



国防科技大学学报

Journal of National University of Defense Technology

ISSN 1001-2486, CN 43-1067/T

《国防科技大学学报》网络首发论文

题目： 炸药在有限泄压条件下燃烧压力发展模型
作者： 汪庆桃，王崇旭
收稿日期： 2024-06-11
网络首发日期： 2025-10-31
引用格式： 汪庆桃，王崇旭. 炸药在有限泄压条件下燃烧压力发展模型[J/OL]. 国防科技大学学报. <https://link.cnki.net/urlid/43.1067.T.20251031.1056.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi: 10.11887/j.issn.1001-2486.24060033

炸药在有限泄压条件下燃烧压力发展模型

汪庆桃*, 王崇旭

(国防科技大学 军政基础教育学院, 湖南 长沙, 410072)

摘要：针对高能激光辐照未爆弹药容易产生爆炸，从而对周围环境产生较大危害的问题，系统梳理了带壳装药在预开孔条件下稳定燃烧的相关理论。基于炸药指数燃烧定律、气体产物的流动壅塞理论模型，建立了带壳装药在有限泄压条件下燃烧时的压力发展模型，提出了柱形装药燃烧面积的简化计算方法，基于计算软件编写了计算程序，研究了不同泄压孔直径时未爆弹药装药燃烧压力发展规律，得出了安全泄压孔直径与弹体直径变化规律，相关结果与试验结果的一致性证明了该理论的正确性和适用性，可为激光以燃烧态销毁未爆弹药提供理论支撑。

关键词：未爆弹药；激光销毁；有限泄压；流动壅塞；理论模型

中图分类号：E932.4

文献标识码：A

Pressure development model of explosives combustion under limited pressure relief conditions

WANG Qingtao*, WANG Chongxu

(College of Basic Military and Political Education, National University of Defense Technology, Changsha 410072, China)

Abstract: Aiming at the problem that the unexploded ordnance irradiated by high energy laser is easy to explode, which will cause great harm to the surrounding environment, the theory of stable combustion of shell charge under the condition of pre-opening hole was systematically sorted out. Based on the explosive exponential combustion law and the choking flow theory model of gas products, the pressure development model of shell charge during combustion, under the condition of limited pressure relief was established. A simplified calculation method for the combustion area of cylindrical charge was proposed. A calculation program was written based on Computational software to study the development law of the combustion pressure of unexploded ordnance charge under different pressure relief hole diameter. The variation law of the diameter of the safety relief hole and the diameter of the projectile body had been obtained. The consistency between the relevant results and the experimental results proves the correctness and applicability of the theory, which can provide theoretical support for laser combustion destruction of unexploded ordnance.

Keywords: unexploded ordnance; laser neutralization; limited pressure relief; flow congestion; theoretical model

随着激光技术，尤其是高能光纤激光技术的持续发展，采用激光技术销毁未爆弹药成为可能。激光具有定向发射、能量密度高、平行性好的特点。激光辐照未爆弹药，可以使未爆弹药以弱爆炸、甚至燃烧的状态销毁，因此，可以大大减小对周围环境的影响。此外，激光可以远距离发射，增加了操作的安

全性，大大减小了处置人员的心理压力。因此，激光辐照未爆弹药以燃烧态销毁对于减小对周边的破坏，节约安全防护成本有着重要的意义。

激光辐照可以使未爆弹药壳体在极短的时间内熔化/汽化，形成穿孔，并作用于装药，使其发生点火、燃烧和爆炸。未爆弹药

收稿日期：2024-06-11

基金项目：国家自然科学基金资助项目（12472374）

第一作者：汪庆桃（1978—），男，湖南平江人，副教授，博士，硕士生导师，E-mail: 35016567@qq.com

引用格式：汪庆桃，王崇旭. 炸药在有限泄压条件下燃烧压力发展模型[J]. 国防科技大学学报

Citation: WANG Q T, WANG C X. Pressure Development Model of Explosives Combustion Under Limited Pressure Relief Conditions [J]. Journal of National University of Defense Technology

内部装药在外部热作用下发生点火、燃烧和爆炸现象通常归纳为热爆炸问题，其响应状态与外部热源、约束条件等直接相关。通常情况下，随着温度的升高，炸药热分解速率将遵循 Arrhenius 规律而迅速增加，释放出的热量也随之增加，反应模型可以采用 Frank-Kamenetskii 模型进行描述。热爆炸理论经历了稳态到非稳态、均温到非均温系统、一维到二维甚至三维的研究历程，由于热爆炸理论的复杂性，很难从理论方面得出用于指导工程实践的结论，因此，实验和数值模拟研究成为一种重要的研究手段。

