

2种低射速下火炮膛内模块装药烤燃特性的对比与分析

钱环宇, 余永刚

(南京理工大学 能源与动力工程学院, 南京 210094)

摘要: **目的** 研究火炮多发连续射击后膛内模块装药的受热过程。**方法** 采用烤燃的思想建立模块装药留膛二维瞬态烤燃模型。以 443 K 为临界温度, 求解火炮在 2 种低射速工况 (以每分钟 2、3 发) 下连续射击至药室内壁温度达到约 443 K 时的壁面温度分布, 并以此为初始温度条件, 对模块装药在膛内的烤燃过程进行数值模拟, 对比分析 2 种低射速下火炮膛内模块装药的烤燃特性。**结果** 火炮以每分钟 2 发射击 42 发后, 火炮药室内壁温度达到 444.3 K, 装填入内的模块装药在膛内滞留 176.4 s 后, 发生烤燃响应, 烤燃响应温度为 484.2 K。射速为每分钟 3 发时, 火炮射击 39 发后, 药室内壁温度达到 444.3 K, 此时模块装药在膛内滞留 216.9 s 后会发生烤燃响应, 烤燃响应温度为 483.0 K。2 种低射速工况下, 模块装药的初始烤燃响应位置均位于模块盒右上角的内壁处。数值计算所得烤燃响应温度结果与试验一致。**结论** 该模型能够较好地分析模块装药在膛内的烤燃问题。射速对模块装药滞留膛内的烤燃特性有一定影响。

关键词: 模块装药; 烤燃; 连续射击; 火炮药室; 壁面温度

中图分类号: TJ450

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)03-0032-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.03.005

Comparison and Analysis of Cook-Off Characteristics of Modular Charge in Gun Chamber at Two Low Firing Rates

QIAN Huan-yu, YU Yong-gang

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

ABSTRACT: To study the heating process of modular charge in gun chamber after multiple continuous firings, a two-dimensional transient cook-off model of modular charge retained in gun chamber was established with cook-off method. Taking 443 K as the critical temperature, the wall temperature distributions when the gun continuously fires until the temperature of the inner chamber wall reaches about 443 K are solved at two low firing rates of 2 rounds/min and 3 rounds/min, which are then adopted as the initial temperature. Based on that, the cook-off processes of modular charge in the chamber are numeri-

收稿日期: 2021-12-29; 修订日期: 2022-01-19

Received: 2021-12-29; Revised: 2022-01-19

基金项目: 国家自然科学基金 (52076111)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (52076111)

作者简介: 钱环宇 (1994—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为模块装药热安全问题。

Biography: QIAN Huan-yu (1994—), Female, Doctoral candidate, Research focus: thermal safety of modular charge.

通讯作者: 余永刚 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为含能材料燃烧技术。

Corresponding author: YU Yong-gang (1963—), Male, Doctor, Professor, Research focus: combustion technology of energetic materials.

引文格式: 钱环宇, 余永刚. 2 种低射速下火炮膛内模块装药烤燃特性的对比与分析[J]. 装备环境工程, 2022, 19(3): 032-038.

QIAN Huan-yu, YU Yong-gang. Comparison and Analysis of Cook-off Characteristics of Modular Charge in Gun Chamber at Two Low Firing Rates[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(3): 032-038.

cally simulated to compare and discuss the cook-off characteristics of modular charge in gun chamber at two low firing rates. The results show that the temperature of the inner wall of the gun chamber reaches 444.3 K after 42 rounds at the firing rate of 2 rounds/min. The modular charge produces cook-off response after being retained in the chamber for 176.4 s with the cook-off response temperature of 484.2 K. When at 3 rounds/min, the inner wall temperature of the chamber reaches 444.3 K after 39 rounds, in which the modular charge produces cook-off response at 216.9 s with the temperature of 483.0 K. Under the two low firing rate conditions, the initial cook-off response positions of the modular charge are located in the upper right corner of the modular cartridge. The numerical results of cook-off off temperature are well consistent with the experimental results. The model is proved to be able to analyze the cook-off problem of modular charge in the chamber, and the firing rate has a certain influence on the cook-off characteristics of modular charge retained in gun chamber.

