

文章编号: 1006-9941(2013)03-0351-06

动力源火工品点火过程中主装药温度特性数值计算

蒋新广¹, 王海甫², 柳维旗¹, 姜志保¹, 刘玉宇¹

(1. 军械工程学院军械技术研究所, 河北 石家庄 050000; 2. 陆军军官学院, 安徽 合肥 230031)

摘要: 为研究动力源火工品的点火过程, 为其设计提供理论依据, 采用数值模拟方法, 根据热点火理论建立了描述点火过程的数学模型。通过数值积分得到了在不同点火源温度情况下主装药内部表面附近的温度分布曲线。由分布曲线得到: 当点火源温度在 2000~3600 K 之间变化时, 点火发生的位置离开主装药表面的距离在 462.8~112.4 μm 之间, 点火延迟期由 8222 μs 缩短到 264 μs 。结果说明点火源温度升高, 点火延迟期缩短, 当点火源温度升高到 2800 K 时, 延迟时间缩短的趋势变得平缓。

关键词: 爆炸力学; 点火数值计算; 热点火理论; 温度分布; 点火延迟期

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.03.016

1 引言

动力源火工品是能产生脉冲推力的小型推力装置, 通过阵列动力源火工品逻辑点火完成弹药及飞行器的弹道和姿态修正, 以便精确达到预定目标。其工作过程是: 电点火元件发火, 点燃点火药, 然后点燃主装药, 主装药燃烧的燃气通过喷管喷出, 产生反作用推力。由于其工作时间和点火延迟时间要短, 因此点火作用所经历的过程非常短暂^[1]。

由于火药和推进剂点火过程复杂, 目前没有一种全面的理论, 能涉及所有可能发生的反应。国内外对火药和推进剂点火过程依据不同的理论进行了数值模拟研究。毛根旺^[2]根据推进剂的特点, 提出了含氧流动热气体点燃推进剂的气相点火模型, 模型中详细考察了点火期间火药表面的分解过程。范存杰^[3]引用固相点火理论, 着重分析了起主要作用的对流换热, 认为提高点火燃气的流速能明显提高点火燃气对火药表面的热交换率。周海清^[4-5]和 Vadim V Barzykin^[6]研究了在考虑点火药气体和固体颗粒两相流时推进剂的点火过程, 颗粒的传热增强效应能显著缩短点火延迟时间。Chang S T^[7]讨论了点火燃气热辐射的影响, 认为热辐射是通过推进剂分解气体的吸收来实现的, 能够缩短点火延迟时间。

但关于装药内部温度分布、采用温度临界值作为

点火判据来确定点火延迟时间等问题尚无数值模拟的报道。本文应用热点火理论, 在不影响总体点火过程的情况下, 做一定合理的假设, 研究在点火药输出温度作用下, 主装药内部的温度变化情况, 计算确定点火延迟时间, 分析点火药输出温度对主装药点火过程的影响, 从而为点火药选择提供理论依据。

2 基本模型假设

对柱形装药, 端面燃烧, 尾部点火的动力源火工品(结构如图 1), 在点火开始阶段, 由于燃烧室压强比较低, 点火药燃气不易渗透到主装药空隙中, 因此开始时刻点火药加热的仅仅是靠近点火药的一薄层药剂。其热点火理论模型^[8]如图 2 所示, T_{ig} 表示主装药表面的点火温度, T_i 为主装药初始温度。热点火理论不考虑气相中的化学反应与质量扩散对点火过程的影响, 认为固相温度的升高是环境热量对固相传热与固相中化学反应放热的结果。

根据主装药物理化学性质, 热点火理论的物理模型所考虑的基本假设如下^[9]:

(1) 由点火所导致的化学反应仅仅在初始物质被加热的那一层(即表面附近)中进行。加热层的厚度被认为远远小于物体表面曲率半径和物体的大小。这样就可以把被点火物质形象地看做是具有平展表面的半无限大空间。

