

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0222

# 底隙对装药发射安全性影响机理的数值模拟研究\*

吴世博, 陈卫东, 路胜卓, 吴培文, 孙明武, 焦子腾

(哈尔滨工程大学航天与建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 为研究底隙对装药发射安全性的影响机理, 基于物质点法建立了冲击载荷下受底隙影响的热-力-固耦合装药燃烧模型。该模型模拟的PBX装药底部温度与实验结果基本一致, 验证了模型的正确性。采用该模型模拟了不同底隙厚度时Composition B(COM B)装药的炮弹发射过程, 分析了装药温度变化规律。结果表明: 发射过程中, COM B装药温度从底部到顶部逐步降低, 装药底部最可能出现点火反应; 装药底部温度随着底隙厚度的增加而升高。弹底载荷峰值为324.7 MPa时, COM B装药处于安全状态的底隙厚度不超过0.062 cm。底隙中的空气在发射过程中被压缩, 其温度极速升高, 导致相邻的装药底部易出现点火反应。

**关键词:** 底隙; 装药; 发射安全性; 物质点法

中图分类号: O383

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

## A numerical study of the impact mechanism of bottom gap on charge launch safety

WU Shibo, CHEN Weidong, LU Shengzhuo, WU Peiwen, SUN Mingwu, JIAO Ziteng

(College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

**Abstract:** The issue of charge launch safety under the environment of high rifling pressure, high overload and high initial velocity has been one of the research hot topics. To investigate the impact mechanism of bottom gap on charge launch safety, a thermo-mechanical-solid coupling combustion model of the charge affected by bottom gap under impact loads based on the material point method is established. In this procedure, the formula for calculating temperature of air in the bottom gap during adiabatic compression is deduced, the relationship between the compression amount and the air temperature is quantitatively analyzed, the criteria and equation of state of the multi-material hybrid is constructed, and the calculation method of the temperature at the charge bottom affected by bottom gap in the launch process is established. The launch process of PBX charge with different bottom gap thicknesses is simulated by using the model, and the bottom temperature variation of PBX charge under different conditions are consistent with the experimental results, which verifies the correctness of the model. This model is then used to simulate the launch process of Composition B (COM B) charge with different bottom gap thickness in the launch environment, and the bottom temperature variation of charge is analyzed. The simulation results show that the charge temperature decreases gradually from the bottom to the top in the launch process and the area most likely to experience an ignition reaction is located at the charge bottom. The bottom temperature of COM B charge increases with the increase of the bottom gap thickness. The thickness of the bottom gap shall not be greater than 0.062 cm when the charge is in the launch safety state under the action of loading peak value of 324.7 MPa, which means that the presence of bottom gap seriously affects charge launch safety. From the simulation results, it is clear that the air in the bottom gap can be compressed in the launch process, and its temperature can rise rapidly; while in turn, it transfers heat to the charge bottom adjacent to the air, causing the temperature of the charge bottom to rise and making the charge bottom more susceptible to ignition reactions. The combustion

\* 收稿日期: 2023-06-28; 修回日期: 2023-12-19

第一作者: 吴世博(1992—), 男, 博士研究生, [wushibo@hrbeu.edu.cn](mailto:wushibo@hrbeu.edu.cn)

通信作者: 陈卫东(1966—), 男, 博士, 教授, [chenweidong@hrbeu.edu.cn](mailto:chenweidong@hrbeu.edu.cn)

model provides a theoretical basis for studying the charge launch safety.

**Keywords:** bottom gap; charge; launch safety; material point method

随着弹药武器的快速发展,装药在高膛压、高过载、高初速等发射环境中的安全性面临严峻挑战<sup>[1]</sup>。在武器制造、武器试验、军事演习和战争中,发射事故会导致弹药武器的可靠性降低、研发进度减缓、人员伤亡、经济损失、军队战斗能力削弱等问题<sup>[2-3]</sup>,因此装药发射安全性是制约弹药武器发展的瓶颈之一,同时也是弹药领域世界公认的热点和难点之一<sup>[4-5]</sup>。开展装药发射安全性研究,对进一步发展弹药武器、提高弹药可靠性、减少发射事故、降低人员伤亡和经济损失具有重要意义。

目前,影响装药发射安全性的主要因素有装药孔隙、裂纹、破碎和底隙等<sup>[6-10]</sup>。在孔隙方面,Roy 等<sup>[11]</sup>和 Yang 等<sup>[12]</sup>分别利用冲击实验装置和损伤热点形成模型研究了装药热点演化过程,发现高速冲击作用下孔隙坍塌形成装药热点。Long 等<sup>[13]</sup>采用分子动力学方法模拟了不同孔径下多孔炸药的冲击加载过程,发现点火临界温度随着孔径的增大而降低。在裂纹方面,Li 等<sup>[14]</sup>采用动态损伤模型研究了 PBX 装药侵彻过程的热响应,裂纹处升温速率高达  $6 \times 10^9$  K/s,温度可达 550 K。Ma 等<sup>[15-16]</sup>利用含有不均匀裂纹的本构模型研究了装药在冲击载荷作用下不同类型裂纹表面的温度变化,指出剪切型裂纹的温升高于开口型裂纹,是装药点火的重要影响因素。Liu 等<sup>[17-18]</sup>采用动态损伤黏弹性模型研究了低速冲击下 PBX 装药的力-热-化学响应,发现点火阈值速度随着初始微裂纹密度的增加而降低。在装药破碎方面,张瑞华等<sup>[19]</sup>研究了冲击载荷下装药的破碎和挤压应力,发现冲击载荷越大,挤压应力峰值越大,装药起始动态活度比越大,装药破碎越严重。Li 等<sup>[20]</sup>采用离散元法研究了装药直径对装药压缩断裂过程的影响,大于 76 mm 的装药直径对装药破碎过程的影响不大。Wang 等<sup>[21]</sup>通过动态压缩和断裂试验研究了冲击载荷下温度和充填形式对装药破碎的影响,40 °C、垂直方式时装药破碎程度最大。在底隙方面,周培毅等<sup>[22]</sup>指出装药点火应力阈值随着底隙的增大而降低。肖玮等<sup>[23]</sup>通过大落锤加载试验发现增加底隙体积能够降低 TNT 炸药点火压力阈值。美国陆军弹道研究所通过激励器研究了装药的动力学过程,发现底隙对发射过载的响应特别敏感<sup>[24]</sup>。王世英等<sup>[9]</sup>通过模拟发射实验装置研究了炸药的应力变化,发现底隙的存在降低了装药的起爆阈值,提高了敏感程度。李文彬等<sup>[25]</sup>利用有限元法研究了发射过程中装药的应力分布,发现底隙大于 0.5 mm 时装药应力快速上升。陈力等<sup>[26]</sup>研究了冲击载荷下装药的起爆敏感度,指出有底隙时装药更容易起爆。高玉玲等<sup>[27]</sup>模拟研究了撞击作用下不同底隙制作方式对装药点火敏感性的影响,发现底隙在装药中更容易导致装药起爆。Liu 等<sup>[24]</sup>模拟研究了 PBX 装药的发射安全性,结果表明,底隙厚度为 0.8 mm 时装药会被引燃。周培毅等<sup>[28]</sup>模拟研究了冲击载荷下装药温度变化,指出冲击载荷越大,被底隙加热的装药底部温度越高。Yu 等<sup>[29]</sup>利用有限体积法研究了发射过程中 PBX 装药的应力和温度变化,底隙初始温度为 500 K 时装药发生点火反应。