KEY WORDS: modular charge; cook-off; continuous firing; gun chamber; wall temperature

模块装药是指将发射药模块化、结构化, 形成独立的装药单元, 以便根据射击需要选择模块种类和数量的一种新型装药方式。它有助于实现火炮自动装填、提高射速, 便于弹药勤务管理, 是大口径火炮装药的重要发展方向。然而在实际的火炮连续射击过程中, 发射药燃烧产生的高温火药燃气不断冲刷着药室内壁, 使得壁面温度不断上升。当一发射击结束后, 若立即装入新的模块, 那么由可燃材料制成的模块在药室内可能会出现热自燃或热爆炸等热安全性事故, 存在极大的危险。

在弹药系统热安全问题的研究中, 烤燃方法是一种非常有效的途径。在炸药的热安全性研究方面, 秦国圣等^[1]通过慢速烤燃试验, 研究了 4 种不同尺寸的 HNS 多点阵列冲击片雷管装药在 3 种不同升温速率下的热安全性。结果表明, 同规格装药时, 升温速率越高; 同升温速率时, 装药量越大, 烤燃响应越剧烈。李娜等^[2]利用自主研发的慢速烤燃试验装置, 在 2 种升温速率下对 JBO-9013 和 JH-14 炸药进行了试验研究, 试验表明, 升温速率对 2 种炸药的响应温度和响应剧烈程度均有影响。张中礼等^[3]对比分析了快速烤燃和慢速烤燃对装药结构试验反应等级的影响, 为其在热安全性试验中如何选择适当的加热方式提供了指导。AYDEMIR 等^[4]开展了慢速烤燃试验, 通过获取炸药 PBCN-110 的烤燃响应时间、烤燃响应位置以及烤燃响应温度, 考察了其热安全性。在对 PBX 炸药的研究中, 高大元等^[5-7]分别考察了加速老化、不同约束条件、叠层复合装药等因素对烤燃响应特性的影响。肖游等^[8]在慢烤条件下对复合装药烤燃响应的研究表明, 烤燃弹的烤燃响应点位于外层低敏感药柱靠近壳体的环状区域, 响应温度随高能药柱直径的增加而升高, 响应等级随外层低敏感药柱厚度的增加而增加。徐瑞等^[9-10]探讨了缓释结构对 B 炸药烤燃响应剧烈程度的影响, 发现弹药泄压结构可以有效降低弹药响应的剧烈程度, 提高装药的热安全性。类似地, 对有/无泄压结构烤燃弹的炸药在慢烤过程中反应特性的研究中, 王琦等^[11]基于 UCM (通用烤燃) 模型的研究也表明了泄压结构会降低熔铸炸药的自热反

应速率, 从而提升装药安全性。在对炸药 HMX 的研究中, Gross 等^[12]基于气固两相模型, 发现热路中的微小变化 (如气隙) 会显著影响快烤的点火时间, 但对慢烤的影响很小。通过烤燃试验和 UCM 模型, HOBBS 等^[13-14]主要研究了烤燃背景下炸药等含能材料的压力相关模型, 其对炸药 CL-20 的压力相关模型能够预测从快烤到慢烤各种条件下的点火时间, 对复合炸药 Comp-B3 的压力相关模型考察了由于热分解产生气泡的排气而导致的点火延迟。

在固体火箭发动机的热安全性研究方面, 刘文一等^[15]在快烤和慢烤 2 种情况下分析了推进剂的温度分布和爆炸延迟时间, 发现推进剂在快烤时的热扩散速率大于慢烤情况, 而温度梯度恰好相反。邓玉成等^[16]开展了慢速烤燃试验, 并结合数值模拟分析了 3 种试验件的点火温度和响应等级。研究发现, 中小型试验件的点火位置位于圆柱体中心, 而大尺寸固体火箭发动机的点火位置位于固体推进剂前端肉厚的中心位置。Yang 等^[17]研究了不同火焰环境下固体火箭发动机的热安全性问题, 发现 AP/HTPB 推进剂的初始着火位置基本相同, 火焰温度升高, 则着火延迟期缩短, 着火温度增大。在此基础上, Ye 等^[18]进一步研究了快烤和慢烤 2 种条件下固体火箭发动机的热安全问题, 发现快烤条件下 AP/HTPB 推进剂的初始点火位置位于推进剂外壁的环形区域, 慢烤条件下, 随着加热速率的增加, 点火中心位置沿轴向向推进剂右端面移动。肖冰等^[19]研究了绝热层厚度对自由装填固体火箭发动机烤燃响应特性的影响, 得出了快烤和慢烤情况下的着火温度、着火延迟时间、着火位置及其与绝热层厚度的关系。张海军等^[20]在慢烤情况下分析了结构尺寸对端羟基聚醚推进剂发动机响应特性的影响, 发现直径大小对烤燃响应时间和温度的影响较大, 对长度的影响较小, 二者对烤燃响应反应位置都有较大影响。

此外, 学者们还将烤燃与弹药系统结合起来研究。Isik 等^[21]开展了 7.62 mm 步枪射击试验, 验证了烤燃模型, 并分析了多参数变化对推进剂烤燃响应时间的影响。Zhu 等^[22]研究了战斗部在快烤过程中的热

安全性,得到了火焰温度和反应级数,研究结果为降低爆炸危险性战斗部提供了参考。Li 等^[23]结合不同烤燃速率研究了底排弹药的热安全性,考察了装药长度和装药内孔直径 2 个装药尺寸因素对底排装置烤燃响应特性的影响。

