

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0218

# 活性材料与炸药环状复合内爆的 准静态压力计算方法\*

朱剑雷, 韩磊, 方展翔, 徐豫新

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 为了预测密闭环境活性材料与炸药环状复合后内爆准静态压力, 基于已有的考虑后燃效应的碳氢氧氮炸药内爆准静态压力计算模型, 提出了一种适用于活性材料与炸药环状复合内爆的准静态压力计算模型; 然后开展了活性材料与炸药复合装药和含铝炸药的內爆试验, 利用试验获得的数据对模型精度进行了验证; 最后对比分析两种炸药内爆准静态压力试验结果, 将计算模型推广至一般含铝炸药, 并利用文献数据进行了验证。研究表明, 所建立的考虑后燃的复合炸药准静态压力修正模型结果与试验数据、文献数据吻合较好, 平均误差为 9.1%, 最大误差为 15.8%; 对一般含铝炸药的計算结果平均误差为 12.1%, 最大误差 20.6%。

**关键词:** 内爆; 准静态压力; 后燃效应; 活性材料; 复合装药

中图分类号: O389

国标学科代码: 130.3520

文献标志码: A

## Calculation method for quasi-static pressure of annular composite implosion of active materials and explosives

ZHU Jianlei, HAN Lei, FANG Zhanxiang, XU Yuxin

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081)

**Abstract:** In order to predict the quasi-static pressure of internal explosion in a closed environment composed of aluminum containing active materials and explosive rings, this paper summarizes the existing quasi-static pressure calculation models for hydrogen, oxygen, and nitrogen explosives considering post ignition effects, and proposes an optimization method for the quasi-static pressure calculation mode applicable to internal explosion of aluminum containing composite charges. After obtaining the ideal maximum reaction heat using the Geiss theorem, this method uses a parameter correction related to the aluminum containing composite explosive itself. Taking Herzog as an example, a specific prediction formula is provided. Then, composite charges of active materials and explosives, as well as aluminum containing explosives, were tested for implosion. Typical overpressure curves were provided, and the method for obtaining quasi-static pressure in the tests and related sources were explained. The experimental data was compared and analyzed with the quasi-static pressure results calculated by the established optimization model, demonstrating the reliability of the modified model. At the same time, the internal explosion results of two types of explosives were compared, and the calculation model was extended to general aluminum containing explosives. The accuracy of the model was verified using quasi-static pressure data from relevant literature, and the reasons for errors and possible improvement methods were analyzed. The research results show that the established quasi-static pressure correction model for post combustion of composite explosives is in good agreement with experimental and literature data, with an average error of 9.1% and a maximum error of 15.8%; The average error of the calculation results for aluminum containing explosives is 12.1%, with a maximum error of 20.6%.

**Keywords:** implosion; quasi static pressure; post combustion effect; active materials; composite charge

\* 收稿日期: 2024-07-02; 修回日期: 2024-09-15

第一作者: 朱剑雷(2000—), 男, 硕士研究生, 931517800@qq.com

通信作者: 徐豫新(1982—), 男, 博士, 准聘教授, xuyuxin@bit.edu.cn

内爆压力载荷包含准静态压力和冲击波超压, 其中由炸药内爆产生的准静态压力虽然远小于冲击波的超压, 但由于其加载时间长, 能给结构以及内部设施造成持续的震荡与冲击, 引起更大程度的毁伤。为了评估准静态压力对结构的毁伤效果, 需要对准静态压力进行分析, 其中炸药内爆的后燃烧效应在准静态压力计算中需要被重点关注。Kuhl 等<sup>[1-2]</sup>进行了冲击分散燃料(shock-dispersed-fuel, SDF)与铝、TNT 的复合装药内爆试验, 探讨了燃烧室容积和几何形状对后燃烧完全度的影响。静态压力表显示在空气中爆炸的压力和脉冲比在氮气中爆炸记录的要大得多, 说明了后燃烧效应对准静态压力的显著影响。Feldgun 等<sup>[3]</sup>与 Edri 等<sup>[4]</sup>进行 TNT 的全尺寸内爆试验, 并将后燃分为完全与不完全两种情况, 给出了准静态压力关于药量体积比的详细的预测模型; 李旭东<sup>[5]</sup>在此基础上简化了计算模型, 并利用试验验证了 TNT 和 RDX 内爆在完全后燃烧下的准静态压力计算公式的准确性; 王等旺等<sup>[6]</sup>、王鑫等<sup>[7]</sup>、张玉磊等<sup>[8]</sup>进行了 TNT 在氧气不充足下的内爆试验, 根据试验数据拟合了 TNT 内爆准静态压力计算公式; 钟巍等<sup>[9-11]</sup>以 TNT 为例系统地研究了后燃烧现象, 提出了温度、准静态压力计算模型; 徐维铮等<sup>[12]</sup>在钟巍等<sup>[9-11]</sup>的研究基础上, 考虑了初始空气内能, 建立了准静态压力与药量体积比的关系。上述研究主要以 TNT 等传统碳氢氧氮炸药为对象, 研究了内爆后燃烧效应对准静态压力的影响, 并通过试验拟合与理论推导给出了内爆准静态压力预测模型, 为后续其他炸药的准静态压力理论预测模型的建立奠定基础。

