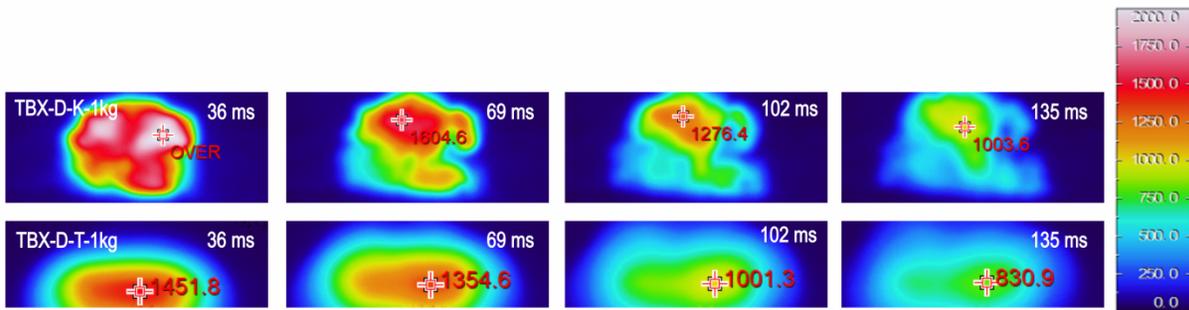


图7 红外摄像火球高温区域温度分布

Fig.7 Temperature distribution of fireballs captured by infrared camera

光纤测温试验结果中1200 °C以上的温度演化过程如图8所示,相同药量的空爆火球温度高于贴地爆;空爆2 kg时火球燃烧持续时间约为66 ms,约为贴地爆的1.33倍。从整体曲线上,空爆工况中都出现了后燃升温现象,药量2 kg时的后燃温度甚至达到了2056 °C。而贴地爆工况中主要维持在约1500 °C和1350 °C左右,没有出现明显的后燃升温现象。

以上3种测量方法得到的火球参数均表明坑道堵口处空爆工况中产生的热效应比贴地爆更加明显。这一结果的产生机理可以结合图6中的火球发展过程进行说明。空爆工况中,铝粉燃烧过程受坑道约束作用明显,因此铝粉和空气处于良好的混合状态,使后燃升温的现象出现,有利于形成更大更持续的高温范围。而贴地爆工况中,早期的火球受地面引导作用明显,火球沿水平方向扩张迅速继而导致受到的坑道约束作用

减弱,造成铝粉和氧气的混合效果减弱,表现为燃烧区域小,燃烧程度不充分,因此获得的测量结果都表明贴地爆的后燃效应差于空爆。

图9所示为堵口空爆和贴地爆2 kg温压炸药热电偶温度测量结果。坑道内A1测点(距离爆心3 m)的热电偶温度测试结果同样表现了贴地爆和空爆的后燃效应差异。贴地爆和空爆的温度峰值分别为600 °C和1450 °C,升温时间分别为40 ms和5 ms。据此可以计算得到两种工况在热电偶附近的热流密度 $q$ ,计算公式如下<sup>[22]</sup>:

$$q = \rho c \bar{l} \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

式中, $\rho$ 为热偶丝的密度, $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;  $\bar{l}$ 为偶结的等效直径, $\text{m}$ ;  $c$ 为热偶丝的热容, $\text{J}\cdot\text{°C}^{-1}$ ;  $\frac{dT}{dt}$ 为升温速率, $\text{°C}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