底隙是装药不可避免的瑕疵,其存在导致装药在发射过程中易发生点火反应,降低装药发射安全性,因此有必要研究底隙对装药发射安全性的影响机理。本文中,基于物质点法建立冲击载荷下受底隙影响的热-力-固耦合装药数值模型,在验证模型正确性的基础上,探讨发射过程中不同底隙厚度下装药的温度变化,分析底隙对装药发射安全性的影响。

## 1 数学模型

### 1.1 模型假设

本文中的模型基于以下假设:

- (1) 只考虑炮弹底部的外部压力载荷,忽略炮弹与炮管以及空气之间的摩擦力;
- (2) 底隙中的空气在极短的时间内被绝热压缩;
- (3) 仅考虑底隙中空气传递给装药底部的热量,忽略在发射过程中发射药燃烧产生的高温高压气体传递给底隙中空气的热量;

- (4) 忽略装药和空气的热辐射, 装药和空气的比热容、热导率等参数与温度无关;  
 (5) 由于发射时间极短(毫秒级), 忽略炮弹钢壳与装药之间的热量传递。

## 1.2 装药底部的热分析

采用理想气体的准静态绝热方程描述空气压缩过程:

$$p_a v_a^\gamma = U \quad (1)$$

式中:  $p_a$  为空气压力;  $v_a$  为空气体积;  $\gamma$  为材料参数, 一般取 1.4;  $U$  为常量。

采用理想气体状态方程描述底隙中空气的状态:

$$p_a v_a = nRT_a \quad (2)$$

式中:  $n$  为物质的量,  $R$  为理想气体常数,  $T_a$  为温度。

由式 (1)~(2) 可得:

$$T_{a,2} = T_{a,1} \left( \frac{p_{a,2}}{p_{a,1}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = T_{a,1} \left( \frac{v_{a,1}}{v_{a,2}} \right)^{\gamma-1} \quad (3)$$

式中:  $T_{a,1}$ 、 $v_{a,1}$  和  $p_{a,1}$  分别为空气被压缩前的温度、体积和压力,  $T_{a,2}$ 、 $v_{a,2}$  和  $p_{a,2}$  分别为空气被压缩后的温度、体积和压力。 $\eta=(v_{a,1}-v_{a,2})/v_{a,1}$  为空气压缩率。图 1 显示了初始温度为 300 K 时不同压缩率下的空气温度, 可以看出, 空气温度随压缩率的增大而升高。

在发射过程中, 与底隙相邻的装药底部是最危险的区域<sup>[24]</sup>, 因此需要重点研究装药底部的温度变化规律。底隙中的空气与装药的横截面尺寸一致, 且两者相接触。高压下, 空气被压缩, 温度上升, 并向装药底部表面(即加热层)进行热传递。由于加热层极薄, 空气向装药热传递的过程瞬间完成<sup>[2]</sup>。空气传热引起的加热层温度增量  $\Delta T_1$ <sup>[2]</sup> 为:

$$\Delta T_1 = \frac{(T_{a,2} - T_{ex,1}) \rho_{a,0} h_a c_a}{\rho_{ex,0} h_{ex} c_{p1}} \quad (4)$$

式中:  $T_{ex,1}$ 、 $h_{ex}$ 、 $\rho_{ex,0}$  和  $c_{p1}$  分别为装药加热层的初始温度、厚度、密度和定压比热容,  $h_{ex}$  取 0.001 cm<sup>[30]</sup>;  $h_a$ 、 $\rho_{a,0}$  和  $c_a$  分别为空气的厚度、密度和定压比热容,  $\rho_{a,0}$  取 1.292 kg/m<sup>3</sup>,  $c_a$  取 1006 J/(kg·K)<sup>[31]</sup>。

在没有空气传热的情况下, 装药受热传导、化学分解热、塑性功和裂纹摩擦等因素影响<sup>[32]</sup>, 其温度增量  $\Delta T_2$  为:

$$\Delta T_2 = \frac{\Delta t}{\rho_1 c_{p1}} \left[ \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \rho_1 Q_1 Z_1 \exp \left( -\frac{E_{a1}}{RT} \right) + \mu_{d1} \sigma_1 \dot{\epsilon}_{1jj} \right] \quad (5)$$

式中:  $\rho_1$ 、 $\lambda_1$  和  $Q_1$  分别为装药的当前密度、热传导系数和热分解热量,  $\Delta t$  为时间长度,  $\sigma_1$  为应力,  $\dot{\epsilon}_{1jj}$  为最大剪应变率,  $\mu_{d1}$  为摩擦因数,  $Z_1$  和  $E_{a1}$  分别为指数前因子和活化能。PBX 装药和 COM B 装药的热力学参数如表 1<sup>[33-35]</sup> 所示。

表 1 装药的热力学参数<sup>[33-35]</sup>

Table 1 Thermodynamic parameters of charges<sup>[33-35]</sup>

名称	$\rho_1/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$c_{p1}/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\lambda_1/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$Q_1/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	$Z_1/\text{s}^{-1}$	$E_{a1}\cdot\text{R}^{-1}/\text{K}$	$\mu_{d1}$
COM B	1717	1780	0.246	$5.82\times 10^6$	$2.01\times 10^{18}$	$2.7\times 10^4$	0.2
PBX	1842	1810	0.5	$5.6\times 10^6$	$5.5\times 10^{19}$	$2.652\times 10^4$	0.24

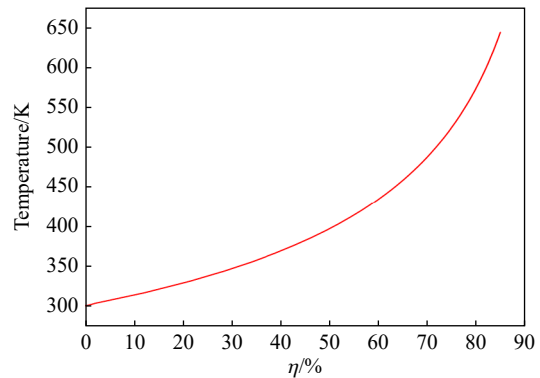


图 1 不同压缩率下的空气温度

Fig. 1 The air temperatures at different compression ratios

根据式 (4)~(5), 底隙中空气压缩后, 装药底部加热层的温度 (如图 2 所示) 为:

$$T_{ex,2} = T_{ex,1} + \Delta T_1 + \Delta T_2 \quad (6)$$

### 1.3 力学响应模型

#### 1.3.1 广义黏弹性统计裂纹模型

广义黏弹性统计裂纹模型由广义黏弹性体和微裂纹体组成, 结合了装药的宏观行为和微观裂纹行为, 用来模拟复杂的力-热-化学过程, 如图 3 所示。炸药装药中不可避免地存在微裂纹瑕疵, 发射过程中的压力载荷使炸药装药温度上升, 利用广义黏弹性统计裂纹模型可以模拟压力载荷下炸药装药内部的温度响应。

在广义黏弹性体中, 偏应力率  $\dot{S}_{ij}$  与偏应变率  $\dot{\epsilon}_{ij}^{ve}$  的关系为:

$$\dot{S}_{ij} = \sum_{n=1}^N \left( 2G^{(n)} \dot{\epsilon}_{ij}^{ve} - \frac{S_{ij}^{ve(n)}}{\tau^{(n)}} \right) \quad (7)$$

式中:  $G^{(n)}$ 、 $S_{ij}^{ve(n)}$  和  $\tau^{(n)}$  分别为第  $n$  个黏弹性体的剪切模量、偏应力和松弛时间,  $N$  为黏弹性体的总数。