相比于 TNT 等传统碳氢氧氮炸药, 含铝炸药能量密度高、爆热大, 被广泛用于打击舰船舱室、建筑房间等具有密闭空间的目标。在含铝炸药理论研究中, 李世伟等<sup>[13]</sup>以 RDX 为对象研究了铝含量对含铝炸药爆热的影响, 拟合了铝氧摩尔比与炸药爆热的方程; 李媛媛等<sup>[14]</sup>测量了不同铝粉粒径的含铝炸药在不同环境中的爆热; 白玉<sup>[15]</sup>通过试验和仿真给出了自由场中的含铝炸药爆炸场的温度分布模型。在试验研究上, 张玉磊等<sup>[16]</sup>进行了 TNT 炸药与某温压炸药内爆的对比试验, 结果显示温压炸药的各威力参量对比同质量 TNT 都有较大提升; 蒋欣利等<sup>[17]</sup>利用 LiF 替代温压炸药中的铝粉进行内爆对照试验, 研究了铝粉对温压炸药内爆的威力增强效果; 李媛媛等<sup>[18]</sup>开展不同铝含量含铝炸药的准静态压力内爆试验, 研究了炸药爆炸场的响应规律; 段晓瑜<sup>[19]</sup>、卢广照等<sup>[20]</sup>分别进行了以 RDX、CL-20 为基的含铝炸药的准静态压力内爆试验, 获得了不同含铝量下的准静态压力数据。目前含铝炸药的研究领域, 在试验上大多进行了含铝炸药与一般炸药的威力对比, 定性分析了铝粉对炸药的威力增强效果; 在理论研究中存在一些通过试验与仿真数据拟合得到的温度分布模型与爆热模型, 但缺少对内爆准静态压力的理论预测模型。

活性材料与炸药环状复合装药作为复合炸药, 可以基于战斗部需求, 选取组合不同模块装药, 从而在提高炸药爆热的同时, 提升装药的安定性。以含铝的活性材料为例: 阳世清等<sup>[21]</sup>测试了 Al/PTFE 的理化性能、热分解性能和力学性能; 刘瑞华等<sup>[22-23]</sup>分析了  $Al_2O_3$ /PTFE 的热化学反应性能, 阐述了多种铝基含氟铝热体系反应机理, 并且借助热分析推断得出 Al/PTFE 的宏观反应过程。聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)作为一种新型的含能材料, 它点火温度低、能量密度高, 是一种重要的工业含能材料, 具有较好的应用前景。上述对活性材料 Al/PTFE 理化性能与反应机理的研究为其在复合装药上的应用提供了理论支撑。

综上所述, 目前含铝炸药、活性材料复合装药的反应机理复杂, 缺少相关炸药的准静态压力预测模型。本文针对上述问题, 以具有代表性的活性材料 Al/PTFE 为对象, 首先分析一般碳氢氧氮炸药后燃烧效应对内爆准静态压力的影响, 归纳一般炸药的准静态压力预测模型, 构建一种活性材料与炸药环状复合装药内爆的准静态压力计算修正模型; 开展活性材料与炸药环状复合装药、含铝炸药两种炸药的准静态压力内爆试验, 验证模型的精度, 并且在对比分析两种炸药的试验结果后, 推广模型至一般含铝炸药, 并整合文献中的相关数据进行验证。

## 1 内爆准静态压力计算模型优化

### 1.1 现有计算模型

密闭空间内炸药爆炸的能量释放包括爆轰阶段和后燃烧阶段: 爆轰阶段炸药分子被外界能量活化

后, 分子运动速度增大, 分子间碰撞增强, 使得炸药分子破裂, 释放出活性基团, 他们之间相互发生剧烈化学反应, 释放大量的气体, 同时产生大量的热量导致气体产物温度上升并急剧绝热膨胀对外界做功; 当爆轰产物膨胀后, 由于爆轰产生的产物中包含多种易燃物, 如一氧化碳、甲烷、碳等, 这些易燃物与空气充分混合后, 在高温高压的环境下, 将会与空气中的氧气发生化学反应, 燃烧放热, 其化学能转换为系统的热能, 最终表现为系统的准静态压力。具体的:

$$E = E_1 + E_2 = mQ + \sum_{i=1}^n Q_i \quad (1)$$

式中:  $E$  为炸药释放的能量,  $Q$  为炸药爆热,  $m$  为炸药质量,  $Q_i$  为后燃烧过程中每一化学反应的反应热,  $n$  为后燃烧发生的反应数目。