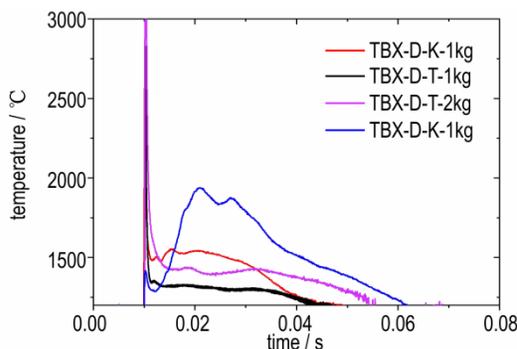


图8 多谱线光纤测得的温度时程曲线

Fig.8 Temperature curves measured by multispectral method

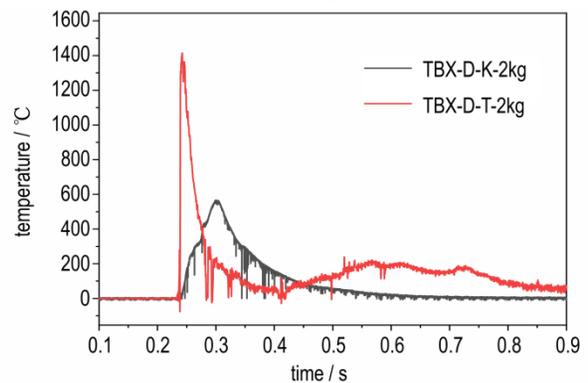
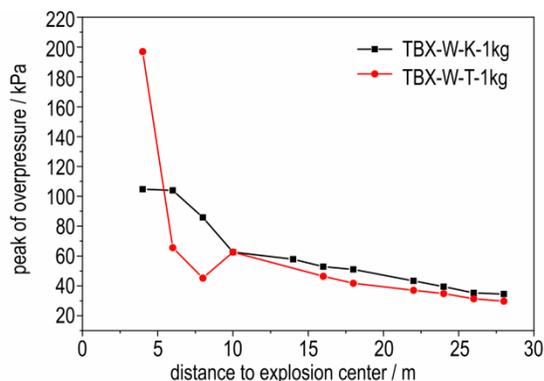


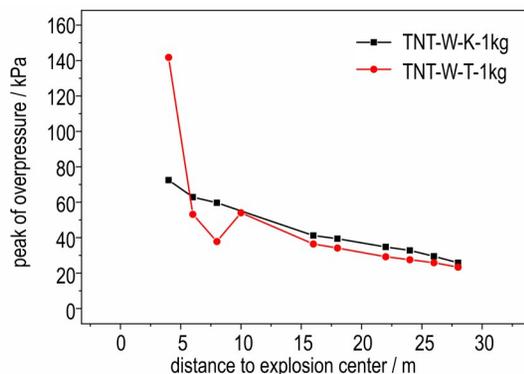
图9 坑道内测得的温度时程曲线

Fig.9 Temperature curves inside the tunnel

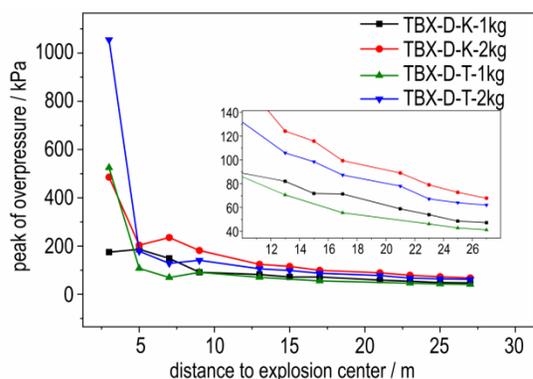
由此计算得到空爆工况在热电偶测量位置的热流密度约为贴地爆的19.3倍。以上结果均显示,堵口空爆工况中坑道内铝粉有氧燃烧产生的热效应相对贴地爆工况更加明显,这与坑道口外通过高速相机、红外摄像机和光纤测温系统测量的结果一致。



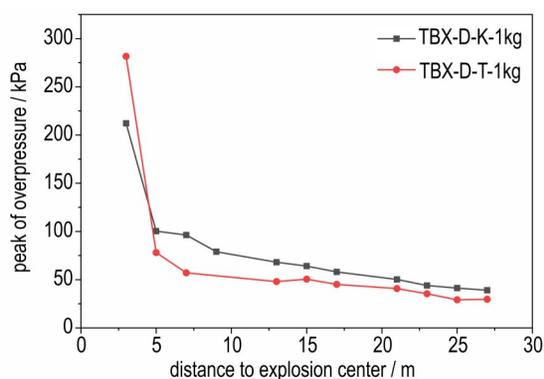
a. overpressure peak value of TBX explosion outside the tunnel entrance



b. overpressure peak value of TNT explosion outside the tunnel entrance



c. overpressure peak value of TBX explosion at the tunnel entrance



d. overpressure peak value of TNT explosion at the tunnel entrance

图10 坑道堵口空爆、贴地爆超压峰值

Fig.10 Overpressure peak value in different explosion mode

以堵口爆炸试验为例,图10c为温压炸药坑道堵口空爆和贴地爆后超压峰值随爆心距的衰减规律。药量相同的情况下,贴地爆炸在A1a测点的峰值总是高于空爆,在之后的传播过程中,贴地爆2次试验的超压峰值在A2a测点经历了快速衰减,分别由530 kPa和1070 kPa衰减到100 kPa和200 kPa,且在A2a测点后,空爆工况的超压峰值总是高于贴地爆。图10a~b和图d中超压峰值随爆心距的衰减过程也与图10c极为相似。由此可知这一数据趋势应排除药量、药品类型和装药距离这几项因素的影响,结合冲击波传播理论可知这一现象与冲击波在坑道内的演化路径相关,可以结合图11中冲击波压力曲线进行说明。