(2) 除了化学反应, 物质中没有体积热源, 对该物质的加热只通过表面而进行。物体在加热区域保持不动, 并且没有发生相变。但对环境的热惯性没有特殊

收稿日期: 2012-05-29; 修回日期: 2012-07-24

作者简介: 蒋新广(1978-), 男, 工程师, 博士, 主要从事火工品检测研究。e-mail: xgjiang.78@163.com

要求。热源的作用可以借助表面边界条件予以确切表达。但热源作用时间比主装药点火延迟时间要长。

(3) 点火过程中, 反应物质的转变率很低, 因此, 可以用零级反应来描述化学动力学规律。

(4) 物质的整体物理性质(导热系数 λ 、密度 ρ 、热容 c_v), 化学性质(活化能 E 、指前因子 K_0 、反应热 Q) 以及加热条件在整个点火过程中保持不变。

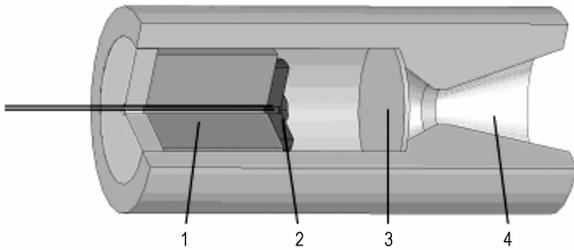


图1 动力源火工品结构示意图

1—主装药, 2—点火药, 3—膜片, 4—喷管

Fig. 1 Sketch of powered pyrotechnics structure

1—main charge, 2—ignition composition, 3—sealed film, 4—nozzle

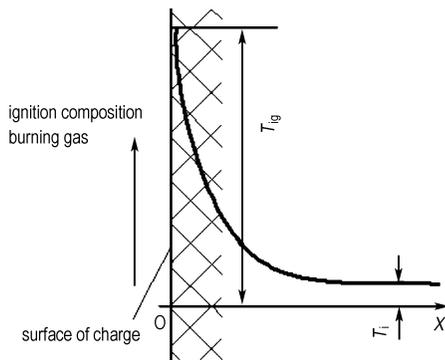


图2 热点火模型示意图

Fig. 2 Sketch of thermal ignition model

3 物理模型的数学描述

3.1 数学模型方程

取坐标原点位于主装药表面处, 剖面为一半无限大平面(如图2所示), 沿图中 x 方向产生化学反应, 经过一定时间, 点火药产物平行表面流动, 并沿垂直于表面方向向亚表面区输送热量, 使其温度升高, 结果使表面温度迅速升到临界温度而点火。描述上述物理模型的方程是能量守恒方程^[9]:

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + QK_0 e^{-E/RT}, 0 \leq x \leq \infty \quad (1)$$

根据 Frank-Kamenetskii 的热自燃理论, 通常将物

理量转换成无量纲量, 因此下面定义无量纲量。

$$\text{无量纲温度: } \theta = \frac{T - T_*}{RT_*^2/E};$$

$$\text{无量纲坐标: } \rho = x/x_*;$$

$$\text{无量纲时间: } \tau = t/t_{ad}(T_*).$$

T_* 是一个标量点火温度, 它由其他的一些考虑所决定, 在不同的问题中它的取值方式不同。

x_* 是一个关于化学反应区宽度的尺度:

$$x_* = \left(\frac{RT_*^2 \lambda}{E Q K_0} e^{E/RT_*} \right)^{1/2}$$

t_{ad} 是温度为 T_* 时的绝热热爆炸延迟期, 由下式计算:

$$t_{ad}(T_*) = \frac{RT_i^2 c_v \rho}{E Q K_0} e^{E/RT_i}$$

根据上述无量纲参数, 占据半无限大区域平面模型的点火方程(1)可以改写为下面的无量纲形式方程:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \rho^2} + e^{\theta/(1+\varepsilon\theta)} \quad (2)$$

ε 为无量纲活化能, 计算式为: $\varepsilon = RT_*/E$ 。

3.2 初始和边界条件

无量纲初始条件为: $\tau = 0, \theta = -\theta_i$; θ_i 为初始温度。

左表面处的 ($\rho = 0$) 条件可能有多种表达形式, 随着加热源性质的不同而不同。在基本理论中, 主要考虑以下两种边界条件:

(1) $\rho = 0$ 时, $\theta = \theta_0$; θ_0 为无量纲表面温度, 这个条件表示表面温度是一个常数 T_0 ($T_0 > T_i$), 热流在表面上随时间加长而减小。

(2) $\rho = 0$ 时, $\frac{\partial \theta}{\partial \rho} = -\sigma_0$; σ_0 为无量纲表面热流, 这个边界条件表示通过表面的热流是一个常数, 表面温度随时间而升高。