Edri 等<sup>[4]</sup> 基于理想气体方程提出了一种考虑后燃烧情况下的准静态压力计算模型。在只由参与反应的物质组成的系统中, 所有产生的热量都用于将产物加热到更高的温度, 炸药释放的能量  $E$  完全转换为系统增加的能量  $\Delta Q$ , 则:

$$\Delta Q = n_{\text{tot}} \int_{T_0}^{T_p} C_p dT \quad (2)$$

式中:  $n_{\text{tot}}$  为爆轰产物物质的量,  $C_p$  为爆轰产物定压摩尔热容,  $T_0$  为初始温度,  $T_p$  为恒定压力下的温度。

利用理想气体状态方程描述爆炸产物:

$$pV = n_{\text{tot}}RT_p = n_{\text{tot}}R\gamma T_p \quad (3)$$

式中:  $V$  为容器体积,  $R=8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ,  $T_p$  为恒定体积下的温度,  $\gamma$  为爆轰产物绝热指数。最终, 炸药释放的能量表现为准静态压力  $p$ :

$$p = T_p \gamma R n_{\text{tot}} / V \quad (4)$$

李旭东<sup>[5]</sup> 根据 Edri 等<sup>[4]</sup> 的研究简化了计算模型。首先利用工程上凝聚炸药爆轰产物的 NMQ 计算方法确定相关的化学反应式与化学反应热, 从而得到各爆轰产物物质的量, 取高温状态下混合气体的绝热指数为 1.25, 然后计算系统最终的准静态压力:

$$p = \frac{[E/(n_{\text{tot}}C_p) + T_0]\gamma R n_{\text{tot}}}{V} \quad C_p = \frac{1}{n_{\text{tot}}} \sum_{i=1}^n C_{pi} n_i \quad (5)$$

式中:  $C_{pi}$  和  $n_i$  分别为第  $i$  种爆轰产物的定压摩尔热容和物质的量。常见气体定压比热见表 1<sup>[11]</sup>。

表 1 常见气体定压比热容<sup>[11]</sup>

Table 1 Common gas specific heat capacity at constant pressure<sup>[11]</sup>

气体	温度/K	定压比热容/(J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	气体	温度/K	定压比热容/(J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
CO <sub>2</sub>	300~2000	37.129	CO	298~2500	29.121
H <sub>2</sub> O	298~2500	33.577	O <sub>2</sub>	289~1500	29.359
N <sub>2</sub>	298~2500	29.121	CH <sub>4</sub>	291~1500	35.715

## 1.2 分析与修正

目前对内爆准静态压力计算模型研究都局限于一般碳氢氧氮炸药, 而将所得到的计算模型运用于 Al/PTFE 活性材料与炸药的环状复合装药时得到的结果偏差极大, 需要对现有计算模型进行修正。而含铝炸药反应机理理论二次反应机理认为: 铝粉在炸药爆轰时并未参与爆轰反应, 反而稀释了炸药的浓度, 降低了炸药释放的能量。因此, 已有模型并不能满足对含铝炸药的精度要求。本文参考含铝炸药的二次反应机理, 考虑 Al/PTFE 与炸药环状复合装药中铝含量对反应热的稀释, 假设反应热的释放程度与炸药含量百分比  $\mu$  存在线性关系, 则实际释放的能量为

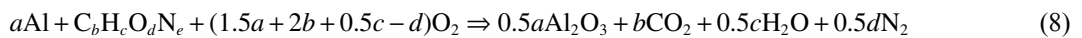
$$E_0 = \mu E_{\max} \quad (6)$$

式中:  $E_0$  为实际释放能量,  $E_{\max}$  为最大反应热。

从而利用  $\mu$  修正炸药释放的能量  $E$ , 可以将式 (5) 改写为

$$p = \frac{[E_0/(n_{\text{tot}}C_p) + T_0]\gamma R n_{\text{tot}}}{V} = \frac{[\mu E_{\max}/(n_{\text{tot}}C_p) + T_0]\gamma R n_{\text{tot}}}{V} \quad (7)$$

在实际作战中, 对于舰艇、建筑等目标的打击, 一般使用半穿甲爆破型战斗部。首先利用战斗部动能击穿目标装甲结构, 随后炸药在内部爆炸形成冲击波对结构造成毁伤。炸药的后燃烧反应的程度会影响炸药的总释放能量, 因此为了较准确地计算内爆准静态压力, 需要对后燃烧反应程度进行分析。受到炸药当量和空腔体积的影响, 炸药会出现完全后燃烧与不完全后燃烧两种情况, 所以药量和空腔体积之比存在一个临界值  $\varphi$ , 低于该临界值时炸药可以完全后燃, 密闭空间内的氧气恰好全部消耗, 此时反应方程式和临界值表达式分别为:

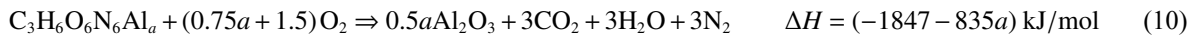


$$\varphi = \frac{0.21M}{V_m(1.5a + 2b + 0.5c - d)} \quad (9)$$

式中:  $M$  为炸药的摩尔质量,  $V_m$  为空气的摩尔体积,  $a$  与炸药铝含量有关,  $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$  与炸药分子式相关, 本文采用的黑索金 (RDX) 炸药化学式为  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_6\text{N}_6$ 。

