

低压环境下 TNT 内爆准静态压力特性

李瑞¹, 孙瑞^{1*}, 刘科洋¹, 胡明航¹, 陈雅静¹, 汪泉¹, 李雪交¹, 徐小猛¹, 崔晓荣²

(1. 安徽理工大学化工与爆破学院, 安徽 淮南 232001;

2. 宏大民爆集团有限公司, 广东 广州 510623)

摘要: 为了研究低压密闭空间 TNT 内爆准静态压力特性, 考虑 TNT 的爆轰反应以及不同低压环境下爆轰产物的后燃反应, 基于能量守恒原理, 建立了低压条件下 TNT 内爆准静态压力的理论预测模型。通过 Chemkin 软件模拟低压下 TNT 爆轰产物的后燃反应, 并结合 AUTODYN 有限元软件的额外能恒速率释放模型, 提出了低压环境下 TNT 炸药密闭空间内爆的数值模拟方法。通过自主设计的可调真空度密闭爆炸容器, 开展了不同低压环境下的 TNT 内爆试验, 对准静态压力理论计算与数值模拟的准确性进行验证。结果表明, 所建立的理论模型能够较准确地预测低压环境下 TNT 内爆准静态压力, 与试验结果的平均误差为 5.9%。考虑后燃能的低压环境 TNT 内爆数值模拟结果与试验结果吻合较好, 平均误差仅为 2.7%。随着环境压力的降低, 周围空气中氧气含量减少, 抑制了爆轰产物的后燃反应, 准静态压力下降。环境压力从 101.332 kPa 降至 40 kPa 时, 准静态压力下降了 23.3%。

关键词: 低压环境; 后燃反应; 准静态压力; 密闭空间; 内爆

中图分类号: O383; O521.9

文献标识码: 13035

针对舱室、堡垒、地下掩体等典型密闭空间目标, 内部爆炸(内爆)是常用的打击方式^[1]。密闭空间内爆表现为冲击波和热效应明显增强, 且作用时间增长。除了爆炸冲击波和热效应, 准静态压力也是内爆毁伤的重要方式^[2]。在炸药爆炸威力评估中, TNT 炸药往往作为标准炸药使用。TNT 是典型的负氧型炸药, 在密闭空间中爆炸时除产生初始爆轰能量外, 爆轰产物还与周围空气中的氧气发生燃烧反应释放额外能量, 造成准静态压力增加。目前, 关于密闭空间内爆研究多限于常压环境, 随着高效毁伤技术的不断发展以及未来战争作战条件的多元化, 武器弹药在高海拔, 高空, 甚至太空环境中应用越来越成为一种可能^[3]。低压环境的空气稀薄, 环境压力降低, 氧气浓度下降, 空气密度减小, 对炸药的内爆准静态压力影响如何, 有待于进一步研究。

准静态压力是由于炸药爆炸产生的高温高压气体产物向外膨胀受到密闭空间约束形成的, 稳定在某一较低压力, 其为炸药密闭空间内爆的重要毁伤元^[4]。目前, 关于炸药内爆准静态压力的预测集中在常压环境。例如, Zhong 等^[5]推导了常压密闭空间内爆的准静态压力计算模型, 并与 CONWEP 软件计算结果进行比较, 验证了模型的准确性。Edri 等^[6]提出了一种考虑爆轰能和后燃能的气体压力模型, 用于预测 TNT 等炸药在常压密闭空间内产生的准静态压力。Xu 等^[7]通过试验测量了常压条件下温压炸药在密闭空间中产生的准静态压力, 并利用试验数据对传统准静态压力预测模型进行了修正。Zhou 等^[8]系统研究了不同质量的 TNT 炸药在常压密闭空间内爆炸的准静态压力特性。目前, 针对密闭空间内爆准静态压力的研究大多在常压环境, 对低压环境的研究相对较少。

TNT 作为典型的负氧型炸药, 其在爆轰后会经历后燃反应过程。周围环境中的氧气会促使未完全氧化的爆轰产物继续发生反应释放后燃能, 进而提升整体能量释放并影响准静态压力。目前, 学者已针对常压下 TNT 炸药内爆后燃反应开展了相关研究。Ornellas 等^[9]首次测定了常压条件下

*收稿日期: 2026-05-18; 修回日期: 2026-06-25

基金项目: 安徽省高等学校科学研究重点项目(2023AH051221); 安徽省自然科学基金(2208085QA26, 2408085MA006)

第一作者: 李瑞(1987-), 男, 博士, 讲师, 主要从事高效毁伤研究. E-mail: lirui_89@126.com

通信作者: 孙瑞(2001-), 男, 硕士研究生, 主要从事爆炸力学研究. E-mail: 1989940724@qq.com

TNT 内爆后燃反应能。Kuhl 等^[10]通过改变密闭容器内的气体成分, 分析了空气和氮气条件下 TNT 内爆特性, 发现 TNT 炸药在空气中的爆炸压力与冲量明显高于氮气环境, 表明后燃反应对内爆的能量释放起调控作用。Zhou 等^[11]研究了常压密闭空间内爆后燃反应对爆炸载荷与结构动态响应的影响, 发现后燃效应可增强爆炸载荷。当前关于后燃反应的研究主要集中在常压条件。低压环境下氧气浓度降低, 势必影响后燃反应的能量释放, 进而影响准静态压力。因此, 有必要开展不同低压环境下 TNT 炸药内爆后燃反应研究。

本文基于能量守恒原理、Chemkin 软件、AUTODYN 有限元软件和自制可调真空度的爆炸容器, 对低压环境下 TNT 炸药密闭空间内爆进行了系统的理论分析、数值模拟和试验研究, 探讨不同低压条件对 TNT 内爆后燃反应及准静态压力的影响规律。

1 理论模型

1.1 准静态压力模型

体积为 V 、初始环境压力为 p_a 的密闭空间内爆产生的准静态压力 p_{qs} 可以使用下式进行计算^[12]:

$$p_{qs} = \left(\frac{p_a}{(\gamma_a - 1)} (V - V_e) + \Delta E_t \rho_e V_e \right) \frac{(\gamma - 1)}{V} \quad (1)$$

式中, ρ_e 和 V_e 分别为炸药的密度和体积; γ_a 和 γ 分别表示初始环境空气和爆轰气体混合物的绝热指数; ΔE_t 为炸药在密闭空间内爆释放的总能量。根据式(1), 低压密闭空间炸药内爆准静态压力 p_{qs} 主要取决于总能量(ΔE_t)与绝热指数(γ)两个关键参数。