## 2.2 冲击波演化规律

### 2.2.1 冲击波超压峰值

图10为温压炸药和TNT在坑道口外和堵口处两个位置空爆和贴地爆的冲击波超压峰值随爆心距衰减结果。

### 2.2.2 冲击波波形演化

图11为温压炸药和TNT在坑道口外和堵口处空爆和贴地爆后在不同测点产生的冲击波压力曲线,压力曲线的演化趋势对应冲击波的不同传播阶段。在冲击波达到坑道壁面前,空爆产生的冲击波近似以球面波的形式向外自由扩张,而贴地爆炸时,冲击波在刚性表面为边界的半空间中传播时,冲击波能量加倍。结合图11a~d可知空爆和贴地爆工况中A1a测点的冲击波首峰分别对应无界环境和半空间的传播结果。图11e中冲击波波形近似为三角波,表明此时冲击波的反射、叠加已经结束,形成了稳定的平面波<sup>[24]</sup>,可以看到相同位置时,空爆和贴地爆的正压时间基本相同,但空爆的超压和比冲量明显高于贴地爆。

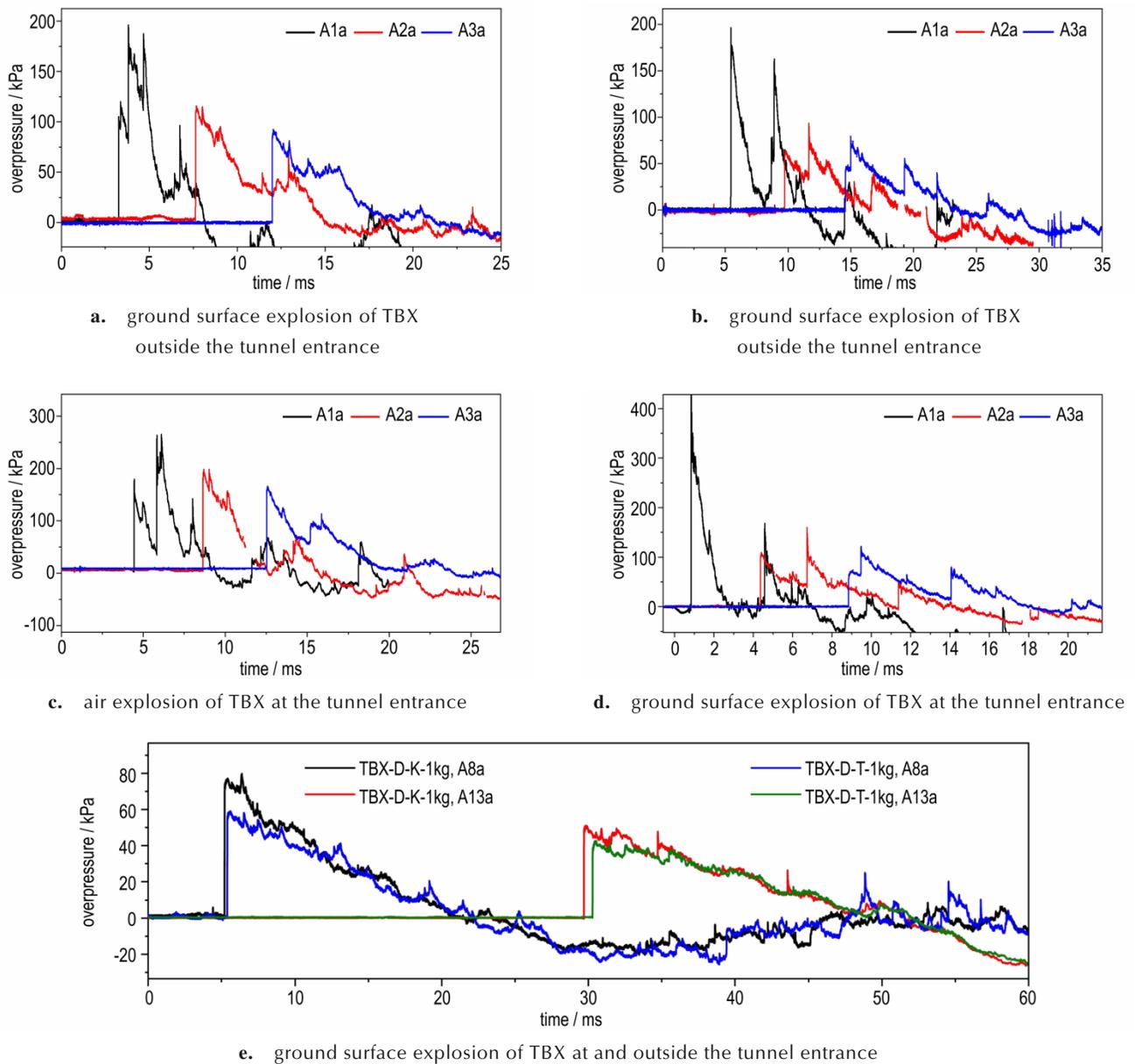


图 11 冲击波压力曲线

Fig.11 Curves of shock wave

有关坑道内相同测点空爆冲击波超压峰值高于贴地爆这一结果,可结合压力曲线演化过程和冲击波传播理论<sup>[1, 23]</sup>进行分析。

图 11a 和 c 显示 A1a 测点的压力曲线在归 0 前具有连续多波峰的特征,测量得到首峰的超压分别为 105 kPa 和 157 kPa,而第二个峰的峰值为 177 kPa 和 232 kPa。