炸药的放热只与起始和终末状态有关, 与变化途径无关。即只要确定爆轰后的产物和原成分的生成焓, 就可根据盖斯定律得出炸药的爆热,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CO}_2$  与气态  $\text{H}_2\text{O}$  的标准摩尔生成焓分别为 1670、394 和 242 kJ/mol。在氧气足够时, 碳元素、氢元素分别被氧化为二氧化碳和水, 而铝元素可能的产物除了  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 还包含  $\text{AlN}$ , 然而  $\text{AlN}$  的制备不仅需要高温条件及长时间保温<sup>[24]</sup>, 同时由于氧气的过量, 大部分  $\text{AlN}$  产物也会被氧化, 所以实际爆轰后产生的  $\text{AlN}$  极少, 对模型的准确性影响较小。

以  $\text{Al}/\text{PTFE}$  与 RDX 环状复合装药为例, 在氧气足够时的反应方程式为:



所以此时的实际释放能量为

$$E_0 = \mu(1847 + 835a) \text{ kJ/mol} \quad (11)$$

计算得到反应后各种物质的量, 总物质的量以及平均定压比热容:

$$\begin{cases} n_{\text{H}_2\text{O}} = 3n_{\text{RDX}} \\ n_{\text{O}_2} = 0.21n_{\text{air}} - (0.75a + 1.5)n_{\text{RDX}} \\ n_{\text{N}_2} = 0.79n_{\text{air}} + 3n_{\text{RDX}} \\ n_{\text{CO}_2} = 3n_{\text{RDX}} \\ n_{\text{tot}} = (7.5 - 0.75a)n_{\text{RDX}} + n_{\text{air}} \\ C_p = \frac{29.1n_{\text{air}} + n_{\text{RDX}}(255.4 - 22.0a)}{n_{\text{tot}}} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $\mu$ 、 $a$  都由复合炸药的组成决定。

将相关参数代入式 (7), 同时令  $x = n_{\text{air}}$ ,  $y = n_{\text{RDX}}$ , 可以得到预测的准静态压力:

$$p = \frac{0.13(x + 7.5y - 0.75ya)(x + 8.79y - 0.76ya + 213.72y\mu + 96.62y\mu)}{x(x + 8.79y - 0.76ya)} \quad (13)$$

## 2 试 验

进行内爆试验, 测试不同炸药在约束环境中爆炸后的准静态压力。现有研究表明准静态压力载荷峰值仅与炸药质量、舱室内体积有关, 所以试验箱体尺寸参考舰船内部舱室结构使用缩比模型是可行

的, 试验所用箱体内部尺寸为  $1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ , 容积为  $3.375\text{ m}^3$ , 爆炸箱整体的模型图 1 所示。压力测试点设计在爆炸箱体顶部。试验中使用的压力传感器灵敏度  $1\text{ mV/psi}$  ( $0.145\text{ mV/kPa}$ ), 测量范围为  $0\sim 5\text{ kpsi}$  ( $34.475\text{ MPa}$ )。