虽然上述基于烤燃方法的研究对弹药系统的热安全性提供了极大的指导,但现有的研究中大多都只考察了弹药在可控或恒定升温速率下的热安全问题,而火炮多发连续射击过程中,膛内温度场是非线性的,其热环境复杂多变,装填入内的发射药处于温度变化剧烈的动态烤燃环境。对于这种情况下发射装药的热安全性鲜有研究,尤其是模块装药的热安全性。对此,本文以某大口径火炮多发连续射

击后膛内热环境为研究背景,建立模块装药膛内二维瞬态烤燃模型,研究模块装药滞留膛内的热安全性问题,并对 2 种低射速工况下模块装药在膛内的烤燃特性进行对比分析。

1 模型建立

1.1 物理模型

模块装药膛内烤燃模型如图 1 所示。火炮药室由膛底边界、药室壁面、弹底边界构成,呈厚壁圆筒状。模块装药装填于药室左侧,药室内充满空气。模块装药由可燃模块盒、发射装药、中心传火管和点火药包等部件构成,整体呈薄壁圆筒状。

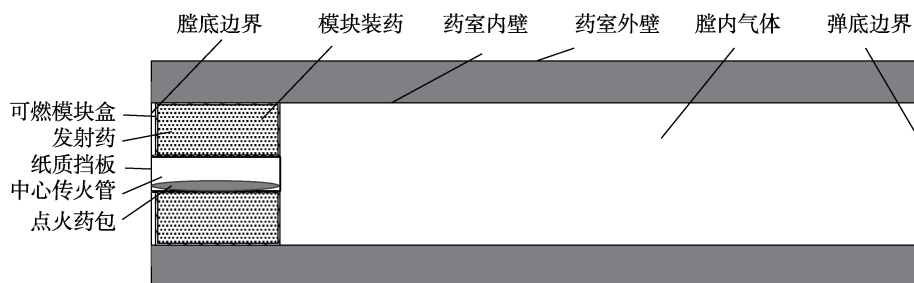


图 1 模块装药膛内烤燃模型

Fig.1 Diagram of cook-off of modular charge in gun chamber

针对所研究问题采用如下简化假设:

- 1) 可燃模块盒及盒内装药的热分解反应遵循 Arrhenius 定律。
- 2) 模块盒和发射药在发生烤燃响应前均保持固态,其物性参数和化学动力学参数在烤燃过程中保持不变,两者分别作为均质、各向同性的材料处理。
- 3) 发射药在模块盒内均匀分布,呈多孔装药状。
- 4) 火药药室为密闭空间。
- 5) 模块装药与环形药室内壁接触导热,与其两端空气存在对流换热。火炮药室与外界存在自然换热。忽略其他热作用。

1.2 数学模型

根据 Arrhenius 定律,速率常数与温度呈指数关系。则模块盒和发射药的反应速率 W_1 和 W_2 可分别表示为:

$$W_1 = A_1 \exp(-E_1 / RT) \quad (1)$$

$$W_2 = A_2 \exp(-E_2 / RT) \quad (2)$$

式中: A_1 、 A_2 为指前因子; E_1 、 E_2 为表观活化能; R 为摩尔气体常量; T 为热力学温度。

烤燃过程中,模块盒和盒内发射药(多孔装药)的能量方程分别为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_1}{\rho_1 c_1} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + W_1 Q_1 \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_3}{\rho_3 c_3} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + W_2 Q_2 \quad (4)$$

其中, ρ_3 、 c_3 、 λ_3 的计算方法^[24]为:

$$\begin{cases} \rho_3 = (1-\varepsilon)\rho_2 + \varepsilon\rho_4 \\ c_3 = [(1-\varepsilon)\rho_2 c_2 + \varepsilon\rho_4 c_4] / \rho_3 \\ \lambda_3 = (1-\varepsilon)\lambda_2 + \varepsilon\lambda_4 \end{cases} \quad (5)$$

式中:下标 1、2、3、4 分别表示模块盒、发射药、多孔装药和空气; ρ 、 c 、 λ 分别为密度、比热容和导热系数; ε 为多孔装药的孔隙率; Q_1 、 Q_2 分别是模块盒和发射药的反应热。

烤燃过程中 2 种不同固相材料 m 和材料 n 的交界面同时满足温度和热流连续条件:

$$T_{r=r_m}^m = T_{r=r_n}^n \quad (6)$$

$$T_{x=x_m}^m = T_{x=x_n}^n \quad (7)$$

$$\lambda_m \frac{\partial T^m}{\partial r} \bigg|_{r=r_m} = \lambda_n \frac{\partial T^n}{\partial r} \bigg|_{r=r_n} \quad (8)$$

早期的平板试验表明,443 K (170 °C) 为模块装药可能发生烤燃响应的临界温度,因此研究中首先要求火炮射击至内壁温度达到约 443 K。射击方式为如下 2 种低射速工况:火炮以每分钟 2 发(工况一)、3 发(工况二)连续射击。