在统计裂纹体中, 偏应变率  $\dot{\epsilon}_{ij}^c$  与偏应力率  $\dot{S}_{ij}$  的关系为

$$\dot{\epsilon}_{ij}^c = \frac{1}{2G} \left[ 3 \left( \frac{c}{a} \right)^2 \left( \frac{\dot{c}}{a} \right) S_{ij} + \left( \frac{c}{a} \right)^3 \dot{S}_{ij} \right] \quad (8)$$

式中:  $c$  和  $\dot{c}$  分别为裂纹的平均半径和扩展速度;  $a$  为初始缺陷尺寸;  $G$  和  $S_{ij}$  分别为统计裂纹体的剪切模量和偏应力。

广义黏弹性统计裂纹模型的偏应力与广义黏弹性体和微裂纹体相同, 而其偏应变率等于二者之和。因此, 广义黏弹性统计裂纹模型的偏应力率  $\dot{S}_{ij}$  与偏应变率  $\dot{\epsilon}_{ij}$  满足以下关系:

$$\dot{S}_{ij} = \frac{2G\dot{\epsilon}_{ij} - \sum_{n=1}^N \frac{S_{ij}^{(n)}}{\tau^{(n)}} - 3 \left( \frac{c}{a} \right)^2 \left( \frac{\dot{c}}{a} \right) S_{ij}}{1 + \left( \frac{c}{a} \right)^3} \quad (9)$$

#### 1.3.2 Johnson-Cook 塑性模型

Johnson-Cook 塑性模型考虑了金属的加工硬化、应变率和温度软化效应。钢材料的屈服应力  $\sigma_y$  为:

$$\sigma_y = (A_{JC} + B_{JC} \epsilon_p^{n_{JC}}) (1 + C_{JC} \ln \dot{\epsilon}_p^*) (1 - T^{*m_{JC}}) \quad (10)$$

$$T^* = \frac{T_{st} - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (11)$$

式中:  $\dot{\epsilon}_p^*$  为无量纲的塑性应变率,  $T_{st}$ 、 $T_{room}$  和  $T_{melt}$  分别为钢的温度、环境温度和熔化温度,  $\epsilon_p$  为等效塑性应变,  $A_{JC}$ 、 $B_{JC}$ 、 $C_{JC}$ 、 $m_{JC}$  和  $n_{JC}$  为材料常量。钢的 Johnson-Cook 模型参数如表 2 [36] 所示。

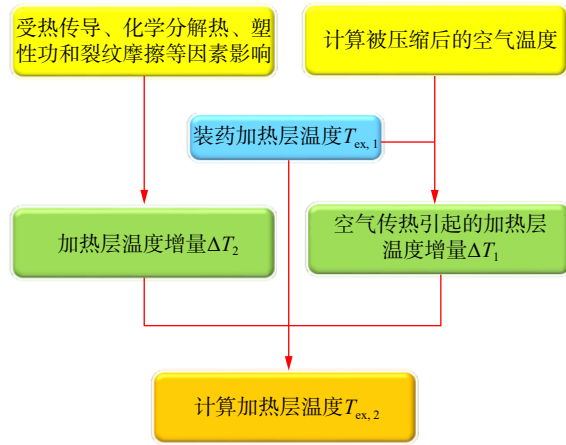


图 2 装药加热层温度的计算流程

Fig. 2 Calculation flow of temperature at heating layer of charge

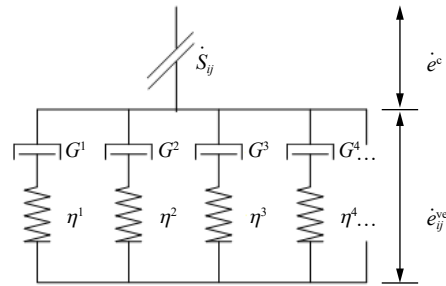


图 3 黏弹性统计裂纹模型

Fig. 3 Viscoelastic-statistical crack mechanics model

表 2 钢的 Johnson-Cook 模型参数<sup>[36]</sup>

Table 2 Parameters of Johnson-Cook model for steel<sup>[36]</sup>

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$A_{\text{JC}}/\text{MPa}$	$B_{\text{JC}}/\text{MPa}$	$n_{\text{JC}}$	$C_{\text{JC}}$	$m_{\text{JC}}$	$T_{\text{melt}}/\text{K}$
7830	792	510	0.26	0.014	1.03	1793

### 1.4 状态方程

#### 1.4.1 装药状态方程

装药未发生反应时, 处于固相状态, 可以用 JWL 方程进行描述:

$$p_{\text{ex}} = Ae^{-R_1 V} + Be^{-R_2 V} + \frac{WT_{\text{ex}}}{V} \quad (12)$$

式中:  $p_{\text{ex}}$  为装药压力,  $T_{\text{ex}}$  为装药温度,  $V$  为相对体积,  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $W$  为装药相关参数。PBX 和 COM B 装药的 JWL 方程参数如表 3<sup>[37-38]</sup> 所示。

表 3 装药的 JWL 方程参数<sup>[37-38]</sup>

Table 3 Parameters of JWL equation for charges<sup>[37-38]</sup>

名称	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$W/(\text{MPa}\cdot\text{K}^{-1})$
COM B	1717	$7.781 \times 10^4$	-5.031	11.3	1.13	2.2229
PBX	1842	$9.522 \times 10^5$	-5.944	14.1	1.41	2.4656

装药燃烧产生的气体产物可用 Virial 方程描述:

$$\frac{p_{\text{ex}} V}{RT_{\text{ex}}} = 1 + B^* \left(\frac{b_0}{V}\right) + \frac{B^*}{T^{* \frac{1}{4}}} \sum_{n=3}^m \frac{\left(\frac{b_0}{V}\right)^{n-1}}{(n-2)^n} \quad n \geq 3 \quad (13)$$

式中:  $B^*$  为无量纲 Virial 系数,  $T^*$  为无量纲温度,  $b_0$  为材料系数。本研究中采用 Virial 方程的前 3 项来描述燃烧气体产物, 即  $m=3$ 。

在燃烧过程中同一个质点可能同时存在未反应的装药和燃烧气体产物(即多物质混合状态, 如图 4 所示), 无法采用 JWL 方程或者 Virial 方程描述, 因此需要建立多物质混合准则和状态方程描述多物质混合状态。无下标、下标 g 和 s 分别代表质点、燃烧气体产物和未反应装药的物理量。

在多物质混合状态的质点中, 相对体积关系为:

$$(1 - \lambda)V_s + \lambda V_g = V \quad (14)$$

式中:  $\lambda$  为装药燃烧反应度。

内能关系为:

$$(1 - \lambda)E_s + \lambda E_g = E \quad (15)$$

未反应装药和气体产物的压力处于平衡状态, 压力关系为:

$$p_{\text{ex}} = p_{\text{ex},s}(V_s, E_s) = p_{\text{ex},g}(V_g, E_g) \quad (16)$$