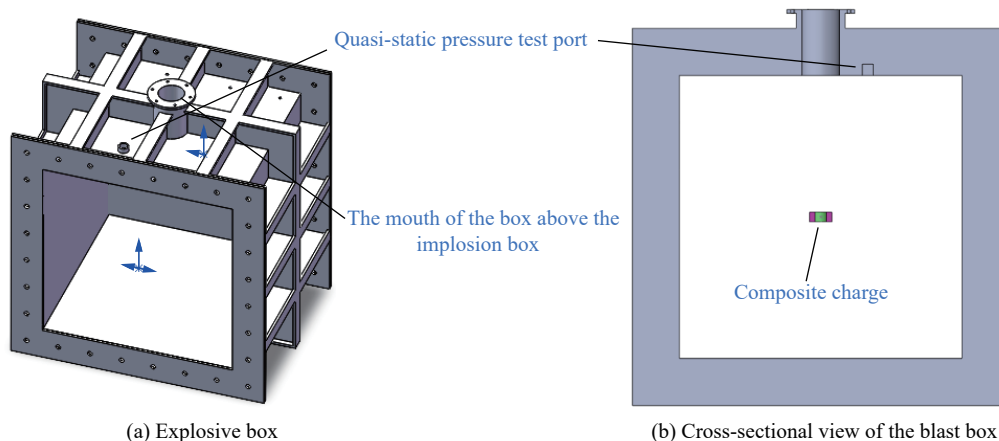


图 1 爆炸箱体模型

Fig. 1 Model of the explosive enclosure

装药结构置于爆炸箱中心, 试验装药分为 2 种, 一种是 JHL-2 含铝炸药, 一种是由中心药柱 JH-14 和含铝外环 Al/PTFE 组合得到的复合装药, 铝粉平均粒径为  $25\text{ }\mu\text{m}$ , PTFE 粒径范围为  $20\sim 70\text{ }\mu\text{m}$ 。其中 JHL-2 炸药和铝粉的质量比为  $65:30$ , JH-14 药柱成分为: 黑索今  $96.5\%$ , 氟橡胶  $3\%$ , 胶体石墨  $0.5\%$ , 圆环复合装药结构见图 2。试验共 4 种工况, 见表 2: 工况 1 和 2 各做两发试验, 起爆方式为上端面中心雷管起爆, 其中工况 1 第一发试验中内爆箱箱口朝上, 装药结构由绳子从上方开口竖直吊至箱体中心, 其余试验内爆箱箱口均朝向侧面, 装药结构固定到木棍上伸至箱体中心。

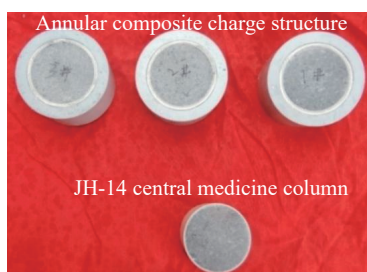


图 2 环状复合装药结构与中心药柱  
Fig. 2 Circular composite charge structure and Central drug column

表 2 试验工况

Table 2 Test conditions

工况	装药	质量/g	质量分数/%		
			Al	RDX	其他
1	JH-14—Al/PTFE复合装药	150.03	14.0	42.5	33.5
		150.03			
2	JH-14—Al/PTFE复合装药	152.56	22.7	41.7	35.6
		152.56			
3		353.00	29.5	66.3	4.2
4	JHL-2	360.00	30.0	65.0	5.0

现场试验布局见图 3。在试验后成功采集到了各工况的压力信号。复合装药爆炸后打开箱体, 观察试验结果, 开箱时有大量白烟散出, 箱内未发现明显残余 Al 粉和 PTFE, 爆炸后铝粉扑在罐体内壁上, 在螺栓连接处铝粉随爆轰产物气体外泄流出, 留下印记, 结果如图 4 所示。

试验获得的典型超压曲线见图 5。爆炸试验中准静态压力的获取主要是通过处理传感器测量到的压力波形得到, 这种方式简单却可能因



图 3 试验现场布局

Fig. 3 Layout of test site

为不同的处理方法导致结果有出入,但这种差异通常很小,并不影响最终的结论。文献 [25] 中进行了不同气体环境下的 TNT 内爆试验,对空气中 15 g 药量的内爆试验准静态压力数据采用了加权平均算法、局部加权回归算法(窗口长度 5 ms)与直接取压力平均值(10~20 ms)三种方法,进行了准静态压力的拟合,得到的结果分别为 434.7、435.0、433.1 kPa,可见其结果差距很小。同时观察典型压力波形,由于存在箱体未完全密封的情况,压力曲线会逐渐衰减,于是取冲击波峰值到达 5 ms 后超压曲线上升段的平均值作为准静态超压。



图 4 试验结果

Fig. 4 Test results

表 3 给出了利用式 (5) 和式 (7) 得到修正前后的 Al/PTFE 与炸药环状复合装药内爆的准静态压力理论计算结果及其与试验结果的对比。可以看出,计算值较试验值偏大,原因是:理论计算的前提条件是处于理想状态,而分析发现试验中铝粉分散等情况,这会消耗炸药的一部分内能;同时在试验中会出现容器结构受压变形、结构不完全封闭等情况,导致爆轰产物耗散等情况,故试验值偏小。对比采用本文方法进行修正前后的计算结果可以看出,修正后计算得到的结果偏差远小于修正前,平均误差为 9.1%,最大误差为 15.8%。

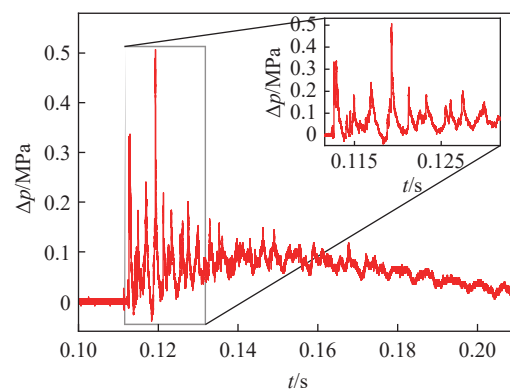


图 5 试验测得的典型超压曲线

Fig. 5 Test overpressure curve

表 3 试验结果与计算结果比较

Table 3 Comparison between experimental and theoretical results

工况	装药质量/g	$a$	$\mu$	试验压力/MPa	计算压力/MPa		误差/%	
					修正前	修正后	修正前	修正后
1	150.03	2.7	0.425	0.180	0.253	0.181	40.6	0.6
	150.03	2.7	0.425	0.172	0.253	0.181	47.1	5.2
2	152.56	4.5	0.417	0.177	0.297	0.198	67.8	11.8
	152.56	4.5	0.417	0.180	0.297	0.198	65.0	10.0
3	353.00	3.8	0.663	0.430	0.686	0.498	59.5	15.8
4	360.00	3.7	0.663	0.440	0.676	0.490	53.6	11.4

