



DOI: 10.12382/bgxb.2023.0555

密闭建筑温压炸药内爆炸后燃效应

蒋欣利¹, 张国凯^{1*}, 何勇¹, 姚箭¹, 王振¹, 吴玉欣¹, 刘举¹, 王明洋²

(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 爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007)

摘要: 温压炸药爆炸具有显著的后燃效应, 在密闭空间内爆炸呈现多重毁伤效应, 但后燃效应引起的多毁伤元耦合效应, 以及后燃增强效应的量化分析尚不明确。基于搭建的大尺寸密闭建筑, 开展不同药量下温压炸药及 LiF 替代铝粉炸药的内爆试验研究, 对温度、冲击波超压、准静态压力及氧浓度进行测试, 分析内爆条件下不同毁伤元的时空变化特征, 结合 LiF 替代铝粉炸药爆炸的对比试验, 阐明了密闭建筑内爆炸毁伤元的分布特点以及铝粉后燃效应对温度、冲击波超压、准静态压力和氧浓度变化的影响规律。研究表明: 密闭空间内爆下热效应和压力效应在角落边界处得到显著增强, 其中全过程比冲量在边界处增强了 2.2~2.5 倍; 铝粉后燃反应可显著增强温度、冲击波超压、准静态压力和氧气消耗量, 当药量达到 300 g 下, 铝粉后燃烧导致爆炸冲击波超压峰值提高 1.2 倍, 温度峰值提高 6.4 倍, 准静态压力提高 2.2 倍, 氧浓度消耗提高 2.8 倍。

关键词: 温压炸药; 内爆炸; 后燃效应; 冲击波超压; 热效应; 耗氧

中图分类号: TJ301

文献标志码: A

文章编号: 1000-1093(2024)08-2520-11

Afterburning Effect of Thermobaric Explosives in Confined Space

JIANG Xinli¹, ZHANG Guokai^{1*}, HE Yong¹, YAO Jian¹, WANG Zhen¹, WU Yuxin¹,
LIU Ju¹, WANG Mingyang²

(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: The explosion of thermobaric explosive has a significant afterburning effect, and its explosion in a confined space has multiple destructive effects. However, the coupling effect of multiple damage elements due to afterburning effect and the quantitative analysis of the afterburning enhancement effect are not clear yet. The implosion test of thermobaric explosives and LiF instead of aluminium powder explosive under different dosages is carried out in a large enclosed building, and the temperature, shock wave overpressure, quasi-static pressure and oxygen concentration are tested. The temporal and spatial variation characteristics of various damage elements under implosion conditions are analyzed, and the distribution characteristics of explosion damage elements are determined. The distribution characteristics of explosion damage elements in closed buildings and the influences of aluminium powder afterburning effect on temperature, shock wave overpressure, quasi-static pressure and oxygen concentration are clarified through the comparative test of LiF instead of aluminium powder explosion. The results show that the thermal effect and pressure impact of internal explosion in confined space are significantly enhanced at

收稿日期: 2023-06-05

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

* 通信作者邮箱: gkzhang@njust.edu.cn

the corner boundary, and the total specific impulse at the boundary is increased by 2.2 – 2.5 times. The afterburning effect of aluminium powder can significantly improve the temperature, shock wave overpressure, quasi-static pressure and oxygen consumption. When the dosage reaches 300 g, the aluminium powder afterburning leads to the explosion shock wave overpressure peak increased by 1.2 times, the temperature peak increased by 6.4 times, the quasi-static pressure increased by 2.2 times, and the oxygen concentration consumption increased by 2.8 times.

Keywords: thermobaric explosive; internal explosion; afterburning effect; shock wave pressure; thermal effect; oxygen consumption

0 引言

温压炸药是一种具有高温、高压效应的新型混合炸药^[1],在受限空间中爆炸表现出多重毁伤耦合机制^[2-3],而长方体建筑作为主要的工程结构类型,在密闭建筑中爆炸,燃烧效应将导致严重的毁伤效应^[4]。因此研究后燃效应在内爆条件下,对毁伤效应的影响规律及后燃增强效应的量化模型,在内爆炸威力评估和工程防护设计中具有重要意义。

在此之前关于密闭空间内爆的研究多以 TNT 在球形、储罐等爆炸容器^[5]中为主,以爆炸冲击波的演化以及内爆炸特性作为研究重点。金朋刚等^[6]基于爆炸罐爆炸试验发现,爆轰产生冲击波压力,而准静态压力是由后燃反应产生。王鑫等^[7]使用爆炸容器开展 TNT 内爆炸试验,基于能量守恒推导出准静态压力公式。李鸿宾等^[8]利用密闭爆炸罐进行空中爆炸试验发现,准静态压力可以作为表征炸药爆轰和后燃释放的总能量水平。徐维铮等^[9-10]在考虑后燃效应的数值计算模型中发现,TNT 的后燃效应能增强受限空间中的内爆载荷。岳学森等^[11]在徐维铮等^[9-10]的基础上,进一步研究 TNT 的燃烧效应能量释放,发现能量释放仅改变反射冲击波压力,对最终的准静态压力没有影响。孔祥韶等^[12]进一步研究了 TNT 爆炸产物燃烧对密闭空间中爆炸载荷的增强效果。

相比传统炸药,温压炸药的后燃效应更加显著,尤其是在受限空间中后燃效应导致毁伤元的显著增强^[13]。在早期的研究中,国外学者着重对温压炸药中铝颗粒的性能进行研究,Carney 等^[14]发现铝粉的早期燃烧在受限空间中对初始爆炸波具有一定增强作用。Manner 等^[15]发现金属铝在 $1\ \mu\text{s} \sim 2\ \text{ms}$ 的时间尺度上对爆炸冲击波的促进机制。Gogulya 等^[16]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 等^[17-18]发现铝粉颗粒大小能够影响温压炸药的反应程度。Fedina 等^[19]