采用热学平衡中的等温模型计算质点温度:

$$T_{\text{ex}} = T_{\text{ex},g} = T_{\text{ex},s} \quad (17)$$

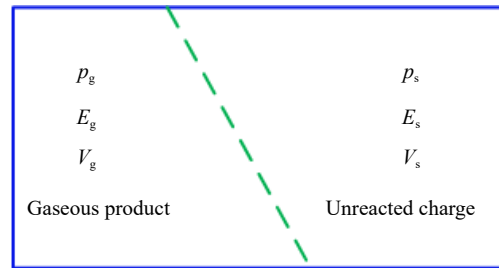


图 4 多物质混合状态下的质点

Fig. 4 Particles in mixed state of multiple substances

式(14)~(17)构建了装药多物质混合准则, 组建了非线性的装药多物质混合状态方程, 经过迭代求解, 可计算出该质点的压力和内能。

1.4.2 材料状态方程

采用 Shock 方程描述钢材料的状态:

$$p_{st} = p_H + \Gamma \rho_{st} (e - e_H) \tag{18}$$

$$p_H = \frac{\rho_{st,0} C_0^2 \psi (1 + \psi)}{[1 - (1 - s)\psi]^2} \tag{19}$$

$$e_H = \frac{1}{2} \frac{p_H}{\rho_{st,0}} \frac{\psi}{1 + \psi} \tag{20}$$

式中:  $\rho_{st}$  和  $e$  分别为钢材料的当前密度和内能,  $\rho_{st,0}$  和  $C_0$  分别为初始状态下的钢密度和声速,  $\psi$  为压缩度,  $s$  和  $\Gamma$  为钢材料参数。钢材的 Shock 方程参数如表 4<sup>[37]</sup> 所示。

表 4 钢材的 Shock 方程参数<sup>[37]</sup>

Table 4 Parameters of Shock equation for steel<sup>[37]</sup>

$\rho_{st,0}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$C_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$s$	$\Gamma$
7830	4610	1.73	1.67

2 模型验证

参考文献 [24] 中的炸药装药发射安全模拟器建立物理模型, 如图 5 所示, 加载压力曲线如图 6 所示。冲击柱和腔室选用钢材, 密度为 7.83 g/cm<sup>3</sup>, PBX 装药的密度为 1.842 g/cm<sup>3</sup>。冲击柱和装药的尺寸均为 4.0 cm×4.0 cm; 腔室的内径为 4.0 cm, 厚度为 0.5 cm; 底隙厚度( $\delta$ )分别为 0、0.05 和 0.08 cm。

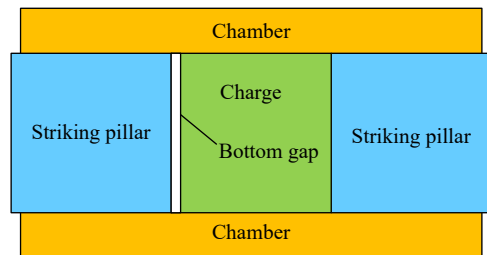


图 5 物理模型

Fig. 5 Physical model

当底隙厚度为 0 cm 时, 模拟得到的装药底部应力曲线与文献 [24] 基本一致, 如图 7 所示。

图 8 显示了不同底隙厚度下装药的最高温度, 可以看出, 温度随着时间的增加而升高, 底隙厚度为 0.08 cm 时, 装药温度在 36.23 ms 出现直线上升趋势。由点火温度判据<sup>[29]</sup>  $dT/dt \rightarrow +\infty$  可知, 底隙厚度为 0 和 0.05 cm 时装药未发生点火反应, 而底隙厚度为 0.08 cm 时装药发生了点火反应。

表 5 列出了不同底隙厚度时装药的点火情况, 可以看出, 装药底部应力峰值的模拟结果与实验结果之间的相对误差小于 1.5%, 且装药点火情况相同, 验证了模型的正确性。

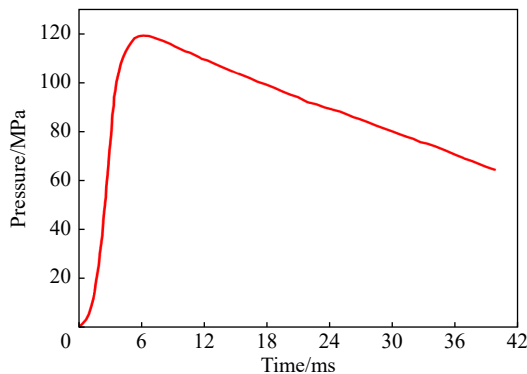


图 6 加载压力曲线

Fig. 6 Loading pressure curve

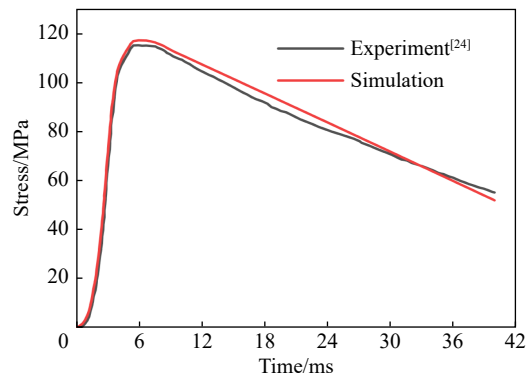


图 7 装药底部应力曲线

Fig. 7 Stress curves of charge at bottom

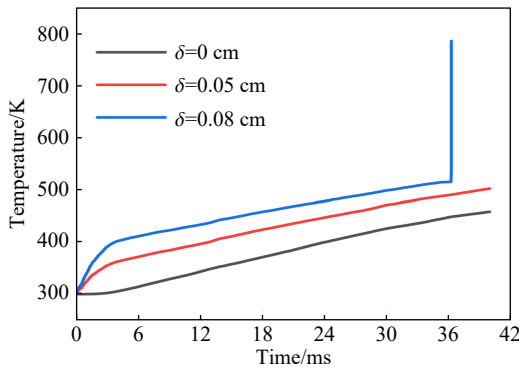


图 8 不同底隙厚度下装药的最高温度

Fig. 8 Maximum temperature of charge with different bottom gap thicknesses

表 5 不同底隙厚度时 PBX 装药的点火情况

Table 5 Ignition situation of PBX charge with different bottom gap thicknesses

$\delta/cm$	装药底部应力峰值			点火情况	
	模拟/MPa	实验/MPa	误差/%	模拟	实验
0	117.39	116.15 <sup>[24]</sup>	1.07	未点火	未点火 <sup>[24]</sup>
0.05	111.52	110.06 <sup>[24]</sup>	1.33	未点火	未点火 <sup>[24]</sup>
0.08				点火	点火 <sup>[24]</sup>

### 3 数值模拟

为了研究 COM B 装药发射安全性, 模拟了不同底隙厚度( $\delta$ )时的 COM B 装药炮弹发射过程。发射环境中 COM B 装药炮弹的物理模型如图 9 所示。炮弹的长度为 74.0 cm, 半径为 7.75 cm。炮弹的壳体选用密度为 7.83 g/cm<sup>3</sup> 的钢。COM B 装药的长度为 56.0 cm, 半径为 6.5 cm, 密度为 1.717 g/cm<sup>3</sup>。背景网格和装药质点的大小为 0.1 cm×0.1 cm。发射过程中, 作用于炮弹底部的压力载荷<sup>[29]</sup> 如图 10 所示, 其作用时间约为 18 ms。在装药底部设置 5 个观测点 G1~G5, 其横坐标  $x$  均为 67.75 cm, 纵坐标  $y$  分别为 4.75、3.75、2.75、1.75、0.25 cm。