1.2 总能量 (ΔE_t)

密闭空间 TNT 内爆的能量释放过程通常可分为两个阶段: 爆轰阶段与后燃阶段。爆轰阶段, TNT 产生大量爆轰产物并释放爆轰能 ΔE_{det} 。后燃阶段, 随着爆轰产物的扩散, 未完全氧化的可燃物与空气中的氧气发生后燃反应, 释放后燃能 ΔE_a 。因此, 低压密闭空间 TNT 内爆需考虑爆轰和后燃两个阶段, 基于能量守恒原理计算内爆释放的总能量 ΔE_t :

$$\Delta E_t = \Delta E_{det} + \Delta E_a \quad (2)$$

式中, ΔE_{det} 和 ΔE_a 分别表示爆轰能与后燃能。

1.2.1 爆轰能 (ΔE_{det})

通过 Becker-Kistiakowsky-Wilson (BKW) 状态方程描述气体爆轰产物和 COWAN 状态方程描述固体碳, 根据最小吉布斯自由能原理, 对 TNT 炸药的爆轰参数进行了理论计算。理论计算结果与实验数据进行对比, 如表 1 所示。由表 1 可见, TNT 爆轰参数的理论计算值与试验值之间的偏差小于 5%, 表明该理论能够准确描述 TNT 的爆轰行为。

表 1 TNT 爆轰参数

Table 1 Detonation parameters of TNT

Detonation parameters	Theoretical results	Experimental results ^[13]
C-J pressure (GPa)	20.25	21.00
Detonation velocity (m/s)	6935	6930
Detonation temperature (K)	2955	—

同样, 计算得到单位质量(1 kg) TNT 的爆轰产物组成, 结果列于表 2。从表 2 中可以看出, 除了完全氧化产物 CO_2 和 H_2O 等以外, 爆轰产物中还含有 CH_4 、 H_2 、 CO 及 C(s) 等多种未完全氧化的可燃物, 其在密闭空间内会与空气中的氧气发生后燃反应。

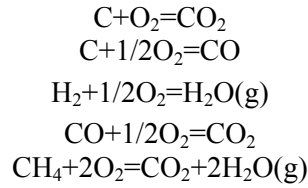
表 2 TNT 爆轰产物的组成计算结果

Table 2 Calculated composition of TNT detonation products

Detonation products	CH ₄	H ₂	CO	C(s)
mol/kg	9.189E-04	6.814E-02	9.001E-01	2.262E+01
Detonation products	O ₂	H ₂ O	CO ₂	N ₂
mol/kg	1.765E-05	1.092E+01	7.296E+00	6.603E+00

1.2.2 后燃能 (ΔE_a)

采用 Chemkin 软件, 模拟不同低压 ($p_a = 101.332$ 、80、60、40 kPa) 密闭条件下的 TNT 爆轰产物的后燃反应过程, 得到相应的后燃能 ΔE_a 。鉴于后燃反应在高温高压条件下持续时间极短, 采用单步化学反应机理, 相关燃烧反应方程式如下:



1.3 绝热指数 (γ)

假设 TNT 内爆反应瞬时完成且热损失可忽略, 将其视为绝热过程。反应温度可通过下式确定:

$$W\Delta E_t = n_t \int_{T_1}^{T_2} C_{V,m} dT \quad (3)$$

式中, W 为炸药的质量; n_t 为产物总摩尔数; T_1 和 T_2 分别为初始反应温度与最终温度; $C_{V,m}$ 为摩尔定容热容。对于爆轰产物中的气态产物, 其摩尔定容热容 $C_{V,m}$ 与摩尔定压热容 $C_{p,m}$ 满足如下关系^[14]:

$$C_{V,m} = C_{p,m} - R \quad (4)$$

而对于爆轰产物中的凝聚相 C(s), 其摩尔定压热容 $C_{p,m}$ 与摩尔定容热容 $C_{V,m}$ 通常可视为近似相等^[14]。通常, 爆轰产物 i 的摩尔定压比热容 $C_{p,m}(i)$ 为温度 T 的函数^[14]:

$$C_{p,m}(i) = A_0 + A_1T + \dots + A_6T^6 \quad (5)$$

式中, A_0 - A_6 为摩尔定压比热容的多项式系数。

基于 JANAF^[15] 提供的 100-6000 K 的数据, 对各爆轰产物的摩尔定压比热容 $C_{p,m}$ 进行多项式系数进行拟合, 结果如图 1 所示。从图 1 中可以看出, 气体的摩尔定压热容 $C_{p,m}$ 随温度升高逐渐增大, 凝聚相 C(s) 的 $C_{p,m}$ 随温度变化缓慢增长。

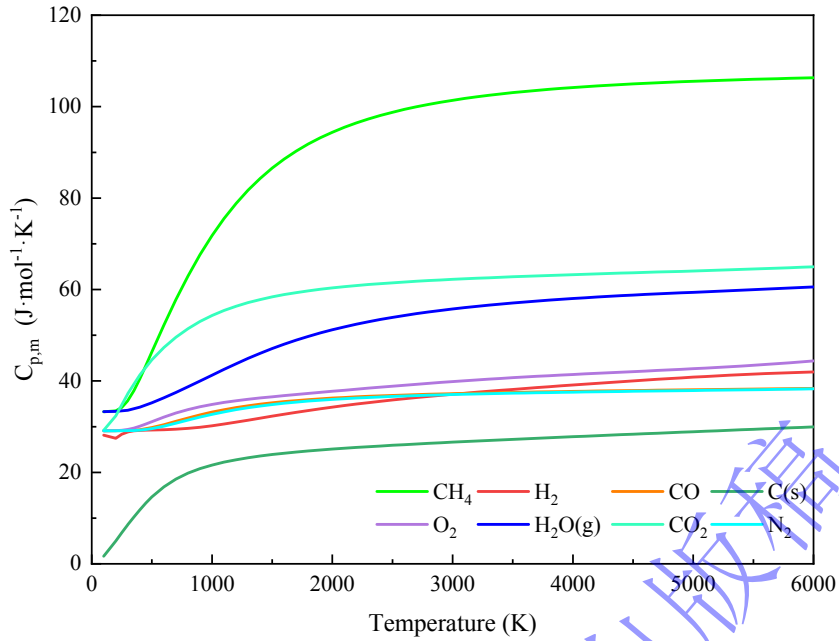


图 1 摩尔定压热容随温度变化关系

Fig. 1 Molar heat capacity at constant pressure versus temperature.