由超压峰值和冲击波速度的对应关系可知经过 A1 测点后反射波会追赶入射波<sup>[23]</sup>,促使超压峰值升高,同时延长正压时间。空爆工况中,温压炸药爆炸产生的球面波到达坑道壁面后会出现 360°全截面的反射,相对于敞开空间只产生地面反射而言,坑道内

的反射波波系演化过程更加剧烈、复杂,反射增强效果也更加明显。

贴地爆炸工况中,图 11b 中 A1a 测点冲击波第二峰(反射波)与第一峰(入射波)之间的间隔时间为空爆的 3.2 倍,反射叠加效果较空爆有明显降低。冲击波反射叠加效果差异是由装药位置差异决定的,置于地面的药柱爆炸后不能形成类似空爆工况中的全截面反射路径,反射波波系演化相对简单。此外,试验中的地面并不是刚性的,药柱爆轰过程中会有能量耗费在地面破坏当中,致使形成冲击波的总能量降低。

### 2.2.3 冲击波正压时间

正压时间是冲击波内超过周围大气压的压力作用时间,是评估冲击波参数的一个重要指标<sup>[23]</sup>。图12为温压炸药和TNT空爆和贴地爆条件下正压时间随传播距离的变化过程,总体上各工况中正压时间都随着传播距离不断增长。

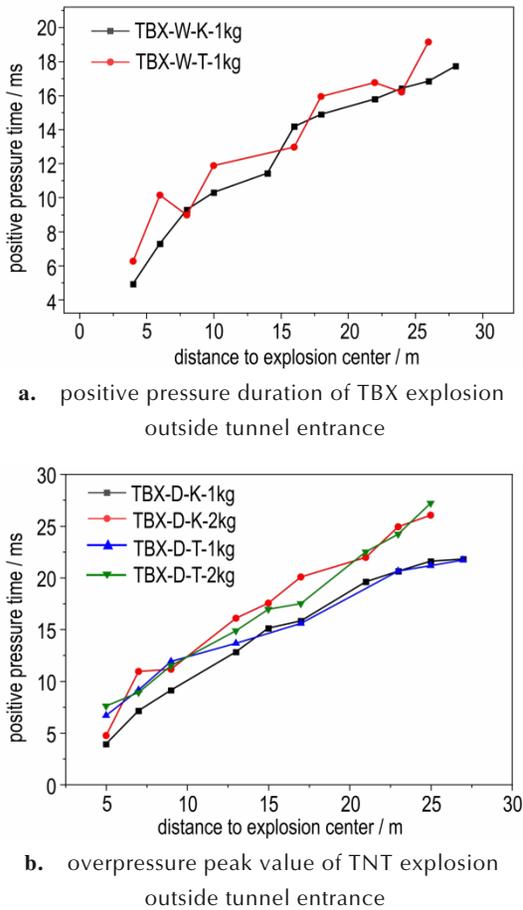


图12 坑道堵口空爆和贴地爆正压时间  
Fig.12 Positive pressure duration of TNT and TBX in air explosion and ground surface explosion at the tunnel entrance

