

DOI: 10.11883/bzycj-2025-0270

温压炸药密闭空间内爆炸冲击波与 温度场耦合试验研究*

蒋欣利¹, 张国凯¹, 何勇², 吴玉欣¹, 刘举¹, 王振²

(1. 南京理工大学安全科学与工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为研究温压炸药在密闭空间内爆炸时冲击波与温度的耦合增强效应, 以 100~400 g 温压炸药为研究对象, 在密闭建筑空间内开展爆炸试验研究, 利用压力传感器和热电偶获得了密闭空间内不同位置处的爆炸压力和温度数据, 揭示了温压炸药爆炸产生的冲击波与温度场演变特征及传播规律。结果表明: 温压炸药内爆炸产生的温度场具有显著的二次升温和长历时特征; 建立了基于比例爆距的初始温度峰值衰减模型。温压炸药内爆炸冲击波超压峰值的 TNT 等效当量系数随比例爆距的增大呈下凹双曲线变化趋势, 在比例爆距为 $1.7 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 冲击波超压的 TNT 等效当量系数达到最小值 1.43, 该位置是有氧后燃反应能量对冲击波超压峰值产生显著作用的转折点。建立了冲击波超压峰值的两阶段预测模型, 分别描述了非理想爆轰与铝粉有氧后燃效应在不同区域对冲击波超压的贡献。基于爆炸产物膨胀和后燃升温引起的压力上升, 建立了温压炸药内爆炸准静态压力预测模型, 以 100 g 装药的准静态压力为基准, 200、300、400 g 装药质量下的准静态压力分别增至基准值的 2.27、3.21、4.18 倍, 准静态压力在爆轰产物和后燃升温的耦合作用下呈非线性增长。

关键词: 温压炸药; 密闭空间; 冲击波; 温度; 准静态压力; 当量效应

中图分类号: O383.1; TJ55 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Experimental study on the coupling of shock wave and temperature field from a thermobaric explosive in a confined space

JIANG Xinli¹, ZHANG Guokai¹, HE Yong², WU Yuxin¹, LIU Ju¹, WANG Zhen²

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

2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: In order to investigate the coupled enhancement effects of shock wave and temperature generated by thermobaric explosives in confined spaces, internal explosion experiments were conducted with 100~400 g charges in a confined building space. Pressure sensors and thermocouples were employed to obtain the explosion pressure and temperature data at different locations within the confined space. The experiments revealed the evolution characteristics and propagation patterns of the shock wave and temperature field produced by the thermobaric explosive. The results show that the temperature generated by the internal explosion of the thermobaric explosive exhibits significant secondary heating and prolonged duration characteristics. A decay model for the initial peak temperature based on the scaled distance was established. The TNT equivalence coefficient of the shock wave from the internal explosion of the thermobaric explosive exhibits a concave hyperbolic trend with increasing scaled distance. At a scaled distance of $1.7 \text{ m/kg}^{1/3}$, the TNT equivalence coefficient of the

* 收稿日期: 2025-08-18; 修回日期: 2025-11-03

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(No.309231B8805);

第一作者: 蒋欣利(1999—), 男, 博士研究生, jiangxinli@njust.edu.cn

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

shock wave overpressure reaches a minimum value of 1.43, indicating that this position is the turning point where the energy from aerobic afterburn combustion exerts a significant effect on the peak overpressure. A two-stage prediction model for the peak overpressure was established, describing the contributions of non-ideal detonation and the aerobic afterburn effect of aluminum powder to the shock wave in different regions. Based on the pressure rise caused by the expansion of detonation products and the temperature rise due to afterburn combustion, a quasi-static pressure prediction model for the internal explosion of thermobaric explosives was established. Taking the quasi-static pressure of the 100 g charge as the reference, the quasi-static pressures for the 200, 300, and 400 g charges increased to 2.27, 3.21, and 4.18 times the reference value, respectively, showing a nonlinear growth under the coupled effect of detonation product expansion and afterburn temperature rise.

Keywords: thermobaric explosive; confined space; shock wave; temperature field; quasi-static pressure; equivalent effect

铝粉因其高热值与易获取性,常作为温压炸药(thermobaric explosive,简称TBX)的主要成分。铝粉在爆炸过程中释放的大量热量,使温压炸药具有良好的热效应。当温压炸药在密闭空间中爆炸时,爆炸产物的反射与汇聚会进一步增强其毁伤效应^[1]。因此,开展典型温压炸药在密闭空间中的爆炸毁伤元特性研究,对评估其内爆炸威力及指导工程防护设计具有重要意义。

近年来,众多学者围绕密闭空间内温压炸药的爆炸特性开展了大量研究。在铝粉后燃对冲击波的影响方面,Hahma等^[2]和Mohamed等^[3]发现,与传统高爆炸药相比,铝粉后燃能够延长爆炸冲击波的正压持续时间,使温压炸药的爆炸冲击波衰减更慢。Peuker等^[4]在不同氧含量气氛的密闭环境中开展了纯RDX和RDX基温压炸药的爆炸试验,发现铝粉早期释放的能量可以增强爆炸冲击波强度。Kim等^[5]建立了基于CE/SE方法的数值模型,并结合封闭爆炸试验进行验证,发现铝粒子的平均粒径及其分布是影响温压炸药后燃性能和爆炸威力的关键因素。Türker^[6]通过文献综述与试验数据整合分析,系统梳理了温压炸药的组成、爆炸三阶段物理现象及各类测试手段,发现温压炸药爆炸威力和热效应主要取决于金属燃料在无氧与有氧阶段的燃烧效率,通过优化燃料粒径、氧化剂配比及装药结构,可显著提升其性能。王梓昂等^[7]、李芝绒等^[8]对圆筒装置中温压炸药爆炸波形进行了研究,发现密闭空间中的爆炸冲击波波形具有多波叠加特征,且叠加程度与爆心距有关。陈昊等^[9]发现密闭空间中爆炸冲击波波形具有双峰结构,角隅处则呈现明显的多峰特征;同时指出,受限空间内的冲击波负压远大于开阔空间。Li等^[10]进一步揭示了炸药内爆炸在密闭空间内引发拐角处冲击波叠加的现象,该处高压由两侧壁面马赫波叠加所致。

除冲击波效应外,温压炸药的后燃机制同样受密闭空间的影响^[11]。Gogulya等^[12]发现金属铝粉在内爆炸过程中被冲击波抛洒至壁面,形成新的燃烧区域。Maiz等^[13,14]应用光谱方法研究了温压炸药在密闭和半密闭环境中火球的热效应,发现铝粉粒径影响其在受限空间中的后燃反应程度。裴明敬等^[15]的研究结果表明,铝粉在爆炸过程中的燃烧有助于提高冲击波强度及火球温度,同时冲击波作用可进一步扩大金属铝粉的燃烧区域。姬建荣等^[16]对温压炸药的后燃性能进行了深入研究,发现当铝粉含量达到20%时,温压炸药在密闭空间中极易发生后燃反应,铝颗粒在壁面处出现明显的二次点火现象,火球持续时间约200 ms。卢勇等^[17]在密闭空间内开展不同配方温压炸药的爆炸试验,通过比较能量输出差异,发现当铝粉含量约为30%、氧化剂为高氯酸钾时,温压炸药的爆炸威力最佳。严家佳等^[18]对温压炸药内爆炸后燃效应进行了研究,指出后燃效应不仅能够增强爆炸冲击波的冲量,还能显著提高爆轰产物的温度。

此外,温压炸药在密闭空间中爆炸还伴随着准静态压力效应^[19]和窒息效应^[20]。张学瑞等^[21]在研究温压炸药内爆炸能量释放特性时发现,当装药质量达到一定程度时,提高点火能量或反应物浓度对准静态压力的提升效果有限。郑朝民等^[22]发现当温压炸药弥散浓度为0.84 g/L时,爆炸耗氧量最大,且远高于传统单质炸药;单位质量炸药的耗氧量较PBX提升55%,能量释放率提升13%。