丁洋等^[1]以带壳装药的激光热点火实验为基础，建立了非线性的热传导数值模型，研究了金属/炸药界面接触热阻对炸药热响应过程和热点火规律的影响。张家雷^[2]以小尺度约束炸药装置为对象，开展了激光热起爆的试验研究，发现了激光参数以及外部约束强度对激光热起爆特性具有较大的影响。楼建锋研究了炸药在不同点火条件，展示了燃烧引发的弱冲击点火与雷管冲击点火在起爆时间上存在明显的差异^[3]。对于有限泄压条件下的热爆炸问题中，燃烧转爆轰过程广泛认为压力是推动发展的核心动力^[4]。为了从宏观角度研究燃烧中压力积累促使爆炸过程，李政阳等^[5]从等熵膨胀、外界稀疏波作用角度描述了非密闭壳体内炸药燃烧的发展过程，在一定程度上描述了燃烧转爆轰的过程，但其忽略了气体壅塞和燃烧室空间变化对压力发展的影响，因此存在较大的局限性。本文以激光销毁未爆弹为背景，基于气体产物的流动壅塞模型、指数燃烧定律等理论，研究在有限泄压条件下未爆弹药壳体内炸药燃烧压力的发展规律，相关结论为激光以燃烧态销毁未爆弹药提供理论支撑。

1. 炸药在壳体内部稳定燃烧

在理想条件下，炸药点燃后在炸药表面会形成稳定的反应区，沿着表面法线形成有规律的温度分布曲线。该曲线以恒定速度推移、层层传递、平行传播。当炸药燃烧的气体产物无法及时被排出，就造成燃烧环境压力积累，而高压气体产物可能破坏药块表面液态熔膜，或者渗透进炸药间隙，导致药块产生裂纹使着火面积进一步扩大，最终炸药失去稳态燃烧的条件，向爆轰转变。尚海林等^[6]、Jackson 等^[7]研究了炸药裂纹中燃烧的发展规律。在有限泄压条件下研究压力变化过程可以采用气体产物的流动壅塞模型来

进行描述。

1.1 流动壅塞理论

如图 1 所示，一个容器用刚性薄板与外界隔离，容器内外的温度、绝对压力和密度分别为 T_1 、 p_1 、 ρ_1 、 T_0 、 p_0 、 ρ_0 ，刚性板中间有一面积为 S 的小孔，当内外气压不同时，理想气体就会通过小孔进行流动，形成截面积为 S^* 的气柱，在实际中 S 和 S^* ^[6,8] 可以进行简化，认为近似相等。

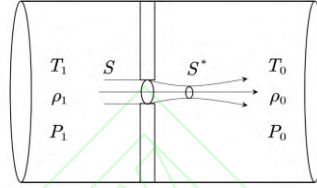


图 1 薄壁小孔泄压示意图

Fig.1 Schematic diagram of pressure relief of thin-walled small holes

理想流体密度为 ρ ，速度向量为 $\mathbf{v}$ ，则适用的欧拉方程为：

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla \right) \mathbf{v} = \rho \mathbf{f} - \nabla p \quad (1)$$

其中 $\mathbf{f}$ 为流体所受单位质量的保守体积力， p 为压力。由于处于在定常流动假设前提下，进一步假设流体为一维可压缩理想气体，并且流动过程中等熵，则可以得到积分形式的可压缩流体的绝热流动伯努利方程：

$$\frac{\gamma}{(\gamma-1)} \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + \phi = \text{常数} \quad (2)$$

在模型图 1 中小孔上游与下游等效界面处均满足式 (2)，因此有：

$$\frac{\gamma}{(\gamma-1)} \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{u_1^2}{2} = \frac{\gamma}{(\gamma-1)} \frac{p_0}{\rho_0} + \frac{u_0^2}{2} \quad (3)$$

其中 γ 为等熵指数（绝热指数）， u 为流动

速度， ρ 为密度，下标 1 表示是容器内参

数，0 表示容器外参数。

气体连续性方程：

$$\rho_1 \cdot s \cdot u_1 = \rho_0 \cdot s \cdot u_0 \quad (4)$$

绝热过程中满足多方方程，因此：

$$\frac{\rho_0}{\rho_1} = \left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\left(\frac{1}{\gamma} \right)} \quad (5)$$

加上理想气体方程：

$$p = \rho RT \quad (6)$$

由(4)、(5)、(6)可以解得速度和流出的质量:

$$u_0 = \sqrt{\left(\frac{2\gamma}{(\gamma-1)} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} \right] \right)} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} m &= \rho_0 \cdot s \cdot u_0 \\ &= s \cdot p_1 \cdot \sqrt{\left(\frac{2\gamma}{(\gamma-1)} \cdot \frac{1}{RT} \right)} \\ &\quad \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{(\gamma+1)}{\gamma}} \right]} \end{aligned} \quad (8)$$

可见流出质量 m 与压力 p_0 有关, 对(8)求极值, 可得发生壅塞的临界压力比为:

$$\left(\frac{p_0}{p_1} \right) = \left(\frac{2}{(\gamma+1)} \right)^{\frac{\gamma}{(\gamma-1)}} \quad (9)$$