从图12中可以看出,口外爆炸试验中温压炸药空爆正压时间整体低于贴地爆,而堵口爆炸时空爆正压时间与贴地爆持平,这一变化趋势是坑道约束效果变化的影响。相对于口外爆炸,堵口爆炸条件下坑道约束作用更直接,空爆模式下具备更好的利用条件,铝粉后燃产生的压力波效果更强,对坑道内的冲击波能量提供补充的同时配合壁面与冲击波的相互作用过程,使波系演化过程中的反射、叠加更加剧烈,延长冲击波正压时间到和贴地爆同一水平。

### 2.2.4 冲击波参数拟合

空爆和贴地爆冲击波参数差异通过温压炸药在坑

道堵口处的试验结果进行分析。将堵口贴地爆和空爆各工况中平面波传播段的超压峰值随比例距离  $(m/(Sx))^{1/3}$  的衰减过程统计得到图13。

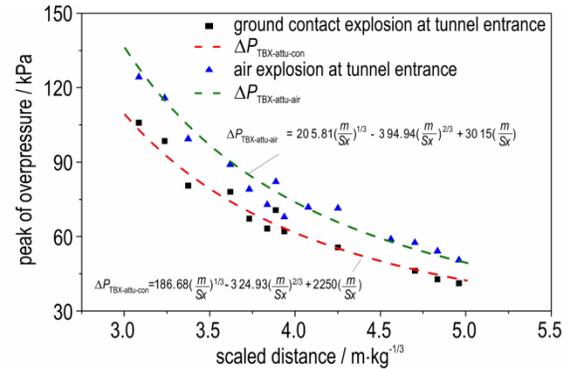


图13 坑道堵口空爆、贴地爆冲击波超压  
Fig.13 Overpressure peak value in air explosion and ground surface explosion at the tunnel entrance

参考文献[24]建立超压  $\Delta P$  随  $(m/(Sx))^{1/3}$  的数量关系,得到堵口空爆冲击波超压  $\Delta P_{TBX-attu-air}$  拟合公式为:

$$\Delta P_{TBX-attu-air} = 205.81(\frac{m}{Sx})^{1/3} - 394.94(\frac{m}{Sx})^{2/3} + 3015(\frac{m}{Sx}) \quad (2)$$

式中,  $m$  为质量, kg;  $S$  为坑道截面积,  $m^2$ ;  $x$  为坑道内传播距离,  $m$ 。

计算得到贴地爆相对于空爆的超压峰值当量系数约为0.77,堵口贴地爆的超压  $\Delta P_{TBX-attu-con}$  拟合公式为:

$$\Delta P_{TBX-attu-con} = 186.68(\frac{m}{Sx})^{1/3} - 324.93(\frac{m}{Sx})^{2/3} + 2250(\frac{m}{Sx}) \quad (3)$$

统计发现正压时间与质量  $m$  的  $1/6$  次方和传播距离  $x$  的  $1/2$  方的乘积  $m^{1/6}x^{1/2}$  可以建立线性关系,如图14所示。

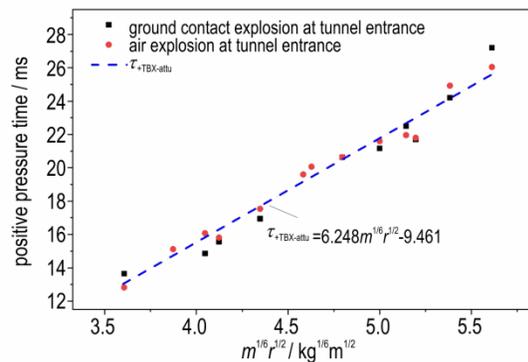


图14 坑道堵口空爆、贴地爆冲击波正压时间  
Fig.14 Positive pressure duration in air explosion and ground surface explosion at the tunnel entrance