利用有限速率化学模型来模拟铝粉燃烧,证明了铝释放的热量与爆炸发生的物理环境和后燃反应程度有关。国内温压炸药的研究起步较晚,近几年的研究多聚焦于温压炸药单一毁伤元威力的评估,以后燃效应在密闭空间引起的准静态压力、热效应为主。郑朝民等^[20]对温压炸药耗氧效应进行研究,发现温压炸药耗氧量远超高爆炸药,且能释放更多的能量。胡岚等^[21]利用耗氧效应对温压炸药毁伤威力进行评估,发现温压炸药耗氧量是 PBX 炸药的 1.55 倍、毁伤威力 PBX 炸药的 1.1 ~ 1.3 倍。严家佳等^[22]利用密闭爆炸罐模拟有限空间,发现后燃效应能提升冲击波比冲量和爆轰产物温度。Fan 等^[23]基于能量守恒和 JWL 方程推导出了考虑后燃效应的密闭空间温压炸药的准静态压力计算模型。李芝绒等^[24]在爆炸容器中的温压炸药和 TNT 的爆炸试验研究中发现,密闭环境中铝粉能够产生更强的燃烧效应。闫潇敏等^[25]对比坑道空间中温压炸药与 TNT 炸药威力,温压炸药产生的冲击波、热效应均比同质量下的 TNT 具有更强的破坏效果。李凌峰等^[26]等在坑道研究中发现,温压炸药具有显著的热效应且拐角结构能增强后燃反应。

通过对现有研究的回顾,发现目前国内外学者大多是基于小尺寸爆炸容器,且多以探测冲击波压力效应为主。对温压炸药在受限空间中的冲击波效应和热效应进行了较为深入的研究,明确了温压炸药毁伤威力大于传统高爆炸药毁伤威力,是由于温压炸药具有显著后燃效应所导致的。但由于小尺寸爆炸容器的体积限制,毁伤元测量手段受限,而温压炸药爆炸释能过程是随着时间和空间动态演变,现有研究鲜少有涉及到作为建筑结构的长方体空间,以及空间内部毁伤元时空分布规律,并且针对温压炸药后燃效应引起的多毁伤元耦合效应,及后燃增强效应的量化分析尚不明确。

基于以上仍存在的问题,结合大尺寸长方体密闭建筑,对温压炸药和 LiF 材料替代铝粉的炸药进

行爆炸试验研究,结合多种毁伤元测试技术,采集不同空间位置处冲击波超压和温度数据,分析准静态压力和氧气浓度的变化;综合研究后燃效应对不同毁伤元时空分布规律的影响,量化长方体密闭空间中后燃效应对毁伤元的增强效果,为温压炸药内爆炸威力评估和工程防护设计提供支撑。

1 内爆试验概况

1.1 长方体建筑模型与试验样品

采用的长方体建筑主体结构由钢筋混凝土搭建而成,内部空间尺寸为 $3.4\text{ m} \times 2.4\text{ m} \times 2.2\text{ m}$ 。在一侧剪力墙通过预留钢筋混凝土防护密闭门实现密闭空间的开启和闭合。表 1 为试验中使用的试验工况数据。

表 1 试验工况

Table 1 Data of test samples

工况编号	药量/g	铝粉/%	RDX/%
TBX-1	150	35	52
TBX-2	300		
LIF-1	150	LiF 替代铝粉	52
LIF-2	300		

温压炸药质量分别为 150 g(直径 42 mm、高度 50 mm)、300 g(直径 60 mm、高度 60 mm),密度为 1.9 g/cm^3 ,炸药中黑索今(RDX)质量占比为 52%,铝粉质量占比为 35%,其他成分为助燃剂和粘结剂。为研究温压炸药中铝粉的后燃增强效应,采用的惰性材料 LiF 具有与铝相似的密度,且不参与爆炸和后燃烧反应,将配方中的高热值铝粉替换为 LiF 材料,RDX 和其他成分质量分数保持不变。药柱形状为圆柱体,试验时药柱竖直悬挂在长方体建筑内部平面位置中心,炸高 1 m,采用 8 号电雷管配合 8701 炸药传爆药柱进行起爆。

1.2 测点布置及测试技术

结合长方体密闭空间特点以及挂药位置,在典型位置安放毁伤元数据采集传感器,总体布局情况如图 1 所示,试验实物布置如图 2 所示,主要测试设备如图 3 所示。试验过程中对内爆产生的高温、冲击波超压、准静态压力和耗氧 4 种毁伤元进行同步监测,采用超压测试、热效应测试以及氧浓度测试 3 类测试手段。

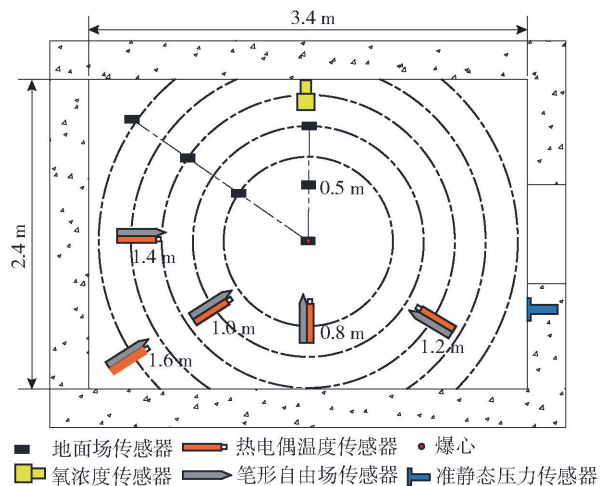


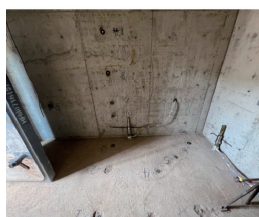
图 1 试验布置

Fig. 1 Test arrangement



图 2 试验实物布置

Fig. 2 Test physical arrangement



(a) 壁面压力传感器
(a) Wall pressure sensor



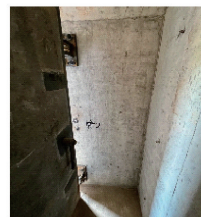
(b) 空气冲击波压力传感器
(b) Air shock wave pressure sensor



(c) 接触式热电偶
(c) Contact thermocouples



(d) 氧浓度传感器
(d) Oxygen concentration sensor



(e) 准静压传感器
(e) Quasi-static pressure sensor

图 3 主要测量设备

Fig. 3 Main measuring equipment

冲击波超压测试采用美国 PCB 公司生产的 ICP 型 1137B 系列自由场式压力传感器以及 113B 系列壁面压力传感器,自由场式压力传感器安装在距离爆心投影 0.8 m、1.0 m、1.2 m、1.4 m、1.6 m 环向位置,通过固定支架将自由场传感器安装在距地面高 1 m 的位置,自由场传感器均指向爆心,壁面压力传感器安装在距离爆心投影 0 m、0.5 m、0.8 m、1.0 m、1.2 m、1.6 m 的地面位置,压力传感器量程为 0~6.9 MPa,采样频率为 1 MHz;准静态压力测试采用对温度不敏感的压力传感器,型号为昆山双桥公司生产的 CYG1508F 型传感器,传感器安装在侧面剪力墙上,采样频率为 200 kHz;热效应测试采用南京理工大学研发的接触式快速响应热电偶^[27],在自由场传感器支架上安装热电偶测试系统,传感器均指向爆心,可测量最高瞬态温度为 2 000 ℃,响应时间小于 1 ms,采样频率设置为 50 kHz;氧浓度测试采用氧化锆电化学氧气传感器^[28],放置在侧面墙中心位置;冲击波超压、准静态压力、耗氧的数据采集系统采用瑞士 Elsys 公司生产的 TranAS3 型数据采集仪。