对比工况 3 和 4 的试验结果,可以发现 JHL-2 含铝炸药与 JH-14—Al/PTFE 复合装药结构在含铝量与总装药量均接近时得到的准静态压力结果差距并不大,于是考虑将式 (7) 推广至一般含铝炸药的内爆准静态压力预测。而由于试验条件有限,因此利用文献中含铝炸药的内爆试验数据对式 (7) 进行

验证。

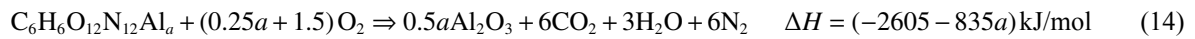
段晓瑜<sup>[19]</sup>在密闭空间开展了不同铝粉粒径、不同铝含量的 RDX 基含铝炸药内爆试验, 获得了多组准静态压力试验数据。试验的爆炸箱容积为 100 L, 试验中氧气充足。表 4 给出了 50  $\mu\text{m}$  粒径铝粉条件下本文理论计算与段晓瑜<sup>[19]</sup>试验数据的对比结果, 得到各工况平均误差 8.1%, 最大误差为 13.0%。

表 4 文献 [19] 试验结果与本文计算结果比较

Table 4 Comparison between test result in Ref.[19] and theoretical results in this paper

工况	药量/g	粒径/ $\mu\text{m}$	$a$	$\mu$	试验压力/MPa	计算压力/MPa	误差/%
19-1	100	50	1.6	80	0.69 <sup>[19]</sup>	0.78	13.0
19-2	100	50	2.9	70	0.79 <sup>[19]</sup>	0.80	1.3
19-3	100	50	3.8	65	0.88 <sup>[19]</sup>	0.81	8.0
19-4	100	50	4.8	60	0.90 <sup>[19]</sup>	0.80	11.1
19-5	100	50	7.3	50	0.82 <sup>[19]</sup>	0.76	7.3

卢广照等<sup>[20]</sup>进行了一系列 CL-20 基含铝炸药的内爆试验, 爆炸罐容积为 1.36  $\text{m}^3$ , 试验工况见表 5。根据试验工况, 炸药处于完全后燃状态, 反应方程式为:



反应后各种物质的量、总物质的量以及平均定压比热容为:

$$\begin{cases} n_{\text{H}_2\text{O}} = 3n_{\text{CL20}} \\ n_{\text{O}_2} = 0.21n_{\text{air}} - (0.25a + 1.5)n_{\text{CL20}} \\ n_{\text{N}_2} = 0.79n_{\text{air}} + 6n_{\text{CL20}} \\ n_{\text{CO}_2} = 6n_{\text{CL20}} \\ n_{\text{tot}} = (13.5 - 0.25a)n_{\text{CL20}} + n_{\text{air}} \\ C_{pm} = \frac{29n_{\text{air}} + n_{\text{CL20}}(454 - 7a)}{n_{\text{tot}}} \end{cases} \quad (15)$$

将相关参数代入式 (7), 并令  $x=n_{\text{air}}, y=n_{\text{CL20}}$ , 得到准静态压力  $p$  的表达式

$$p = \frac{0.13(x + 13.5y - 0.25ya)(x + 15.66y - 0.24ya + 301.43y\mu + 96.62ya\mu)}{x(x + 15.66y - 0.24ya)} \quad (16)$$

通过试验工况, 可以计算不同工况下  $a$  的值, 得到不同情况下的反应热, 然后利用式 (7) 得到炸药内爆准静态理论计算结果, 见表 6。可以发现, 计算得到结果的平均误差 15.4%, 最大误差为 20.6%。

表 5 文献 [20] 试验工况

Table 5 Test conditions in Ref.[20]

工况	药量/g	质量分数/%			工况	药量/g	质量分数/%		
		铝	CL-20	其他			铝	CL-20	其他
20-1	200	10	64.5	25.5	20-4	100	10	64.5	25.5
20-2	200	20	54.5	25.5	20-5	100	20	54.5	25.5
20-3	200	30	45.5	25.5	20-6	100	30	44.5	25.5

分析表 3、表 4、表 6 的数据, 发现文献 [19] 中以 RDX 为基含铝炸药的计算平均误差与最大误差都与本次计算误差接近, 而文献 [20] 则误差较大, 同时表 3 与表 4 中的计算结果几乎普遍偏大, 而表 6 中的计算结果偏小。分析认为: 原因是在固相的炸药环境中, 不同炸药环境对铝粉的能量释放过程具有一定影响<sup>[26]</sup>, 为进一步减少产生的误差, 需要进一步研究铝粉氧化燃烧的机制, 深入认识固相炸药氧化环境对铝粉氧化燃烧的影响。