然而,受限于小尺寸试验装置,现有研究多聚焦于壁面反射超压和火球表面温度,难以获取爆炸近场毁伤元的完整时空分布特征。更重要的是,针对温压炸药的非理想爆轰和铝粉后燃释能特性,现有相

似律理论尚未能较好地描述铝粉能量对爆炸冲击波的增强效应。为此, 本文以大型密闭建筑为平台, 通过 100~400 g 装药试验, 采用冲击波压力传感器、热电偶等瞬态毁伤监测设备, 对不同空间位置处的毁伤元进行实时监测与数据采集。通过详细的数据分析, 揭示了温压炸药内爆炸过程中不同空间位置毁伤元的时空变化规律, 并在此基础上构建了温压炸药内爆炸毁伤元分布的数学模型, 揭示了温压炸药内爆炸近场与远场毁伤元的耦合规律并建立了分段预测模型, 为威力评估提供新的依据。

1 密闭空间内爆炸试验

1.1 试验设置

为模拟真实的内爆炸场景, 搭建了一座内部空间尺寸为长 3.4 m、宽 2.4 m、高 2.2 m 的大型混凝土密闭建筑。试验装置由冲击波压力测试系统、温度测试系统及准静态压力测试系统组成, 密闭空间内爆炸试验布设如图 1 所示。现场试验布置及传感器实物如图 2 和图 3 所示。

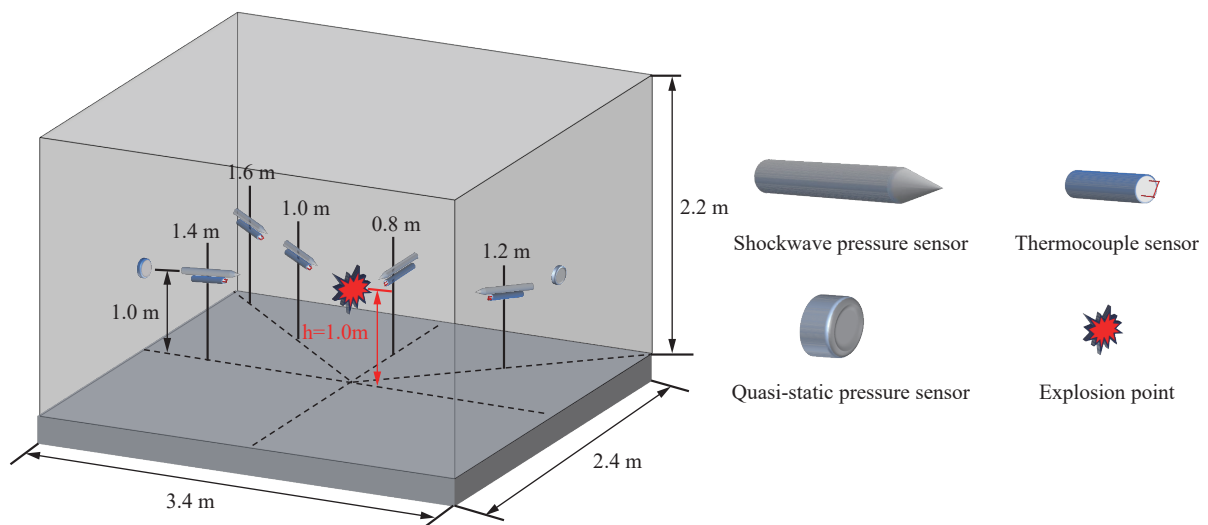


图 1 密闭空间内爆炸试验布设示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the explosion test setup in confined space



图 2 内爆炸试验现场布置图

Fig. 2 Layout of the internal explosion test setup

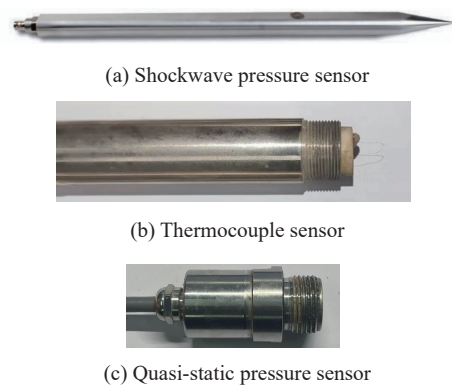


图 3 内爆炸试验所用传感器实物

Fig. 3 Sensors used in internal explosion test

冲击波测试系统由传感器、同轴电缆和数据采集仪组成。冲击波压力传感器采用 PCB 137B 系列笔形自由场空气传感器, 测试时安装于立式传感器支架, 用于测量自由场空气超压。传感器响应频率高于 100 kHz, 量程为 0.34~3.4 MPa。数据采集使用 Elsys 公司 TranAX3 型数据采集仪, 采样频率设为

1 MHz。在距地面 1.0 m 高度的水平面上, 设置距爆心直线距离分别为 0.8、1.0、1.2、1.4、1.6 m 的 5 个压力测点, 传感器敏感端均指向爆炸中心。为避免剧烈温度变化对传感器的影响^[23], 在传感器敏感面涂抹薄层硅脂。

温度测试采用自制的 S 型钨铼丝热电偶, 偶丝直径为 0.04 mm, 型号为 W-Re3/25, 瞬时测量温度最高可达 2800 °C, 响应时间为 1 ms。数据采集系统以 50 kHz 采样频率采集温度数据。温度传感器安装于压力传感器正下方, 每次试验开始前使用气瓶清理热电偶丝表面积灰, 以保障温度测量精度。

准静态压力测试采用 CYG1508F 压阻式压力传感器, 响应频率为 100 kHz, 量程为 0~10 MPa。传感器安装于隔振基座上, 以减小建筑结构振动对数据采集的干扰; 数据采集使用东华测试 DH5960 型动态信号测试仪, 采样频率设为 500 kHz。

1.2 试验工况

试验采用含铝温压炸药, 由 52% 黑索金、35% 铝粉以及黏结剂和氧化剂组成。共设置 4 种不同装药质量, 分别为 100、200、300、400 g。试验过程中爆心位置保持不变, 药柱悬吊于密闭空间水平中心处, 距地面 1.0 m。采用 8 号电雷管配合 8701 传爆药柱起爆。需要指出的是, 由于爆炸过程中的不确定性, 冲击波压力和温度可能对传感器造成影响, 因此每组试验均保持相同的试验条件, 每种试验工况各重复 2 次, 文中数据为 2 次重复试验的平均值。

1.3 内爆炸特性

温压炸药内爆炸的毁伤元主要包括冲击波超压、爆炸温度场和密闭空间准静态压力, 各毁伤元之间相互耦合。通过试验获得了不同爆心距下的冲击波、温度及准静态压力时程曲线。以 100、400 g 温压炸药为例, 内爆炸冲击波超压、温度和准静态压力的时程曲线如图 4~6 所示。

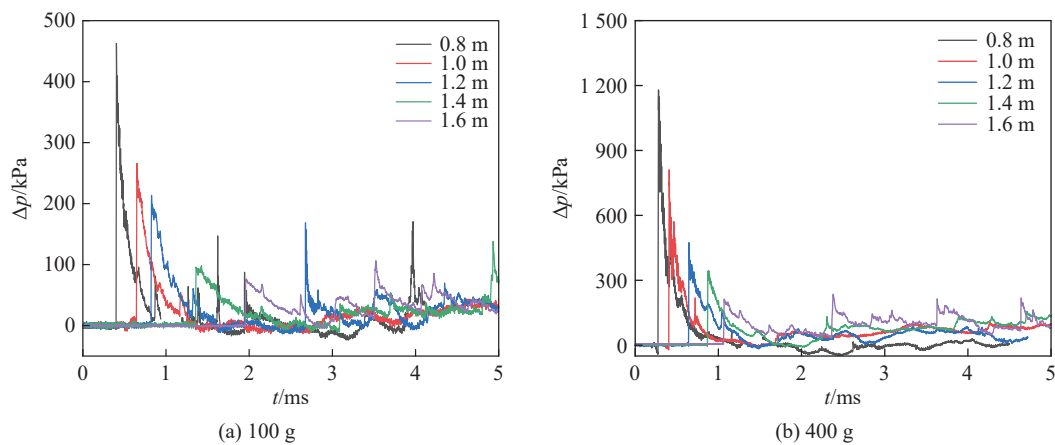


图 4 不同装药质量温压炸药内爆炸下各测点冲击波时程曲线

Fig. 4 Shock wave time history curves at various distances for thermobaric explosives with different charge masses