此时:

$$m = s p_1 \left(\frac{1+\gamma}{2} \right)^{\frac{1}{1-\gamma}} \cdot \left(\frac{2\gamma RT}{1+\gamma} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

该式说明, 外部减压的容器流动壅塞的发生和流体的本身属性 γ 等熵指数(绝热指数)有关, 等熵指数决定了发生壅塞所需的压力比, 在高压侧不变(即 p_1 不变)条件下, 低压侧压力减少到一定值后, 流出的质量会达到稳定值; 但是在低压不变(即 p_0 不变)条件下升高高压侧压力, 如果压力差超过了比值, 流量受 γ 、 p_1 共同影响, 在该压力等级下泄压速率会达到一个最大值, 随着高压侧压力增加, 会产生更高压力的壅塞平衡, 排出的气体质量也会增加。

1.2 柱状结构的流动壅塞理论模型

1.2.1 模型建立

通过理想气体的流动壅塞模型, 得到了气体在压力差作用下通过小孔质量流动的规律。在实际的金属/炸药复合结构燃烧过程中, 内部炸药的反应过程和气体产物状态都较为复杂, 为对其进行研究, 需要进行合理的简化。

在燃烧进行时, 假定:

(1) 燃烧形成的燃烧室中同一时刻压力与温度在空间上均匀相等, 且燃烧速度满足指数燃烧定律, 进而可以推断出稳定燃烧的速度均垂直于燃烧面且大小相等。

(2) 凝聚态炸药为 TNT 炸药, 且燃烧过程中炸药全部转化为气体产物质量。

(3) 在内部炸药燃烧过程中外壳孔径不发生变化。

(4) 击穿壳体的同时药块被点燃, 并以球状燃烧态进行扩散。

上述假设条件结合零维内弹道理论, 建立带孔壳体的气体产物流动模型如图2所示。

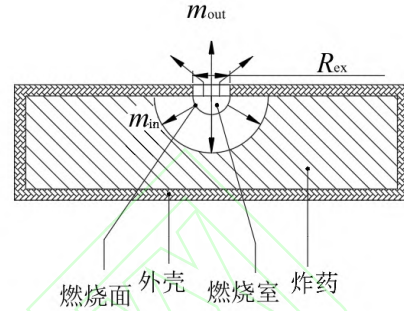


图2 有限泄压条件下气体产物流动模型

Fig.2 Model of gas product flow under limited pressure relief

在以上条件下, 通过几何近似, 有:

$$\frac{dV_1}{dt} = A_b \cdot u_e \quad (11)$$

$$\frac{de}{dt} = u_e \quad (12)$$

其中 V_1 为燃烧后空腔体积, A_b 为燃烧面积, u_e 为燃烧速度和 e 为已燃烧的厚度。

而其中炸药的燃烧速度可由指数燃烧定律^[9]得到:

$$u_e = 0.01 \cdot \left[a + b \left(\frac{p}{p_0} \right)^n \right] \quad (13)$$

从质量守恒原理出发, 必然可以构建排出气体质量 $\dot{m}_{out}$ 、生成气体质量 $\dot{m}_{in}$ 和内部积攒气体质量的动态平衡:

$$\frac{d}{dt} (\rho_1 V_1) = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (14)$$

从式(11)可以看出, 单位时间燃烧的质量可以通过炸药密度 ρ_e 与单位时间体积变化计算, 即 $\dot{m}_{in} = \rho_e A_b u_e$, 同时将上式(10)用流量修正系数 φ_1 修正带入式(14)可得:

$$\begin{aligned} V_1 \frac{d\rho_1}{dt} &= \rho_e A_b u_e - \rho_1 A_b u_e \\ &\quad - p_1 s \left(\frac{1+\gamma}{2} \right)^{\frac{1}{1-\gamma}} \cdot \left(\frac{2\gamma RT}{\gamma+1} \right)^{\frac{1}{2}} \varphi_1 \end{aligned} \quad (15)$$

其中 ρ_1 为气体产物密度, 由于 $\rho_e \gg \rho_1$, 近似

得:

$$V_1 \frac{d\rho_1}{dt} = \rho_e A_b u_e - p_1 s \left(\frac{1+\gamma}{2} \right)^{\left(\frac{1}{1-\gamma} \right)} \left(\frac{2\gamma RT}{\gamma+1} \right)^{\frac{1}{2}} \varphi_1 \quad (16)$$

从能量守恒原理出发可得:

$$\frac{d(V_1 \rho C_v T)}{dt} = m_{in} \chi C_p T - m_{out} C_p T \quad (17)$$

其中 T 为气体温度, C_p 是定压比热, C_v 是定容比热, χ 是对热量修正的经验参数, 上式表明任一瞬间燃烧室中总内能对时间的变化率等于单位时间因燃烧加入的净能量和从喷管排出燃烧产物的总焓之差, 将 $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$, $p = \rho RT$, $\frac{dV_1}{dt} = A_b u_e$ 代入可得:

$$V_1 \frac{dp_1}{dt} = \rho_e A_b u_e R \chi T \gamma - \rho_1 A_b u_e T R - p_1 s \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\left(\frac{1}{1-\gamma} \right)} \cdot \left(\frac{2\gamma RT}{\gamma+1} \right)^{\frac{1}{2}} \varphi_1 \gamma RT \quad (18)$$