常温常压下,经内弹道计算^[25]、火炮药室径向传热计算得出火炮药室内壁温度达到约 443 K 时的射

击发数、内外壁温度以及温度分布，结果见表 1 和图 2。这一温度分布将作为烤燃过程的初始温度条件。

表 1 2 种低射速下火炮药室内外壁初始温度
Tab.1 Initial temperatures of inner/outer wall at two firing rates

射速/(发·min ⁻¹)	射击发数	内壁温度/K	外壁温度/K
2	42	444.3	422.7
3	39	444.3	408.0

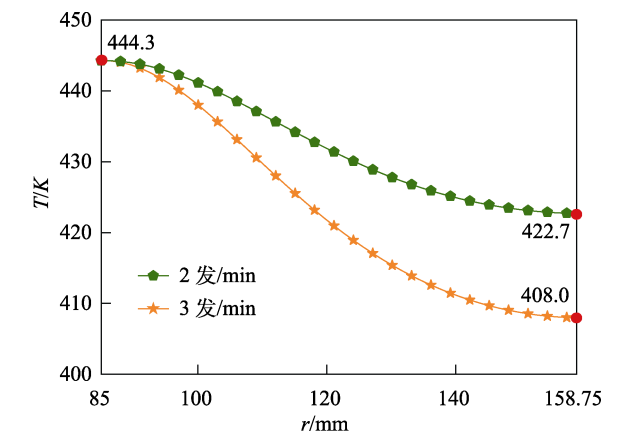


图 2 药室壁面温度
Fig.2 Schematic diagram of wall temperatures

1.3 计算模型

基于上述模型，采用 FLUENT 仿真分析软件对模块装药在膛内的烤燃过程进行数值模拟。采用四边形结构网格，并对边界和交界处的网格进行加密，以提高计算精度。计算域共计 262 590 个网格单元，并经过网格无关性验证。求解时，通过编译用户自定义函数，引入模块盒和多孔装药的能量源项，选择基于压力的求解器，以 SIMPLE 模式耦合压力和速度，密度、压力、动量和能量方程均采用二阶迎风格式，时间步长取 0.1 s。因所研究问题具有二维轴对称性，故采用 1/2 结构模型以简化计算。计算所用模块装药的动力学参数及物性参数^[26-28]见表 2。

为了更直观地了解烤燃过程中模块装药内部的温度响应，计算时在模块内设置 4 个温度监测点 A、B、C、D，其位置如图 3 所示。点 A(75, 52.5)为盒内发射药的中心位置，点 B(75, 72.5)、C(75, 82.5)位于点 A 正上方。图 3 中，点 D 为数值计算求解得出的烤燃响应中心，即最先发生烤燃的位置。计算认为，若某一时刻某点的温度曲线出现陡升，温度在瞬间急剧升高至 1000 K 以上，则该点为烤燃响应中心，该点所在温升曲线的拐点对应的温度值为烤燃响应温度，拐点对应的时间为烤燃响应时间。

表 2 模块装药计算参数
Tab.2 Kinetic parameters of modular charge

材料	动力学参数			物性参数		
	A_i/s^{-1}	$E_i/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	$Q_i/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
模块盒	5.754×10^{15}	163.8	928	1100	0.14	1534
发射药	7.917×10^{12}	125.0	1856	1600	0.142	1131

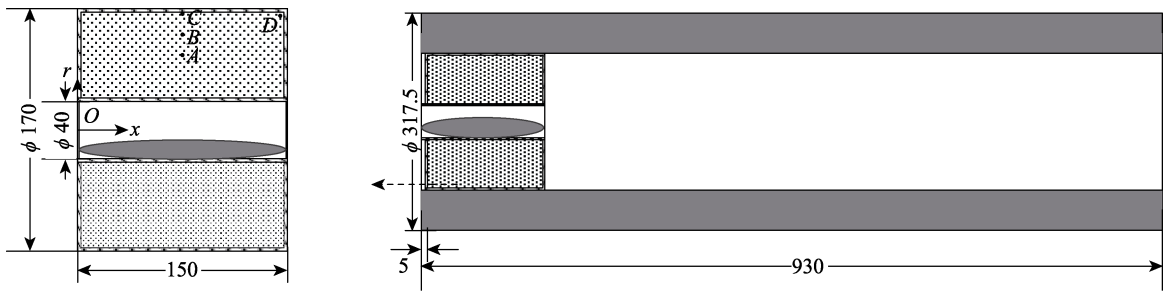


图 3 计算模型（单位：mm）
Fig.3 Schematic diagram of calculation model (unit: mm)

2 结果及分析

针对火炮以 2 种低射速连发射击后的热环境，对新装填入内的模块装药在膛内的烤燃过程进行了模拟。图 4 为烤燃过程中模块装药在不同时刻的温度云图。在工况一下，火炮以每分钟 2 发的低射速射击 42 发后，药室内壁温度达到临界值。图 4a 分别列出

