第21卷 第2期
2007年6月

高 压 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

Vol. 21, No. 2
June, 2007

文章编号:1000-5773(2007)02-0193-06

电爆管内燃烧过程数值模拟*

祝明水,何 碧,蒋小华,蒋 明

(中国工程物理研究院化工材料研究所,四川绵阳 621900)

摘要:基于内弹道两相流模型,考虑到点火药量与主装药相当及其固体燃烧产物所占比例大等影响,提出了适用于电爆管内燃烧过程的内弹道"四相流"模型,即将气态燃烧产物、固态燃烧产物、点火药和主装药分别作为一"相"参与燃烧和流动,每一"相"都用质量、动量和能量方程描述,而它们之间的各种相互作用以源项的形式出现在上述方程中。模型计算结果与电爆管实验结果一致,表明该模型对于电爆管内燃烧过程的描述是合理的,可以作为分析该电爆管燃烧性能的一种辅助工具。

关键词:燃烧;电爆管;两相流;四相流

中图分类号:O521.9;TQ038.2 **文献标识码**:A

1 引 言

电爆管在使用前,总是要通过大量的实验来验证其性能。这些实验必然会大大增加其成本。减少实验量,同时又不降低电爆管作用可靠性的可信度,一直是研究人员长期寻求解决的问题。数值模拟在很大程度上与实验结果吻合,大大增强了人们通过数值模拟评价产品性能的信心。因此,对电爆管性能实验进行数值模拟,对于减少验证性实验、降低成本,是非常有意义的。本研究借助内弹道两相流模型开发了适用于该电爆管性能实验的内弹道"四相流"模型,并对电爆管性能实验进行了模拟,模拟结果与实验结果吻合,表明内弹道"四相流"模型可以作为分析电爆管性能的一种辅助工具。

2 物理模型

电爆管结构一般如图1所示,主要由电阻丝、点火药、主装药和壳体等四个部分组成。使用时,电阻丝在电流的作用下产生焦耳热加热点火药,点火药达到燃烧温度燃烧产生具有一定压力的高温气体和固体产物,这些高温燃烧产物以各种形式与未燃点火药和主装药进行能量交换,使整个电爆管系统的燃烧自持发展并产生大量高温高压气体。这些高温高压气体膨胀,可以达到各种各样的目的,如开阀、推销、拔销等。在验证电爆管性能时,采用密闭容器测压系统(如图2所示),测试电爆管燃烧产物在一定体积内的燃烧压力随时间的变化,以评价该电爆管的做功能力。这个过程类似于火炮的内弹道过程,只不过取消了弹丸,而代之以一段自由膨胀空间。因此,适用于内弹道过程的内弹道两相流模型[1-3]对于电爆管密闭容器内的燃烧过程也是适用的。但在一般的内弹道过程中,点火药与主装药相比很少,对整个内弹道过程的影响不是很大,因而在数值模拟过程中,它们对于整个内弹道过程的作用可以采用源项的形式分布到某几个节点主装药的平衡方程中,主要达到点燃主装药的作用。而在电爆管中,点火药量与主装药量相当,点火药的燃烧对整个燃烧流场和电爆管的输出性能都有比较大的影响,再把点火药的作用以源项的形式分布到主装药的平衡方程就不合适了。本研究认为,对点火药和主装药分别建立固相的各种平衡方程,将原两相流模型改变为"三相流"模型,对电爆管的燃烧做功过程的描述更切合实

* **收稿日期**:2006-07-21;**修回日期**:2006-09-11

基金项目:中国工程物理研究院科学技术基金(42101030308)

作者简介:祝明水(1977—),男,硕士研究生,助理研究员,主要从事火工品、燃烧、爆炸等研究. E-mail:zhumsi12@163.com

际。“三相流”模型实际上就是将点火药、主装药和燃烧产物分别作为一相参与燃烧和流动，燃烧产物的气体常数、比热比、余容等性能参数由点火药和主装药各自燃烧产物的性能参数通过质量加权平均的方式决定。