联立公式(2)至(5), 可得到爆轰产物在定容条件下的最终温度 T_2 :

$$W\Delta E_i = \sum_i n(i) \int_{T_1}^{T_2} C_{p,m} dT - \sum_j n(j) \int_{T_1}^{T_2} R dT \quad (6)$$

式中, $n(i)$ 表示各组分摩尔数; $n(j)$ 表示各气体组分摩尔数。

不同温度下爆轰产物与后燃产物的绝热指数(γ)可通过下式进行计算^[2]:

$$\gamma = \frac{1}{n_t} \sum_i n(i) \gamma(i) = \frac{1}{n_t} \sum_i n(i) \frac{C_{p,m}(i)}{C_{v,m}(i)} \quad (7)$$

式中, n_t 为产物的总摩尔数。

图 2 展示了不同产物的绝热指数随温度的变化情况。从图 2 可以看出, 除凝聚相 C(s)外, 其余物质的绝热指数均随温度升高而呈下降趋势, 变化范围为 1.1-1.4。凝聚相 C(s)的绝热指数随温度变化而保持恒定。

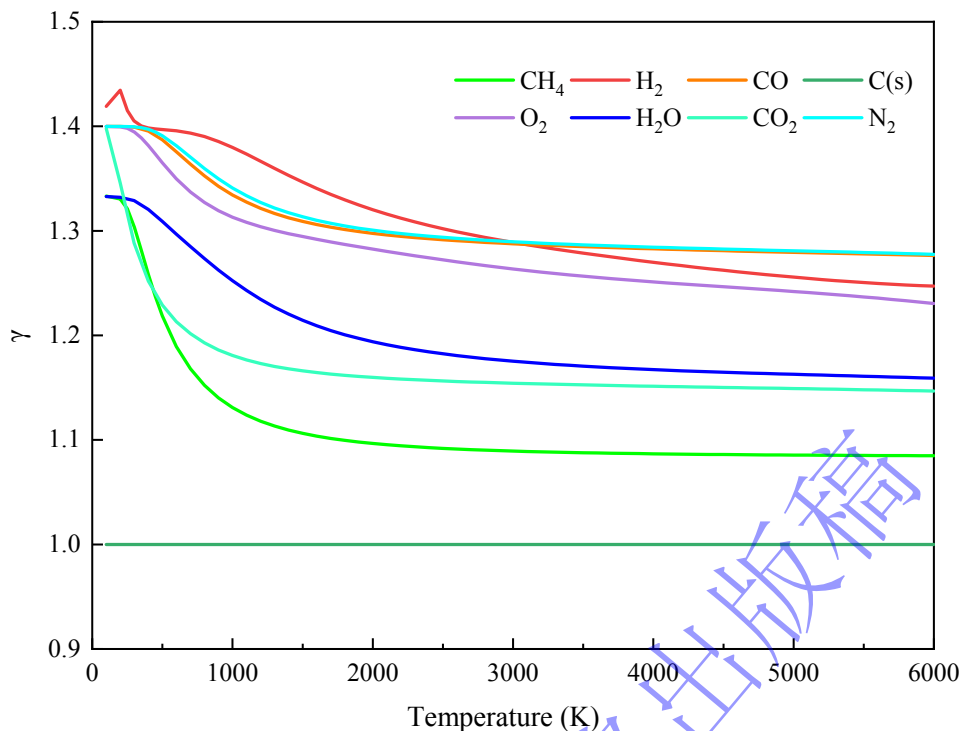


图 2 绝热系数随温度变化关系

Fig. 2 Adiabatic coefficient versus temperature.

2 试验

为开展低压密闭空间 TNT 炸药的内爆试验, 测定不同低压环境下 TNT 炸药的内爆准静态压力。自主设计了一个可调真空度的圆柱形爆炸容器 (尺寸为 $\Phi 320 \text{ mm} \times 430 \text{ mm}$), 试验测试系统示意图如图 3 所示。试验中采用量程为 6.89 MPa、响应时间 $t \leq 1 \mu\text{s}$ 的压电式压力传感器(型号 113B24, 美国 PCB 公司)布设于爆炸容器壁, 用于测量不同低压条件下 TNT 内爆产生的准静态压力。试验过程中, 为避免强冲击波及破片飞散对传感器造成损伤, 将传感器以导孔方式安装, 并在其前方加装导流罩进行保护^[16]。试验采用柱形压装 TNT 药柱 (装药质量为 3.45 g) 作为爆炸装药, 为减小雷管装药对试验结果的影响, 选用小型雷管 (尺寸 $\Phi 3 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$) 进行 TNT 炸药的起爆。试验通过真空泵抽排空气, 构建 $p_a = 101.332$ 、80、60 和 40 kPa 的不同试验压力环境。