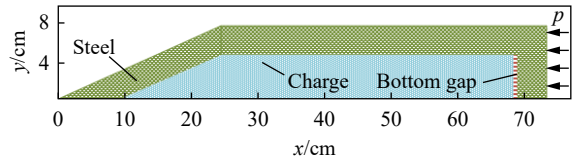


图 9 炮弹的物理模型

Fig. 9 Physical model of howitzer

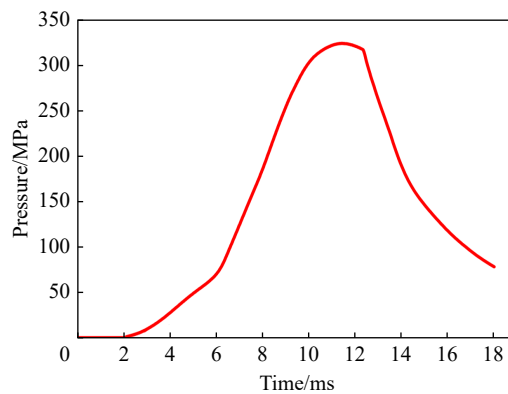


图 10 作用于炮弹的外部压力载荷

Fig. 10 Pressure load acting on the howitzer

## 4 模拟结果与分析

### 4.1 底隙厚度为 0 cm

图 11 显示了底隙厚度为 0 cm 时发射环境中典型时刻的装药温度变化。从图 11 可以看出, 装药温度从底部到顶部逐渐降低, 且随着时间的增加而升高, 装药高温区域主要集中在底部。11.4 和

18.0 ms 时高温区域的温度分别为 329~338 K 和 361~382 K。

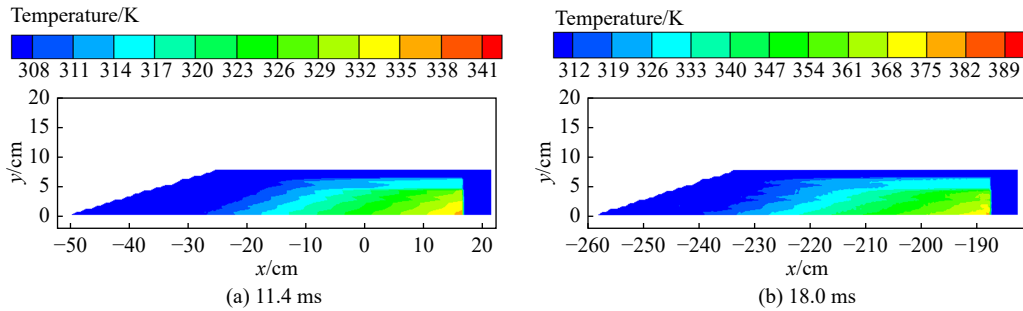


图 11  $\delta=0$  cm 时典型时刻的装药温度云图

Fig. 11 Temperature clouds of charge at typical moments when  $\delta=0$  cm

在装药的顶部 ( $x=10.75, y=0.25$ )、中部 ( $x=38.75, y=0.25$ ) 和底部 ( $x=67.75, y=0.25$ ) 分别设置一个观察点, 其应力曲线如图 12 所示, 装药应力峰值从顶部到底部依次增加。装药内部存在微小裂纹, 应力作用在裂纹处产生热量加热装药, 且应力越大, 装药温度越高, 因此装药的温度从底部到顶部逐渐降低。

装药底部不同观察点的温度随着时间的增加而升高, 如图 13 所示。在前期, 外部压力载荷较小, 装药底部应力较小, 裂纹处产生的热量较少, 装药底部温度上升缓慢; 在中期, 外部压力载荷增大, 装药底部应力增加, 裂纹处产生的热量增多, 装药温度上升速率加快; 在 11.40 ms 后, 外部压力载荷减小, 装药底部应力减小, 裂纹处产生的热量也减少, 装药底部温度上升速率减缓; 18.0 ms

时, 装药底部温度达到峰值, 最高温度为 379.30 K。相同时刻下, G1~G5 的温度逐渐升高。从图 14 可以看出, 在相同时刻下, G1~G5 处的应力逐渐增大, 导致 G1~G5 处的温度上升速率增加, 温度也升高。

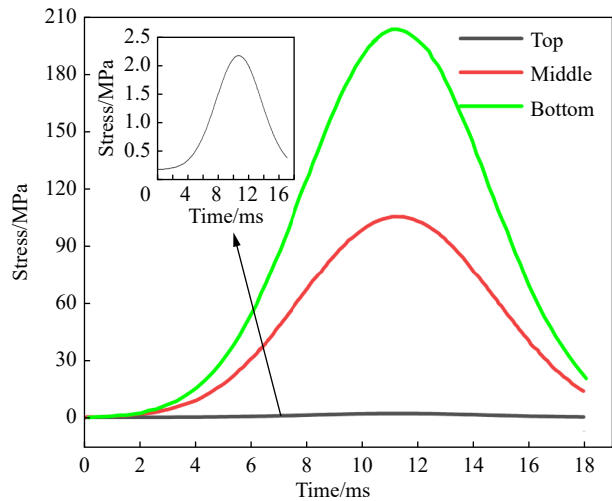


图 12 不同位置的装药应力曲线

Fig. 12 Stress curves of charge at different positions

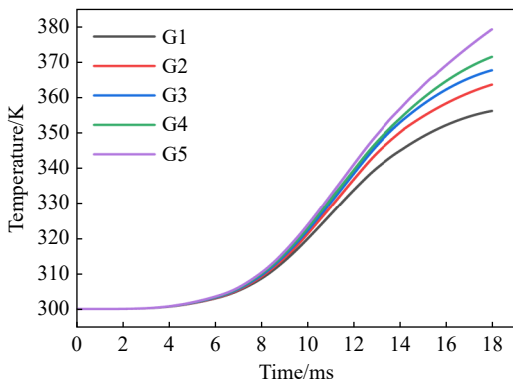


图 13  $\delta=0$  cm 时不同观察点的温度曲线

Fig. 13 Temperature curves at different observation positions when  $\delta=0$  cm

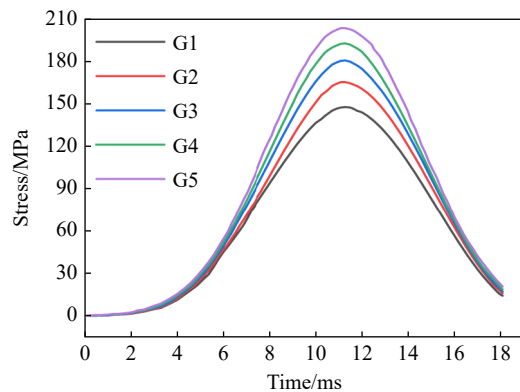


图 14 不同观察点处的装药应力曲线

Fig. 14 Stress curves of charge at different observation positions



### 4.2 底隙厚度为 0.055 cm

图 15 显示了底隙厚度为 0.055 cm 时发射环境中典型时刻的装药温度变化。从图 15 可以看出, 装药温度从底部到顶部逐渐降低, 高温区域主要集中在装药底部。11.4 和 18.0 ms 时, 高温区域温度分别为 446~487 K 和 422~457 K。相较于  $\delta=0$  cm,  $\delta=0.055$  cm 时装药底部的温度较高, 这是由于装药底部温度受到裂纹产生热量和底隙中空气传递热量的共同影响。在发射过程中, 底隙中的空气被压缩而快速升温, 加热装药底部, 因此,  $\delta=0.055$  cm 时装药底部温度较高。