同样由于 $\rho_e \gg \rho_1$, 近似得:

$$V_1 \frac{dp_1}{dt} = \rho_e A_b u_e R \chi T \gamma - p_1 s \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\left(\frac{1}{1-\gamma} \right)} \cdot \left(\frac{2\gamma RT}{\gamma+1} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \varphi_1 \gamma RT \quad (19)$$

通过上述(11)、(12)、(13)、(17)、(19)这5个方程, 补充完全气体方程, 可以对问题进行求解, 相关参数由表1给出^[5, 10]。

表1 TNT 燃烧计算参数
Tab.1 Calculation parameters of TNT combustion

变量	名称	参数设置	单位
p_1	燃烧室压力	求解量	Pa
V_1	燃烧室体积	求解量	m ³
ρ_1	气体产物密度	求解量	K
e	燃烧厚度	求解量	m
s	排气面积	排气孔直径计算	m ²
A_b	燃烧面积	空间关系函数表示	m ²
u_e	燃烧速度	压力函数表示	m/s
ρ_e	燃料密度	1620	kg/m ³
R	气体常数	337	J/(kg K)
T	燃料燃烧温度	3400	K
χ	热量修正系数	0.98	

φ_1	流量修正系数	0.95	
γ	比热比	1.3	
R_{ex}	泄压孔直径	初始参数	m
a	燃烧参数	0.009	cm/s
b	燃烧参数	0.05	cm/(Pa s)
n	燃烧参数	1	
p_0	标准大气压	10 ⁵	Pa

计算时初始压力设定为2 MPa, 初始气体密度设为1.29 kg/m³, 初始已燃烧厚度 e 取0, 根据几何关系确定燃烧的初始面积和初始体积。计算时使软件采用四阶-五阶Runge-Kutta算法进行求解。

1.2.2 燃烧面积计算

在实际中的金属/炸药复合结构中, 弹体的外壳通常存在弧度, 因此, 与平边上扩散形成标准半球相比, 存在弧度的外壳会使燃烧面积产生一定程度的削减, 为准确描述面积, 编写了计算程序对面积的变化进行计算, 选择圆柱上辐射中心点作为坐标系原点, 选择四分之一模型进行研究。

利用 mesh 函数, 在 XOY 平面上构建一个网格, 该网格由500×500数据点组成。由于采用了对称的方法, 对四分之一球面进行建模, 研究的球面可以由 $z = \sqrt{R_{td}^2 - x^2 - y^2}$ 进行表示, 考虑到圆柱的限制作用, 其边界可以 $x^2 + y^2 - 4R_{td} = 0$ 表示, 当数据点 (x_i, y_j) 处于圆球以及圆柱在 XOY 投影面以外时, 点的 z 值设置为0或者 NaN, 通过这种方法, 燃烧面可以通过 $(x_i, y_j, z_{i,j})$ 组成的四边形网格构建出来。

为计算面积, 可以将三维的空间曲面转化为若干个空间平面, 当网格划分足够密时, 所有网格面积之和近似为曲面的面积。在单个平面面积计算中将四边形划分为两个三角形, 采用海伦公式计算面积。

由于网格具有连续性, 使得网格在边缘突变处发生畸变, 大量增加计算面积, 因此在筛选网格时, 采用了比圆球和圆柱略小的限制条件, 即原半径的0.985进行网格筛选。

再在对算法结果除以修正系数0.83以后, 计算结果对比如图3所示, 球面积算法结果(图中蓝色圆圈)较好贴合解析结果(图中红色圆圈)。通过以上方法, 建立了圆柱内球状扩散半径与燃烧面积的对应的计算函数, 将该函数取代上述公式(11)中 A_b 的计算公式, 即可得到圆柱内球状燃烧压力发展规律。