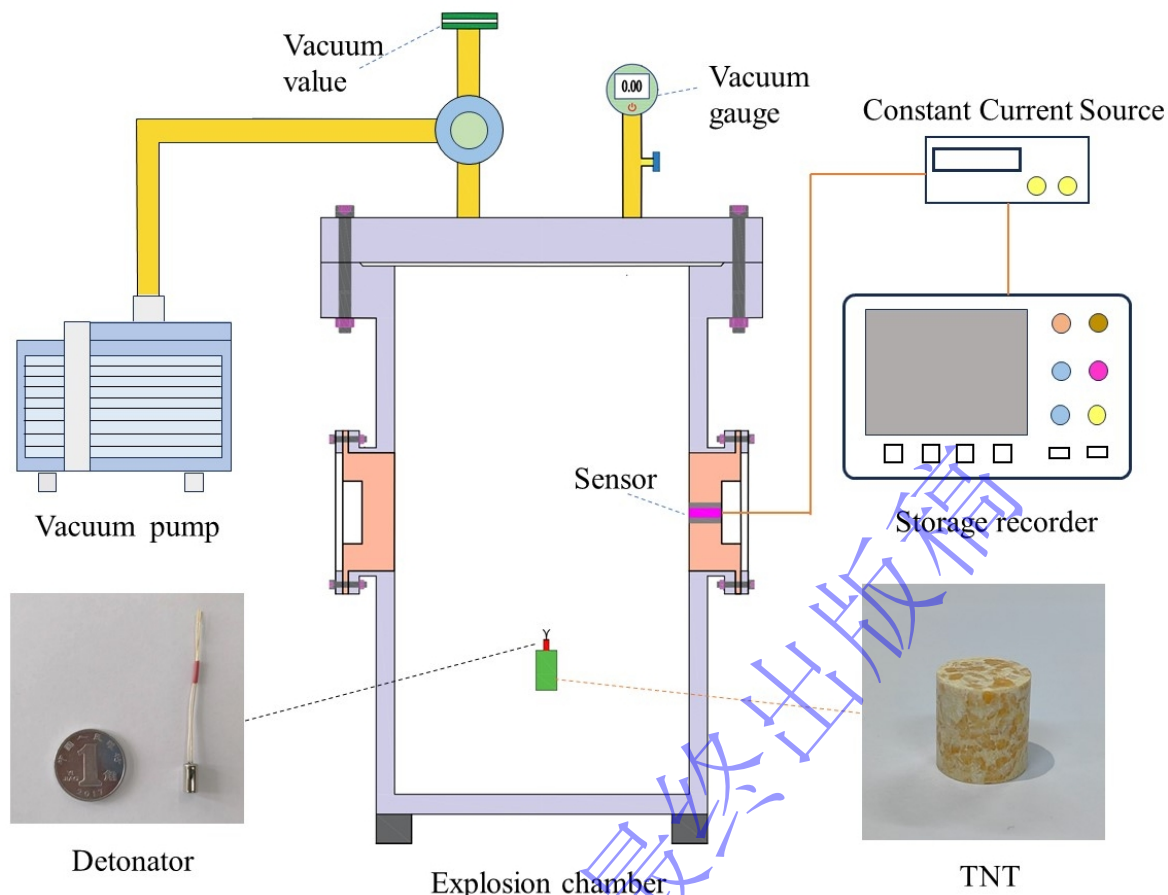


图3 试验测试系统

Fig. 3 Experimental system

3 数值模拟

3.1 有限元模型

采用 AUTODYN 有限元软件，使用 ALE 算法模拟不同低压 ($p_a=101.332、80、60、40$ kPa) 密闭空间 TNT 内爆过程。根据图 3 的柱形密闭爆炸容器特点，建立了二维轴对称有限元模型，如图 4 所示。模型包含空气域、TNT 炸药以及 4340 钢材料爆炸容器。空气采用欧拉网格进行划分，其尺寸为 $510\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ (长度 \times 高度)。爆炸容器壁厚 10 mm ，采用拉格朗日网格进行划分，网格尺寸为 5.0 mm 。

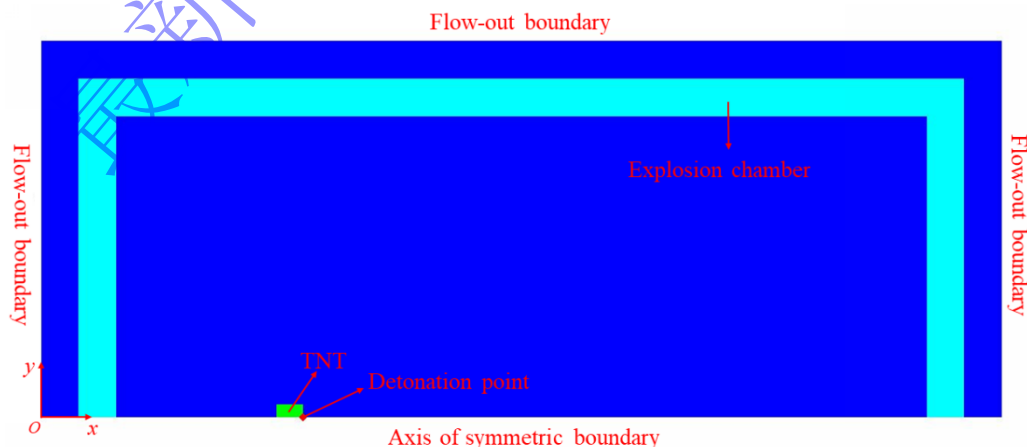


图4 数值模拟模型

Fig. 4 Numerical simulation model.

3.2 材料参数

4340 钢材料采用 Johnson-Cook 本构方程进行描述, 其表达式为^[17]:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \varepsilon^*)(1 - T^{*m}) \quad (8)$$

式中: σ 为 Von Mises 等效应力。A, B, C, m 和 n 是材料相关常数。 ε_p 为等效塑性应变, ε^* 为等效塑性应变率。 $T^* = (T - T_{\text{room}})/(T_{\text{melt}} - T_{\text{room}})$ 是无量纲温度, T 为绝对温度, T_{room} 为参考温度, T_{melt} 为材料的熔点。4340 钢材料的 Johnson-Cook 本构方程参数取自 AUTODYN 软件标准材料模型库^[18]。

空气采用理想气体 (ideal-gas) 状态方程进行描述^[18]:

$$p_a = (\gamma_a - 1)\rho_a e_a \quad (9)$$

式中, p_a 为环境压力, γ_a 为空气的绝热指数, ρ_a 为空气密度, e_a 为空气的初始比内能。

对温度不变的低压环境, 其环境压力 p_a 主要取决于空气密度 ρ_a ^[19]。根据式(9), 通过调节空气密度 ρ_a 即可实现不同环境压力 p_a 。表 3 列出了不同环境压力 p_a 所对应的空气密度 ρ_a , 以及对应的氧气含量 w_{O_2} 。

表 3 不同环境压力下的空气参数

Table 3 Air parameters at various ambient pressures

p_a /(kPa)	ρ_a /(kg·m ⁻³)	w_{O_2} /(mol·m ⁻³)
101.332	1.225	9.374
80	0.967	6.770
60	0.725	5.063
40	0.483	3.385

炸药 TNT 采用 Jones-Wilkins-Lee(JWL)状态方程进行描述, 其表达式为^[13]:

$$P = A(1 - \frac{\omega}{R_1 v})e^{-R_1 v} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 v})e^{-R_2 v} + \frac{\omega E}{v} \quad (10)$$