正压时间  $\tau_{+TBX-attu}$  拟合公式如下:

$$\tau_{+TBX-attu} = 6.248m^{1/6}x^{1/2} - 9.461 \quad (4)$$

形成平面波后,所测量段坑道的比冲量基本为定值<sup>[16]</sup>。统计得到贴地爆和空爆平面波传播阶段的比冲量平均值如图 15 所示,堵口贴地爆的比冲量为 447.5 kPa·ms 和 724.75 kPa·ms,均约为空爆相同药量的 90% 左右。

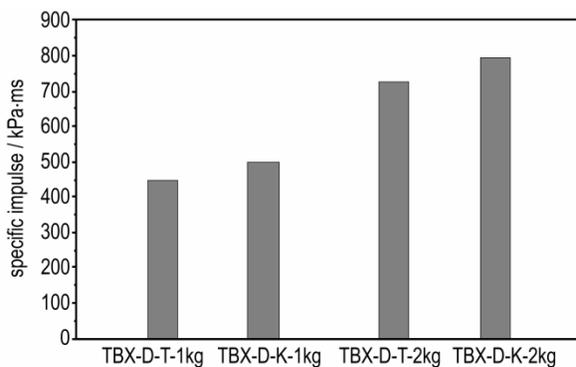


图 15 坑道堵口空爆、贴地爆冲击波比冲量

Fig. 15 Specific impulse in air explosion and ground surface explosion at the tunnel entrance

图 13~15 所示的温压炸药堵口爆炸模式下冲击波的波形演化过程、冲击波超压峰值、正压时间以及比冲量的演化特征和定量化对比结果都表明空爆冲击波威力高于贴地爆炸,表明铝粉后燃差异除了表现在热效应外,对冲击波传播也有明显影响。

综合温压炸药火球热效应和冲击波传播的特征现象和演化规律,可推测坑道口部空爆和贴地爆后燃效应的差异来自于坑道约束作用和地面干预作用两个方面:

**坑道的约束作用。**堵口空爆条件下,药柱位于坑道端口的截面中心,环向全包围的坑道壁面对于中心向外辐射状抛撒燃烧的铝粉有正向增强的约束作用,能够促进铝粉与氧气的混合效果,提高后燃强度,从而形成对火球高温区域和坑道内冲击波能量的良好补充。

**地面的干预作用。**贴地爆模式下地面的干预作用会诱导火球沿地面方向扩张,火球形状的变化实际上代表了铝粉抛撒状态的改变,贴近地面会使得坑道约束作用受到明显削弱,同时大范围处于地面附近的铝粉难与氧气形成良好的混合效果。两方面的条件弱化和困难造成了贴地爆后燃强度的降低,导致燃烧产生的热效应和压缩波效果较空爆低。

### 3 结论

以近坑道口爆炸条件下温压炸药热效应和冲击波演化规律为主要研究内容,开展了温压炸药在坑道口外和堵口处的空爆、贴地爆试验,得到了热效应和冲击波演化规律,分析了空爆和贴地爆条件下后燃效应差异表现形式及其中的影响因素,主要结论如下:

(1)堵口爆炸条件下,温压炸药在空爆模式中受坑道约束作用明显,而贴地爆模式中地面的干预作用会削弱坑道对铝粉燃烧过程的约束作用,同时导致铝粉在地面附近难以与氧气形成良好的混合效果,最终导致后燃强度较空爆工况有明显降低。

(2)堵口爆炸条件下,空爆工况中铝粉后燃过程对冲击波能量的补充作用更显著,同时受药柱与坑道截面相对位置的影响,空爆产生的冲击波会形成更加充分、复杂的反射路径,使堵口空爆的冲击波超压高于贴地爆,空爆冲击波超压峰值、正压时间和比冲量相对于贴地爆的当量系数分别为 1.3、1 和 1.1。