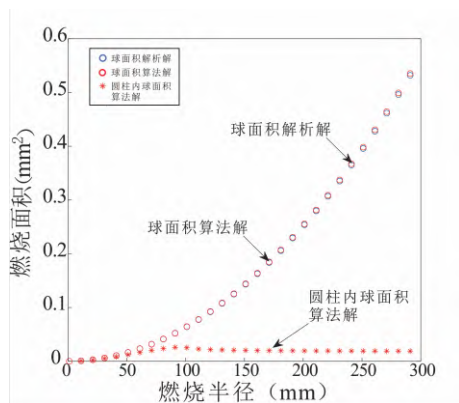


图3 修正后燃烧面积发展趋势

Fig.3 Trends in the development of revised burning area

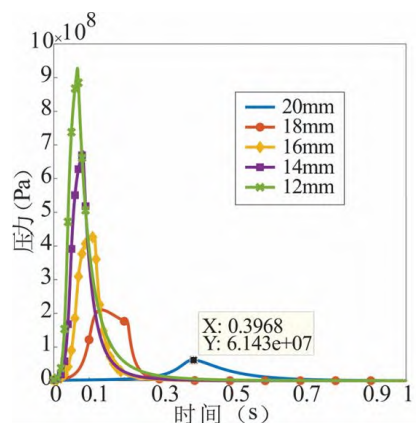
2. 模型计算结果分析

从图3可以看出,当燃烧半径接近弹体直径时,燃烧面积开始减少,因此考虑长径比大于1的计算模型,计算模型药柱直径取100 mm,泄压孔直径设置为12~20 mm,燃烧半径取80 mm,其它初始条件与表1相同,计算在有限泄压条件下内部压力发展情况。

白志玲等^[11]对 $\phi 152$ mm 2, 4-二硝基苯甲醚(2, 4-dinitroanisole, DNAN)基熔铸炸药在密闭条件下反应时压力演化曲线进行计算,发现呈现典型的三阶段特征,即缓慢成长阶段、指数增长阶段和高速线性阶段。并通过燃烧实验,测得密闭容器条件下190 MPa时端盖冲开,说明模型内部发生爆炸;黄云伟^[12]对 $\phi 35$ mm 钢约束B炸药进行了慢速烤燃实验,并在不考虑壳体变形时对不同泄压孔面积时烤燃弹内峰值压力进行了仿真计算,其认为当内部压力大于120 MPa时壳体会破裂。本计算模型假设弹体壳体为刚性条件,在对弹体反应后内部压力进行计算时,其压力可能会远高于壳体的强度,这明显与实际情况不符。考虑到本模型的结构、尺寸特征,认为在内部压力为90 MPa弹体结构将会发生破坏。这个标准是以安全为首位进行的设定,超过这个压力,则认为炸药进入了不确定的失控区间,可能继续燃烧,也可能向爆轰转变,更准确和经济的标准有赖于后续的精确定量。

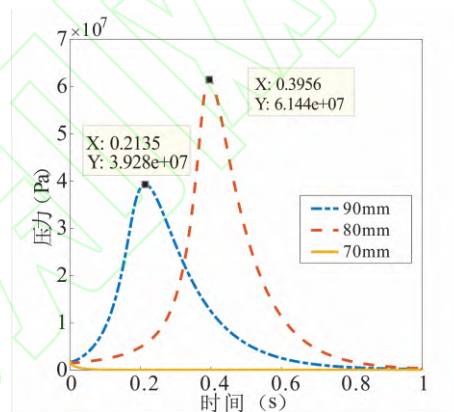
12 mm~20 mm泄压孔直径条件下内部压力发展如图4(a)所示,12 mm至18 mm泄压孔条件下最大压力在逐渐减少,但压力均在200 MPa以上,此压力高于研究所设定的90 MPa安全压力,可以认为该直径泄压孔无法做到有效泄压,进而炸药会进入失控

区间,可能由燃烧向爆炸转变。



(a) 不同直径泄压孔压力发展情况

(a) Pressure development of pressure relief holes of different diameters



(b) 20 mm 直径泄压孔不同燃烧直径条件下压力发展情况

(b) Pressure development of 20 mm diameter pressure relief holes under different combustion diameters

图4 100 mm 直径药柱压力计算结果

Fig.4 Pressure calculation results of 100 mm diameter columnar explosives

在装药直径为100 mm,泄压孔直径为20 mm,在不同燃烧半径时内部压力发展如图4(b)所示。燃烧半径在20 mm至70 mm阶段,无法形成流动堵塞,模型失效,可以认为压力无法积累从而炸药会稳定燃烧,在燃烧半径达到80 mm时,压力逐渐积累,最终达到61.43 MPa,此压力低于90 MPa安全压力,因此可以认为,对于直径100 mm的圆柱装药,20 mm泄压孔可以有效泄压,防止内部装药由燃烧向爆轰转变。

在6 mm厚钢制外壳、直径100 mm柱

状 TNT 装药的点火实验响应实验中，采用高热剂穿孔（直径 20 mm），并瞬间点燃内部装药，用以验证一定尺寸孔径下弹体的响应特性。

该装药结构最终以燃烧方式完成响应，整个壳体结构保持完整，可以明显判断没有出现爆炸。

3. 安全泄压孔直径与弹体直径变化规律

为了研究安全泄压孔直径随弹体装药直径的变化规律，分别计算了圆柱形装药直径分别为 120、140、160、180、200、400、800mm 时的安全泄压孔直径。

在 120 mm 直径条件下，内部压力发展如图 5 所示，图中红线表示泄压孔直径较大的情况，蓝线表示泄压孔直径较小的情况，不同的线形代表不同的燃烧半径。从图中可以看到在泄压孔直径 24 mm 时，在燃烧半径为 90 mm 时，压力值在向下发展，说明堵塞模型失效，压力无法在壳体内积聚，炸药可以稳定燃烧，直至燃烧半径达到 100 mm 时，如图中红色实线所示，压力迅速上升达到 51.55 MPa，壳体内压力得到有效限制，这种情况可以认为燃烧会稳定进行；在泄压孔直径 22 mm 时，燃烧半径达到 90 mm 时，如图中蓝色连续点所示，压力迅速上升达到 178.2 MPa，复合结构响应结果进入失控区间，可能由燃烧向爆炸转变。