式中, P 为爆轰产物压力, v 为爆轰产物的相对比容, A, B, R₁, R₂, ω 为试验确定的拟合参数, E 为炸药单位体积内能。炸药 TNT 的 JWL 参数取自 AUTODYN 软件标准材料模型库^[19], 相关参数如表 4 所示。

表 4 TNT 的 JWL 状态方程参数^[16]

Table 4 JWL equation of state parameters for TNT^[16]

ρ_0 /(g·cm ⁻³)	D_{CJ} /(m·s ⁻¹)	p_{CJ} /(GPa)	A/(GPa)	B/(GPa)	R_1	R_2	ω	E/(GPa)
1.63	6930	21.0	371.2	3.231	4.15	0.95	0.3	7.0

值得注意的是, 采用式(10)的 JWL 状态方程描述 TNT 炸药的爆炸释能过程时, 并没有考虑爆轰产物与周围空气中氧气的后燃反应过程。TNT 作为典型的负氧平衡炸药, 其爆轰产物会与空气中的氧气发生后燃反应。如果仿真模型中忽略后燃效应, 会给准静态压力仿真结果带来一定的影响^[20]。因此, 为更精确地模拟不同低压条件下 TNT 内爆过程, 利用结合 AUTODYN 有限元软件的额外能恒速率释放模型^[17], 将 Chemkin 软件计算得到的不同低压条件下 TNT 内爆后燃能加入 TNT 炸药的 JWL 状态方程, 模拟不同低压环境下 TNT 的内爆释能过程。

3.3 网格尺寸的收敛性分析

使用 AUTODYN 有限元软件进行低压环境下 TNT 炸药内爆数值模拟前, 需要进行网格尺寸的收敛性分析, 以确定仿真模型合理的网格尺寸。数值模拟中采用 0.5、1.0、2.0 和 3.0 mm 四种网格尺寸进行收敛性分析, 获得了测点 1 (215 mm, 40 mm) 和测点 2 (215 mm, 60 mm) 位置处的典型压力-时程曲线, 如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 随网格尺寸逐步增大, 监测位置冲击波峰值压力减小、压力上升段斜率持续下降, 冲击波压力-时程曲线逐渐失真。对比图中 2 个不同测点处不同网格尺寸下的冲击波压力-时程曲线, 可以认为网格尺寸在 0.5~1.0 mm 尺寸范围内的数值模拟是收敛的。因此, 选择 1.0 mm 网格尺寸进行空气域和 TNT 炸药的建模, 既能够保证计算精度, 同时有效控制模型规模与计算耗时。

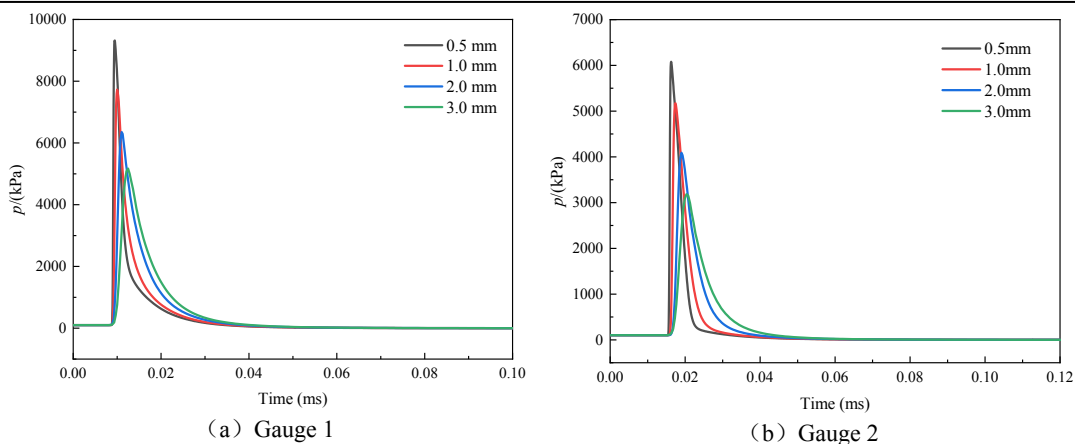


图 6 不同网格尺寸下各测点压力-时程曲线的结果对比

Fig.6 Comparison of pressure-time curves at different measuring points with different mesh sizes

4 结果与讨论

4.1 低压下 TNT 爆轰产物的后燃过程

通过 Chemkin 软件模拟得到不同低压下 TNT 爆轰产物各组分在后燃过程中随时间的变化规律, 如图 7 所示。从图 7 可以看出, 随着后燃反应的进行, 不同环境压力下的产物组成表现出明显差异。环境压力下降时, CO 生成量增多, CO₂生成量相应减少。环境压力从 101.332 kPa 降至 40 kPa 时, CO 摩尔数由 0.011 mol 增加为 0.023 mol, CO₂摩尔数由 0.096 mol 减少为 0.079 mol。在低压环境中, 空气中的氧气含量有限, 抑制了 C 向 CO₂的完全氧化, 从而导致 CO₂含量减少, CO 含量增多。这表明, 低压环境是影响 TNT 爆轰产物后燃反应的重要因素。环境压力降低氧气浓度下降, 减缓了整体后燃反应动力学, 阻碍了爆轰产物可燃组分的完全氧化, 进而会导致低压环境下 TNT 爆炸后燃反应释放的能量降低。