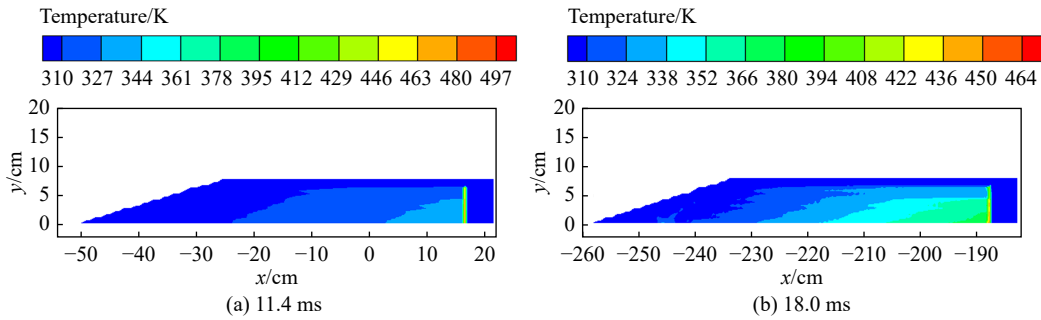


图 15  $\delta=0.055$  cm 时典型时刻的装药温度云图

Fig. 15 Temperature clouds of charge at typical moments when  $\delta=0.055$  cm

装药底部不同观察点的温度随着时间的增加先升高后降低, 如图 16 所示。在前期, 外部压力载荷较小, 装药底部应力较小, 裂纹处产生的热量 ( $Q_n$ ) 较少, 同时底隙中的空气被轻度压缩, 传给装药底部的热量 ( $Q_a$ ) 较少, 因此, 装药底部热量增加得较少, 温度上升缓慢。随着外部载荷的增加,  $Q_n$  和  $Q_a$  增大, 导致装药底部温度快速上升。在 11.4 ms 后, 外部载荷逐渐减小,  $Q_n$  也减少; 同时, 空气温度低于装药底部温度后, 装药底部向空气传递热量  $Q_y$  ( $Q_y > 0$ )。当  $Q_n > Q_y$  时, 装药底部温度继续上升; 当  $Q_n = Q_y$  时, 装药底部温度出现峰值; 当  $Q_n < Q_y$  时, 装药底部温度逐渐下降。

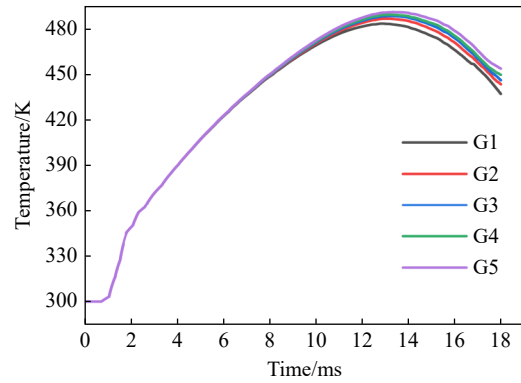


图 16  $\delta=0.055$  cm 时不同观察点的温度曲线

Fig. 16 Temperature curves at different observation positions when  $\delta=0.055$  cm

### 4.3 底隙厚度为 0.062 cm

图 17 显示了底隙厚度为 0.062 cm 时发射环境中典型时刻的装药温度变化。从图 17 可以看出, 装药温度从底部到顶部逐渐降低, 高温区域主要集中在装药底部。11.4 和 18.0 ms 时高温区域温度分别为

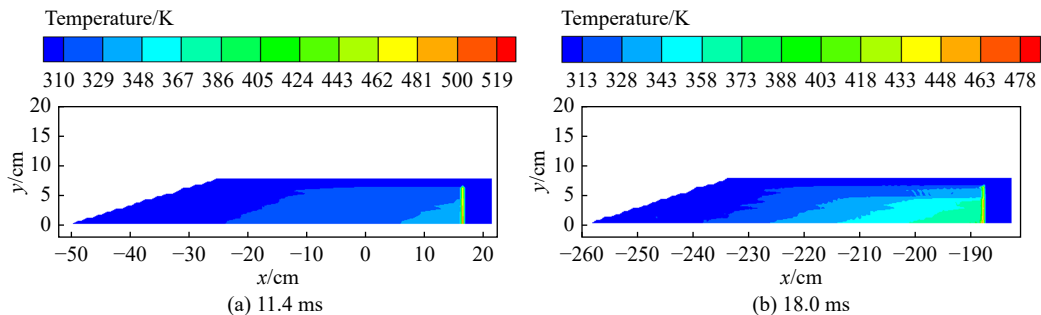


图 17  $\delta=0.062$  cm 时典型时刻的装药温度云图

Fig. 17 Temperature clouds of charge at typical moments when  $\delta=0.062$  cm

481~508 K 和 436~470 K。相较于  $\delta=0.055$  cm,  $\delta=0.062$  cm 时装药底部温度较高。相同压力下, 底隙厚度越大, 空气传递给装药底部的热量越多, 因此  $\delta=0.062$  cm 时装药底部温度较高。

装药底部不同观察点的温度随着时间的增加先升高后降低, 如图 18 所示。在 11.4 ms 前, 装药底部的裂纹产生的热量 ( $Q_n$ ) 和底隙中空气传递给装药底部的热量 ( $Q_a$ ) 使炸药底部温度持续上升。11.4~12.9 ms 内, 装药底部开始向空气传递热量  $Q_y$  ( $Q_y > 0$ ), 而裂纹处产生的热量  $Q_n$  大于  $Q_y$  ( $Q_n > Q_y$ ), 因此装药底部温度缓慢上升。在 12.9 ms,  $Q_n = Q_y$ , 装药底部温度出现峰值。12.9~18.0 ms 内,  $Q_n < Q_y$ , 装药底部温度下降。

#### 4.4 底隙厚度为 0.063 cm

图 19 显示了底隙厚度为 0.063 cm 时发射环境中典型时刻的装药温度变化。从图 19 可以看出, 装药温度从底部到顶部逐渐降低, 高温区域主要集中在装药底部。11.4 和 12.1 ms 时高温区域的温度分别为 482~518 K 和 510~800 K。整个过程中, 弹底变形量为 0.0501 cm, 导致底隙中的空气被压缩, 压缩率为 79.52%。相较于  $\delta=0.055$  cm 和  $\delta=0.062$  cm,  $\delta=0.063$  cm 时的装药底部温度较高。在同一发射环境中, 底隙厚度越大, 被压缩的空气传递给装药底部的热量越多, 装药底部温度越高。

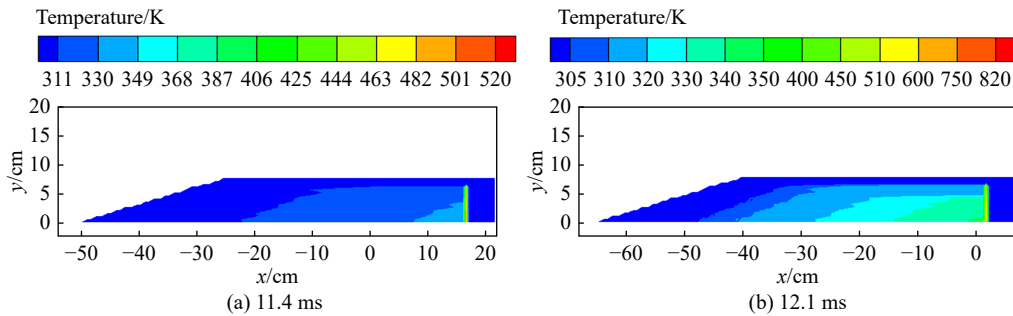


图 19  $\delta=0.063$  cm 时典型时刻的装药温度云图

Fig. 19 Temperature clouds of charge at typical moments when  $\delta=0.063$  cm

装药底部不同观察点的温度随着时间的增加而升高, 如图 20 所示。在 12.1 ms, 观测点 G5 的温度极速升高, 由点火温度判据<sup>[29]</sup>  $dT/dt \rightarrow +\infty$  可知, G5 已经发生了点火反应。从图 21 可以看出, G5 的压力在 12.1 ms 突升到 0.63 GPa, 发生了点火反应。这表明: 在此发射环境中, 底隙厚度为 0.063 cm 时 COM B 装药处于不安全状态。