了模块装药在烤燃初期（ $t=38.1\text{ s}$ ）、烤燃中期（ $t=108.1\text{ s}$ ）和烤燃响应时刻（ $t=176.4\text{ s}$ ）的温度云图。

在烤燃初期，模块装药整体温度较低，模块盒外壁面因直接与高温壁面相接触，故温度较高，并将热量不断向模块盒内壁面及盒内发射药传递。中心传火管右侧温度较高，是因为药室内的气体被高温壁面加热，不断向药室左侧的模块传热，故中心传火管区

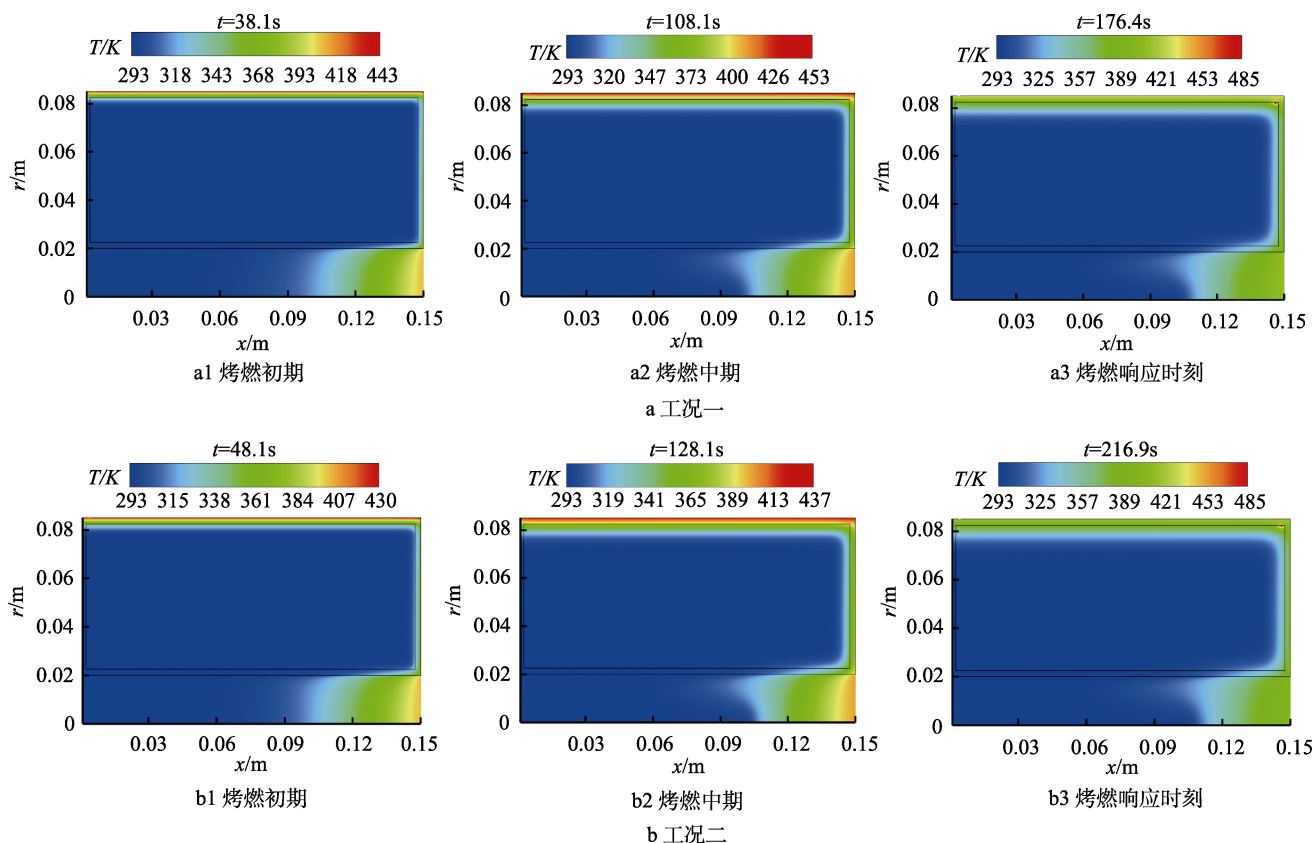


图4 模块装药温度云图

Fig.4 Temperature contours of modular charge: a) condition 1; b) condition 2

域的温度呈现出自右向左逐渐降低的云图。同时,受药室内空气传热影响,模块装药右侧面的温度也有所升高。

随着烤燃过程的进行,热量不断累积,当模块装药某一区域的温度达到一定值后,此处的模块盒或发射药将会发生缓慢的自热反应,此时进入烤燃中期。这一时期模块会经历漫长的升温过程,该过程中存在2种热源:原有的高温壁面和模块的自热反应。图4a2展示了这2种热作用叠加的效果,可以观察到,模块中心温度几乎不变,模块盒整体处于较高温,且热量自模块盒区域向内部的发射药区域以相同的速率逐层推进,靠近模块盒的发射药温度不断上升。中心传火管内,右侧的高温区继续向左推进。因高温壁面所传递的热量大于药室内空气所传递的热量,故模块装药上端面处的温度高于右端面,这一区域更早发生自热反应。热量进一步累积,使得上端面处更深层的发射药被加热升温。