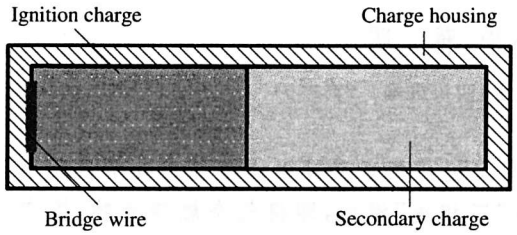


图 1 电爆管装置示意图

Fig. 1 Schematic of electric squib

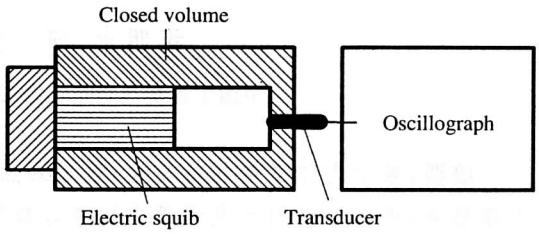


图 2 密闭容器测压系统示意图

Fig. 2 Schematic of closed volume pressure testing system

将点火药单独作为一相，又引入了一些新的问题。众所周知，点火药通常都是烟火药，其燃烧会生成大量的固体产物。对于本研究采用的 B/KNO_3 点火药，其燃烧的固体产物量更是高达 65%以上。这么多的固体燃烧产物势必对点传火过程有很大的影响。其中，最大的影响就是点火药燃烧产物对主装药的点火会变得非常复杂。在这种高固态产物含量的点火过程中，固体产物的存在会增强气体产物与主装药之间以对流形式为主的能量交换。这种增强作用可以用粒子冲击热增强模型来描述，这个模型包括了气膜导热、接触导热以及碰撞传热等 3 种复杂的能量交换形式，对固态产物粒子与主装药点火面之间能量交换的描述比较符合实际情况。本研究在数值模拟过程中考虑了这种影响，并将“三相流”模型扩展到“四相流”模型，进一步将燃烧产物细分为气态燃烧产物和固态燃烧产物。

3 数学模型

3.1 主要假设

(a) 电爆管内流动过程为一维四相流动，包括气态燃烧产物、固态燃烧产物、点火药和主装药。

(b) 点火药燃烧生成气态燃烧产物和固态燃烧产物，且整个燃烧过程中单位质量点火药燃烧生成的气固产物质量比保持不变；忽略主装药燃烧产生的固态产物，即主装药只生成气态产物。

(c) 不考虑固态产物与气态产物、点火药和主装药之间的相间作用力。因为固态产物颗粒非常细小，很难对气态产物的运动形成阻碍作用；另外，固态产物速度较低，因而对点火药和主装药的力作用也可忽略不计。

(d) 装药颗粒燃烧速度服从指数燃烧定律。

(e) 点火药和主装药的物理性质不随温度、时间变化。

3.2 基本方程

(a) 气态燃烧产物质量平衡方程

$$\frac{\partial \varphi_g \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(\varphi_g \rho_g v_g) = \dot{km}_{ig} + \dot{m}_p \tag{1}$$

(b) 气态燃烧产物动量平衡方程

$$\varphi_g \rho_g \left(\frac{\partial v_g}{\partial t} + v_g \frac{\partial v_g}{\partial z}\right) + \varphi_g \frac{\partial p}{\partial z} = -D_{ig} - D_p + \dot{km}_{ig}(v_{ig} - v_g) + \dot{m}_p(v_p - v_g) \tag{2}$$

(c) 气态燃烧产物能量平衡方程

$$\begin{aligned}\varphi_g \rho_g \left(\frac{\partial e_g}{\partial t} + v_g \frac{\partial e_g}{\partial z}\right) + \varphi_g p \frac{\partial v_g}{\partial z} + p\left(\frac{\partial \varphi_g}{\partial t} + v_g \frac{\partial \varphi_g}{\partial z}\right) &= D_p(v_g - v_p) + D_{ig}(v_g - v_{ig}) - s_p q + \\ \dot{km}_{ig}\left[e_{ig} - e_g + \frac{p}{\rho_g} + \frac{(v_g - v_{ig})^2}{2}\right] &+ \\ \dot{m}_p\left[e_p - e_g + \frac{p}{\rho_g} + \frac{(v_g - v_p)^2}{2}\right]&\end{aligned} \tag{3}$$

(d) 固态燃烧产物质量平衡方程

$$\frac{\partial \varphi_s \rho_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(\varphi_s \rho_s v_s) = (1-k)\dot{m}_{ig} \tag{4}$$