表 6 列出了不同底隙厚度时 COM B 装药的底部温度峰值和点火情况。可以看出, 为保证装药发射安全性, 弹底载荷峰值为 324.7 MPa 时, COM B 装药的底隙厚度不大于 0.062 cm。

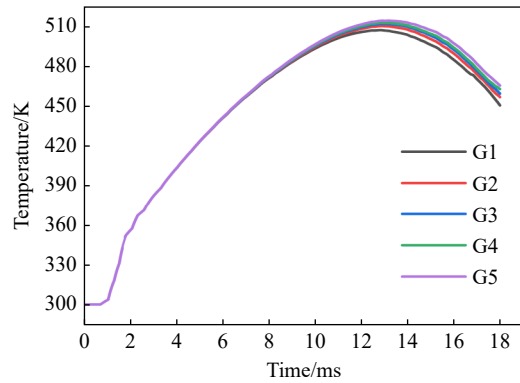


图 18  $\delta=0.062$  cm 时不同观察点的温度曲线

Fig. 18 Temperature curves at different observation positions when  $\delta=0.062$  cm

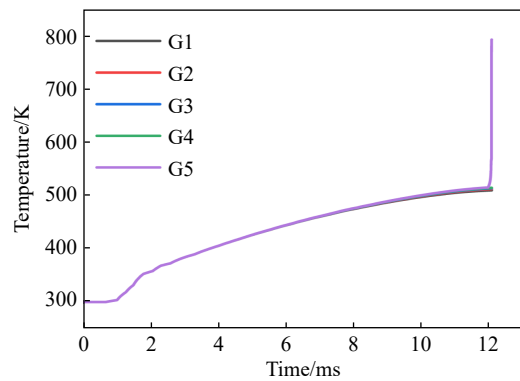


图 20  $\delta=0.063$  cm 时不同观察点的温度曲线

Fig. 20 Temperature curves at different observation positions when  $\delta=0.063$  cm

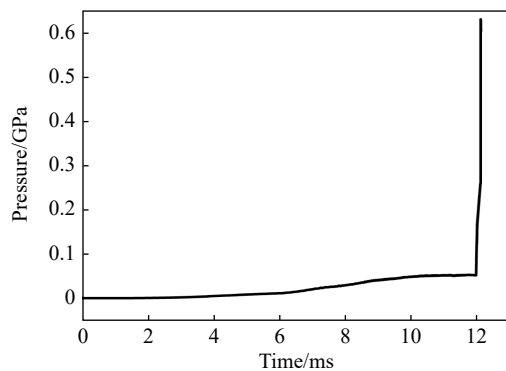


图 21 观察点 G5 的压力曲线

Fig. 21 Pressure curve at G5

表 6 不同底隙厚度时 COM B 装药的点火情况

Table 6 Ignition situations of COM B with different bottom gap thicknesses

$\delta/\text{cm}$	装药底部温度 峰值/K	高温点	高温区域	点火情况
0	379.30	G5	装药底部	未点火
0.055	491.39	G5	装药底部	未点火
0.062	514.39	G5	装药底部	未点火
0.063	>750.00	G5	装药底部	点火

## 5 结 论

利用物质点法建立了一种受底隙影响的装药发射安全性数值模型, 验证了该模型的正确性, 利用该模型模拟了不同底隙厚度下炮弹的发射过程, 分析了底隙对装药发射安全性的影响机理, 结论如下:

- (1) 建立的冲击载荷下力-热-固耦合的装药燃烧模型, 可为装药发射安全性研究提供理论支持;
- (2) 发射过程中, COM B 装药的温度从顶端到底部依次升高, 装药底部最可能发生点火反应, 且底部温度随着底隙厚度的增加而升高;
- (3) 弹底载荷峰值为 324.7 MPa 时, COM B 装药处于安全状态的底隙厚度不大于 0.062 cm;
- (4) 底隙中的空气在发射过程中被压缩, 温度升高, 将热量传递给装药底部, 使装药底部更容易发生点火反应。

## 参考文献:

- [1] 杨京广, 余永刚. 随行程装药方案提高大口徑火炮初速的数值预测 [J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(2): 161-165. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)02-0161-05.  
YANG J G, YU Y G. Velocity prediction of big caliber gun based on traveling charge scheme [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(2): 161-165. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)02-0161-05.
- [2] 彭嘉诚, 蒋建伟, 廖伟. 高速旋转弹丸炸药装药在膛内运动中底层温度的数值模拟 [J]. *兵工学报*, 2020, 41(9): 1783-1791. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.09.010.  
PENG J C, JIANG J W, LIAO W. Bottom temperature simulation of explosive charge in high-speed rotating projectile in internal ballistic process [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(9): 1783-1791. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.09.010.
- [3] 张雯浩, 余永刚. 基于流固耦合的燃气冲刷烧蚀内膛特性分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(3): 034201. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0390.  
ZHANG W H, YU Y G. Analysis of gas-eroding barrel characteristics based on fluid-solid interaction [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(3): 034201. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0390.
- [4] LI C, RUI X T, WANG Y, et al. A novel method for gas generation law calculation of fractured propellant charge [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2018, 43(9): 898-903. DOI: 10.1002/prop.201800025.
- [5] 俞来峰, 芮筱亭, 王国平, 等. DCD 格式在破碎发射药床两相流内弹道计算中的应用 [J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(3): 295-300. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)03-0295-06.  
YUN L F, RUI X T, WANG G P, et al. Application of DCD scheme to computation of two-phase flow interior ballistics for fractured propellant bed [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(3): 295-300. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)03-0295-06.
- [6] ZHAO X, RUI X T, LI C, et al. Evaluation and prediction methods for launch safety of propellant charge based on support vector regression [J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 109: 107527. DOI: 10.1016/j.asoc.2021.107527.
- [7] LIU W, WANG G P, RUI X T, et al. A hotspot model for PBX explosive charge ignition in a launch environment [J].