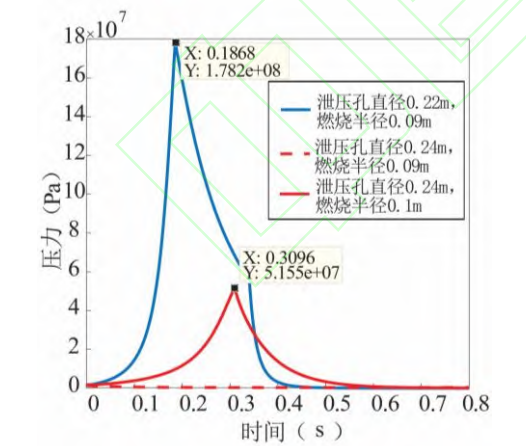


图 5 120 mm 装药直径不同泄压孔压力发展
Fig.5 Pressure development of 120 mm charge diameter with different pressure relief hole

而在 140 mm 直径条件下，内部压力发展如图 6 所示，从图中可以看到泄压孔直径达到 28 mm 后，壳体内压力在燃烧半径 110 mm 时压力上升到最大，为 58.51 MPa，因此认为 28 mm 直径的泄压孔可以有效限制

直径为 140 mm 的金属/炸药复合结构进入失控区间，避免由燃烧向爆轰转变。

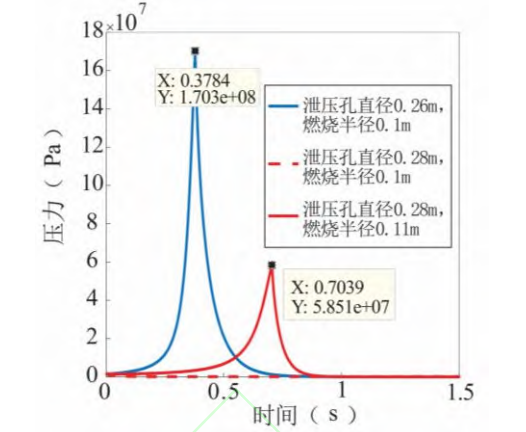


图 6 140 mm 装药直径不同泄压孔压力发展
Fig.6 Pressure development of 140 mm charge diameter with different pressure relief hole

在 160 mm 直径条件下，内部压力发展如图 7 所示，从图中可以看到当泄压孔直径达到 32 mm 后，壳体内压力在燃烧半径 120 mm 时压力上升到最大，为 60.11 MPa，因此认为 32 mm 直径的泄压孔可以有效限制直径为 160 mm 的金属/炸药复合结构进入失控区间，避免由燃烧向爆轰转变。

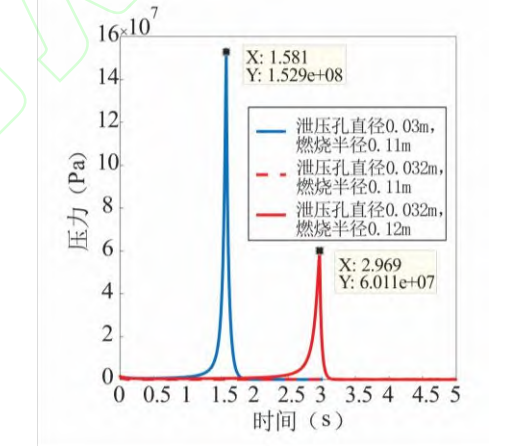


图 7 160 mm 装药直径不同泄压孔压力发展
Fig.7 Pressure development of 160 mm charge diameter with different pressure relief hole

而在 180 mm 直径条件下，内部压力发展如图 8 所示：

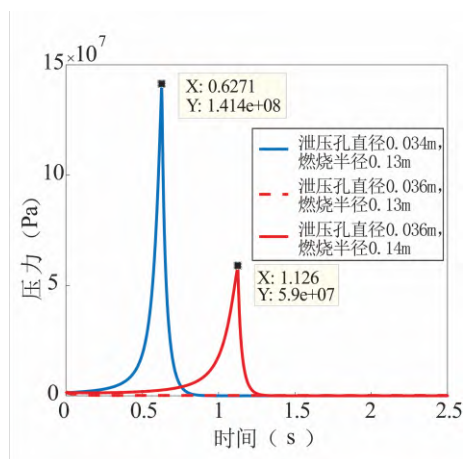


图8 180 mm 装药直径不同泄压孔压力发展

Fig.8 Pressure development of 180mm charge diameter with different pressure relief hole