(e) 固态燃烧产物动量平衡方程

$$\varphi_s \rho_s \left(\frac{\partial v_s}{\partial t} + v_s \frac{\partial v_s}{\partial z}\right) + \varphi_s \frac{\partial p}{\partial z} = (1-k)\dot{m}_{ig}(v_{ig} - v_s) \tag{5}$$

(f) 固态燃烧产物能量平衡方程

$$\frac{\partial \varphi_s \rho_s e_s}{\partial t} + v_s \frac{\partial \varphi_s \rho_s e_s v_s}{\partial z} = -s_p q' + (1-k)\dot{m}_{ig}\left[e_{ig} - e_s + \frac{(v_s - v_{ig})^2}{2}\right] \tag{6}$$

(g) 点火药质量平衡方程

$$\frac{\partial \varphi_{ig} \rho_{ig}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(\varphi_{ig} \rho_{ig} v_{ig}) = -\dot{m}_{ig} \tag{7}$$

(h) 点火药动量平衡方程

$$\left(\frac{\partial \varphi_{ig} \rho_{ig} v_{ig}}{\partial t} + \frac{\partial \varphi_{ig} \rho_{ig} v_{ig}^2}{\partial z}\right) + \varphi_{ig} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}(\varphi_{ig} \tau_{ig}) = D_{ig} - \dot{m}_{ig} v_{ig} \tag{8}$$

(i) 主装药质量平衡方程

$$\frac{\partial \varphi_p \rho_p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(\varphi_p \rho_p v_p) = -\dot{m}_p \tag{9}$$

(j) 主装药动量平衡方程

$$\left(\frac{\partial \varphi_p \rho_p v_p}{\partial t} + \frac{\partial \varphi_p \rho_p v_p^2}{\partial z}\right) + \varphi_p \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}(\varphi_p \tau_p) = D_p - \dot{m}_p v_p \tag{10}$$

(k) 体积分数约束关系

$$\varphi_g + \varphi_s + \varphi_{ig} + \varphi_p = 1 \tag{11}$$

以上各式中:φ、ρ、v、p、$\dot{m}$、τ 和 D 分别指体积分数、密度、速度、压力、质量生成速率、粒间应力和相间作用力。下标 g、s、ig 和 p 分别指气态燃烧产物、固态燃烧产物、点火药和主装药。k 为单位质量点火药生成气态产物的质量分数。

3.3 边界条件

电爆管密闭容器内燃烧过程中左边界为固定静止边界,右边界开始时近似为自由运动边界,燃烧产物到达自由空间末端后变为固定静止边界。

3.4 数值计算方法

模型的差分格式仍然采用 MacCormack 两步格式。另外,电爆管作为火工品,其空间尺度与火炮相比小得多。但电爆管燃烧过程中的压力、温度、速度等参数的幅值与火炮差不多,因而电爆管内各参数在传播方向上的梯度要大得多,从而引起数值模拟过程收敛困难或者数值溢出,使计算不能进行下去。这种问题的解决办法通常是尽量细分网格。但细分网格后,又可能引进大数除小数增大误差积累。为了避免这种情况的发生,本研究对原内弹道两相流程序进行了仔细分析,采用改变计算顺序、面积不参加直接计算等方法,成功地解决了本研究的小尺度模拟问题。

4 结果与讨论

4.1 密闭容器测压实验

为了验证计算模型的合理性,采用图 2 所示的密闭容器测压系统对电爆管密闭容器内燃烧压力随时间的变化进行了测试,测试结果如图 3 所示。

4.2 计算结果

本计算中电爆管的点火药为 B/KNO_3,主装药为 RDX,所用两种装药的主要参数如表 1 所示。表 1 中,除理论密度、比热和热传导系数取自文献[5-6]外,其余参数均为本研究试验或计算结果。

计算获得的电爆管输出压力随时间的变化如图 3 所示。由图可见,计算结果与密闭容器测压结果

一致，表明内弹道“四相流”模型对于电爆管密闭容器内燃烧过程是适用的。因此，内弹道“四相流”模型可以作为分析电爆管性能的一种辅助工具。

表 1 计算所用两种装药主要参数

Table 1 Main parameters of two charges in calculation

Charges	TMD /(kg/m³)	c_p /[J/(kg·K)]	λ /[W/(m·K)]	f /(kJ/kg)	α /(m³/kg)	n	u_0 /[μm/(s·Pa^n)]
B/KNO_3	2134	1023[5]	0.67[5]	211.6	0.0004	0.60	0.015
RDX	1816[6]	1130[6]	0.106[6]	1300	0.0011	0.87	8.074