图 4 为 100、400 g 温压炸药内爆炸的冲击波时程曲线。各测点的爆炸冲击波超压迅速上升至超压峰值 Δp_m , 随后急剧衰减至大气压以下, 进入负压作用段; 前 2 ms 内, 冲击波超压波形与敞开空间爆炸相似^[24], 均呈单峰形态; 2 ms 后, 冲击波时程曲线呈现多峰叠加特征。这是由于壁面存在, 导致初始冲击波反射形成多道反射冲击波, 其在密闭空间内汇聚叠加, 从而形成 2 ms 后的多峰波形。

图 5 为 100、400 g 温压炸药内爆炸不同位置的温度时程曲线。爆炸初期各测点温度在 50 ms 内迅速上升, 达到初始温度峰值 T_m , 其上升时间大于冲击波超压上升时间, 这是由于火焰传播速度远低于冲击波压力传播速度。各测点初始温度峰值随爆心距增大而衰减, 100 g 装药下, 在 0.8、1.0、1.2、1.4、1.6 m 测点的初始温度峰值分别为 384、184、104、100、88 °C, 其变化规律与冲击波超压变化规律相似。此外, 密闭空间的封闭性使得爆炸后的残余高温可维持较长时间。例如在 1.0 m 处, 5 s 内温度高于 100 °C 的

时间长达 3.71 s。这种持续高温不仅延长了热毁伤作用时间,还通过对内部气体的持续加热,进一步延长了准静态压力的维持时间。

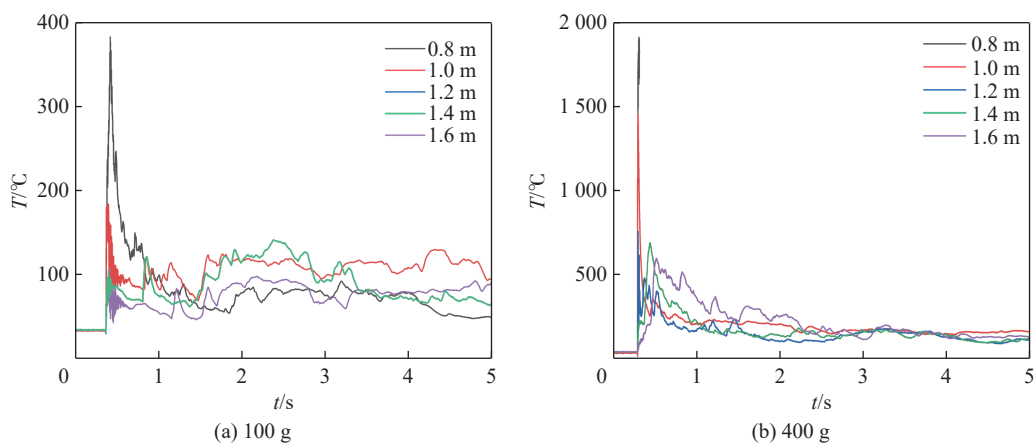


图 5 不同装药质量温压炸药内爆炸下各测点温度时程曲线

Fig. 5 Temperature time history curves at various distances for thermobaric explosives with different charge masses

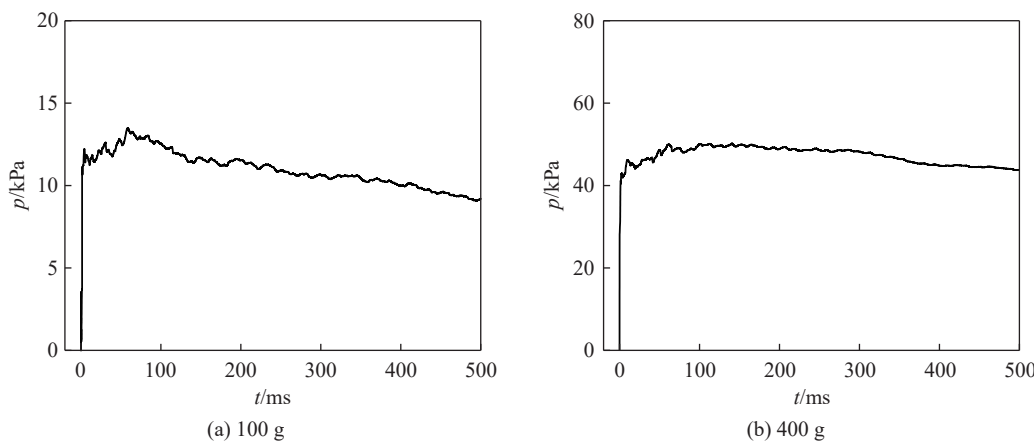


图 6 不同装药质量温压炸药内爆炸下准静态压力时程曲线

Fig. 6 Quasi-static pressure time history curves of thermobaric explosives with different charge masses

准静态压力是密闭空间内紧随初始冲击波之后出现的后续压力波动^[25],其值受炸药种类、药量、空间结构及内部氧化剂含量等因素影响。目前关于准静态压力 p_{qs} 的数据处理尚无统一标准,通常有两种方法:一是将滤波后的压力作为准静态压力^[26],二是取某时段内的平均压力。本文选取第一种方法,采用 Origin 软件对准静态压力原始数据进行滤波,然后采用相邻平均法处理,得到 100、400 g 准静态压力曲线,如图 6 所示。处理后得到的曲线符合准静态压力定义^[27],密闭空间内部压力在爆炸初期后迅速上升,在达到准静态压力后,空间内部压力保持在准静态压力平台附近。由图 6 可见,400 g 炸药爆炸产生的准静态压力较 100 g 显著提升,且随着装药质量增大,准静态压力的衰减速率减缓。

2 结果与讨论

2.1 温度

图 7 为不同装药质量下 1.0、1.4 m 爆心距处的温度时程曲线。由图可见,1.0 m 与 1.4 m 处的温度波形曲线的波动特征存在明显差异。在 0~5 s 内,1.0 m 处的温度迅速达到峰值后快速下降,温度波形呈单峰形态,且峰值随着装药质量增大而升高。1.4 m 处的温度则缓慢上升到初始峰值,结合图 4(b)中

1.2、1.4、1.6 m 处的温度波形可见, 远区不再呈现单峰结构。这是由于内爆炸温度受空间结构与后燃反应的共同作用, 残余铝粉颗粒汇聚后被再次点燃, 产生二次燃烧现象。随着铝粉被再次点燃, 1.0、1.2、1.4、1.6 m 测点温度曲线均依次出现二次波动。以各装药初始温度峰值为基准, 100、200、300、400 g 装药的二次升温幅度分别较初始温度峰值增长 48%、55%、155%、212%。随后, 温度在下降过程中受壁面反射冲击波产生的涡流及爆轰产物回流的影响, 呈现波动下降的特征。