右表面处 ($\rho = \infty$) 的边界条件为: $\rho = \infty, \theta = -\theta_i, \frac{\partial \theta}{\partial \rho} \rightarrow 0$, 表示离开点火源很远处的右表面温度为初始温度。

在热点火理论中, 主要的相似准则是参数 θ_i (为无量纲初始温度):

$$\theta_i = \frac{T_* - T_i}{RT_*^2/E}$$

对于点火, θ_i 总是大于零。 θ_i 越大, 点火特性越显著。

采用热点火理论对点火过程进行数值计算, 目的是要得到主装药中非稳定的温度场 $\theta(\rho, \tau, \theta_i)$ 的分布, 从而得到点火延迟时间 τ_{ign} 。

4 数值计算结果及分析

根据实际点火过程特点,本研究计算点火源温度保持不变的情况下装药内部的温度特性。因此左边界条件采用第一种,即恒定表面温度。在这种情况下,无量纲量中的标量温度 T 是表面温度 T_0 ,这个温度是主装药点火表面所面临的点火药燃烧产生的温度,它控制化学反应进程。因此得到无量纲表面温度 $\theta_0 = 0$ 。

针对不同的点火药燃烧温度进行计算,选取的点火药燃烧温度 T_0 为 2000, 2400, 2800, 3200, 3600 K。其他参数为: 初始温度 $T_i = 300$ K, 活化能 $E = 150$ kJ · mol⁻¹。计算中用到的过程参量见表 1。

将式(2)在表 1 参数条件下数值积分可获得不同点火药燃烧温度时主装药内部非稳定温度场的特性曲线。计算结果如图 3 所示,图中表示在主装药中不同时刻不同位置的温度场分布曲线。图 3 中曲线从 $\Delta\tau = 0$ 时刻开始,每两条曲线之间的无量纲时间间隔为 $\Delta\tau = 2.5$,由图 3 可以看到:

(1) 点火过程经历两个阶段,在第一阶段,化学反

应并不显著,主装药主要被点火药产物通过表面传递的热量加热,即主装药表现出化学惰性的特点。在这个阶段中,一个逐渐加热的表面层在主装药中形成了。在第二个阶段,外部加热使主装药表面温度升高,直到在靠近表面附近主装药发生放热化学反应,由于这些化学反应,一个逐渐加强的自加热层出现了,化学反应放出的热量变得重要起来,温度的升高远快于单纯由外部加热所引起的温度升高速率。在这种情况下,表面处的热流改变了它的方向,即主装药外的介质由加热源变成了吸热源。此时,一个热波离开表面,它的波幅由于热量的释放而增加,热点火发生在离开表面一定距离的地方;

表 1 计算中用到的参数

Table 1 Parameters used in calculation

surface temperature T_0 /K	2000	2400	2800	3200	3600
θ_i	7.7	6.6	5.8	5.1	4.6
ε	0.11	0.13	0.16	0.18	0.20

Note: θ_i is initial temperature without units; ε is activation energy without units.