从图8中可以看到泄压孔直径达到36mm后,壳体内压力在燃烧半径140mm时压力上升到最大,为59MPa,因此认为36mm直径的泄压孔可以有效限制直径为180mm的金属/炸药复合结构由燃烧向爆轰转变。

在200mm直径条件下,内部压力发展如图9所示,从图中可以看到泄压孔直径达到40mm后,壳体内压力在燃烧半径为160mm时压力上升到最大,为60.45MPa,因此认为40mm直径的泄压孔可以有效限制直径为200mm的金属/炸药复合结构进入失控区间,避免由燃烧向爆轰转变。

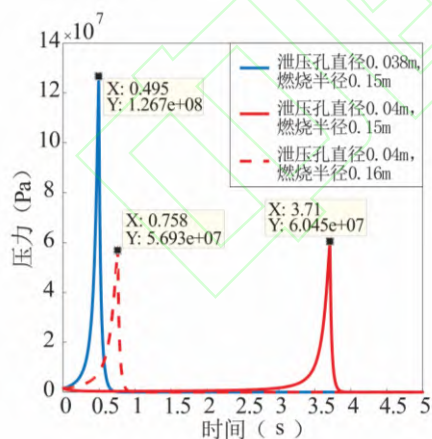


图9 200 mm 装药直径不同泄压孔压力发展

Fig.9 Pressure development of 200 mm charge diameter with different pressure relief hole

在400mm直径条件下,内部压力发展如图10所示,从图中可以看到泄压孔直径达到80mm后,壳体内压力在燃烧半径320mm时压力上升到最大,为57.59MPa,因此认为80mm直径的泄压孔可以有效限制直径为400mm的金属/炸药复合结构进入

失控区间,避免由燃烧向爆轰转变。

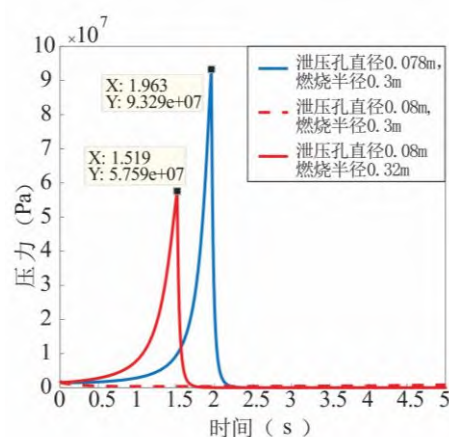


图10 400 mm 装药直径不同泄压孔压力发展

Fig.10 Pressure development of 400mm charge diameter with different pressure relief hole

在800mm直径条件下,内部压力发展如图11所示:

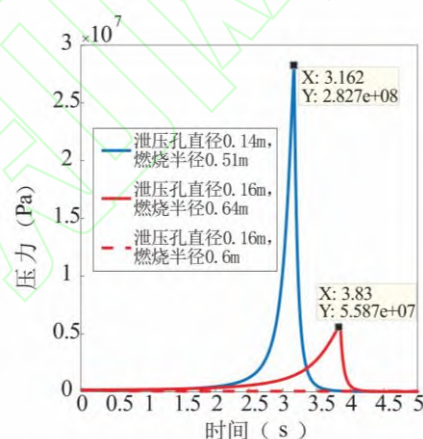


图11 800 mm 装药直径不同泄压孔压力发展

Fig.11 Pressure development of 800 mm charge diameter with different pressure relief hole

从图中可以看到泄压孔直径达到160mm后,壳体内压力在燃烧半径640mm时压力上升到最大,为55.87MPa,因此认为160mm直径的泄压孔可以有效限制直径为800mm的金属/炸药复合结构进入失控区间,避免由燃烧向爆轰转变。

表2为不同装药直径时安全泄压孔直径及炸药燃烧产生的最大压力表。根据表2数据绘制装药直径-安全泄压孔直径图,如图12所示,可以看出,安全泄压孔直径与装药直径几乎成线性关系。即当泄压孔直径为圆柱装药直径的0.2倍时,可以将内部燃烧产生的最大压力限制在90MPa以下,此时炸药的响应模式为燃烧。

表 2 最大压力与对应的安全泄压孔直径

Tab.2 Maximum pressure and corresponding diameter of the safety relief hole

装药直径/mm	安全泄压孔直径/mm	最大压力/MPa
100	20	61.43
120	24	51.55
140	28	58.51
160	32	50.11
180	36	59.0
200	40	60.45
400	80	57.59
800	160	55.87

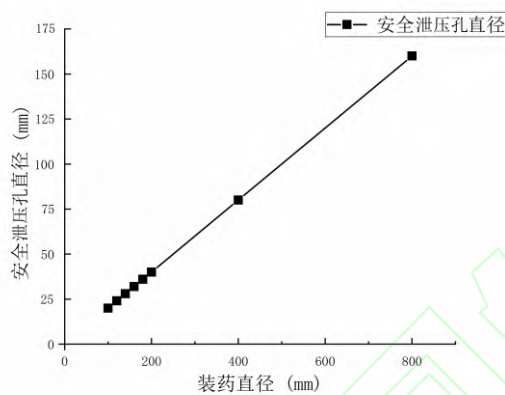


图 12 装药直径与安全泄压孔直径关系图

Fig.12 Diagram of the relationship between the diameter of the charge and the diameter of the safety relief hole