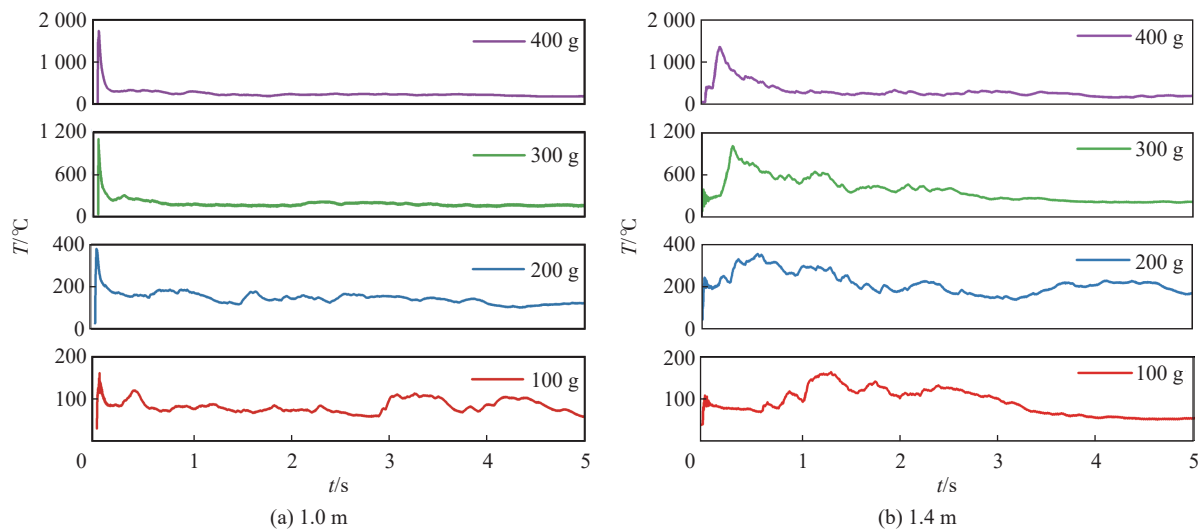


图 7 不同装药质量温压炸药在 1.0 m 和 1.4 m 爆心距处的温度时程曲线

Fig. 7 Temperature time history curves at 1.0 m and 1.4 m for thermobaric explosives with different masses

热电偶在测量高温火焰温度时, 实测温度并非火焰真实温度, 高温环境下的热辐射损失不可忽略, 因此需对实测温度进行修正。为平衡热对流与表面热辐射, 热电偶测温修正方法^[28,29]如下:

$$T_g = T + \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_\infty^4)}{h_b} + \frac{d^2(T_w - T) \sqrt{4h_w k_w / d_t}}{(2D^2 - d_t^2)h_b} \quad (1)$$

式中: T_g 为修正后的温度; T 为热电偶实测温度; h_b 为热电偶探头与高温气流之间的对流换热系数; ε 为热电偶表面发射率, 钨铼丝热电偶氧化后表面发射率取 0.3; σ 为黑体辐射常数; T_∞ 为爆炸环境温度, 取 300 K。 T_w 为热电偶丝的平衡温度, 由热电偶丝和周围环境的对流和辐射热平衡决定; D 为测温热电偶丝尖端测温珠直径, d_t 为热电偶丝直径; k_w 为热电偶丝导热系数, h_w 为热电偶丝总换热系数。

对流换热系数 h_b 的计算公式如下:

$$h_b = \frac{\lambda_g}{d_t} [2 + (0.4Re^{1/2} + 0.06Re^{2/3}) Pr^{0.4}], Re = \frac{\rho_g v_g D_t}{\mu_g} \quad (2)$$

h_w 包含热对流系数 $h_{c,w}$ 和辐射换热系数 $h_{r,w}$, 计算公式为:

$$h_w = h_{c,w} + h_{r,w} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_w^4 - T_\infty^4)}{(T_g - T_w)} + \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_\infty^4)}{(T_g - T)} \quad (3)$$

式中: λ_g 为高温气流热传导系数; Pr 为高温气体普朗特数; Re 为高温气流雷诺数; ρ_g 为火焰密度; v_g 为火焰传播速度; μ_g 为火焰黏性系数; D_t 为热电偶保护外壳直径。

由图 7 可见, 受空间结构影响, 爆炸远区能够产生更大的温度波动, 因此选用不受结构影响的初始温度峰值研究温度分布规律。采用式 (1) 对热电偶传感器实测初始温度峰值进行修正, 修正后的温度较实测值提高约 1%~9%, 修正前后温度变化趋势一致。不同装药质量温压炸药在内爆炸下的初始温度峰值 T_m 随爆心距 d 的变化关系如图 8 所示。

温度变化是由爆炸冲击波与火球以球面形式共同膨胀引起的, 而爆炸产生的冲击波超压主要受装药质量 M 、炸药密度 ρ_e 、爆炸速度 D_e 、空气初始压力 p_0 、空气初始密度 ρ_0 、爆心距 d 等因素的影响。由

量纲分析可知, 冲击波超压峰值可以采用爆心距与爆炸当量立方根比值的函数形式表达, 爆心距 d 与爆炸当量 M 立方根的比值 $d/M^{1/3}$ 通常称为比例爆距, 记为 R 。

由于爆炸火球与波阵面前沿共同传播, 初始温度峰值 T_m 与冲击波超压峰值 Δp_m 存在映射关系^[30], 因此可使用比例爆距 R 对初始温度峰值 T_m 进行量化分析。采用指数衰减函数对温度初始峰值进行拟合, 拟合结果如式 (4) 所示, 其拟合优度为 99.83%。图 9 为温压炸药内爆炸温度峰值与拟合曲线的对应关系。温度数据均匀分布在拟合曲线两侧, 拟合得到的温度峰值公式能够较为准确地反映温压炸药内爆炸下的初始温度峰值分布情况。

$$T_m = 3\,403.52R^{-4.486} + 37.99 \quad 1.0 < R \leq 3.5 \quad (4)$$

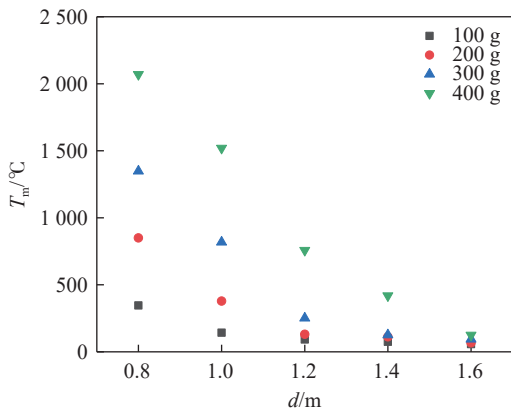


图 8 不同装药质量温压炸药温度初始峰值随爆心距变化
Fig. 8 Variation of initial temperature peak with distance for thermobaric explosives with different masses

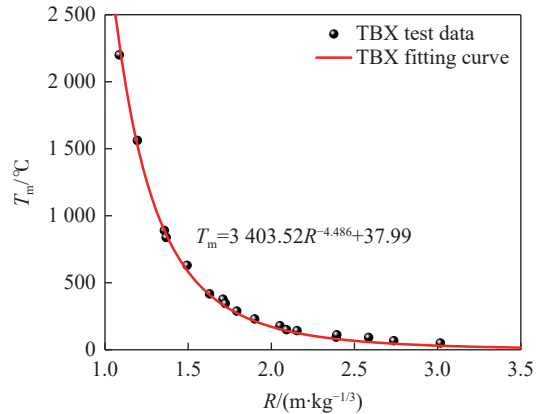


图 9 温压炸药内爆炸温度初始峰值随比例爆距变化
Fig. 9 Variation of initial peak temperature of thermobaric explosives internal explosion with scaled distance

2.2 冲击波

温压炸药后燃反应持续时间为数毫秒, 其后燃能量释放对冲击波传播的早期阶段产生显著影响, 最终增强冲击波的正压冲量 i_+ 。不同装药质量下冲击波超压峰值 Δp_m 和正压冲量 i_+ 随爆心距 d 的变化关系如图 10 所示。从图 10 可以看出, 冲击波超压峰值随爆炸距离的增大而持续衰减, 正压冲量也随之减小; 所有冲击波参数均随着装药质量增大而增大。