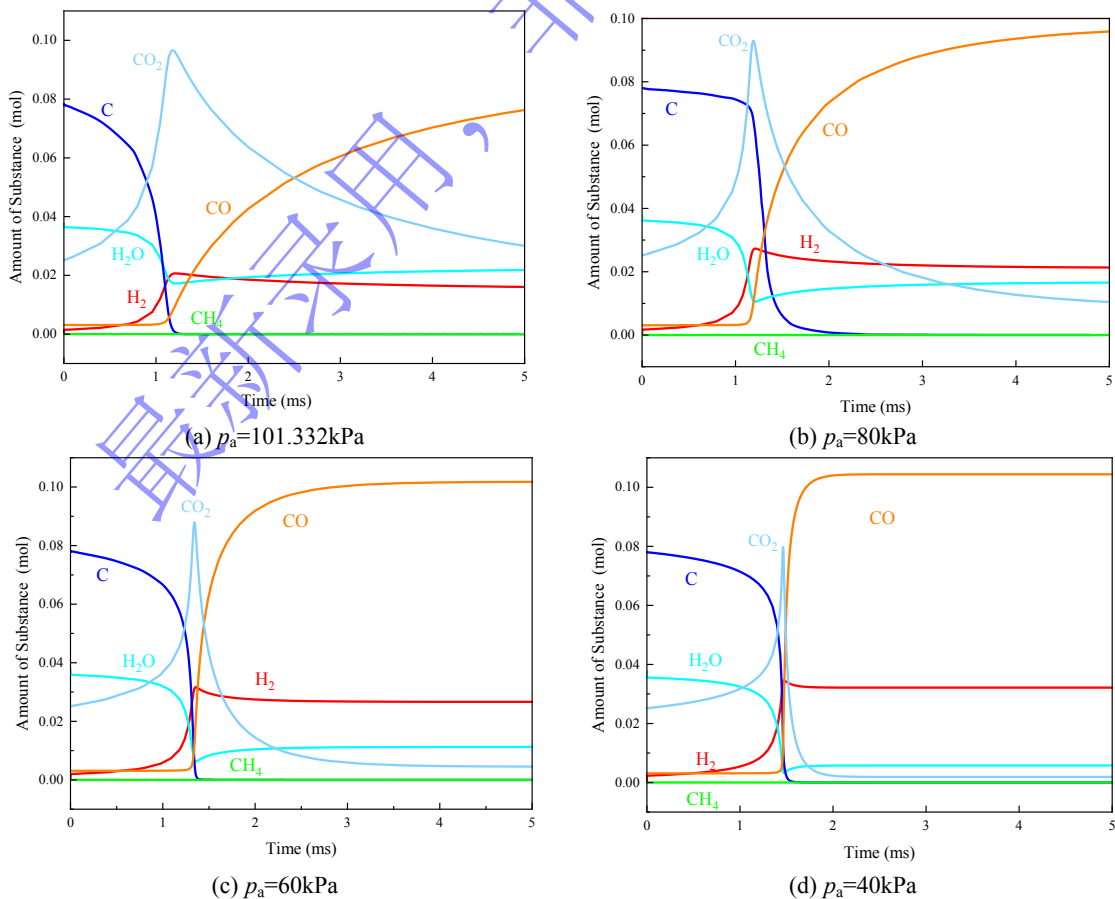


图 7 不同环境压力下爆轰产物含量-时程图

Fig. 7 Time histories of mole amount for detonation products under different ambient pressures.

通过 Chemkin 软件模拟计算出不同环境压力下的 TNT 爆轰产物后燃能, 如图 8 所示。从图 8 可以看出, 环境压力变化对 TNT 爆炸后燃能有着重要影响。当环境压力从 $p_a = 101.332$ kPa 降至 $p_a = 40$ kPa 时, 后燃能由 $\Delta E_a = 8695.6$ kJ/kg 下降至 $\Delta E_a = 6630.3$ kJ/kg, 降幅达 23.7%。这表明, 低压环境影响爆轰产物的反应动力学与氧化完全性, 后燃能随环境压力的下降而降低。后续使用 AUTODYN 有限元软件进行不同低压条件下 TNT 炸药内爆仿真时, 将图 8 中的不同低压下 TNT 内爆后燃能加入到 AUTODYN 软件的额外能恒速率释放模型中, 并与不考虑后燃反应的 TNT 低压密闭空间内爆准静态压力进行对比模拟。

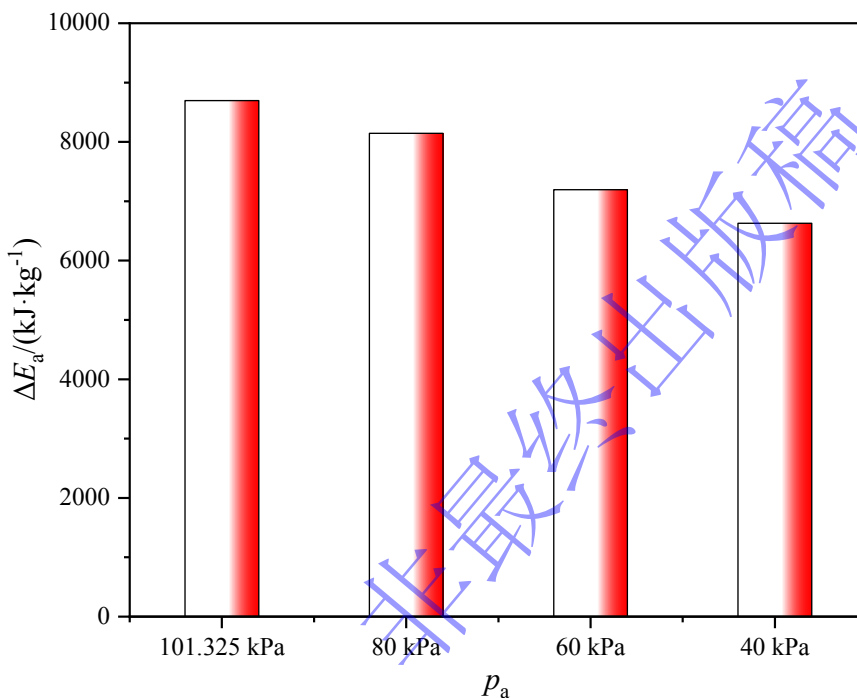


图 8 不同低压环境下 TNT 后燃能

Fig. 8 Afterburning energy of TNT under different low-pressure conditions

4.2 准静态压力

为研究初始环境压力对 TNT 炸药内爆准静态压力的影响, 考虑 TNT 的爆轰反应过程和不同低压下 TNT 内爆后燃反应过程, 基于能量守恒原理建立了低压条件下 TNT 内爆准静态压力的理论预测模型。计算获得的 TNT 炸药在不同低压 ($p_a = 101.332$ 、80、60、40 kPa) 密闭环境下的内爆准静态压力。采用 AUTODYN 有限元软件分别考虑和不考虑 TNT 爆轰产物的后燃反应, 数值模拟获得不同低压下 TNT 内爆冲击波压力-时程曲线。通过自主设计的可调真空度爆炸容器, 试验获得了不同低压条件下 TNT 内爆的压力-时程曲线。将理论计算、数值模拟与试验结果进行综合对比, 如图 9 所示。从图 9 可以看出, 试验获得的不同低压下压力-时程曲线具有相同的变化规律。冲击波压力首先快速上升, 约在 5 ms 时达到峰值并缓慢下降, 下降后的 15 ms 内气体压力回升, 45 ms 内达到稳定准静态压力, 后又开始缓慢下降。最初的压力上升是炸药爆炸引起的, 缓慢下降是由于爆轰产物在密闭空间内扩散导致的。爆轰产物在扩散过程中与爆炸容器内的氧气发生后燃反应释放后燃能, 导致压力上升至准静态压力峰值。随着后燃反应结束以及爆炸容器壁的热传导造成热量散失, 压力进入缓慢衰减阶段。分析图 9 不同低压条件下准静态压力试验数据, 可以发现准静态压力随环境压力的下降而降低, 环境压力从 $p_a = 101.332$ kPa 降至 $p_a = 40$ kPa 时, 准静态压力降低了 23.3%。这主要是因为, 在低压环境下, 氧气浓度下降, 限制了爆轰产物与氧气的后燃反应, 导致后燃能降低, 进而使得 TNT 内爆释放总能量的下降, 准静态压力也随之降低。