- Combustion Science and Technology*, 2022, 194(10): 1954–1972. DOI: 10.1080/00102202.2020.1849166.
- [8] GUO H F, ZHANG F, ZHAO C Z, et al. Influence of particle size of explosive on ignition mechanism under low velocity impact [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2021, 46(1): 46–51. DOI: 10.1002/prop.202000121.
- [9] 王世英, 胡焕性. B 炸药装药发射安全性落锤模拟加载实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(3): 275–278.  
WANG S Y, HU H X. Drop hammer simulation study on launch safety of composite B [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(3): 275–278.
- [10] 王燕, 芮筱亭, 宋振东, 等. 初始堆积对发射药床底部挤压应力的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(5): 560–566. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)05-0560-07.  
WANG Y, RUI X T, SONG Z D, et al. Effect of original packing on compression stress at the bottom of propellant bed [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(5): 560–566. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)05-0560-07.
- [11] ROY S, JOHNSON B P, ZHOU X, et al. Hot spot ignition and growth from tandem micro-scale simulations and experiments on plastic-bonded explosives [J]. *Journal of Applied Physics*, 2022, 131(20): 205901. DOI: 10.1063/5.0085356.
- [12] YANG K, WU Y Q, HUANG F L. Damage and hotspot formation simulation for impact-shear loaded PBXs using combined microcrack and microvoid model [J]. *European Journal of Mechanics: A/Solids*, 2020, 80: 103924. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2019.103924.
- [13] LONG Y, CHEN J. Theoretical study of the critical dynamic behaviors for pore collapse in explosive [J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2021, 29(5): 055009. DOI: 10.1088/1361-651X/abfd1c.
- [14] LI X, LIU Y Z, SUN Y. Dynamic mechanical damage and non-shock initiation of a new polymer bonded explosive during penetration [J]. *Polymers*, 2020, 12(6): 1342. DOI: 10.3390/polym12061342.
- [15] MA X, MA Q P, LI T, et al. A modified set of constitutive models for polymer-bonded explosives that consider heterogeneity of initial cracks and failure of damaged granules [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2022, 47(11): e202200032. DOI: 10.1002/prop.202200032.
- [16] MA X, ZHANG K, SHANG H L, et al. Measuring crack growth and rise in temperature around a cylindrical defect in explosive simulants under low-pressure and long-pulse loadings [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45(10): 1654–1661. DOI: 10.1002/prop.202000057.
- [17] LIU R, CHEN P W, ZHANG X T, et al. Non-shock ignition probability of octahydro-1, 3, 5, 7-tetranitro-tetrazocine-based polymer bonded explosives based on microcrack stochastic distribution [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45(4): 568–580. DOI: 10.1002/prop.201900313.
- [18] LIU R, WANG X J, CHEN P W, et al. The role of tension-compression asymmetrical microcrack evolution in the ignition of polymer-bonded explosives under low-velocity impact [J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 129(17): 175108. DOI: 10.1063/5.0046011.
- [19] 张瑞华, 芮筱亭, 赵宏立, 等. 基于离散单元法的发射装药挤压破碎模拟实验 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(6): 062301. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0157.  
ZHANG R H, RUI X T, ZHAO H L, et al. Simulational experiment on compression and fracture of propellant charge based on the discrete element method [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(6): 062301. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0157.
- [20] LI C, RUI X T, GU J J, et al. Influences of the random stacking and charge's diameter on compression and fracture process of propellant charge [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2022, 47(1): e202100177. DOI: 10.1002/prop.202100177.
- [21] WANG Y, RUI X, LI C, et al. Analysis on affecting factors of the fragmentation degree of propellant charge [C]//1st International Conference on Mechanical System Dynamics. Nanjing, China: IET, 2022: 647–651. DOI: 10.1049/icp.2022.1890.
- [22] 周培毅, 徐更光, 张景云, 等. 改性 B 炸药装药发射安全性实验研究 [J]. *火炸药学报*, 1999, 22(4): 34–35. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.1999.04.010.  
ZHOU P Y, XU G G, ZHANG J Y, et al. The experimental study of lurching safety of modified Comp-B explosive charge [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 1999, 22(4): 34–35. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.1999.04.010.
- [23] 肖玮, 李亮亮, 苏健军, 等. TNT 在热和撞击加载作用下的点火性能 [J]. *火炸药学报*, 2013, 36(2): 38–41. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2013.02.009.  
XIAO W, LI L L, SU J J, et al. Ignition performances of TNT under temperature and impact loading actions [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2013, 36(2): 38–41. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2013.02.009.

- [24] LIU W, WANG G P, RUI X T, et al. A test method for launch safety of explosive charge accurately simulating launch overload [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2022: 1-21. DOI: [10.1080/07370652.2022.2108165](https://doi.org/10.1080/07370652.2022.2108165).
- [25] 李文彬, 王晓鸣, 赵国志, 等. 装药底隙对弹底应力及发射安全性影响研究 [J]. *弹道学报*, 2001, 13(3): 64-67, 72. DOI: 10.3969/j.issn.1004-499X.2001.03.013.  
LI W B, WANG X M, ZHAO G Z, et al. The research of the effect of base gap on the stress of explosives and the launching safety [J]. *Journal of Ballistics*, 2001, 13(3): 64-67, 72. DOI: 10.3969/j.issn.1004-499X.2001.03.013.
- [26] 陈力, 丁雁生. 炸药装药撞击起爆低速气炮模拟实验系统 [C]//第三届全国爆炸力学实验技术交流会论文集. 黄山: 中国科学技术大学冲击动力学实验室, 2004: 280-284.
- [27] 高玉玲, 肖玮, 杜振华. 在撞击作用下炸药装药的底隙制作研究 [J]. *火炸药学报*, 2001, 24(3): 35-36. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2001.03.012.  
GAO Y L, XIAO W, DU Z H. Research on the making of base-gap of the explosive under impact in steel sleeve [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2001, 24(3): 35-36. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2001.03.012.
- [28] 周培毅, 徐更光, 王廷增. 炸药装药在后座冲击条件下的点火模型研究 [J]. *火炸药学报*, 2000, 23(1): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2000.01.001.  
ZHOU P Y, XU G G, WANG T Z. Ignition models of explosive charge subjected to setback impact [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2000, 23(1): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2000.01.001.
- [29] YU Y C, YAN H, CHEN W D, et al. Finite volume method for the launch safety of energetic materials [J]. *Shock and Vibration*, 2021, 2021: 9609557. DOI: 10.1155/2021/9609557.
- [30] 李德聪, 陈力, 丁雁生. 装药弹体侵彻混凝土厚靶中的炸药摩擦起爆模型 [J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(1): 13-17. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)01-0013-05.  
LI D C, CHEN L, DING Y S. A model of explosion induced by friction in the process of loaded projectiles penetrating into concrete targets [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(1): 13-17. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)01-0013-05.
- [31] 赵泽灏, 张金龙, 董宇红. 多孔介质传热模型在多孔壁湍流中的适用性 [J]. *空气动力学学报*, 2023, 41(0): 1-10. DOI: [10.7638/kqdlxxb-2023.0084](https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2023.0084).  
ZHAO Z H, ZHANG J L, DONG Y H. Heat transfer models for porous media in porous-walled turbulent flows [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2023, 41(0): 1-10. DOI: [10.7638/kqdlxxb-2023.0084](https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2023.0084).
- [32] CHEN W D, MA J X, SHI Y Q, et al. A mesoscopic numerical analysis for combustion reaction of multi-component PBX explosives [J]. *Acta Mechanica*, 2018, 229(5): 2267-2286. DOI: 10.1007/s00707-017-2098-7.
- [33] MCCLELLAND M A, GLASCOE E A, NICHOLS A L, et al. ALE3D simulation of incompressible flow, heat transfer, and chemical decomposition of Comp B in slow cookoff experiments: DE-AC52-07NA27344 [R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 2014.
- [34] HOBBS M L, KANESHIGE M J, ANDERSON M U. Cookoff of a melt-castable explosive (compb-B): SAND2012-10207C [R]. Albuquerque: Sandia National Laboratory, 2012.
- [35] 马敬鑫. 基于物质点法的非均质炸药燃烧细观响应机理研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021: 55-68. DOI: [10.27060/d.cnki.ghbcu.2021.000050](https://doi.org/10.27060/d.cnki.ghbcu.2021.000050).  
MA J X. Mechanism research of combustion reaction of multi-component explosives at mesoscale based on material point method [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021: 55-68. DOI: [10.27060/d.cnki.ghbcu.2021.000050](https://doi.org/10.27060/d.cnki.ghbcu.2021.000050).
- [36] CHEN W D, SHI Y Q, YAN H, et al. A stochastic material point method for probabilistic dynamics and reliability [J]. *Computational Mechanics*, 2019, 63(5): 1069-1082. DOI: 10.1007/s00466-018-1667-5.
- [37] CHEN W D, WU S B, MA J X, et al. Numerical simulation of the deflagration to detonation transition behavior in explosives based on the material point method [J]. *Combustion and Flame*, 2022, 238: 111920. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111920.
- [38] TARVER C M. Jones-Wilkins-Lee unreacted and reaction product equations of state for overdriven detonations in octogen- and triaminotrinitrobenzene-based plastic-bonded explosives [J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2020, 124(7): 1399-1408. DOI: 10.1021/acs.jpca.9b10804.

(责任编辑 王小飞)