2 有无后燃效应毁伤元对比

2.1 热效应变化特征

接触式热电偶采集的温度用于表征内爆炸温度场的演变。由于热传导的非均匀性,并且由于爆炸后热流作用于传感器上的时间短暂,传感器的升温需要一定的热积累,所采集的温度数据与真实温度有所差距,因此仅用于表征内爆炸下温度场的变化特征。以下需对比温压炸药与 LiF 替代铝粉炸药热效应变化规律进行对比分析,为便于描述,将 LiF 替代铝粉炸药简称为 LIF 炸药。

2.1.1 温压炸药热效应变化特征

在长方体密闭空间内爆炸下,温压炸药爆炸后温度场变化规律如图 4 所示。由图 4 可以得出:在 150 g 药量下,爆炸近区 0.8 m 位置高温达到 1 426 ℃,高于 1 000 ℃的持续时间为 45 ms;在 300 g 药量下,爆炸近区 0.8 m、1.0 m 位置均采集到大于 1 000 ℃的高温,温度峰值分别为 1 992 ℃、1 100 ℃,温度高于 1 000 ℃的持续时间分别为 70 ms、4 ms。在 150 g 中 1.0 m 处温度较 0.8 m 处温度出现明显的降低,而在 300 g 药量下 0.8 m 和 1.0 m 温度为同一数量级,根据火球模型^[29]发现火球半径是随着装药质量的增加得到提升,因此高于 1 000 ℃的位置

表明该位置位于爆炸火球内,而火球区外温度则快速下降,能够解释图 4 中 0.8 m 处温度在 150 g 与 300 g 中先后出现不同量级温度的现象。

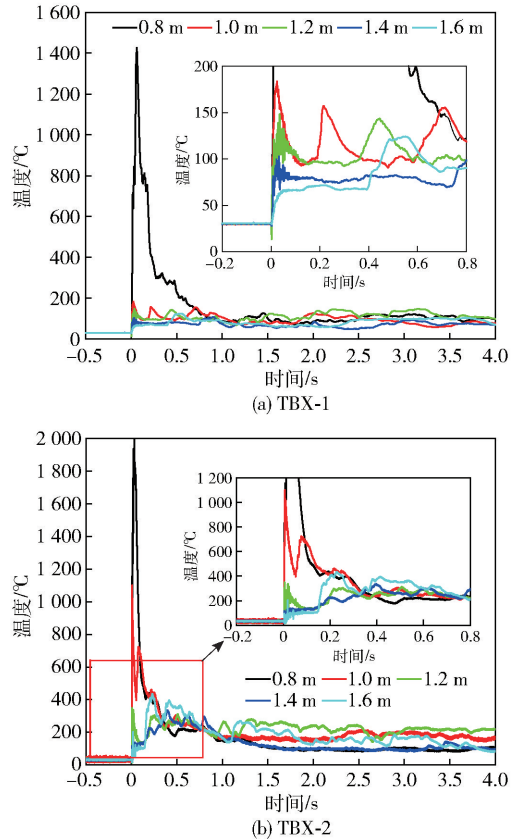


图4 温压炸药测温结果

Fig. 4 Measured results of explosion temperatures of thermobaric explosives

在火球区高温结束之后,温度曲线经过波动后回归到相对稳定的残余温度,150 g 温压炸药残余温度为 100 ℃左右,300 g 温压炸药残余温度为 250 ℃左右。上述温度变化特点展示了温压炸药内爆炸温度场演化过程:爆炸初期,火球覆盖爆炸近区,温度直线上升,爆炸远区仅受到火球热辐射影响,温度提升较少,等到爆轰气体均匀分布后,密闭空间内部温度趋于稳定。

图 4 中爆炸远区温度的二次增幅效果,与空间位置有着密切的联系,角落区温度测温结果如图 4 所示。以 1.6 m 处温度曲线为例,两种工况下 1.6 m 位置处的二次升温次序分别为第 3 位和第 2 位,升温间隔时长分别为 0.39 s、0.14 s,二次升温幅度分别为 56 ℃、325 ℃。随着装药质量的增加,边角位置的升温速率和升温次序均得到大幅度提升,而 1.4 m 处的二次升温次序及升温幅度

都落后于 1.6 m 处。结合图 1 中 1.4 m 和 1.6 m 测点位置发现,1.6 m 位于三面墙壁约束的角落区,1.4 m 位于两面墙壁约束区,在爆轰过程中,铝粉以及爆轰产物被冲击波向四周抛洒,并在角落位置得到汇聚,在靠近角落位置出现二次燃烧现象,使得爆炸后期靠近角落位置处的温度快速上升,延长温度持续时间^[30],温压炸药的二次燃烧在角落处得到增强。

2.1.2 LIF 炸药热效应变化特征

LIF 炸药爆炸后温度场变化规律如图 5 所示,(0.8 m 处接触式热电偶丝在 LIF-2 工况下损坏,未采集到温度数据)。

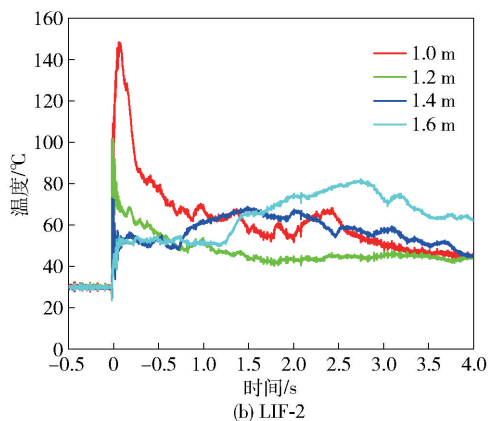
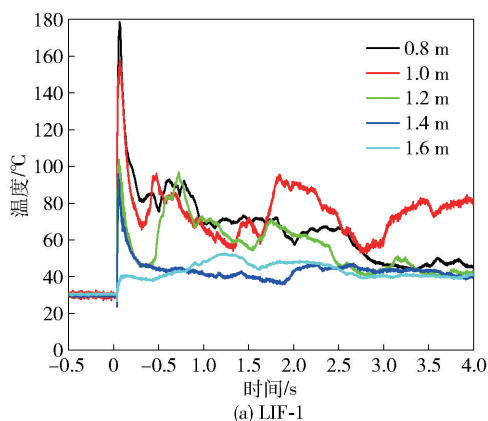