当烤燃过程进行至 $t=176.4\text{ s}$ 时,模块盒右上角热量不断增加,温度逐渐升高至模块装药的着火点,此时发生烤燃响应。故在工况一下,装填入内的模块装药在膛内滞留 176.4 s 后,将会发生烤燃响应,烤燃响应点位于模块盒右上角的发射药处,烤燃响应温度约为 484.2 K 。

在工况二下,火炮以每分钟3发的低射速射击

39发后,火炮药室内壁温度达到临界值。从图4b中可以观察到,这种射速下模块装药的烤燃过程、温度分布和变化及其烤燃响应位置与工况一基本相同,烤燃响应温度为 483.0 K 。主要差异为烤燃响应时间,模块装药在膛内滞留 216.9 s 后才发生烤燃响应,比上一工况延长了约 40 s 。这一差异主要是由烤燃的初始温度条件即火炮药室壁面温度引起的。在火炮射击过程中,火炮药室内壁面与外壁面、外壁面与外界环境始终存在热传导与热对流。火炮以每分钟2发射击时,需要射击42发,药室内壁温度方可达到临界值,整个射击过程持续了 21 min ,最终内外壁温差为 21.6 K ;以每分钟3发射击时,仅需射击39发即可达到临界值,射击过程为 13 min ,最终内外壁温差高达 36.3 K 。射击过程时间越长,相当于火炮壁面传热过程时间越长,从而外壁温度更高,火炮药室壁面整体温度更高,热容量更大。因此,虽然工况二下火炮壁面更快达到了临界温度,但较之工况一,其药室壁面温度低,热容量小,故模块装药在膛内要滞留更长的时间才能积累足够的热量以发生烤燃响应。

2种射速下模块内温度监测点的温度曲线如图5所示。综合比较图4、图5可知,位于模块发射药中心的A点处温度几乎不变,其上方B点的温度随着烤燃过程的进行略有升高,C点距离高温壁面最近,

温度在烤燃初期最先、最快上升,在烤燃中后期基本保持不变。 D_1 、 D_2 分别为工况一、工况二下的烤燃响应中心位置,均位于模块盒右上角内壁面处。其温度在烤燃初期上升较快,中后期升温速率略减,临近烤燃响应时此处温度骤升,在瞬间升高至1000 K以

上。工况一、工况二下模块装药的烤燃响应时间分别为176.4、216.9 s,烤燃响应位置基本相同,烤燃响应温度分别为484.2、483.0 K。文献[29]中试验测得了模块装药着火的温度为475~485 K,本数值模拟所得温度与文献相吻合,验证了模型的正确性。

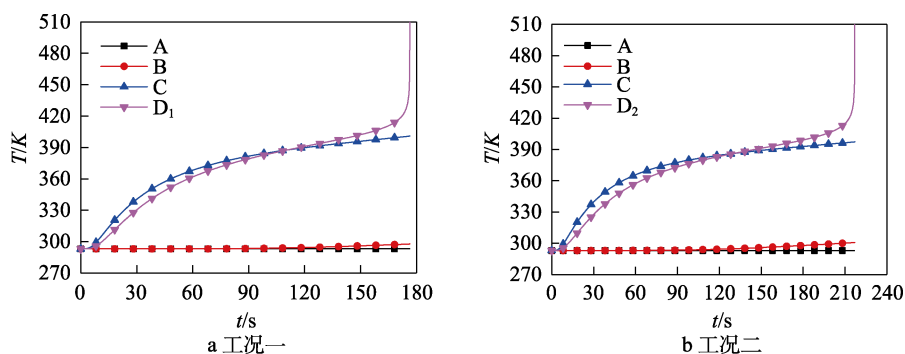


图5 模块装药内监测点温度响应

Fig.5 Diagrams of temperature response on monitoring points in modular charge

3 结论

针对火炮多发连续射击后模块装药在膛内的烤燃问题,建立了模块装药膛内烤燃瞬态模型,对2种低射速工况进行了数值仿真,结论如下:

1) 火炮以每分钟2发连续射击42发后,药室内壁温度将达到临界值,此时装填入内的模块装药在膛内滞留176.4 s后,将会发生烤燃响应,烤燃响应温度为484.2 K;以每分钟3发连续射击39发后,药室内壁温度达到临界温度,模块装药在膛内滞留216.9 s后发生烤燃响应,烤燃响应温度为483.0 K。2种射速下的烤燃响应位置基本相同,均位于模块盒右上角的内壁面处,此处的发射药最先着火。