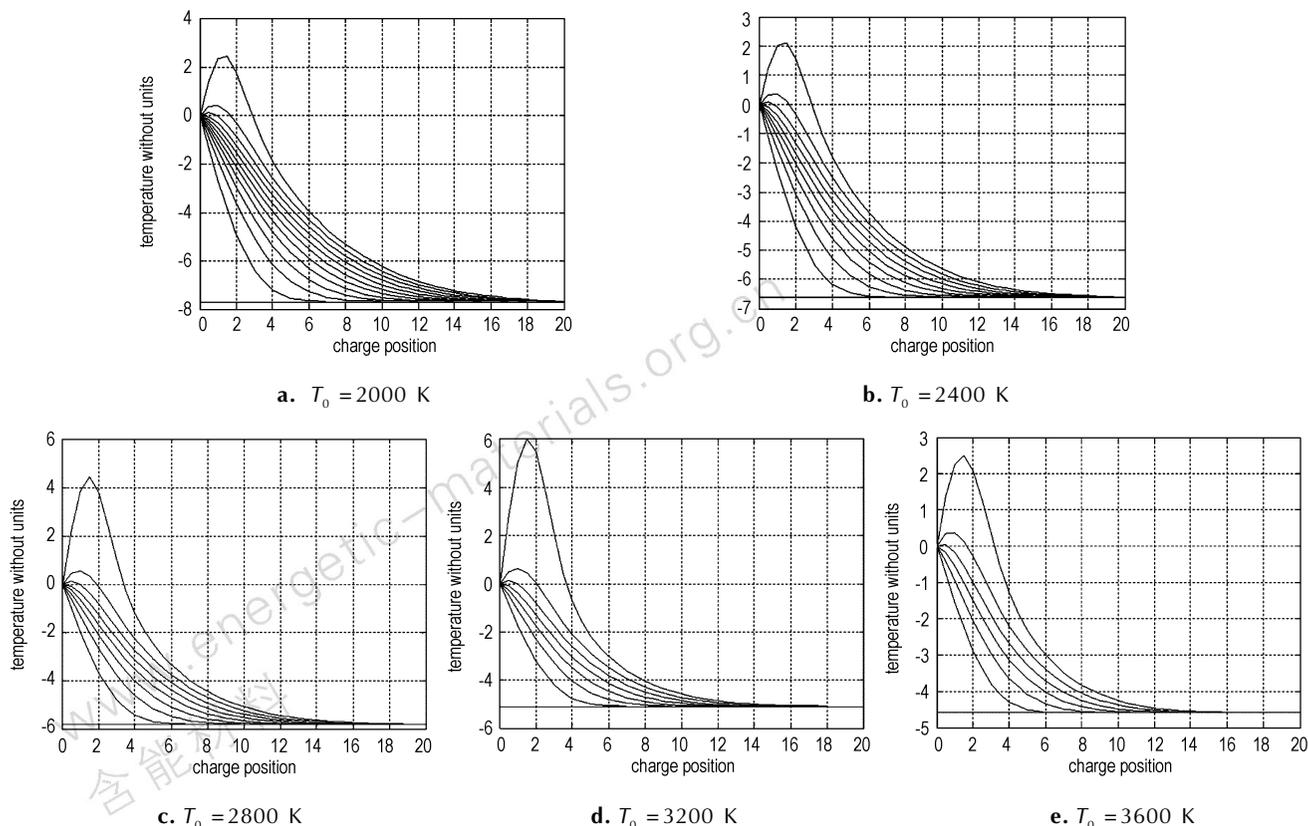


图 3 不同表面温度时主装药的温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of main charge at different surface temperatures

(The time which corresponds the initial curve is $\tau = 0$. The dimensionies time interval between every two curves is $\Delta\tau = 2.5$)

(2)把主装药中表面附近的温度达到一定值作为点火开始的时刻。本文选择当表面附近的温度出现突跃上升时,主装药正式被点火,开始快速燃烧。从图3可以看出,表面温度(点火药燃烧温度)越高,主装药达到着火温度所需的时间越短。并且表面温度越高,在 $\Delta\tau=2.5$ 时间间隔内会出现温度的突跃,如表面温度为2800 K时,无量纲温度从 $\theta=0.5$ 突跃到 $\theta=4.2$,说明在表面温度达到一定程度后,反应放热很剧烈,致使温度的增加很快。

因此,为了能够更细致地了解短时间内温度的变化,把时间间隔缩短为 $\Delta\tau=0.625$,得到图4所示的点火时刻前后温度的细节分布图。由此计算出无量纲点火延迟时间 τ_{ign} 和点火位置离开主装药表面的无量纲距离。

由图4可知,当点火源温度在2000~3600 K时,点火位置离开主装药表面的无量纲距离为1.5左右,换算成有量纲距离为462.8~112.4 μm 。

由图4得到的不同表面温度下的无量纲点火延迟时间 τ_{ign} 列于表2。

由 $\tau=t/t_{\text{ad}}(T_*)$ 和 $t_{\text{ad}}(T_*)=\frac{RT_*^2}{E} \frac{\rho c_v}{QK_0} e^{E/RT_*}$,可以