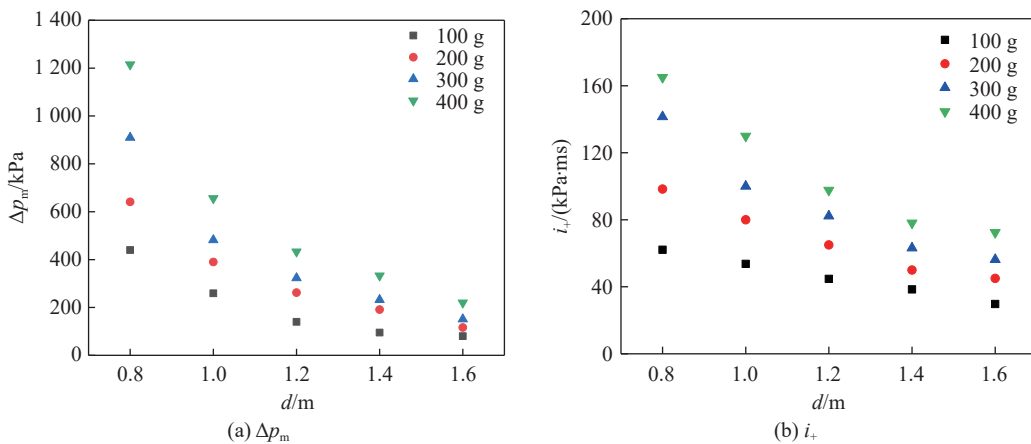


图 10 不同装药质量温压炸药冲击波超压峰值和正压冲量随爆心距变化

Fig. 10 Variation of peak overpressure and positive impulse with distance for thermobaric explosives with different masses

采用爆炸相似律将超压峰值 Δp_m 和正压冲量 i_+ 转化为比例爆距 R 的函数, 对二者进行量化分析。拟合结果如式 (5) 和 (6) 所示, 拟合曲线如图 11 所示, 超压峰值和正压冲量的拟合优度分别为 99.2% 和 99.4%。

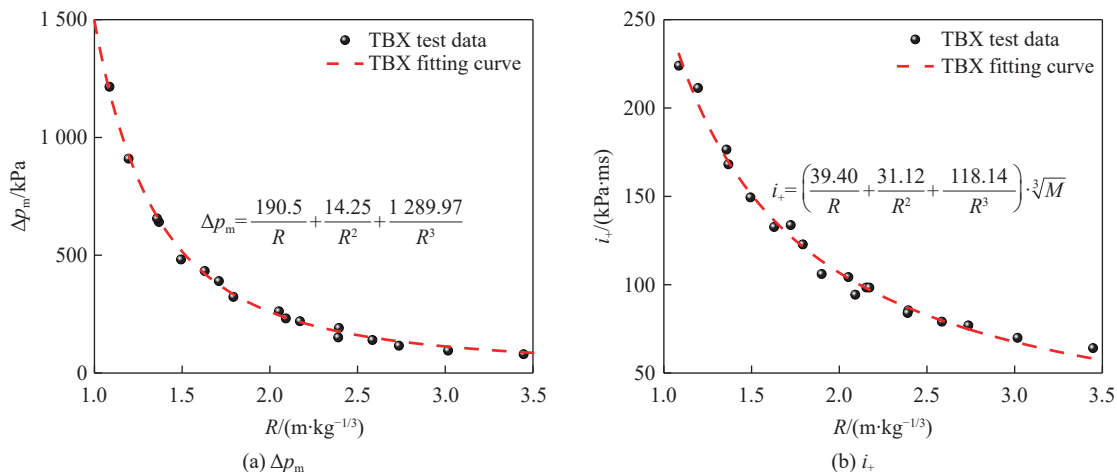


图 11 温压炸药冲击波超压峰值和正压冲量随比例爆距的拟合曲线

Fig. 11 Fitted curves of peak overpressure and positive impulse versus scaled distance for thermobaric explosives

$$\Delta p_m = \frac{190.55}{R} + \frac{14.25}{R^2} + \frac{1289.97}{R^3} \quad (5)$$

$$i_+ = \left(\frac{39.40}{R} + \frac{31.12}{R^2} + \frac{118.14}{R^3} \right) \cdot \sqrt{M} \quad (6)$$

在本次试验中, 比例爆距范围为 $1.0 \sim 3.5 \text{ m/kg}^{1/3}$, 当比例爆距大于 $0.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 初始冲击波与爆轰产物能够完全分离^[31], 因此本试验采集到的冲击波超压峰值均受到铝粉后燃能量释放的影响。而爆炸相似律是基于理想爆轰或点爆炸理论推导得出的。温压炸药属于非理想爆轰炸药, 其后燃反应持续释能导致冲击波传播规律发生变化。目前关于温压炸药爆炸场分区的界定尚不明确, 针对冲击波超压进行分段讨论的研究^[32]也未能给出分段的依据及其物理含义。以 TNT 作为基准, 可将爆炸参数归一化至统一尺寸进行横向对比^[33]。因此本文采用 TNT 冲击波超压峰值和正压冲量的经验公式进行 TNT 等效当量系数的计算, 以 1 kg 装药质量为基准, 计算温压炸药冲击波超压峰值和正压冲量的 TNT 等效当量。将温压炸药冲击波超压峰值公式 (5) 和正压冲量公式 (6) 与 TNT 炸药相应的经验公式联立求解, 得到相同超压峰值或相同正压冲量所对应的 R_{TBX} 和 R_{TNT} , 进而利用式计算温压炸药冲击波超压峰值和正压冲量的 TNT 当量系数随比例爆距的变化, 结果如图 12 所示。

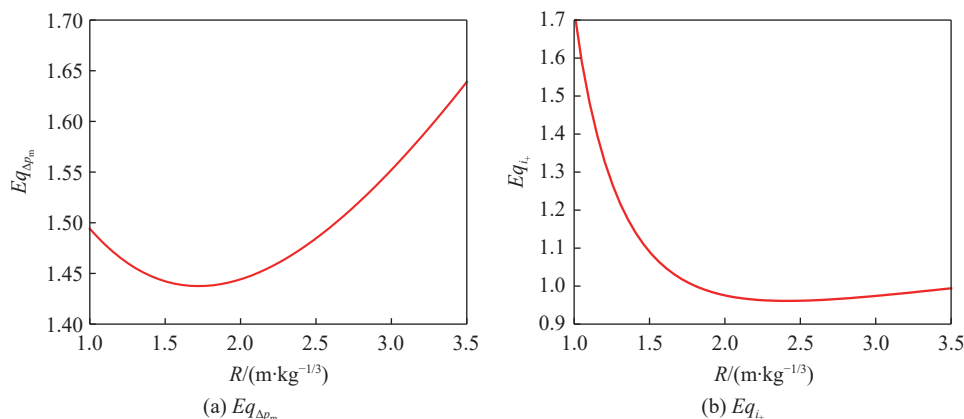


图 12 温压炸药冲击波超压峰值和正压冲量的 TNT 等效当量系数随比例爆距的变化曲线

Fig. 12 TNT equivalence coefficients of peak overpressure and positive impulse versus scaled distance for thermobaric explosives

$$Eq = \left(\frac{R_{\text{TBX}}}{R_{\text{TNT}}} \right)^3 \quad (7)$$

式中: E_q 为 TNT 等效当量系数; R_{TBX} 和 R_{TNT} 分别为温压炸药和 TNT 炸药产生相同超压峰值或者正压冲量时的比例爆距。

以往关于 TNT 等效当量的研究表明, 不同炸药冲击波超压的 TNT 等效当量系数变化显著, 并非固定值。例如, 岩石乳化炸药的超压 TNT 等效当量系数随比例爆距呈上凸变化^[34], 而新型发射药^[35] 的 TNT 等效当量系数呈下凹变化; PETN 的数值仿真计算^[36] 显示, 其超压峰值和正压冲量的 TNT 等效当量系数均随比例爆距增大而衰减。可见, TNT 等效当量系数变化与装药种类密切相关。关于温压炸药 TNT 等效当量系数的研究最初在坑道环境^[37] 中开展, 坑道爆炸试验发现, 温压炸药的 TNT 等效当量系数在坑道近端较大、远端较小。由图 12 可见, 温压炸药内爆炸下超压峰值的 TNT 等效当量系数整体呈下凹双曲线变化趋势, 在 $1.0 \text{ m/kg}^{1/3} < R < 3.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ 范围内, TNT 等效当量系数为 1.43~1.64, 并在 $1.7 \text{ m/kg}^{1/3}$ 处达到最小值 1.43。温压炸药正压冲量的 TNT 等效当量系数则为先下降后缓慢上升: 在相同比例爆距范围内, 正压冲量的 TNT 等效当量系数为 0.97~1.69, 在 $1.7 \text{ m/kg}^{1/3}$ 处降至 1.0。冲击波超压峰值和正压冲量的 TNT 等效当量系数的变化, 需结合冲击波传播及后燃作用进一步分析。