Charges	d /(μm)	E /(MPa)	ε_0	ε_1	k_0	k_1
B/KNO_3	4.731	503.55	0.6973	0.3771	1.1703	−21.342
RDX	15.64	454.49	0.6296	0.3677	1.0260	−21.808

Note: f, α—Nobel-Abel EOS coefficient; n, u_0—Exponent combustion law coefficient; d—Equivalent grain diameter; E—Compress module; ε_0, ε_1, k_0, k_1—Coefficients of stress law between grains. (see Ref. [4])

4.3 结果讨论

图 4～图 7 是不同时刻电爆管内燃烧压力、气体产物速度、温度以及空隙率的空间分布情况。由图可见，各参量在空间连续分布，并随时间的延长趋于一致。这种变化与经验认识是一致的，即燃烧从点火端开始，各参量在点火端的幅值较大，在燃烧的传播方向上，存在梯度；随着燃烧的进行，这种梯度减小；当燃烧结束时，这种梯度消失，各参量在空间的分布基本一致。这些结果再次表明，本研究采用的内弹道“四相流”模型对于电爆管内燃烧过程的描述是合理的。

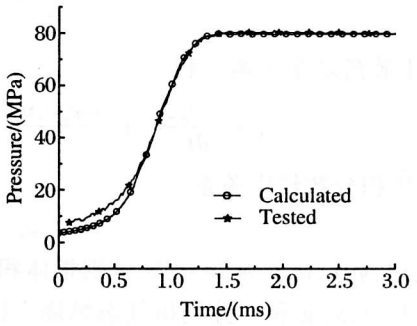


图 3 密闭容器试验值与计算值

Fig. 3 Tested and calculated pressures in closed volume

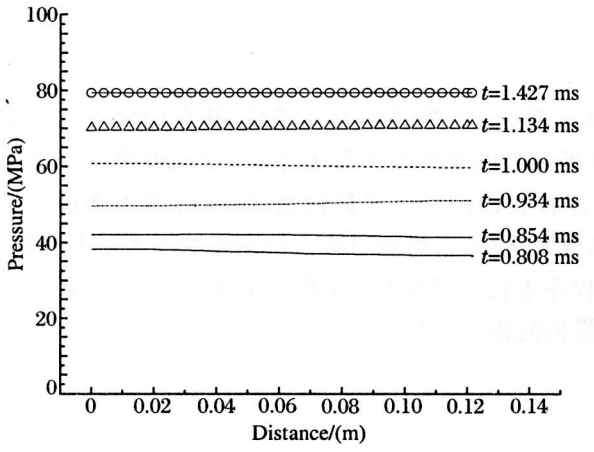


图 4 不同时刻的燃烧压力分布

Fig. 4 Combustion pressure distributing in different times

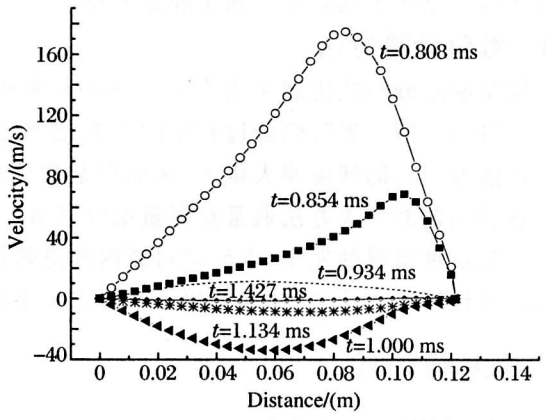


图 5 不同时刻气体产物的速度分布

Fig. 5 Gas product velocity distributing in different times

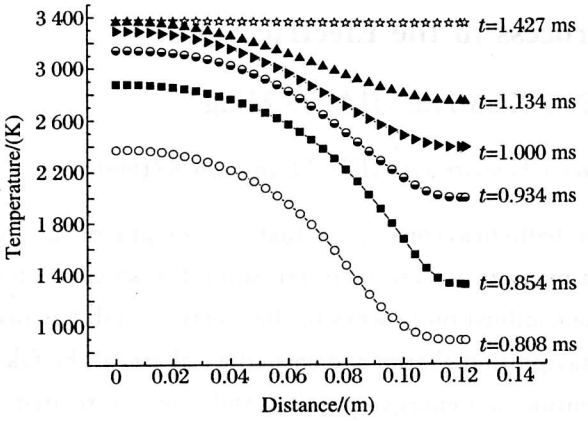


图 6　不同时刻气体产物的温度分布

Fig. 6　Gas product temperature distributing in different times

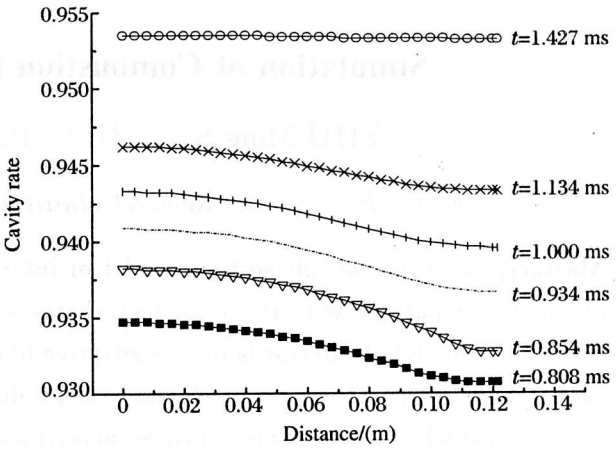


图 7　不同时刻的空隙率分布

Fig. 7　Cavity distributing in different times

5　结　论

计算值与实验值一致,计算结果与经验认识一致,表明本研究采用的内弹道"四相流"模型对于电爆管内燃烧过程的描述是合理的。因此,该模型可以作为电爆管燃烧性能的一种辅助工具。

References:

[1] Wang C S, Yuan Y X, Jin Z M. Two-Phase Flow Interior Ballistic Model and Its Calculation for a Complex Charge Construction [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1995, 19(4): 297-301. (in Chinese)
翁春生,袁亚雄,金志明. 一种复杂装药结构的两相流内弹道模型及计算 [J]. 南京理工大学学报,1995,19(4):297-301.

[2] Huang Y S, Shen R Q, Dai S Z. The Numerical Simulation of Combustion Process for the Centre Initiator in Gas Generator [J]. Initiators & Pyrotechnics, 1996, (3): 17-20. (in Chinese)
黄寅生,沈瑞琪,戴实之. 气体发生器中心点火管燃烧过程的计算 [J]. 火工品,1996,(3):17-20.

[3] Zhou H Q, Zhang P. 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. (in Chinese)