表 6 文献 [20] 试验结果与计算结果比较

Table 6 Comparison between experimental result in Ref.[20] and theoretical results in this paper

工况	药量/g	$a$	$\mu$	试验压力/MPa	计算压力/MPa	误差/%
20-1	200	2.6	64.5	0.46 <sup>[20]</sup>	0.37	19.6
20-2	200	6.1	54.5	0.49 <sup>[20]</sup>	0.40	18.4
20-3	200	11.1	45.5	0.51 <sup>[20]</sup>	0.41	19.6
20-4	100	2.6	64.5	0.27 <sup>[20]</sup>	0.25	7.4
20-5	100	6.1	54.5	0.29 <sup>[20]</sup>	0.26	6.9
20-6	100	11.1	44.5	0.34 <sup>[20]</sup>	0.27	20.6

### 3 结 论

在总结了一般炸药考虑后燃效应下的内爆准静态压力计算模型基础上, 考虑 Al/PTFE 与炸药环状复合装药中铝含量对反应热的稀释, 本文提出了一种约束条件下 Al/PTFE 与炸药环状复合装药的准静态压力计算模型, 用以深入描述约束爆炸中的准静态压力变化。

考虑存在理论计算值会出现一定程度偏大的情况, Al/PTFE 与炸药环状复合装药完全后燃下的准静态压力模型计算数据与试验数据吻合较好, 平均误差为 9.1%, 最大误差为 15.8%。

试验结果显示, Al/PTFE 与炸药环状复合装药和含铝炸药的准静态压力相近。

对于其他文献中含铝炸药试验研究的内爆试验数据, 本文方法预测准静态压力的平均误差为 12.1%, 最大误差为 20.6%, 说明本文计算模型同样适用于内爆下一般含铝炸药准静态压力的预测。

### 参考文献:

- [1] KUHL A L, REICHENBACH H. Combustion effects in confined explosions [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2): 2291–2298. DOI: 10.1016/j.proci.2008.05.001.
- [2] KUHL A L, FORBES J, CHANDLER J, et al. Confined combustion of TNT explosion products in air: UCRL-K-131748 [R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1998.
- [3] 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: 46–60. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.12.001.
- [4] EDRI I, FELDGUN V R, KARINSKI Y S, et al. On blast pressure analysis due to a partially confined explosion: III. Afterburning effect [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2012, 3(3): 311–331. DOI: 10.1260/2041-4196.3.3.311.
- [5] 李旭东. 内爆准静态压力载荷对舱壁结构的毁伤效应研究 [D]. 太原: 中北大学, 2020. DOI: 10.27470/d.cnki.ghbgc.2020.001050.  
LI X D. Study on the damage effect of internal explosive quasi-static pressure loads to bulkhead structures [D]. Taiyuan: North University of China, 2020. DOI: 10.27470/d.cnki.ghbgc.2020.001050.
- [6] 王等旺, 张德志, 李焰, 等. 爆炸容器内准静态气压实验研究 [J]. *兵工学报*, 2012, 33(12): 1493–1497. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2012.12.014.  
WANG D W, ZHANG D Z, LI Y, et al. Experiment investigation on quasi-static pressure in explosion containment vessels [J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(12): 1493–1497. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2012.12.014.
- [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. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2020.05.036.  
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. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2020.05.036.
- [8] 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. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0170.  
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. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0170.
- [9] 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: 10.3969/j.issn.1001-1455.2013.04.007.  
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: 10.3969/j.issn.1001-1455.2013.04.007.
- [10] 钟巍, 田宙. 考虑产物化学反应影响的约束爆炸准静态压力数值计算方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(S1): 78–83.  
ZHONG W, TIAN Z. Numerical calculation of quasi-static pressures of confined explosions considering chemical reactions kinetic of detonation products [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(S1): 78–83.
- [11] 钟巍, 田宙, 赵阳. 考虑约束爆炸后产物发生化学反应的约束空间内准静态温度计算 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(6): 777–784. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0777-08.  
ZHONG W, TIAN Z, ZHAO Y. Calculation of the quasi-static temperature of confined explosions in consideration of the effect of the chemical reactions with detonation products [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(6): 777–784. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0777-08.
- [12] 徐维铮, 吴卫国. 密闭空间内爆炸准静态压力理论计算研究 [J]. *中国舰船研究*, 2019, 14(5): 124–130. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01368.  
XU W Z, WU W G. Study on theoretical calculation of quasi-static pressure for explosion in confined space [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14(5): 124–130. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01368.
- [13] 李世伟, 王正宏, 吴成成, 等. 铝粉含量对 RDX 基含铝炸药爆热性能的影响 [J]. *爆破器材*, 2022, 51(4): 29–32. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2022.04.005.  
LI S W, WANG Z H, WU C C, et al. Effect of aluminum content on detonation heat of RDX-based aluminized explosives [J]. *Explosive Materials*, 2022, 51(4): 29–32. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2022.04.005.
- [14] 李媛媛, 王晓峰, 牛余雷, 等. 环境氧含量对含铝炸药爆热的影响 [J]. *火炸药学报*, 2014, 37(2): 49–52, 56. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2014.02.009.  
LI Y Y, WANG X F, NIU Y L, et al. Effects of environment oxygen content on heat of detonation of aluminized explosive [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2014, 37(2): 49–52, 56. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2014.02.009.
- [15] 白玉. 含铝炸药爆炸场温度测试及数值模拟 [D]. 太原: 中北大学, 2022. DOI: 10.27470/d.cnki.gbhgc.2022.000344.  
BAI Y. Temperature measurement and numerical simulation of explosive field containing aluminum [D]. Taiyuan: North University of China, 2022. DOI: 10.27470/d.cnki.gbhgc.2022.000344.
- [16] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.07.011.  
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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.07.011.
- [17] 蒋欣利, 张国凯, 何勇, 等. 密闭建筑温压炸药内爆炸后燃效应 [J]. *兵工学报*, 2024, 45(8): 2520–2530. DOI: 10.12382/bgxb.2023.0555.  
JIANG X L, ZHANG G K, HE Y, et al. Afterburning effect of thermobaric explosives in confined space [J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45(8): 2520–2530. DOI: 10.12382/bgxb.2023.0555.
- [18] 李媛媛, 徐洪涛. 密闭环境下含铝炸药爆炸场温度与压力特征 [J]. *爆破器材*, 2014, 43(2): 1–4. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2014.02.001.  
LI Y Y, XU H T. Characteristics of blasting temperature and pressure of aluminized explosive in confined conditions [J]. *Explosive Materials*, 2014, 43(2): 1–4. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2014.02.001.
- [19] 段晓瑜. 含铝炸药空气中爆炸冲击波特性研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2017. DOI: 10.26948/d.cnki.gbjlu.2017.000047.  
DUAN X Y. Study on the properties of shock wave from aluminized explosives blast in air [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017. DOI: 10.26948/d.cnki.gbjlu.2017.000047.
- [20] 卢广照, 姜春兰, 毛亮, 等. 薄钢板在 CL-20 基含铝炸药内爆载荷作用下的变形响应和工程预测 [J]. *兵工学报*, 2020, 41(8): 1509–1518. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.08.005.  
LU G Z, JIANG C L, MAO L, et al. Deformation response and its engineering prediction of steel plate subjected to internal blast loading from CL-20-based aluminized explosive charges [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(8): 1509–1518. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.08.005.