图 5 LIF 炸药测温结果

Fig. 5 Measured results of explosion temperatures of LIF explosives

已知 LiF 材料作为金属铝粉的惰性替代物^[31],不参与整个爆炸过程,LIF 炸药爆炸结束后地面残留一层较厚的黑色粉末,而温压炸药的爆炸残余物较少,金属铝粉在密闭建筑中得到了充分燃烧。因此 LIF 炸药对应的最高温度仅为 178 °C 和 148 °C,温度峰值均远低于 1 000 °C,爆炸火球直径也远小于温压炸药爆炸火球直径,图 5 中 LIF 炸药的二次

升温现象不显著,且二次升温幅度较低,残余温度仅在 50 °C 附近。

2.1.3 后燃效应温度对比

温压炸药与 LIF 炸药温度峰值随爆炸距离的变化关系如图 6 所示。随着装药质量的增加,温压炸药温度场变化显著,而 LIF 炸药温度场无明显变化。这是由于热电偶传感器属于接触式测温传感器,传感器安装位置距爆心有一定距离,不同装药质量下爆轰产物和铝粉的抛洒范围和浓度不同。所以随着装药质量的增大,火球范围、爆轰产物及铝粉抛洒半径及浓度都增大,尤其是内爆炸作用下对爆轰产物和铝粉的汇聚现象,导致温压炸药不同装药质量下温度场温度不同;而对于 LIF 炸药,不同装药质量下的爆炸温度场差异不大,但是相同位置处 LIF 炸药爆炸温度远低于温压炸药爆炸温度。对比温压炸药与 LIF 炸药内爆炸温度场的结果,后燃效应使得温度峰值提升了 6.4 ~ 8.9 倍,铝粉的后燃效应能够显著提高热效应,值得注意的是随着装药质量的增加,温压炸药受结构约束影响更大,越靠近角落区温度提升明显,使得长方体密闭建筑边界位置仍具有较高的热毁伤能力。

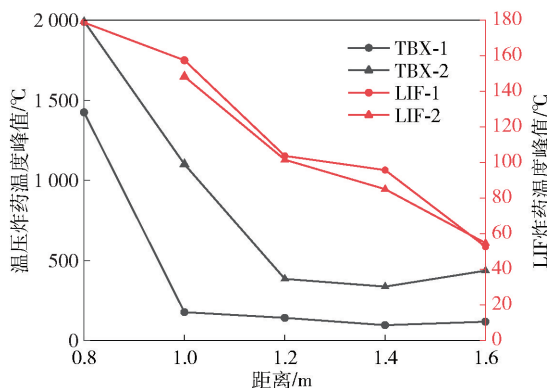


图 6 温压炸药与 LIF 炸药温度峰值对比

Fig. 6 Comparison of peak temperatures of thermobaric explosives and LIF explosives

2.2 冲击波超压变化特征

2.2.1 温压炸药超压波形特征

现有内爆炸研究发现压力效应主要由冲击波效应和准静压效应构成^[6,32],初始冲击波超压瞬间达到峰值,并快速衰减,由于密闭空间的限制导致冲击波出现多次反射、叠加、汇聚现象,之后随着爆炸产物的膨胀,以及后燃效应持续释放能量延缓冲击波衰减,准静态压力逐渐形成并达到峰值。

温压炸药 150 g 工况下自由场冲击波压力时

程曲线如图 7 所示。对温压炸药爆炸冲击波进一步研究可以发现:温压炸药在长方体建筑内爆炸下,冲击波超压峰值随着爆炸距离的增加而依次衰减,冲击波从 0.8 m 处传播到 1.6 m 角落位置大约需要 1.5 ms,爆轰反应持续时间为微秒级,厌氧燃烧为数百微秒级,后燃烧持续时间为毫秒级^[1],在 1.5 ms 内铝粉和爆轰产物的厌氧燃烧结束,此时后燃效应开始,铝粉早期燃烧反应对初始冲击波超压产生了影响^[33],需要对冲击波超压计算公式进一步研究。

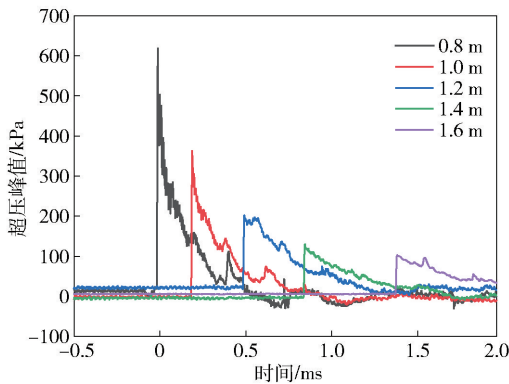


图 7 TBX-1 自由场压力时程曲线

Fig. 7 Free field pressure-time curve of TBX-1

由于冲击波数据较多,选取 0.8 m 处 300 g 装药质量下的温压炸药和 LIF 炸药内爆炸冲击波超压时程曲线进行对比分析,如图 8 所示。由图 8 可以观察到:温压炸药与 LIF 炸药内爆炸首先产生一道初始入射波峰之后,温压炸药紧接着出现了一道明显的二次波峰,二次波峰是铝粉与氧气发生后燃反应释放能量引起的,二次波峰能够提升冲

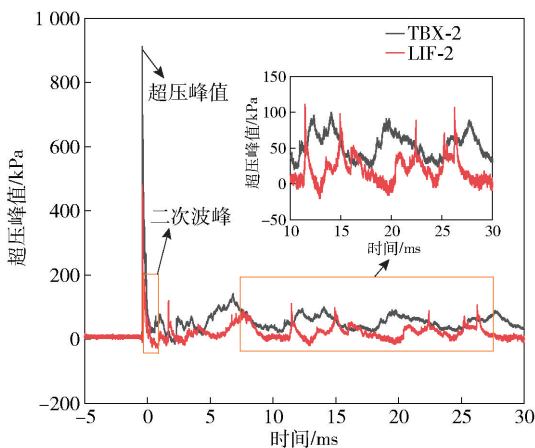


图 8 0.8 m 处 TBX-2 与 LIF-2 压力时程曲线

Fig. 8 Pressure-time curves of TBX-2 and LIF-2 at 0.8 m

击波的正压作用时间和正压比冲量^[34];LiF 作为惰性替代物,对反应物浓度起着稀释作用,不但不参与化学反应还吸收一部分的能量,使得冲击波威力下降,结合整个自由场冲击波时程曲线能够发现,LIF 炸药的波形曲线大部分时间低于温压炸药,波峰始终滞后于温压炸药,由此得出铝粉参与的后燃效应是持续作用于爆炸各个阶段,持续释放的能量增强冲击波。