4. 结论

针对激光辐照等非接触法销毁未爆弹药时易发生爆炸，从而对周围环境造成较大影响的问题，本文以长径比大于 1 的圆柱型带壳装药为模型背景，结合流动壅塞模型、指数燃烧定律和零维内弹道理论，建立了炸药在有限泄压条件下燃烧时的压力发展模型，在预设安全压力为 90 MPa 条件下计算了不同泄压条件下炸药在壳体内燃烧时的压力发展规律，得出了在圆柱型带壳装药侧面设置安全泄压孔的直径与装药直径几乎成线性关系，按照圆柱装药直径的 0.2 倍设置泄压孔直径可以安全泄压的结论。本文的研究结果对确保未爆弹药以燃烧态销毁有着理论指导作用。

参考文献 (References)

- [1] 丁洋, 赵生伟, 初哲, 等. 激光辐照带壳炸药热点火数值计算模型[J]. 现代应用物理, 2017, 8(3): 67-73.
DING Y, ZHAO S W, CHU Z, et al. Modeling of thermal ignition of explosive with metal shell irradiated by laser beam[J]. Modern Applied Physics, 2017, 8(3): 67-73. (in Chinese)
- [2] 张家雷. 激光辐照下约束炸药热爆炸机理研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2017.
ZHANG J L. Study on laser-induced thermal explosion mechanism of confined explosives[D]. Mianyang: Institute of Fluid Physics China Academy of Engineering Physics, 2017. (in Chinese)
- [3] 楼建锋, 张树道. 不同点火方式下HMX基PBX炸药反应演化过程的特征分析[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(2): 31-38.
LOU J F, ZHANG S D. Characteristic analysis of reaction evolution process of HMX-based PBX explosive under different ignition modes[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(2): 31-38. (in Chinese)
- [4] FEAGIN T A, HEATWOLE E M, EASTWOOD D S, et al. Mechanistic insights into the initial explosion in the deflagration-to-detonation transition[J]. Combustion and Flame, 2022, 242: 112175.
- [5] 李政阳, 安振涛, 李金明, 等. 未爆弹弹丸装药稳定燃烧仿真研究[J]. 火工品, 2017(2): 53-56.
LI Z Y, AN Z T, LI J M, et al. Simulation calculation on the stable combustion stage of explosive projectile charge[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2017(2): 53-56. (in Chinese)
- [6] 尚海林, 杨洁, 胡秋实, 等. 炸药裂缝中的对流燃烧现象实验研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(1): 99-106.
SHANG H L, YANG J, HU Q S, et al. Experimental research on convective burning in explosive cracks[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(1): 99-106. (in Chinese)
- [7] JACKSON S I, HILL L G. Runaway reaction due to gas-dynamic choking in solid explosive

- containing a single crack[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2): 2307-2313.
- [8] 王玮, 田威. 管道阻塞特征对壅塞流的影响[J]. 液压与气动, 2014, 38(6): 55-58, 62.
WANG W, TIAN W. Effect of pipe blockage characteristic on choked flow[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2014, 38(6): 55-58, 62. (in Chinese)
- [9] 王浩, 方向, 郭涛, 等. 高能燃烧剂销毁金属壳体装药的安全压力计算[J]. 爆破器材, 2018, 47(1): 16-21.
WANG H, FANG X, GUO T, et al. Safe pressure calculation of explosives with metal shell destroyed by high energy combustion destruction method[J]. Explosive Materials, 2018, 47(1): 16-21. (in Chinese)
- [10] 贾栓柱, 甄建伟, 孙付兵, 等. 未爆弹药安全燃烧模型建立分析与应用[J]. 化工新型材料, 2021, 49(7): 158-161, 166.
JIA S Z, ZHEN J W, SUN F B, et al. Analysis and application of safety combustion model of unexploded ordnance[J]. New Chemical Materials, 2021, 49(7): 158-161, 166. (in Chinese)
- [11] 白志玲, 段卓平, 李治, 等. 热刺激约束DNAN基不敏感熔铸炸药装药点火后反应演化调控模型[J]. 含能材料, 2023, 31(10): 1004-1012.
BAI Z L, DUAN Z P, LI Z, et al. Regulation model for reaction evolution of confined DNAN-based cast explosives after ignition under thermal stimulation[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2023, 31(10): 1004-1012. (in Chinese)
- [12] 黄云伟. 约束对熔铸炸药慢烤响应特性的研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.
HUANG Y W. Study on slow cook-off response characteristics of melt cast explosives under constraints[D]. Taiyuan: North University of China, 2023. (in Chinese)