2) 模块装药在膛内的安全滞留时间与射速有一定关系。射速越低,火炮内壁达到临界温度所需的射击发数越多(射击时间越长),火炮药室内外壁温差越小,最终使得火炮内部模块装药发生烤燃响应的的时间越短。

参考文献:

- [1] 秦国圣, 都振华, 王可暄, 等. HNS 多点阵列装药慢速烤燃试验研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(9): 34-39.
QIN Guo-sheng, DU Zhen-hua, WANG Ke-xuan, et al. Slow Cook-Off Test of HNS Multi-Point Array Charge[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(9): 34-39.
- [2] 李娜, 吕春玲, 王杰, 等. 低成本高效慢速烤燃试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(9): 18-23.
LI Na, LYU Chun-ling, WANG Jie, et al. Low Cost and High Efficiency Slow Cook-Off Test Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(9): 18-23.
- [3] 张中礼, 吴松, 鲁亮, 等. 装药结构热安全性试验方法

及其特点分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(5): 28-33.

ZHANG Zhong-li, WU Song, LU Liang, et al. Characteristics of the Fast/Slow Cook-Off Experimental Methods for Ammunition Structures[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(5): 28-33.

- [4] AYDEMIR E, ULAS A, SERIN N. Thermal Decomposition and Ignition of PBXN-110 Plastic-Bonded Explosive[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2012, 37(3): 308-315.
- [5] 高大元, 申春迎, 文尚刚, 等. 加速老化 PBX-6 炸药件的火烧实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(S1): 145-150.
GAO Da-yuan, SHEN Chun-ying, WEN Shang-gang, et al. Fast Cook-Off Test of Accelerated Aging PBX-6 Explosive Components[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(S1): 145-150.
- [6] 邓海, 赵小锋, 任新联, 等. 不同约束条件下硝酸酯类 PBX 炸药装药慢烤响应特性[J]. 火炸药学报, 2021, 44(5): 652-657.
DENG Hai, ZHAO Xiao-feng, REN Xin-lian, et al. Slow Cook-Off Response Characteristics of Nitrate Explosive PBX Charge under Different Constraint Conditions[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2021, 44(5): 652-657.
- [7] 曹仕瑾, 李忠友, 熊伟强, 等. 低易损浇注 HMX-Al 基 PBX 炸药设计与性能[J]. 含能材料, 2021, 29(7): 650-657.
CAO Shi-jin, LI Zhong-you, XIONG Wei-qiang, et al. Design and Performance of a Low Vulnerability PBX with HMX and Al[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(7): 650-657.
- [8] 肖游, 智小琦, 王琦, 等. 多种复合炸药装药的慢烤特性及其机理[J]. 高压物理学报, 2022, 36(2): 1-10.
XIAO You, ZHI Xiao-qi, WANG Qi, et al. Characteristics and Mechanism of Slow Cook-Off of Composite Explosive Charges[J]. Chinese Journal of High Pressure Phys-