将无量纲点火延迟时间转换成有量纲延迟时间 t_{ign} 。

计算中用到的参数见表3。计算得到的不同表面温度(点火源温度)时有量纲点火延迟时间 t_{ign} 见表4。

因此,得到有量纲延迟时间与表面温度的关系曲线如图5所示。由图5可知,点火延迟时间随着表面温度的升高而缩短,且表面温度到2800K以后,延迟时间缩短的趋势变得平缓。原因为,表面温度越高,点火源与主装药的温差越大,点火源向主装药的传热越剧烈,传热速率越高,由于主装药达到点火温度时所需吸收的总热量是一定值,因此主装药吸收点火所需热量的时间缩短,温度能在更短的时间内达到点火温度,因此点火延迟时间缩短。当温度升高到一定程度时,温度虽然很高,由于主装药自身物理化学性质的限制,其吸收热量的速率有一极限,当传热速率继续增大时,吸收速率保持在一定范围内变化不大,因此温度升高速率变化不大,延迟时间缩短变缓。由此可知,当作为点火源的点火药燃烧产物的温度越高时,主装药的表面温度就越高,点火延迟时间就越短,因此应该选择燃烧温度高的点火药,这有利于缩短点火延迟时间。

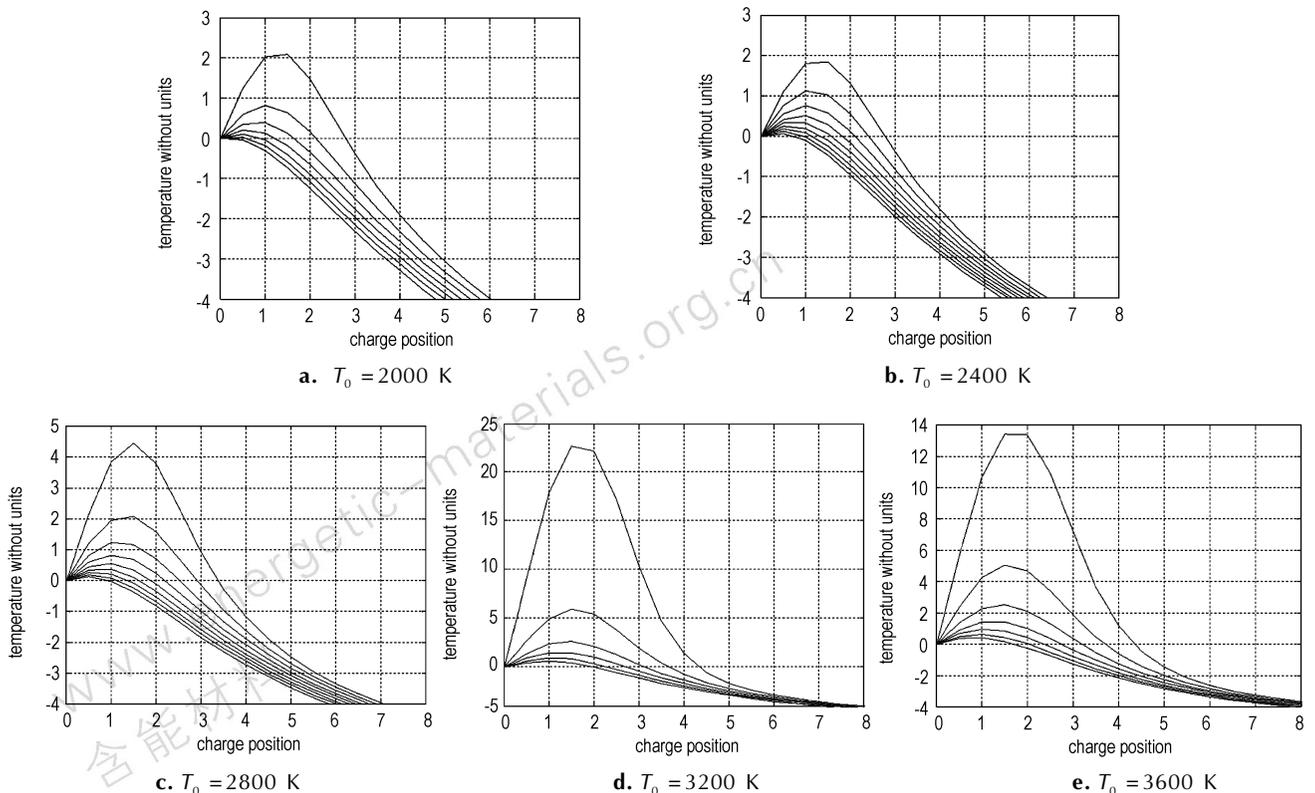


图4 主装药中温度分布细节

Fig.4 Detail temperature distribution in main charge

(The time which corresponds the initial curve is $\tau=0$. The dimensionies time interval between every two curves is $\Delta\tau=0.625$)