表 1 统计了不同装药质量温压炸药内爆炸的正压作用时间。由表可知, 温压炸药内爆炸平均正压作用时间为 867 μs ; 此外, 100、200、300、400 g 温压炸药爆炸产生的冲击波从爆心距 0.8 m 传播到 1.6 m 分别耗时 1.49、1.27、1.22、1.03 ms, 而温压炸药爆炸释能过程中, 金属铝粉的有氧燃烧阶段可达数毫秒。因此, 各测点在正压作用期间均不同程度地受到有氧反应的增强作用。铝粉的有氧反应对冲击波压力时程曲线的影响如图 13 所示。温压炸药后燃反应释放的能量形成压缩波, 压缩波与冲击波叠加, 大幅延长正压作用时间, 增强爆炸冲击波的正压冲量。随着装药质量的增大, 相同时间内铝粉燃烧释放的能量增大, 形成更强的压缩波, 冲击波叠加现象更显著, 且压缩波到达时间提前。而随着传播距离增大, 有氧反应的增强效应逐渐减弱。因此, 正压冲量的 TNT 等效当量在比例爆距 $1.7 \text{ m/kg}^{1/3}$ 之前逐渐下降, 当有氧反应生成的压缩波追赶至波阵面时, 其对压力峰值和正压作用时间的增幅已不显著, 因此正压冲量的 TNT 等效当量系数在比例爆距 $1.7 \text{ m/kg}^{1/3}$ 之后降低到 1.0 附近。

图 14 为 400 g 温压炸药在不同测点处的冲击波压力时程曲线。在爆心距 0.8~1.4 m 处, 均可观察到有氧后燃引起的波形波动, 且随着爆炸反应过程的进行, 波动逐渐减弱。然而, 随着传播距离的增大, 有氧后燃反应生成的压缩波逐渐追赶上前沿冲击波, 最终对冲击波超压峰值形成增幅效应。由此可见, 初始冲击波超压峰值由高能基药爆轰以及爆轰产物无氧反应共同作用产生^[38]。爆炸发生后, 高能基药爆炸产生的高温高压使得氧化剂迅速分解, 提高了铝粉在无氧反应阶段的参与度。此时波阵面与爆轰产物尚未分离, 外部空气无法进入产物区, 因此爆轰产物包裹下的金属颗粒主要发生无氧反应。当冲击波开始与爆轰产物分离时, 外部空气逐渐进入产物区, 与无氧反应中未反应的成分充分混合, 燃

表 1 不同装药质量温压炸药内爆炸各测点正压作用时间

Table 1 Positive pressure durations of internal explosions for thermobaric explosives with different charge masses

装药质量/g	正压作用时间/ μs				
	$d=0.8 \text{ m}$	$d=1.0 \text{ m}$	$d=1.2 \text{ m}$	$d=1.4 \text{ m}$	$d=1.6 \text{ m}$
100	469.38	664.83	736.16	882.87	958.18
200	635.12	739.64	825.07	964.68	994.61
300	801.25	816.95	880.98	997.53	1013.42
400	904.62	956.78	978.94	1048.36	1085.44

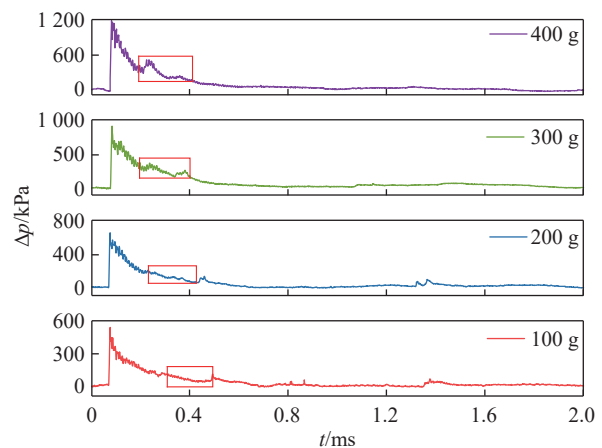


图 13 不同装药质量温压炸药在 0.8 m 爆心距处的冲击波压力时程曲线

Fig. 13 Shock wave pressure time history at 0.8 m for thermobaric explosives with different masses

烧反应由无氧反应主导向有氧反应主导转变。

当爆轰产物半径膨胀到装药半径的 15~19 倍时, 冲击波开始与爆轰产物缓慢分离。对于本文 100~400 g 温压炸药, 冲击波与爆轰产物分离发生在 0.3~0.7 m 范围内。随着分离过程的进行, 无氧反应不再主导燃烧, 其释放的能量逐渐衰减, 因此图 12 中超压的 TNT 等效当量系数在 $1.7 \text{ m/kg}^{1/3}$ 之前逐渐减小。爆轰产物与波阵面分离之后, 爆轰产物和剩余铝颗粒与空气逐渐混合, 有氧燃烧反应逐渐占据主导地位, 反应生成的压缩波逐渐追赶至波阵面, 延缓了冲击波超压的衰减, 因此温压炸药冲击波超压的 TNT 等效当量系数在比例爆距 $1.7 \text{ m/kg}^{1/3}$ 之后逐渐上升。采用最小二乘法对超压峰值的 TNT 等效当量曲线按照 $1.7 \text{ m/kg}^{1/3}$ 进行分段幂函数拟合, 不同爆炸区域下的 TNT 等效当量公式如式 (8), 分段拟合的拟合优度分别为 99.7% 和 99.8%。同理, 以 $1.7 \text{ m/kg}^{1/3}$ 为分界点重新拟合温压炸药超压峰值衰减公式, 拟合结果如式 (9) 所示, 冲击波超压峰值随比例爆距变化的拟合结果如图 15 所示。分段拟合的拟合优度分别为 99.6% 和 99.3%, 以 $1.7 \text{ m/kg}^{1/3}$ 作为分界点, 有效提高了温压炸药冲击波超压峰值的拟合精度, 分别描述了非理想爆轰与铝粉有氧后燃效应在不同区域对冲击波超压的贡献。

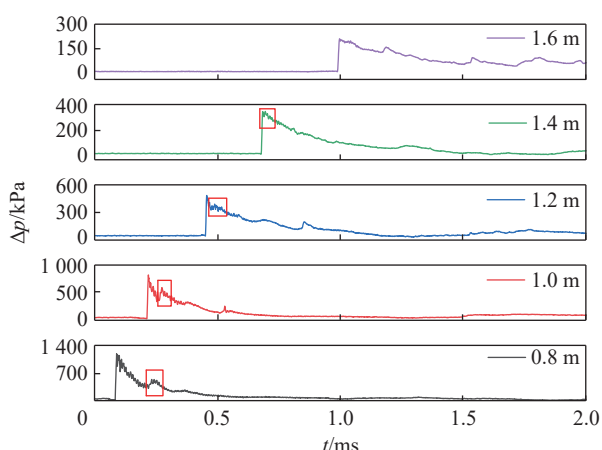


图 14 400 g 温压炸药在不同测点处的冲击波压力时程曲线
Fig. 14 Shock wave pressure time history of 400 g thermobaric explosive at different measuring points