2.2.2 压力参数特征

炸药在建筑内发生爆炸后,冲击波未触碰壁面前,以球面波的形式向前传播。集中装药爆炸冲击波超压以及正压作用时间的公式^[35]如下:

$$p = A \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r} \right) + B \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r} \right)^2 + C \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r} \right)^3 \quad (1)$$

$$\tau = \sqrt[6]{m\sqrt{r}} \quad (2)$$

式中: p 为超压峰值 (MPa); m 为装药质量 (kg); r 为爆炸距离 (m); τ 为正压作用时间 (ms); A 、 B 、 C 为常数。

对内爆下温压炸药、LIF 炸药的超压峰值和正压时间进行拟合,得到本文试验中两种炸药内爆下的超压峰值和正压作用时间公式为

$$p_{\text{TBX}} = -0.6705R + 2.981R^2 - 1.031R^3 \quad (3)$$

$$p_{\text{LIF}} = 0.5717R - 26.717R^2 + 4.05R^3 \quad (4)$$

$$\tau_{\text{TBX}} = 1.008 \sqrt[6]{m\sqrt{r}} \quad (5)$$

$$\tau_{\text{LIF}} = 0.86 \sqrt[6]{m\sqrt{r}} \quad (6)$$

式中: p_{TBX} 、 p_{LIF} 分别为温压炸药和 LIF 炸药的超压峰值; R 为比例爆距, $R = \sqrt[3]{m/r}$; τ_{TBX} 与 τ_{LIF} 分别为温压炸药与 LIF 炸药的正压作用时间。其中温压炸药超压峰值和正压作用时间的拟合优度分别为 98.2% 和 93.2%, LIF 炸药的拟合优度分别为 98.5% 和 93.4%,公式适用于密闭建筑中心位置竖直装药起爆,适用范围为比例爆距 1 ~ 3 m/kg^{1/3} 之间。

为与配方中的 RDX 炸药威力进行对比,将 LIF 炸药中含有的 RDX 基底视为 RDX 炸药,忽略 LiF 材料,重新计算比例爆距,结合 LIF 炸药采集到的超压峰值,绘制 RDX 炸药超压峰值模型,试验数值与拟合结果如图 9 和图 10 所示。

根据图 9 和图 10,对比温压炸药与 RDX 炸药发现:当比例爆距较小时,温压炸药内爆冲击波超压小于 RDX 炸药内爆冲击波超压;随着比例爆距的增大,温压炸药爆炸冲击波超压逐渐接近 RDX 炸药的爆炸冲击波超压。这是由于金属铝粉在爆轰反应

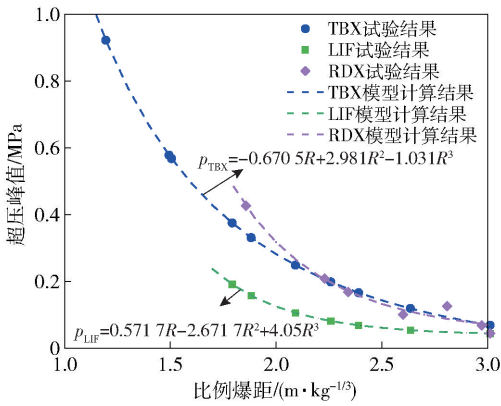


图 9 超压峰值随比例爆距变化

Fig. 9 Over pressure peak vs. proportional burst distance

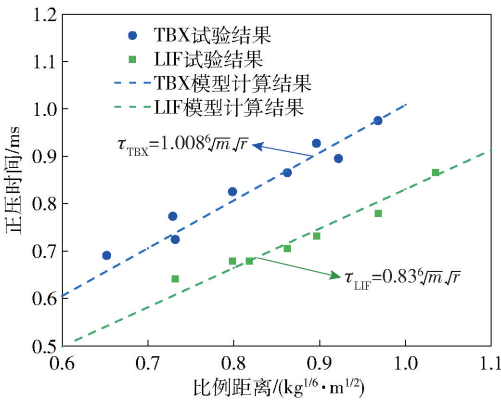


图 10 正压作用时间随比例距离变化

Fig. 10 Positive pressure time vs. proportional distance

中,参与化学反应少,且会吸热和消耗一部分的爆轰能量,从而降低温压炸药的爆炸威力,所以在比例距离较小时,爆炸威力小于传统炸药。对比温压炸药与 LIF 炸药;二者爆炸产生的冲击波超压差距随着爆距的增加逐渐减小,铝粉燃烧对爆炸初始冲击波的贡献随着距离的增加逐渐减少;二者的正压时间均随着比例爆距增大而增加,后燃效应能够有效地延长冲击波正压作用时间。

考虑内爆炸火球温度对冲击波压力的影响,在爆炸初期,冲击波与火球面传播速度相同,火球面与氧气接触反应释放大量能量,通过热辐射的方式加热周围的空气,同时能够通过接触式传导的方式对前沿初始冲击波能量进行补充^[36];在本文试验中,后燃效应对自由场中的超压峰值以及正压时间都有很大程度的提升,对冲击波超压与正压时间的增幅效果主要与药量有关,其中 300 g 药量下温压炸药的超压峰值是 LIF 炸药超压峰值的 2.2 倍,正压作

用时间是 LIF 炸药的 1.2 倍,量化了后燃效应对冲击波超压和正压时间的增幅效果。

2.2.3 后燃效应对冲击波影响

结合图 8 冲击波压力时程可以看出,后燃效应是作用于整个爆炸过程的,铝粉的早期反应虽然对初始冲击波具有增强效果,但仅用初始冲击波超压和正压作用时间不能完全描述后燃效应的持续增强效果,需要对后燃效应作用的整个爆炸过程进行描述。将后燃效应作用的整个冲击波压力段进行积分得到全过程比冲量,结果如表 2 所示。

表 2 300 g 药量下全过程比冲量

Table 2 Whole process specific impulse at 300 g dosage

爆炸距离/m	全过程比冲量		增大倍数
	TBX-2	LIF-2	
0.8	2 575.50	1 140.79	1.26
1.0	4 432.71	1 561.79	1.84
1.2	4 980.22	1 403.03	2.55
1.4	5 163.14	1 989.66	1.59
1.6	5 932.21	1 836.16	2.23