表 2 不同表面温度时点火延迟时间

Table 2 Ignition delayed time at different surface temperatures

surface temperature /K	2000	2400	2800	3200	3600
ignition delayed time without units τ_{ign}	27.5	22.5	19.375	16.875	15

表 3 计算中采用的参数

Table 3 Parameters used in calculation

parameter	value
gas constant $R/\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	8.314
activation energy $E/\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	150
charge density $\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.4
heat capacity $c_v/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	960
product of reaction heat and index factor $QK_0/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	884×10^{15}

表 4 延迟时间计算结果

Table 4 Calculation results of delayed time

surface temperature /K	$t_{\text{ad}}(T_*) / \text{s}$	ignition delayed time $t_{\text{ign}} / \mu\text{s}$
2000	2.99×10^{-4}	8222
2400	9.57×10^{-5}	2153
2800	4.45×10^{-5}	862
3200	2.6×10^{-5}	438
3600	1.76×10^{-5}	264

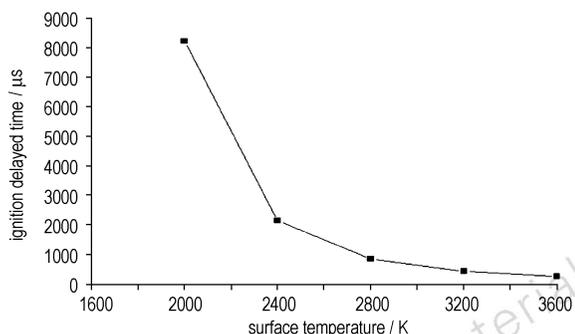


图 5 点火延迟时间与表面温度的关系

Fig.5 Relationship of ignition delayed time and surface temperature

5 结论

(1) 主装药点火主要经历两阶段, 第一阶段吸收点火源热量而加热, 第二阶段发生自我放热化学反应, 点火发生在第二阶段。

(2) 主装药点火发生在离开表面一定距离的位置, 在点火源温度为 2000 K 到 3600 K 时, 该距离为 $462.8 \sim 112.4 \mu\text{m}$ 。

(3) 随着点火源温度升高, 主装药的点火延迟时间缩短, 当温度升高到 2800 K 后, 延迟时间缩短的趋势变得平缓。因此选择燃烧温度高的点火药有利于缩短点火延迟时间。

(4) 本文的研究方法和研究对象适用于装药固相点火过程, 得到了点火过程中主装药温度的变化规律。但由于计算方法限制, 做了一定假设, 没有反映点火过程的其他因素, 如点火压力、热对流的影响, 因此本研究也是不全面的。

参考文献:

- [1] 李世鹏, 张平. 微型脉冲推力器点火瞬变过程特性分析[J]. 航空动力学报, 2003, 18(3): 411-414.
LI Shi-peng, ZHANG Ping. Analysis of the transient ignition process of impulsivemicrothruster[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2003, 18(3): 411-414.
- [2] 毛根旺. 复合推进剂气相点火过程的分析与计算[J]. 推进技术, 1992(2): 54-60.
MAO Gen-wang. Analysis and computation of gas-phase ignition process in composite solid propellants[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1992(2): 54-60.
- [3] 范存杰, 李逢春. 微型固体火箭发动机用短点火延迟点火器研究[J]. 推进技术, 1995(3): 42-45.
FAN Cun-jie, LI Feng-chun. Study on igniter to shorten ignition delay time for micro-solid propellants rocket motor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1995(3): 42-45.
- [4] 周海清, 张平. 微型脉冲推力器点火启动过程计算与点火药量选择[J]. 固体火箭技术, 2004, 27(4): 276-279.
ZHOU Hai-qing, ZHANG Ping. Ignition start-up course calculation and ignition charge mass selection of impulse micro-thruster[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2004, 27(4): 276-279.
- [5] 周海清, 尤政, 张平. 颗粒传热增强对微型脉冲推力器点火过程的影响[J]. 固体火箭技术, 2006, 29(1): 31-34.
ZHOU Hai-qing, YOU Zheng, ZHANG Ping. Effect of particle heat transfer enhancement on ignition process of miniature impulse thruster[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2006, 29(1): 31-34.
- [6] Vadim V Barzykin, Alexander G Merzhanov. Ignition of energetic materials under conditions of complex heat exchange[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1995, 11(4): 816-823.
- [7] Chang S T, Han S, John C Chai. Radiation effects on 1-D ignition transient analysis of SRM[R]. AIAA-96-3055.
- [8] 郭·萨默菲尔德. 固体推进剂燃烧基础[M]. 北京: 宇航出版社, 1994.
- [9] 冯长根. 热点火理论[M]. 吉林: 吉林科学技术出版社, 1991.