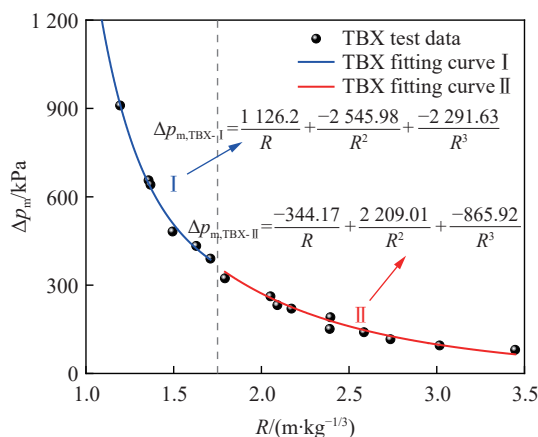


图 15 温压炸药冲击波超压峰值随比例爆距变化的分段拟合曲线

Fig. 15 Piecewise fitted curves of peak overpressure versus scaled distance for thermobaric explosives

$$Eq_{\Delta p_m} = \begin{cases} 0.0776R^{-2.73} + 1.417 & 1.0 < R \leq 1.7 \\ 0.00424R^{3.21} + 1.405 & 1.7 < R \leq 3.5 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \Delta p_{m,TBX-I} = \frac{1126.26}{R} + \frac{-2545.98}{R^2} + \frac{2291.63}{R^3} & 1.0 < R \leq 1.7 \\ \Delta p_{m,TBX-II} = \frac{-344.17}{R} + \frac{2209.01}{R^2} + \frac{-865.92}{R^3} & 1.7 < R \leq 3.5 \end{cases} \quad (9)$$

2.3 准静态压力

温压炸药在密闭空间内爆炸时, 无氧爆轰产生大量高温气体, 形成初始冲击波导致内部压力升高; 有氧燃烧释放大量热量, 使空间内部压力维持高温状态且持续时间较长。初始冲击波引起的压力上升与后燃释能引起的温度上升共同作用形成准静态压力^[39]。因此, 密闭空间内准静态压力的计算公式为:

$$p_{qs} = p_v + p_T \quad (10)$$

式中: p_{qs} 为准静态压力, p_v 为冲击波超压引起的空间内部压力上升分量; p_T 为温度引起的空间内部压力上升分量。

冲击波引起的空间内部压力上升源于炸药爆炸后生成的气态爆炸产物, 其体积急剧膨胀, 但在密闭空间内受到约束, 从而导致内部压力增大, 数学表达式如下:

$$p_v = p_0 M \left(\frac{v_0}{V} \right) \quad (11)$$

式中: p_0 为密闭空间初始压力; M 为装药质量, kg; v_0 为单位质量炸药爆炸生成的气态产物在标准状态下的体积, m^3/kg ; V 为密闭空间容积, m^3 。

温度上升导致的准静态压力升高部分可根据理想气体状态方程推导:

$$p_T = \left(\frac{M q_T}{m_g c_v} \right) \left(\frac{n R_g}{V} \right) \quad (12)$$

式中: n 为空气的物质的量; R_g 为气体常数, 取 $8.314 \text{ Pa} \cdot m^3 / (\text{mol} \cdot K)$; q_T 为炸药爆轰热, kJ/kg ; m_g 为密闭空间内气体质量, kg ; c_v 为空气的定容比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot K)$ 。

在理想条件下, 密闭空间内准静态压力 p_{qs} 可表示为 M/V 的函数:

$$p_{qs} = \left(p_0 v_0 + \frac{n R_g q_T}{m_g c_v} \right) \left(\frac{M}{V} \right) = f \left(\frac{M}{V} \right) \quad (13)$$

采用式 (13) 对准静态压力进行非线性拟合, 拟合结果如式 (14) 所示, 该公式适用于本试验所使用的温压炸药配方及试验条件。图 16 给出了准静态压力随装药质量与空间容积之比的变化关系。以 100 g 装药质量对应的准静态压力为基准, 200、300、400 g 装药质量对应的准静态压力分别增至 2.27、3.21、4.18 倍。由图可见, 当 M/V 较小时, p_{qs} 随 M/V 增大而快速上升; 随着 M/V 继续增大, p_{qs} 的增长速率逐渐减缓。

准静态压力是初始冲击波均匀化后与后燃效应共同作用的结果, 对于温压炸药在密闭空间中爆炸, 后燃效应受装药质量和约束环境共同影响。拟合结果还表明, 较大的装药质量不一定产生更大的准静态压力, 这是因为温压炸药的爆炸

能量与氧平衡密切相关。可将密闭空间内的气体与炸药视为一个氧平衡系统^[40], 但随着装药质量增大, 系统中的氧化剂不足以将炸药完全氧化, 后燃反应受限, 导致准静态压力的增长趋于饱和。对于这类复杂装药, 需进一步对后燃机理开展详细研究, 以明确氧化剂对准静态压力中冲击波分量和温度分量的贡献关系。

$$p_{qs} = 1.279 \left(\frac{M}{V} \right)^{0.864} \quad 0.004 \leq \frac{M}{V} \leq 0.024 \quad (14)$$

3 结 论

本文通过开展 100~400 g 温压炸药在密闭空间内的爆炸试验, 获得了爆炸冲击波与温度场的变化特征, 建立了温压炸药爆炸冲击波和温度衰减规律模型, 得到如下主要结论:

(1) 温压炸药在密闭空间内爆炸产生的温度场具有显著的二次升温 and 长历时特征。二次升温受装

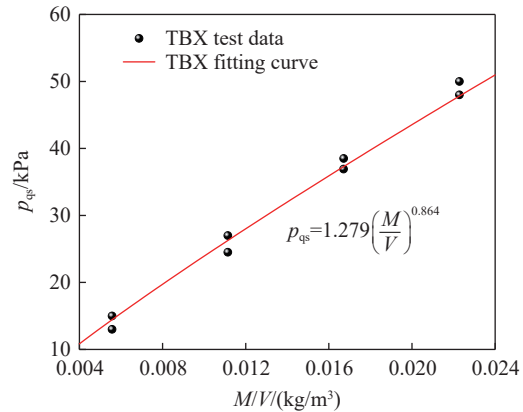


图 16 准静态压力随密闭空间内装药质量的变化

Fig. 16 Quasi-static pressure in a confined space as a function of charge mass

药质量与空间结构共同作用。基于温压炸药内爆炸初始温度峰值衰减规律,建立了相应的衰减模型。

(2) 揭示了温压炸药内爆炸冲击波超压峰值与正压冲量的变化规律。冲击波超压峰值的 TNT 等效当量系数随比例爆距的增大呈下凹双曲线变化,在比例爆距 $1.7 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时达到最小值 1.43。以该比例爆距为分界点,建立了冲击波超压峰值的两阶段预测模型,分别描述了温压炸药非理想爆轰效应与铝粉有氧后燃效应在不同区域对冲击波超压峰值的影响。

(3) 温压炸药内爆炸准静态压力受爆炸产物膨胀与后燃升温共同作用,随装药质量增加呈非线性增长。以 100 g 装药为基准,200、300、400 g 装药的准静态压力分别增至 2.27、3.21、4.18 倍。准静态压力的增长速率随装药质量增加而减缓,密闭空间内氧平衡对准静态压力具有显著制约作用。

参考文献:

- [1] 陈飞翔, 张国凯, 何勇, 等. 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 [J]. *爆炸与冲击*, 2025, 45(12): 122202. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0486.
CHEN F X, ZHANG G K, HE Y, et al. Influence of tunnel structural confinement on shock wave and fireball generated by explosion of a thermobaric explosive in a tunnel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2025, 45(12): 122202. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0486.
- [2] HAHMA A, PALOVUORI K, ROMU H. Experimental studies on metal fueled thermobaric explosives [C]//Proceedings of the FINNEX 2002 Seminar. Levi, Kittilä: Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos, Julkaisuja, 2002: 211-218.
- [3] 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.
- [4] PEUKER J M, LYNCH P, KRIER H, et al. Optical depth measurements of fireballs from aluminized high explosives [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(9): 1009-1015. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2009.04.011.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 王梓昂, 翟红波, 李芝绒, 等. 不同炸药在圆筒装置内爆炸冲击波载荷传播规律与分布特性 [J]. *弹箭与制导学报*, 2019, 39(1): 11-14, 20. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2019.01.003.
WANG Z A, ZHAI H B, LI Z R, et al. Study on propagation rules and distribution characteristics of explosion shock wave loading on different explosives inside cylindrical device [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2019, 39(1): 11-14, 20. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2019.01.003.
- [8] 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. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0327.
LI Z R, WANG S Q, JIANG H Y, et al. Experimental studies on characteristics of explosion pressure load in cylinder apparatus [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(10): 102202. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0327.
- [9] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2009.05.002.
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. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2009.05.002.
- [10] LI X D, CHEN H J, YIN J P, et al. Corner convergence effect of enclosed blast shock wave and high-pressure range [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(22): 11341. DOI: 10.3390/app122211341.
- [11] 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. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01263.
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. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01263.