关于冲击波比冲量的研究中,Jiang 等^[37]进行了 LiF 惰性材料替代铝粉炸药的对比试验,发现铝粉燃烧释放的能量能够加强初始冲击波的正压比冲量的威力;严家佳等^[22]进行了后燃效应的比冲量研究,发现后燃过程中的二次能量释放可以明显增加爆炸罐内壁所受到的比冲量。后燃效应能够增加初始冲击波正压比冲量,从表 2 的数据可以发现,内爆炸下的全过程比冲量是与距离的增加呈正相关,并且温压炸药全过程比冲量的增大倍数呈现上升趋势,是 LIF 炸药的数倍,后燃效应能够显著提高传统炸药的做功能力,增大倍数的上升趋势认为是后燃反应的剧烈程度受到了空间位置的影响。

通过全过程比冲量的变化趋势可以观察到,靠近壁面的程度越大后燃烧效应表现得越明显。温压炸药全过程比冲量的增大倍数呈现上升趋势,但在 1.4 m 处有所回落,紧接着在 1.6 m 增大倍数回升,其中 1.4 m 在两面角落区,1.6 m 在三面角落区,结合室内爆炸载荷简化模型^[38-39]可以发现,在距离两面角落区以及三面角落区较近时,冲击波受壁面反射,越靠近角落位置冲击波反射叠加效果越明显,能够有效提升全过程比冲量数值;同时结合温压炸药二次升温次序,约束程度的增强能够促进后燃反应,进一步增强靠近墙壁位置处的热效应毁伤能力,同

时补充冲击波能量,使得靠近壁面位置存在多种毁伤元聚集,由此可见在温压炸药长方体建筑内爆下边界位置具有较强的毁伤能力,尤其是角落位置^[40]。

2.3 准静态压力变化特征

温压炸药在密闭空间内爆炸后,爆轰产物膨胀扩散和后燃反应持续放热,导致密闭空间压力升高,形成高温高压的环境压力即准静态压力。高温高压的爆轰气体是生成准静态压力的关键因素^[41],结合温度场分布规律能够发现,在二次燃烧之后空间内部保持着较高的残余温度,这些残余温度对爆炸波不具有贡献,但是在长方体密闭建筑中,残余温度可以维持爆轰气体温度来提升准静态压力^[26];结合全过程比冲量结果可以看出,后燃效应主要作用于爆炸过程中初始冲击波之后阶段^[22],导致后燃效应对准静压的贡献比重更大,因此准静态压力能够较好的评估后燃效应的增幅效果。温压炸药与 LIF 炸药准静态压力如图 11 所示。

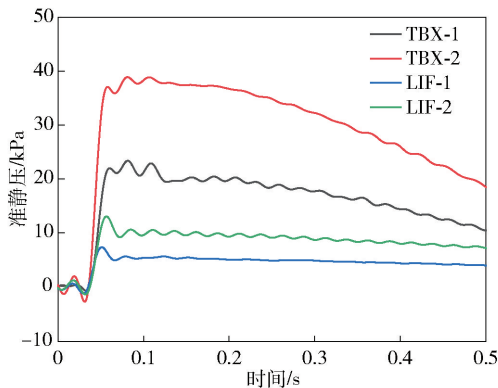


图 11 温压炸药与 LIF 炸药准静压对比

Fig. 11 Comparison of quasi-static pressures of thermobaric explosive and LIF explosive

由图 11 可知:温压炸药准静态压力升压时间分别为 24.7 ms、26.1 ms, LIF 炸药准静态压力升压时间分别为 21.2 ms、24.2 ms,结合冲击波时程曲线,25 ms 时刻位于冲击波压力振荡回升段^[22]附近,此时爆轰产物在内部空间中均匀分布,准静态压力的升压速度弱于冲击波超压升压速度,但是准静态压力的作用时间比冲击波作用时间更长;对于准静态压力峰值,温压炸药的准静态压力峰值分别为 23.4 kPa、38.9 kPa, LIF 炸药的准静态压力峰值分别为 7.3 kPa、13.1 kPa,后燃效应对准静态压力的提升分别是 LIF 炸药的 3.2 倍、2.9 倍,且由于密闭空间限制了爆轰产物的扩散,准静态压力

在达到峰值后的一段时间仍能够维持较高的压力,峰值虽远小于冲击波超压峰值,但能够产生持续性的破坏效果。

2.4 氧浓度变化特征

温压炸药爆炸会产生大量的火焰和烟雾,爆轰产物和金属铝粉燃烧消耗大量的氧气,生成大量的 CO、NO 等有毒气体,导致封闭空间内的氧气浓度下降。氧浓度变化曲线如图 12 所示。氧浓度的测量原理是:氧化锆探头在 700 多摄氏度的温度下接触气体,气体是通过导引管进入的氧化锆检测室,因此氧浓度测试的响应时间取决于气体流量^[42],而在内爆炸下爆轰气体在建筑内来回振荡,氧探头接触到的气体流量不均匀,因此在曲线上表现出层层衰减的波动现象;并且在氧气测量的过程中,传感器是位于墙壁位置,爆炸发生后,火球区内爆生产物和铝粉快速燃烧,导致火球区内氧气的快速消耗,而其他区域氧浓度变化较小,随着爆炸火球的逐渐消散,该区域外的氧浓度明显高于原来的火球区,形成了氧浓度梯度,氧气按照分子运动会从四周较高氧浓度的区域扩散到爆炸火球区的低氧区域,而气体分子运动扩散速度相较于冲击波的传播更加地缓慢,因此氧浓度分析的时间尺度与后燃烧时间尺度有所不同。

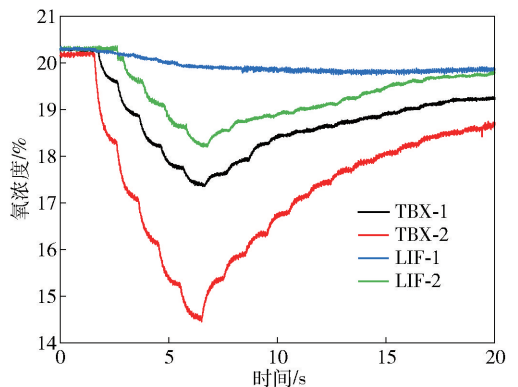


图 12 温压炸药与 LIF 炸药氧浓度变化

Fig. 12 Variation curves of oxygen concentrations of thermobaric explosive and LIF explosive