周海清,张　平. 微型脉冲推力器点火器动过程的计算与点火药量选择 [J]. 固体火箭技术,2004,27(4):276-279.

[4] Wang S C, Zhou Y H, Liu Q L, et al. Multiphase Combustion Theory and Application in Bore [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1994. (in Chinese)
王升晨,周彦煌,刘千里,等. 膛内多相燃烧理论及应用 [M]. 北京:兵器工业出版社,1994.

[5] Gao S. The Numerical Simulation and Mechanism of the Laser Diode Ignition Process in B/KNO_3 [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2004. (in Chinese)
高　颂. B/KNO_3 的 LDI 激光点火机理及数值模拟研究 [D]. 北京:北京理工大学,2004.

[6] Dong H S. Characteristics of Explosives and Relatives [M]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2005. (in Chinese)
董海山. 炸药及相关物性能 [M]. 四川:中国工程物理研究院,2005.

Simulation of Combustion Process in the Electric Squib

ZHU Ming-Shui, HE Bi, JIANG Xiao-Hua, JIANG Ming

(*Laboratory for Pyrotechnics Research, Institute of Chemistry, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Based on two phase flow model of interior ballistics, considered that the weight of ignition charge is comparable with the secondery charge and many of its products are solid, the so called four phase flow model of interior ballistics adaptive to the combustion process in the electric squib has been established. In the model, gas products, solid products, ignition charge and secondery chare, all be taken as a phase, each of them is described by mass, momentum and energy equation, and they are related by mutual actions, which are the source terms in the before-mentioned equations. Caculated result by the model is in agreement with the test of the electric squib. This shows that the model describes reasonably the combustion process in the electric squib, and can be as an assistant tool for evaluating of the performance of electric squib.

Key words: combustion; electric squib; two phase flow; four phase flow