- [12] GOGULYA M F, BRAZHNİKOV 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.
- [13] MAIZ L, TRZCIŃSKI W A, PASZULA J. Investigation of fireball temperatures in confined thermobaric explosions [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2017, 42(2): 142–148. DOI: 10.1002/prop.201600150.
- [14] 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.
- [15] 裴明敬, 田朝阳, 胡华权, 等. 铝粉在温压炸药爆炸过程中的响应分析 [J]. *火炸药学报*, 2013, 36(4): 7–12. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2013.04.002.
- PEI M J, TIAN Z Y, HU H Q, et al. Response analysis of aluminum in the process of thermobaric explosive detonation [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2013, 36(4): 7–12. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2013.04.002.
- [16] 姬建荣, 苏健军, 王胜强. 小型爆炸容器中 TNT/Al 炸药的后燃烧性能 [J]. *火炸药学报*, 2013, 36(3): 46–49. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2013.03.011.
- JI J R, SU J J, WANG S Q. After-burning performances of TNT/Al explosive in small explosion vessel [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2013, 36(3): 46–49. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2013.03.011.
- [17] 卢勇, 王伯良, 何中其, 等. 温压炸药爆炸能量输出的实验研究 [J]. *含能材料*, 2014, 22(5): 684–687. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.05.020.
- LU Y, WANG B L, HE Z Q, et al. Experimental research on energy output of thermobaric explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2014, 22(5): 684–687. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.05.020.
- [18] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2015.17.028.
- 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. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2015.17.028.
- [19] 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(1): 012023. DOI: 10.1088/1742-6596/1721/1/012023.
- [20] 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): 032301. 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): 032301. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0011.
- [21] 张学瑞, 周涛. 密闭空间中复合装药的能量释放特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(6): 062302. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0381.
- ZHANG X R, ZHOU T. Energy release characteristics of composite charge in confined space [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(6): 062302. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0381.
- [22] 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, 51. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2014.05.026.
- ZHENG C M, YAN R, LIU Z W, et al. Experimental study on oxygen consumption effect of thermo-baric explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2014, 37(5): 33–36, 51. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2014.05.026.
- [23] 施宇成, 孔德仁, 徐春冬, 等. 爆炸场冲击波压力测量及其传感器技术现状分析 [J]. *测控技术*, 2022, 41(11): 1–10, 34. DOI: 10.19708/j.ckjs.2022.03.240.
- SHI Y C, KONG D R, XU C D, et al. Status analysis of shock wave pressure measurement and sensor technology in explosion field [J]. *Measurement & Control Technology*, 2022, 41(11): 1–10, 34. DOI: 10.19708/j.ckjs.2022.03.240.
- [24] ZHAO Y F, LI Y N, HAN Z W, et al. Effects of main components on energy output characteristics of thermobaric explosive — a case study of typical formulations [J]. *Defence Technology*, 2024, 38: 205–216. DOI: 10.1016/j.dt.2024.03.008.
- [25] 钟巍, 田宙. 等压假设下考虑化学反应动力学影响的约束爆炸准静态压力的计算 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(4): 375–380. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)04-0375-06.
- Zhong W, Tian Z. Calculation of quasi-static pressures for confined explosions considering chemical reactions under isobaric assumption [J]. *Explosion And Shock Waves*, 2013, 33(4): 375–380. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)04-0375-06.

- [26] DUAN X Y, GUO X Y, JIAO Q J, et al. Effects of Al/O on pressure properties of confined explosion from aluminized explosives [J]. *Defence Technology*, 2017, 13(6): 428–433. DOI: 10.1016/j.dt.2017.05.018.
- [27] TROTT B D, BACKOFEN JR J E, WHITE III J J. Design of explosion blast containment vessels for explosive ordnance disposal units: DAAA21-72-C-0129 [R]. Dover: Picatinny Arsenal, 1975. DOI: 10.21236/ADB016707.
- [28] LI X Y, HUANG Q H, LUO X G, et al. Thermocouple correction method evaluation for measuring steady high-temperature gas [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 213: 118673. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118673.
- [29] 胡泽君, 冯运超, 何志成, 等. 微米级铝颗粒在水蒸气和氧气中的点火燃烧特性 [J]. *航空学报*, 2023, 44(15): 528866. DOI: 10.7527/S1000-6893.2023.28866.
- HU Z J, FENG Y C, HE Z C, et al. Ignition and combustion characteristics of micro-sized aluminum particles in H₂O and O₂ [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(15): 528866. DOI: 10.7527/S1000-6893.2023.28866.
- [30] WANG L Q, KONG D R. Mapping function model representing the relationship between explosion shock wave pressure and wavefront temperature [J]. *AIP Advances*, 2023, 13(6): 065011. DOI: 10.1063/5.0155382.
- [31] 张德志, 李焰, 王等旺, 等. 球形装药近距离爆炸正反射冲击波实验研究 [J]. *兵工学报*, 2009, 30(12): 1663–1667. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2009.12.018.
- ZHANG D Z, LI Y, WANG D W, et al. Experiment investigations on normal reflected blast wave near the spherical explosive [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(12): 1663–1667. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2009.12.018.
- [32] 赵新颖, 王伯良, 李席. 温压炸药在野外近地空爆中的冲击波规律 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(1): 38–42. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)01-0038-05.
- ZHAO X Y, WANG B L, LI X. Shockwave characteristics of thermobaric explosive in free-field explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(1): 38–42. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)01-0038-05.
- [33] 黄寅生. 炸药理论 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016.
- HUANG Y S. Explosives theory [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2016.
- [34] 范俊余, 方秦, 张亚栋, 等. 岩石乳化炸药 TNT 当量系数的试验研究 [J]. *兵工学报*, 2011, 32(10): 1243–1249.
- FAN J Y, FANG Q, ZHANG Y D, et al. Experimental investigation on the TNT equivalence coefficient of a rock emulsion explosive [J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(10): 1243–1249.
- [35] 高金明, 曾丹, 孙磊, 等. 新型发射药爆炸 TNT 当量系数的实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(10): 102101. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0432.
- GAO J M, ZENG D, SUN L, et al. Experimental study on TNT equivalent coefficients for two new kinds of propellants [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(10): 102101. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0432.
- [36] XIAO W F, ANDRAE M, GEBBEKEN N. Air blast TNT equivalence factors of high explosive material PETN for bare charges [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 377: 152–162. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.05.078.
- [37] 许珂, 李秀地, 毛怀源, 等. 坑道内温压炸药冲击波传播特性的试验研究 [J]. *爆破*, 2018, 35(3): 42–48. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2018.03.007.
- XU K, LI X D, MAO H Y, et al. Experimental study on blast wave characteristic of thermobaric explosive inside tunnel [J]. *Blasting*, 2018, 35(3): 42–48. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2018.03.007.
- [38] KHRISTOFOROV B D. Effect of properties of the source on the action of explosions in air and water [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2004, 40(6): 714–719. DOI: 10.1023/B:CESW.0000048277.31127.06.
- [39] XU Q P, LI Z R, WANG X J, et al. Experimental performance assessment of thermobaric explosives in free field and internal blast tests [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2022, 58(1): 93–105. DOI: 10.1134/S0010508222010105.
- [40] 李营, 张磊, 杜志鹏, 等. 舱内爆炸准静态压力形成机理的研究 [J]. *中国造船*, 2020, 61(2): 28–34. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2020.02.003.
- LI Y, ZHANG L, DU Z P, et al. Theoretical and experimental study on formation of quasi-static pressure in internal blast [J]. *Shipbuilding of China*, 2020, 61(2): 28–34. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2020.02.003.

(责任编辑 曾月蓉)