由图 12 可以得到:温压炸药内爆下氧气浓度最低达到 17.32% 和 14.45%,达到最低氧浓度的时间分别为 4.81 s 和 5.14 s,当氧气浓度低于 18% 时人体处于缺氧状态^[43],温压炸药氧浓度低于 18% 的持续时间分别为 4.13 s 和 12.45 s; LIF 炸药中含有的 RDX 是一种负氧炸药,能够消耗一定的氧气,因此 LIF 炸药最低氧浓度分别为 19.73% 和

18.21%,后燃效应对氧气消耗分别增加了2.41%和3.76%,是LiF炸药氧气消耗的2.3~2.8倍,消耗空气中的氧气是后燃效应的显著现象。且由于本次试验过程中长方体建筑无法做到完全密封,对于地下防护工程而言,在受到武器打击发生坍塌后氧气将得不到及时的补充,最低氧浓度进一步降低,缺氧持续时间会更长。

3 结论

本文基于搭建的大尺寸长方体密闭空间试验装置,测量获得了温压炸药内爆毁伤元(热效应、冲击波超压、准静态压力、氧浓度)的时空变化,建立了毁伤元特征变化规律,量化了后燃效应对毁伤元的增强效果。得到以下主要结论:

1)长方体密闭建筑内爆炸时,随着爆炸距离的增加,铝粉对初始冲击波的增强效果减弱,靠近壁面位置,随着约束强度的增加,冲击波反射将铝粉与空气均匀混合后在边界处汇集,后燃烧反应得到增强,从而增强冲击波威力,使得全过程比冲量提升2.2~2.5倍,体现出结构边界对毁伤威力的增强。

2)采用LiF材料替代铝粉炸药,揭示了温压炸药内爆炸过程中多毁伤元的传播规律:爆炸冲击波在建筑墙壁发生反射、叠加,铝粉在角落位置处汇聚并发生二次燃烧,热量的持续释放生成准静态压力,铝粉的后燃效应又导致氧气含量的快速下降,最终形成多毁伤元的相互耦合增强效应,多种毁伤元的存在提升了温压炸药内爆炸毁伤作用时间。

3)温压炸药的后燃效应在密闭空间中具有显著的多毁伤元增强效果,通过对比LiF替代铝粉炸药的研究,发现铝粉的后燃效应能够增强冲击波超压峰值0.3~1.2倍,准静态压力增强1.9~2.2倍,最高温度提升6.4~8.6倍,耗氧量增加了2.3~2.8倍,在温压炸药内爆炸威力评估中需要考虑后燃效应对爆炸毁伤元增强的影响。

参考文献 (References)

- [1] 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 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. (in Chinese)
- [2] 胡宏伟,宋浦,赵省向,等.有限空间内部爆炸研究进展[J].含能材料,2013,21(4):539-546.
HU H W, SONG P, ZHAO S X, et al. Progress in explosion in confined space[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(4): 539-546. (in Chinese)
- [3] TRZCIŃSKI W A, MAIZ L. Thermobaric and enhanced blast explosives-properties and testing methods [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2015, 40(5): 632-644.
- [4] KUHLE A L, REICHENBACH H. Combustion effects in confined explosions[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2): 2291-2298.
- [5] 赵士达.爆炸容器[J].爆炸与冲击,1989,9(1):85-96.
ZHAO S D. Explosive containers[J]. Explosion and shock waves, 1989, 9(1): 85-96. (in Chinese)
- [6] 金朋刚,郭炜,王建灵,等.密闭条件下TNT的爆炸压力特性[J].火炸药学报,2013,36(3):39-41.
JIN P G, GUO W, WANG J L, et al. Explosion pressure characteristics of TNT under closed condition[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2013, 36(3): 39-41. (in Chinese)
- [7] 王鑫,张连生,张明明,等.密闭空间TNT内爆炸准静态压力研究[J].兵器装备工程学报,2020,41(5):188-192.
WANG X, ZHANG L S, ZHANG M M, et al. Study on quasi-static pressure of TNT internal explosion in confined spaces[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(5): 188-192. (in Chinese)
- [8] 李鸿宾,金朋刚,郭炜,等.炸药在密闭空间中爆炸超压测试与分析[J].科学技术与工程,2013,13(28):8448-8451.
LI H B, JIN P G, GUO W, et al. Overpressure test and analysis of TNT blast in confined chamber[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(28): 8448-8451. (in Chinese)
- [9] 徐维铮,吴卫国.考虑后燃烧效应密闭空间内爆炸场数值计算研究[J].含能材料,2019,27(8):661-670.
XU W Z, WU W G. Study on numerical calculation of explosion field in closed space considering after-burning effects[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2019, 27(8): 661-670. (in Chinese)
- [10] 徐维铮,吴卫国.后燃烧效应对约束空间内爆炸载荷的影响规律[J].中国舰船研究,2019,14(1):52-58.
XU W Z, WU W G. Afterburning effect on blast load in confined space[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(1): 52-58. (in Chinese)
- [11] 岳学森,周沪,孔祥韶,等.舱室内爆炸荷载燃烧增强效应实验及仿真研究[J].中国舰船研究,2023,18(4):223-232.
YUE X S, ZHOU H, KONG X S, et al. Experimental and simulation study of afterburning effect for blast load in confined cabin[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(4): 223-232. (in Chinese)
- [12] 孔祥韶,况正,郑成,等.舱室密闭空间中爆炸荷载燃烧增强效应试验研究[J].兵工学报,2020,41(1):75-85.
KONG X S, KUANG Z, ZHENG C, et al. Experimental study of afterburning enhancement effect for blast load in confined compartment space [J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(1): 75-85. (in Chinese)