- [21] 阳世清, 徐松林, 张彤. PTFE/Al 反应材料制备工艺及性能 [J]. *国防科技大学学报*, 2008, 30(6): 39–42, 62. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2486.2008.06.009.  
YANG S Q, XU S L, ZHANG T. Preparation and performance of PTFE/Al reactive materials [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2008, 30(6): 39–42, 62. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2486.2008.06.009.
- [22] 刘瑞华, 王亚军, 万奕, 等. 氧化铝/聚四氟乙烯热化学反应特性及影响因素 [J]. *火炸药学报*, 2024, 47(1): 35–43. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202304023.  
LIU R H, WANG Y J, WAN Y, et al. Thermochemical reaction characteristics and influencing factors of alumina/polytetrafluoroethylene composites [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2024, 47(1): 35–43. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202304023.
- [23] 刘瑞华, 王亚军, 邓正亮, 等. 铝基含氟铝热体系反应机理研究进展 [J]. *火炸药学报*, 2023, 46(9): 776–787. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202303004.  
LIU R H, WANG Y J, DENG Z L, et al. Progress on the reaction mechanism of aluminum-based fluorine-containing thermite systems [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2023, 46(9): 776–787. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202303004.
- [24] 陈林玉, 张向军, 张鸣一, 等. 氮化铝纳米陶瓷粉末制备方法的研究进展 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2024, 47(3): 130–137. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20240513.001.  
CHEN L Y, ZHANG X J, ZHANG M Y, et al. Research progress on preparation methods of aluminum nitride nano-ceramic powder [J]. *Ordnance Materials Science and Engineering*, 2024, 47(3): 130–137. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20240513.001.
- [25] 岳学森. 舰船舱内爆炸载荷燃烧增强效应及抑制方法研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022. DOI: 10.27381/d.cnki.gwlg.2022.001554.  
YUE X S. Study on afterburning effect and mitigation method of blast load in confined cabin [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2022. DOI: 10.27381/d.cnki.gwlg.2022.001554.
- [26] 钟凯, 张朝阳. 纳米铝颗粒在不同炸药环境中氧化燃烧的分子动力学模拟 [J]. *含能材料*, 2023, 31(1): 48–60. DOI: 10.11943/CJEM2022231.  
ZHONG K, ZHANG C Y. Oxidation and combustion of aluminum nanoparticles in different explosive environments by molecular dynamics simulation [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2023, 31(1): 48–60. DOI: 10.11943/CJEM2022231.

(责任编辑 王小飞)