分析图 9 可知, 基于最小吉布斯自由能原理, 结合 BKW 与 COWAN 状态方程计算得到 TNT

的爆轰能。同时，考虑 TNT 爆轰产物后燃能，基于能量守恒原理建立了低压条件下 TNT 内爆准静态压力的理论预测模型。理论预测模型计算获得的 TNT 在不同低压密闭环境下内爆准静态压力与试验准静态压力峰值吻合较好，平均误差为 5.9%。这说明考虑 TNT 的爆轰过程和后燃过程，基于能量守恒原理建立的理论模型能够较好地预测低压条件下的 TNT 内爆准静态压力。

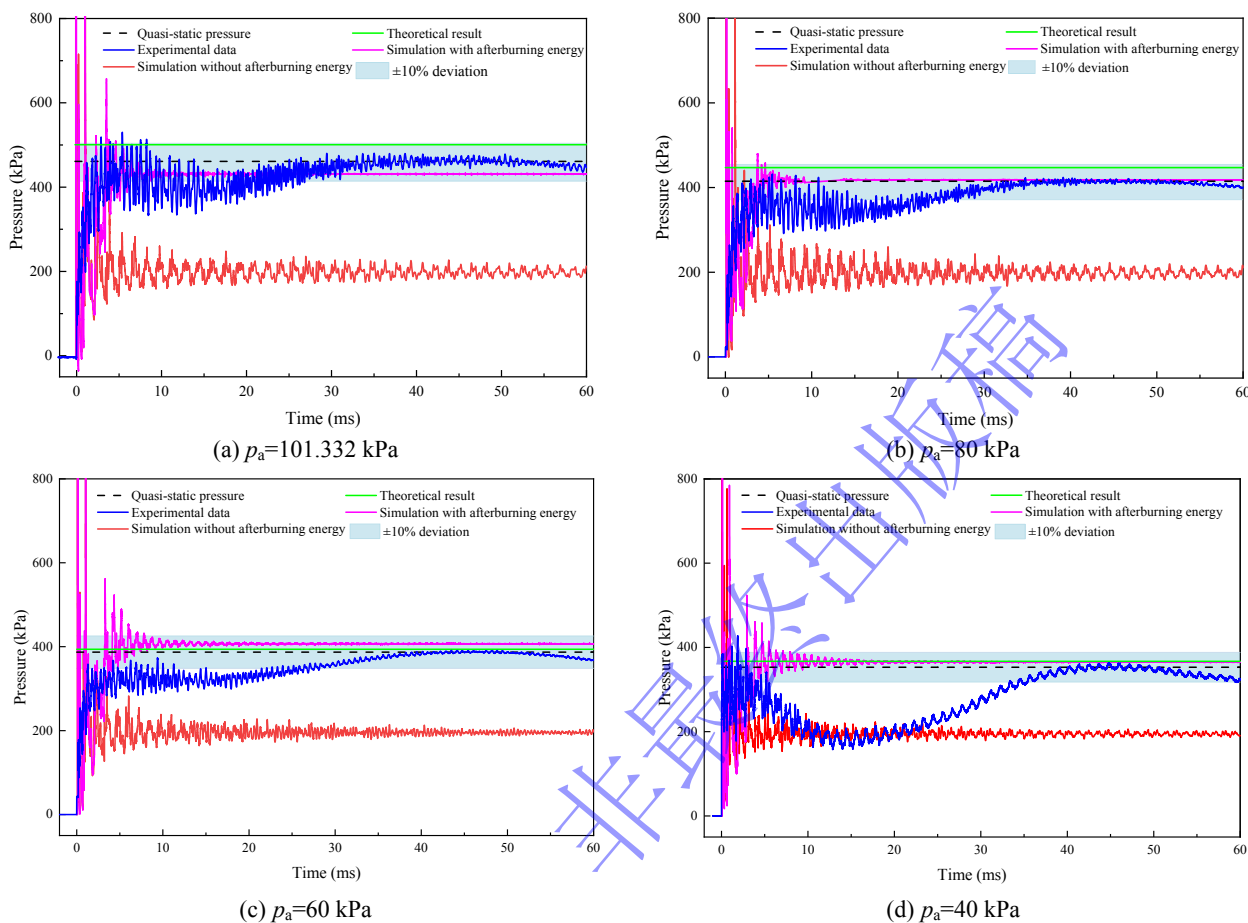


图9 准静态压力的理论预测、数值模拟与试验结果对比

Fig. 9 Comparison of theoretical predictions, numerical simulations, and experimental results for quasi-static pressure.