(3)堵口爆炸条件下,空爆工况中会出现后燃升温现象,空爆火球的后燃温度峰值较火球刚达到稳定状态时升高可达 50% 以上,空爆火球在坑道外的火球高度和峰值温度分别约为贴地爆的 2 倍和 1.41 倍,坑道内热电偶温度峰值可达贴地爆的 2.42 倍,热流密度可超过贴地爆的 19.3 倍。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张思维, 张鹏程, 王子, 等. 温压炸药配方及毁伤评估研究进展 [J]. *兵工学报*, 2024, 45(增): 147-160.  
ZHANG Si-wei, ZHANG Peng-cheng, Wang Zi, et al. Research progress on thermobaric explosive formulation and damage assessment [J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45 (s): 147-160.
- [3] 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.
- [4] 王伯良, 李亚宁, 韩志伟. 温压炸药发展趋势的几点思考 [J]. *火炸药学报*, 2023, 46(11): 935-936.  
WANG Bo-liang, LI Ya-ning, HAN Zhi-wei. Some thoughts on the development trend of thermobaric explosives [J]. *Journal of Fire and Explosives*, 2023, 46(11): 935-936.
- [5] 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.

- HU Hong-wei, SONG Pu, DENG Guo-qiang, et al. Characteristics of thermobaric explosives and their advances[J]. *Advances in Mechanics*, 2022, 52(1): 53-78.
- [6] 田少康,李席,刘波,等.一种RDX基温压炸药的JWL-Miller状态方程研究[J].含能材料,2017,25(3):226-231.  
TIAN Shao-kang, LI Xi, LIU Bo, et al. Study on JWL-Miller equation of state of RDX-based thermobaric explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(3): 226-231.
- [7] 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.  
GENG Zhen-gang, LI Xiu-di, MIAO Chao-yang, et al. Propagation of blast wave of thermobaric explosive inside a tunnel [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(5): 23-29.
- [8] 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.  
XU Li-na, YONG Shun-ning, WANG Feng-dan, et al. Study of blast wave overpressure propagation inside straight tunnel [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2014, 28(2): 114-118.
- [9] 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,(03):21-24.  
KONG Lin, SU Jian-jun, LI Zhi-rong, et al. Test Study on explosion shock wave propagation of different explosives inside tunnels[J]. *Initiators & Pyrotechnics*. 2012, (03): 21-24.
- [10] 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.  
MAO Jin-feng, CHEN Fei, HOU Pu-min. Study on shock wave damage effects of thermobaric explosive explosion in tunnel entrance[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2016, 37(1): 184-193.
- [11] 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+632.  
LI Shi-min, LI Xiao-jun, LI Hong-xin. Numerical simulation study of airblast of thermobaric explosive explosion in tunnel [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2012, 29(5): 595-600+632.
- [12] 仲倩,王伯良,黄菊,等.火球动态模型在温压炸药热毁伤效应评估中的应用[J].爆炸与冲击,2011,31(5):528-532.  
ZHONG Qian, WANG Bo-liang, HUANG Ju, et al. Application of a dynamic model to thermal damage estimation of thermobaric explosives[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(5): 528-532.
- [13] 仲倩,刘大斌,秋珊珊,等.温压药剂爆炸火球温度测量研究[J].爆破器材,2019,48(1):23-26+31.  
ZHONG Qian, LIU Da-bin, QIU Shan-shan, et al. Temperature measurement study on blasting fireball of thermobaric explosives[J]. *Blasting Equipment*, 2019, 48(1): 23-26+31.
- [14] 裴明敬,胡华权,张景森,等.含铝温压炸药及其爆炸效能研究[J].中国工程科学,2009,11(4):67-75.  
PEI Ming-jing, HU Hua-quan, ZHANG Jing-sen, et al. Study on efficiency of aluminized thermobaric explosive[J]. *Strategic Study of CAE*, 2009, 11(4): 67-75.
- [15] 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.  
YAN Xiao-min, SU Jian-jun, LI Zhi-rong, et al. Experimental study on explosive thermal effect of thermal-baric explosives in tunnel[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2015(1): 22-25.
- [16] 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.  
JI Yu-guo, ZHANG Guo-kai, LI Gan, 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.
- [17] 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.  
JI Yu-guo, ZHANG Guo-kai, LI Gan, et al. Explosion characteristics of thermobaric explosive (TBX) detonated inside tunnel and the related influential factors[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(3): 118-132.
- [18] 钟巍,田宙,寿列枫.基于能量密度因子法的复杂环境下爆炸冲击波超压峰值解析计算[J].科学技术与工程,2021,21(28):11947-11954.  
ZHONG Wei, TIAN Zhou, SHOU Lie-feng. Analytical calculation of the blast wave peak overpressure under complex environments based on the energy concentration factor method[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(28): 11947-11954.
- [19] 邓国强,杨秀敏.以贴地爆为基准点的地面上强爆炸威力分析[J].防护工程,2020,42(3):32-35.  
DENG Guo-qiang, YANG Xiu-min. Analysis of strong above-ground explosion power based on surface proximity burst[J]. *Protection Engineering*, 2020, 42(3): 32-35.
- [20] 许仁翰,周钊捷,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.  
XU Ren-han, ZHOU Yi-jie, DI Chang-an. A temperature measuring method for explosive temperature field based on high-speed imaging technology[J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(3): 640-647.
- [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.  
ZHONG Qian, WANG Bo-Liang, WANG Feng-dan, et al. Explosion temperature of thermobaric explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011(2): 204-208.
- [22] 李芝绒,张玉磊,蒋海燕,等.一种温压炸药半密闭坑道内爆炸综合效应评价方法[P].2017-09-08.  
LI Zhi-rong, ZHANG Yu-lei, JIANG Hai-yan, et al. Evaluation method of comprehensive effect of explosion in semi-enclosed pit of thermobaric explosives [P]. 2017-09-08.
- [23] Л.П. 奥尔连科.爆炸物理学[M].科学出版社,2011.  
ОРЛЕНКО Л.П. Explosion physics[M]. Translated by Sun Chengwei. Beijing: Science Press, 2011.
- [24] 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.  
YANG Ke-zhi, YANG Xiu-min. Shock waves propagation inside tunnels [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003(1): 37-40.