- ics, 2022, 36(2): 1-10.
- [9] 徐瑞, 智小琦, 王帅. 缓释结构对B炸药烤燃响应烈度的影响[J]. 高压物理学报, 2021, 35(3): 149-157.
XU Rui, ZHI Xiao-qi, WANG Shuai. Influence of Venting Structure on the Cook-Off Response Intensity of Composition B[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2021, 35(3): 149-157.
- [10] 徐瑞. 热刺激下缓释结构与炸药响应烈度关系的研究[D]. 太原: 中北大学, 2021.
XU Rui. Study on the Relationship between Venting Structure and Explosive Response Intensity under Thermal Stimulation[D]. Taiyuan: North University of China, 2021.
- [11] 王琦, 智小琦, 肖游, 等. 基于UCM模型的B炸药慢烤泄压结构的作用分析[J/OL]. 爆炸与冲击, 2021. <http://www.bzyej.cn/article/doi/10.11883/bzyej-2021-0253?viewType=HTML>.
WANG Qi, ZHI Xiao-qi, HAO Chun-jie. Analysis of The Effect of Venting Structure on Slow Cook-Off of Comp-B Based on UCM[J/OL]. Explosion and Shock Waves, 2021. <http://www.bzyej.cn/article/doi/10.11883/bzyej-2021-0253?viewType=HTML>
- [12] GROSS M L, HEDMAN T D, MEREDITH K V. Considerations for Fast Cook-Off Simulations[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2016, 41(6): 1036-1043.
- [13] HOBBS M L, KANESHIGE M J, CORONEL S. Vented and Sealed Cookoff of Powdered and Pressed E-CL-20[J]. Journal of Energetic Materials, 2021, 39(4): 432-451.
- [14] HOBBS M L, KANESHIGE M J, ERIKSON W W, et al. Cookoff Experiments of a Melt Cast Explosive (Comp-B3)[J]. Combustion and Flame, 2020, 213: 268-278.
- [15] 刘文一, 焦冀光. 固体发动机装药热安全性数值分析[J]. 装备环境工程, 2016, 13(2): 129-133.
LIU Wen-yi, JIAO Ji-guang. Numerical Analysis on the Thermal Safety of Solid Rocket Motor Propellant[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(2): 129-133.
- [16] 邓玉成, 李军, 任慧, 等. 不同结构尺寸丁羟发动机慢速烤燃特性[J]. 含能材料, 2022, 30(2): 155-162.
DENG Yu-cheng, LI Jun, REN Hui, et al. Slow Cook-Off Characteristics of HTPB SRM with Different Structural Sizes[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2022, 30(2): 155-162.
- [17] YANG Hou-wen, YU Yong-gang, YE Rui, et al. Cook-off Test and Numerical Simulation of AP/HTPB Composite Solid Propellant[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 40: 1-9.
- [18] YE Qing, YU Yong-gang. Numerical Simulation of Cook-off Characteristics for AP/HTPB[J]. Defence Technology, 2018, 14(5): 451-456.
- [19] 肖冰, 田小涛, 王绍增, 等. 绝热层厚度对自由装填固体火箭发动机烤燃特性的影响[J/OL]. 固体火箭技术, 2021-09-13. <https://web05.cnki.net/kmobile/Journal/detail/ASSJ/GTHJ20210910000>
XIAO Bing, TIAN Xiao-tao, WANG Shao-zeng, et al. Effect of Insulation Thickness on Cook-Off Characteristics of Free-Standing Solid Rocket Motor[J/OL]. Journal of Solid Rocket Technology, 2021-09-13. <https://web05.cnki.net/kmobile/Journal/detail/ASSJ/GTHJ20210910000>
- [20] 张海军, 聂建新, 王领, 等. 端羟基聚醚推进剂慢速烤燃尺寸效应[J]. 兵工学报, 2021, 42(9): 1858-1866.
ZHANG Hai-jun, NIE Jian-xin, WANG Ling, et al. Numerical Simulation on Size Effect of Hydroxyl Terminated Polyether Propellant Engine during Slow Cook-off[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(9): 1858-1866.
- [21] IŞIK H, GÖKTAŞ F. Cook-Off Analysis of a Propellant in a 7.62 mm Barrel by Experimental and Numerical Methods[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112: 484-496.
- [22] ZHU Min, WANG Sheng-ao, HUANG Huang, et al. Numerical and Experimental Study on the Response Characteristics of Warhead in the Fast Cook-Off Process[J]. Defence Technology, 2021, 17(4): 1444-1452.
- [23] LI Wen-feng, YU Yong-gang, YE Rui. Effects of Charge Size on Slow Cook-Off Characteristics of AP/HTPB Composite Propellant in Base Bleed Unit[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2018, 43(4): 404-412.
- [24] 刘伟, 范爱武, 黄晓明. 多孔介质传热传质理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
LIU Wei, FAN Ai-wu, HUANG Xiao-ming. Theory and Application of Heat and Mass Transfer in Porous Media[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [25] 张小兵. 枪炮内弹道[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
ZHANG Xiao-bing. Interior Ballistics of Guns[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004.
- [26] 胡荣祖, 郭鹏江, 宋纪蓉, 等. 用非等温DSC估算硝化棉热爆炸的临界温升速率[J]. 火炸药学报, 2003, 26(2): 53-57.
HU Rong-zu, GUO Peng-jiang, SONG Ji-rong, et al. Estimation of the Critical Increase Temperature Rate of Thermal Explosion of Nitrocellulose Using Non-Isothermal DSC[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2003, 26(2): 53-57.
- [27] 姚二岗, 胡荣祖, 赵凤起, 等. 用DSC曲线数据估算硝化棉的 C_nB 和表观经验级数自催化分解反应热爆炸临界温升速率[J]. 火炸药学报, 2013, 36(5): 72-76.
YAO Er-gang, HU Rong-zu, ZHAO Feng-qi, et al. Estimation of the Critical Rate of Temperature Rise for Thermal Explosion of C_nB and Apparent Empiric-Order Autocatalytic Decomposing Reaction of Nitrocellulose from DSC Curves[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2013, 36(5): 72-76.
- [28] 宁斌科, 刘蓉, 杨正权, 等. 硝化棉一级自催化分解反应动力学参数数值模拟[J]. 含能材料, 1999, 7(4): 162-165.
NING Bin-ke, LIU Rong, YANG Zheng-quan, et al. Numerical Simulation of Kinetic Parameters of the First Order Autocatalytic Decomposition of NC[J]. Energetic Materials, 1999, 7(4): 162-165.
- [29] 刘子如. 含能材料热分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
LIU Zi-ru. Thermal analyses for energetic materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.