值得注意的是，通过图9的数值模拟还比较了不同低压条件下考虑和不考虑后燃能对 TNT 内爆释能过程的影响。结果表明，不考虑后燃能时不同低压条件下数值模拟预测的 TNT 内爆准静态压力与试验准静态压力峰值的平均误差高达 49.4%。考虑不同低压条件下 TNT 内爆后燃能后，平均误差降低至 2.7%。说明后燃反应是 TNT 密闭空间内爆释能的重要部分，TNT 低压密闭空间内爆有限元数值仿真过程，有必要考虑爆轰产物后燃反应的影响。

5 结论

本文通过能量守恒原理，Chemkin 软件，AUTODYN 有限元软件和自制可调真空度的爆炸容器内爆试验，深入探讨了不同低压条件 ($p_a = 101.332、80、60、40$ kPa) 对 TNT 内爆后燃反应及准静态压力的影响规律，主要结论如下：

(1) 考虑不同低压条件下 TNT 的爆轰能与后燃能，基于能量守恒原理建立了低压条件下 TNT 内爆准静态压力的理论预测模型。并通过自制可调真空度的爆炸容器内爆试验结果验证模型的预测准确性，模型预测平均误差为 5.9%。

(2) 通过 Chemkin 软件计算获得不同低压下 TNT 爆轰产物后燃能，结合 AUTODYN 软件中的额外能恒速率释放模型，提出了不同低压环境下的 TNT 炸药密闭空间内爆的数值模拟方法。数值模拟中，后燃能是 TNT 内爆释能的关键影响因素。未考虑后燃能的准静态压力模拟结果与试验数据的平均误差为 49.4%，考虑后燃能平均误差降低至 2.7%。

(3) 环境压力的下降抑制 TNT 内爆后燃反应, 导致 TNT 在密闭空间内爆准静态压力的降低。随着初始环境压力由 101.325 kPa 下降到 40 kPa 时, 后燃能下降了 23.7%, 准静态压力降低了 23.3%。

参考文献

- [1] JIN J, HOU H L, Chen P Y, et al. Experimental study on the combined damage of liquid cabin structure subjected to charge explosion with preset fragments[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 130(8): 19-26.
- [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. Review on explosion in confined space [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2013, 21(4): 539-546.
- [3] 李瑞, 李孝臣, 汪泉, 等. 低温和低压环境下炸药爆炸冲击波的传播特性[J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(02): 18-28.
LI R, LI X C, WANG Q, et al. Propagation characteristics of blast wave in diminished ambient temperature and pressure environments [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(2): 18-28.
- [4] 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.
- [5] ZHONG W, TIAN Z, WANG H. Quasi-static pressure calculations of confined explosions [J]. *Emerging Materials Research*, 2015, 4(1): 32-41.
- [6] EDRI I, GRISARO H Y, YANKELEVSKY D Z. TNT equivalency in an internal explosion event [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 374: 248-257.
- [7] 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.
- [8] ZHOU H, YUE X S, ZHENG C Q, et al. Dynamic behavior of steel plates subjected to confined blast loading considering afterburning effect [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 188: 104934.
- [9] ORNELLAS D L. Calorimetric determinations of the heat and products of detonation for explosives: October 1961 to April 1982 [R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1982.
- [10] KUHL A L, BELL J B, BECKNER V E, et al. Gasdynamic model of turbulent combustion in TNT explosions [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 2177-2185.
- [11] ZHOU H, ZHENG C Q, YUE X S, et al. TNT equivalency method in confined space based on steel plate deformation [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 178: 104587.
- [12] FELDGUN V R, KARINSKI Y S, EDRI I, et al. Prediction of the quasi-static pressure in confined and partially confined explosions and its application to blast response simulation of flexible structures[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 90(4): 46-60.
- [13] DOBRATZ B M, CRAWFORD P C. LLNL Explosive Handbook Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants [M]. California: Lawrence Livermore National Laboratory, 1985.
- [14] 傅献彩. 物理化学(第五版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
FU X C. *Physical Chemistry (5th ed.)* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2005.
- [15] CHASE M W, Jr. NIST- JANAF thermochemical tables (4th ed.) [M]. Washington: American Chemical Society, 1998.
- [16] 李芝绒, 翟红波, 闫潇敏, 等. 一种温压内爆炸准静态压力测量方法研究[J]. *传感技术学报*, 2016, 29(2): 208-212.
LI Z R, ZHAI H B, Yan X M, et al. Research on a quasi-static pressure measurement method for

- warm-pressure inner explosion[J]. *Journal of Sensors and Actuators*, 2016, 29(2): 208-212.
- [17] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]//*Proceeding of the 7th international symposium on ballistics*, Hague, Netherlands, 1983: 541-547.
- [18] COWLER M S, VIRNBAUM N K. AUTODYN user's manual[M]. Oakland: Century Dynamics Inc., 1989.
- [19] IZADIFARD R A, FOROUTAN M. Blast wave parameters assessment at different altitude using numerical simulation[J]. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 2010, 34(1): 25-41.
- [20] 辛春亮, 徐更光, 刘科种, 等. 考虑后燃烧效应的 TNT 空气中爆炸的数值模拟[J]. *含能材料*, 2008, 16(2): 160-163.
- XIN C L, XU G G, LIU K Z, et al. Numerical simulation of TNT explosion with post-detonation burning effect in Air[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2008, 16(2): 160-163.

Pressure Characteristics of TNT Internal Explosions under Reduced Ambient Pressure

LI Rui¹, SUN Rui¹, LIU Keyang¹, HU Minghang¹, CHEN Yajing¹, WANG Quan¹, LI Xuejiao¹, XU Xiaomeng¹, CUI Xiaorong²

(1. *School of Chemical and Blasting Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;*

2. *Hongda Civil Explosives Group Co., Ltd., Guangzhou 510623, Guangdong, China*)

Abstract: To investigate the quasi-static pressure characteristics of TNT internal explosions in confined spaces under low-pressure (LP) conditions, this study incorporates both the detonation process and the afterburning reactions of TNT under various ambient pressure conditions. Based on energy conservation, a theoretical model was developed to predict the quasi-static pressure generated by TNT internal explosions under LP conditions. The Chemkin software was used to simulate the afterburning reactions of TNT detonation products under LP conditions. By incorporating an additional energy release model into the AUTODYN finite element software, a numerical simulation framework was developed to characterize the energy release behavior of TNT internal explosions in LP environments. To validate the accuracy of the theoretical model and numerical simulations, TNT internal explosion experiments were conducted under various LP conditions using a self-designed sealed explosion vessel with an adjustable vacuum degree. The results indicate that the proposed theoretical model can accurately predict the quasi-static pressure generated by TNT internal explosions under LP conditions, with an average error of 5.9% relative to the experimental data. The finite element simulation results incorporating afterburning energy show good agreement with the experimental results, with an average error of only 2.7%. As the ambient pressure decreases, the oxygen content in the surrounding air is reduced, thereby inhibiting the afterburning reactions of the detonation products and further lowering the quasi-static pressure. When the ambient pressure decreased from 101.332 kPa to 40 kPa, the quasi-static pressure was reduced by 23.3%.

Keywords: low-pressure conditions; afterburning reaction; quasi-static pressure; confined space; internal explosions