## Evolution Laws of the Thermal Effect and Shock Wave Generated by Explosion of Thermobaric Explosive (TBX) Around the Tunnel Entrance

Ji Yu-guo<sup>1</sup>, HE Yong<sup>2</sup>, TAN Yi-zhong<sup>1</sup>, LI Jie<sup>1</sup>, SHAO Lu-zhong<sup>1</sup>, ZHANG Jun-nan<sup>1</sup>, ZHANG Guo-kai<sup>3</sup>, LI Gan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China, 2. China School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 3. School of Safety Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** To study the evolution laws and its suffered influential factors of thermal effect and shock wave generated by thermobaric explosive (TBX) explosion around the tunnel entrance, explosion experiments were carried out by varying the initial location of TBX relative to the tunnel entrance. Thermal effect parameters (e.g. fireball size and temperature), and shock wave parameters (e.g. overpressure peak value, positive pressure duration, specific impulse and waveform), were analyzed. Moreover, the propagation trace of shock wave inside the tunnel was analyzed in conjunction with the results of Trinitrotoluene (TNT) explosion experiments. The results indicated that, when the TBX charge was initiated at the tunnel entrance, both the thermal effect and shock wave effect in air explosion was better than that in a ground surface explosion. Regarding thermal effect, the height and peak temperature of the fireball generated by the explosion were approximately 2 and 1.41 times higher than that of a ground surface explosion, respectively. The peak temperature measured inside the tunnel was about 2.42 times higher than that of a ground surface explosion, and the heat flux density could exceed 19.3 times that of the ground surface explosion. The temperature increasement generated by the afterburning process of TBX indicated a positive correlation with the weight of TBX charge. Concerning shock wave, the overpressure generated by the afterburning process of TBX in air explosion at the tunnel entrance was stronger than that of the ground surface explosion. For air explosion, the reflection and superposition paths of shock wave were more sufficient. Compared to the ground surface explosion, the equivalent coefficients of overpressure peak value, positive pressure duration and specific impulse of the shock wave in air explosion were approximately 1.3, 1, and 1.1, respectively. The evolution laws of thermal effect and shock wave effect were influenced by the combination of the constraint from tunnel and the intervention of the ground. In air explosion, the constraint effect of tunnel was much more significant, so as to the afterburning effect. However, in a ground surface explosion, the intervention effect of the ground could weaken the constraint function of tunnel, so that the mixing between Al particles and air could be suppressed, resulting in a reduction of afterburning intensity.

**Key words:** thermobaric explosive (TBX); tunnel entrance; afterburning of Al particles; thermal effect; shock wave effect

**CLC number:**

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2024207

**Grant support:** National Natural Science Foundation of China (52278504, 12072371); The Natural Science Foundations of Jiangsu Province (BK20220141; BK20221528); Innovation Foundation of Army Engineering University of PLA youth Found

(责编:高毅)