- [13] 张玉磊, 李芝绒, 蒋海燕, 等. 温压炸药内爆炸压力特性及威力试验研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(7): 1333-1338.
ZHANG Y L, LI Z R, JIANG H Y, et al. Experimental study of the characteristics of internal explosion pressure and power of thermobaric explosive[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(7): 1333-1338. (in Chinese)
- [14] CARNEY J R, LIGHTSTONE J M, MCGRATH II T P, et al. Fuel-rich explosive energy release: oxidizer concentration dependence[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2009, 34(4): 331-339.
- [15] MANNER V W, PEMBERTON S J, GUNDERSON J A, et al. The role of aluminum in the detonation and post-detonation expansion of selected cast HMX-based explosives [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2012, 37(2): 198-206.
- [16] 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.
- [17] MAIZ L, TRZCIŃSKI W A, PASZULA J. Investigation of fireball temperatures in confined thermobaric explosions [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2017, 42(2): 142-148.
- [18] 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.
- [19] FEDINA E, FUREBY C. Analysis of heat-release during TNT/aluminum afterburning by means of numerical simulations[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(2): 2841-2848.
- [20] 郑朝民, 严蕊, 刘志伟, 等. 温压炸药耗氧效应的实验研究[J]. 火炸药学报, 2014, 37(5): 33-36.
ZHENG CM, YAN R, LIU ZW, et al. Experimental study on oxygen consumption effect of thermo-baric explosives[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2014, 37(5): 33-36. (in Chinese)
- [21] 胡岚, 严蕊, 熊贤锋, 等. 耗氧效应对温压战斗部及装药的毁伤评估[J]. 含能材料, 2015, 23(2): 163-167.
HU L, YAN R, XIONG X F, et al. Damage assessment of thermo-baric warhead and charge with oxygen consumption effect [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(2): 163-167. (in Chinese)
- [22] 严家佳, 金朋刚, 李鸿宾, 等. 有限空间中温压炸药后燃烧效应的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(17): 154-157, 163.
YAN J J, JIN P G, LI H B, et al. Experiment investigation of thermobaric explosive afterburn effect in finite space[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(17): 154-157, 163. (in Chinese)
- [23] FAN X, ZHANG L S, WANG X. Study on theoretical calculation of quasi-static pressure for aluminized explosive in confined space [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1721: 012023.
- [24] 李芝绒, 王胜强, 蒋海燕, 等. 圆筒装置内爆炸压力载荷特性实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(10): 102202.
LI Z R, WANG S Q, JIANG H Y, et al. Experimental studies on characteristics of explosion pressure loading cylinder apparatus. [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(10): 102202. (in Chinese)
- [25] 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 X M, SU J J, LI Z R, et al. Experimental study on explosive thermal effect of thermal-baric explosives in tunnel[J]. Initiators and Pyrotechnics, 2015(1): 22-25. (in Chinese)
- [26] 李凌峰, 韩秀凤, 沈飞, 等. 典型约束环境下 HMX 基温压炸药内爆释能特性[J]. 火工品, 2022(2): 48-53.
LI L F, HAN X F, SHEN F, et al. Internal explosion energy release characteristics of HMX-based thermobaric explosive in typical confined environment [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2022(2): 48-53. (in Chinese)
- [27] 王代华, 宋林丽, 张志杰. 基于钨铼热电偶的接触式爆炸温度测试方法[J]. 探测与控制学报, 2012, 34(3): 23-28.
WANG D H, SONG L L, ZHANG Z J. Contact measuring method of explosion temperature based on tungsten-rhenium thermocouple[J]. Journal of Detection & Control, 2012, 34(3): 23-28. (in Chinese)
- [28] 徐雯, 修吉平, 肖建中. 氧化锆氧传感器浓差电势的测试研究[J]. 仪表技术与传感器, 2013(8): 1-4, 7.
XU W, XIU J P, XIAO J Z. Experimental study on concentration potential of zirconia oxygen sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2013(08): 1-4, 7. (in Chinese)
- [29] BAKER W E, COX P A, WESTINE P S, et al. Explosion hazards and evaluation [M]. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1983.
- [30] 郑勇杰, 苏健军, 姬建荣, 等. TNT 爆炸温度场热作用规律实验研究[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(6): 103-107, 147.
ZHEN Y J, SU J J, JI J R, et al. Experimental study on the thermal action law of TNT explosion temperature field [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(6): 103-107, 147. (in Chinese)
- [31] GOGULYA M F, MAKHOV M N, DOLGOBORODOV A Y, et al. Mechanical sensitivity and detonation parameters of aluminized explosives [J]. Combustion Explosion and Shock Waves, 2004, 40(4): 445-457.
- [32] ZHANG F, GERRARD K, RIPLEY R C. Reaction mechanism of aluminum particle air detonation[J]. Journal of Propulsion and Power, 2009, 25(4): 845-858.
- [33] 陈昊, 陶钢. 温压弹在有限空间内爆炸的超压测试和分析[J]. 爆破器材, 2009, 38(5): 4-7.
CHEN H, TAO G. The test and analysis on overpressure

- generated by thermo-baric grenade explosion in limited space [J]. *Explosive Materials*, 2009, 38(5):4-7. (in Chinese)
- [34] 李根. 温压炸药后燃反应实验和数值模拟研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.
- LI G. Experimental and numerical researches on the afterburning of thermobaric explosives[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021. (in Chinese)
- [35] 奥尔连科 И П. 爆炸物理学[M]. 孙承纬, 译. 北京: 科学出版社, 2011.
- ОПЛЕХКО И П. Explosionphysics[M]. SUN C W, translated. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [36] 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 M J, HU H Q, ZHANG J S, et al. Study on efficiency of aluminized thermobaric explosive [J]. *Strategic Study of CAE*, 2009, 11(4): 67-75. (in Chinese)
- [37] JIANG C, LU G, MAO L, et al. Effects of aluminum content on the energy output characteristics of CL-20-based aluminized explosives in a closed vessel[J]. *Shock Waves*, 2021, 31(2): 141-151.
- [38] 丁阳, 陈晔, 师燕超. 室内爆炸超压荷载简化模型[J]. *工程力学*, 2015, 32(3): 119-125, 133.
- DING Y, CHEN Y, SHI Y C. Simplified model of overpressure loading caused by internal blast [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(3): 119-125, 133. (in Chinese)
- [39] QIN Y Z, WANG Y, WANG Z, et al. Investigation on similarity laws of cabin structure under internal blast loading [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 260: 111998.
- [40] 刘博文, 龙仁荣, 张庆明, 等. 舱内爆炸角隅汇聚反射冲击波超压特性研究[J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(1): 35-51.
- LIU B W, LONG R R, ZHANG Q M, et al. Study on the corner overpressure characteristics of concentrated reflected shock wave due to internal blast in cabin [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(1): 35-51. (in Chinese)
- [41] 张玉磊, 苏健军, 李芝绒, 等. TNT 内爆炸准静态压力特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(6): 1429-1434.
- ZHANG Y L, SU J J, LI Z R, et al. Quasi-static pressure characteristic of TNT's internal explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(6): 1429-1434. (in Chinese)
- [42] 高志强, 肖立, 高新华, 等. 氧化锆测氧原理及维护使用 [J]. *传感器世界*, 2006(3): 21-24.
- GAO Z Q, XIAO L, GAO X H, et al. The oxygen-measured principle, maintenance and application of zirconia Sensor [J]. *Sensors World*, 2006(3): 21-24. (in Chinese)
- [43] 王启文. 缺氧危险作业安全措施 [J]. *现代职业安全*, 2008(1): 97-99.
- WANG Q W. Safety measures for hazardous work in hypoxia [J]. *Modern occupational safety*, 2008(1): 97-99. (in Chinese)