Numerical Calculation of Temperature Character of Main Charge in the Powered Initiators Ignition Process

JIANG Xin-guang¹, WANG Hai-nan², LIU Wei-qi¹, JIANG Zhi-bao¹, LIU Yu-zi¹

(1. Ordnance Technology Institute, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050000, China; 2. Army Officer Academy, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to study the ignition process of powered initiators and provide theoretical base for the design of powered pyrotechnics, a mathematical model describing the ignition process was founded by numerical simulation method on the basis of thermal ignition theory. The interior temperature distributions nearby the main charge surface in condition of different ignition source temperature were obtained by means of numerical integral. The following results from distribution curves were obtained: when the ignition source temperature is from 2000 K to 3600 K, the ignition distance depart from main charge surface is from 462.8 μm to 112.4 μm . The ignition delayed time shortens from 8222 μs to 264 μs , indicating that the ignition delayed time shortens when the ignition source temperature increases. When the ignition source temperature goes to 2800 K, the trend of ignition delayed time shortening becomes flat.

Key words: explosion mechanics; ignition numerical calculation; thermal ignition theory; temperature distribution; ignition delayed time

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.03.016



第十六届国际含能材料新趋势会议成功召开

2013年4月10日至12日,第十六届国际含能材料新趋势会议(New Trends in Research of Energetic Materials, NTREM)在捷克帕尔杜比采大学举行,该会议是含能材料领域重点关注的国际学术会议之一。本次会议主题是“含能材料发展前瞻性方法与技术”,内容涵盖含能材料发展历程、制备、表征和应用技术,材料包括实验室研制级和工业级炸药、推进剂、发射药、烟火剂。大会由捷克帕尔杜比采大学化工学院含能材料研究所所长 S. Zeman 教授担任主席。

参加本次会议的代表有来自俄罗斯、美国、中国、德国、英国、捷克、以色列、澳大利亚、法国、日本、韩国、比利时、瑞典等近30个国家近300位从事含能材料研究的专家学者。参会单位有含能材料领域著名的

的美国劳伦斯利弗摩尔国家实验室、洛斯阿拉莫斯国家实验室、德国 ICT 研究所、慕尼黑大学、俄罗斯科学院有机化学研究所、西伯利亚科技大学、英国剑桥大学、卡文迪许实验室、澳大利亚 DSTO 研究中心等,来自中国的参会单位有中国工程物理研究院化工材料研究所、北京应用物理与计算数学研究所、北京理工大学以及南京理工大学。

本次会议共有40多名学者作了报告,另有61张海报进行了展示。涉及主题包括:(1)新炸药合成,包括高能量密度材料、高氮含能离子盐及衍生物、激光点火炸药、多硝基烷氨基唑化合物以及 HMX 合成新方法等;(2)混合炸药,包括新型含能粘结剂的合成、PBX 制备工艺、PVP 复合物包覆 RDX、含 Al 基 PBX 感度研究等;(3)基础理论研究,如炸药合成机理理论研究、含卤素溶剂对 CL-20 重结晶影响研究、分形富氮聚合物理论计算研究、TNT/CL-20 共晶界面相互作用、共晶化合物的 DFT 理论计算研究、环状硝胺化合物的光学和电化学性质等;(4)新型复合材料,如硅基含能材料、NTO-石墨烯纳米复合物、金属 Ti 与 okfol 炸药复合材料等;(5)其它还包括新概念致死武器研究、复合含能材料表征技术及含能材料爆轰性能研究。

2013年国际含能材料新趋势会议的成功召开,有效推动了国际含能材料领域专家学者的成果交流,展示了相关领域的最新技术,为国际科研与项目合作搭建了良好平台。

(中国工程物理研究院化工材料研究所 舒远杰 马卿 杨志剑 供稿)

