

# 点火期间装药裂纹内流场特性的有限元计算\*

张文普, 蔡体敏

(西北工业大学 航天工程学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 通过理论分析, 建立了固体火箭发动机推进剂裂纹动态点火的理论模型, 对裂纹内部燃烧流动情况进行了理论计算。在非结构网格下, 用有限元方法计算了不同几何特性和增压梯度下, 火焰在裂纹内的传播及裂纹内的压强变化情况。计算表明: 增压梯度越大, 裂纹越窄, 裂纹内的火焰传播速度越大, 裂纹尖端压强也越大。

**关键词:** 固体推进剂火箭发动机; 装药; 裂纹; 流场仿真; 有限元法

中图分类号: V435.12 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055(2000)06-0059-03

## Finite element calculation of crack combustion flow field in solid propellant

ZHANG Wenpu, CAI Tirmin

(Coll. of Astronautics, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Crack combustion flow field in solid propellant was analyzed using two dimension model of the gas flow along the crack coupled with a simplified ignition model. Control equations were solved with finite element method (FEM) under unstructured grid. Effects of pressurization rate and crack geometry on the flame propagation and pressure distribution in crack were studied. Numerical simulation indicates that the velocity of flame propagation in crack and the pressure at the crack tip increase as the pressurization rate increases and the crack width decreases.

**Key words:** Solid propellant rocket engine; Charge; Crack; Flow field simulation; Finite element method

## 1 引言

在发动机点火工作期间, 燃烧室内部的增压速率比较高, 可能引起装药的初始裂纹扩展或产生新的裂纹, 使发动机内弹道曲线严重偏离正常状态<sup>[1]</sup>, 甚至导致爆燃及药柱结构的完全破坏。因此, 研究和揭示裂纹内部的燃气流动及火焰传播规律, 对固体火箭发动机研制有重要意义。国内外研究者对裂纹内部的燃气流动进行过一些数值模拟<sup>[2,3]</sup>, 但大多是按一维模型进行计算<sup>[4]</sup>。近期才有用二维的差分方法计算, 本文通过对模型的改进, 并采用二维有限元方法对此问题进一步进行了研究。

## 2 物理模型

对裂纹中燃烧流动的研究, 从燃烧室压强开始建立, 高温燃气流进入裂纹内部, 裂纹内部压强逐渐升高, 同时温度也随之升高, 裂纹内表面被点燃,

燃气急剧增加, 气体冲出裂纹进入燃烧室, 直到燃烧室内工作状态最终稳定为止。由于此过程比较复杂, 因此作了如下简化处理:

(1) 将裂纹当作平面二维处理。

(2) 认为裂纹内的燃烧符合推进剂燃烧的通用规律, 燃速公式用  $r = ap^n$ , 侵蚀燃烧效应公式采用  $\varepsilon = 1.0 + 4.0136(\lambda - 0.2396)$ ,  $\lambda$  为特征速度。

(3) 按简单内孔圆柱贴壁浇注装药发动机条件, 计及由于裂纹内压强而使裂纹产生变形的影响。

(4) 假定裂纹推进剂表面某处达到点火温度时, 就认为火焰传播到了该处, 不考虑辐射换热对火焰传播的影响。点火准则方程<sup>[5]</sup>  $T_B = T_{ign}$ ,  $T_B$  为推进剂表面温度。

## 3 数值计算

控制方程取二维非稳态可压流的 N-S 方程, 裂纹内燃气状态方程采用完全气体状态方程  $p = \rho RT$ ,

\* 收稿日期: 1999-09-21; 修订日期: 2000-04-06。

作者简介: 张文普 (1971—), 男, 博士研究生, 研究领域为固体火箭发动机的理论分析与数值模拟。

粘弹性的本构关系方程见文献 [6]。实际裂纹的几何形状极不规则, 但为了计算方便并便于同实验对比, 将裂纹形状简化为规则的长矩形加以处理。考虑到实际裂纹几何形状的复杂性与力学计算程序的衔接性, 采用有限元法进行求解。网格生成采用非结构网格生成方法, 以便更好地贴合裂纹几何形状。计算区域共划分为 3 536 个结点, 6 242 个三角形网格。计算中, 裂纹几何形状发生变化, 通过调整边界节点的位置进行网格调整, 因此网格无须重新划分, 但要求时间步长足够小。

控制方程采用 Galerkin 有限元方法离散, 压强插值函数采用线性函数, 速度的插值函数用二次函数, 离散后的有限元方程采用中点法求解。根据不同时刻裂纹内的压强分布, 对裂纹进行了变形分析, 并耦合进裂纹流场分析程序中。

在裂纹壁面处, 采用无滑移边界条件; 在裂纹开口处, 当燃气流入时, 入口温度  $T$  由入口燃气温度给定, 压强由增压条件决定, 速度边界条件通过特征线方法求出, 当燃气以亚声速流出时, 出口的压强给定, 边界条件不封闭, 由特征线法给出补充条件, 当燃气以超声速流出时, 边界条件全由特征线法给出; 在加质边界上, 燃烧面的温度取推进剂的燃烧温度, 未燃烧表面的温度取推进剂初温, 燃气无切向速度, 法向速度由加质推进剂确定。

## 4 计算结果分析

计算中, 对两种不同的推进剂 Propellant A 和 Propellant B 进行了计算, 主要参数如下: Propellant A:  $a = 1.62$ ,  $n = 0.41$ ,  $T_g = 3\ 000\text{ K}$ ,  $\rho = 1\ 580\text{ kg/m}^3$ ,  $T_B = 1\ 050\text{ K}$ ; Propellant B:  $a = 8.50$ ,  $n = 0.43$ ,  $T_g = 3\ 500\text{ K}$ ,  $\rho = 1\ 790\text{ kg/m}^3$ ,  $T_B = 850\text{ K}$ 。

### 4.1 算法考核

在增压梯度  $dp/dt = 0.5\text{ GPa/s}$  的条件下, 对推进剂 Propellant B 内长度为  $L = 210\text{ mm}$ , 宽度为  $b = 4.0\text{ mm}$  的裂纹, 应用本文模型和计算方法进行了理论计算, 所得火焰传播前锋位置随时间的变化关系如图 1 曲线所示, 图中  $x/L$  为裂纹的无量纲纵向距离。计算值与试验测得的结果吻合良好, 可见本文提出的计算模型与方法可行。

### 4.2 火焰在裂纹内的传播

对不同宽度和不同增压梯度时的裂纹内火焰传播进行计算的结果表示在图 2 和图 3 中, 从图中可以看出, 增压梯度和裂纹宽度对裂纹中的火焰传播

速度有较大的影响, 裂纹宽度越小, 火焰到达裂纹顶端所需时间越短, 但是在开始阶段, 较宽的裂纹内火焰传播速度稍快; 增压梯度越大, 火焰到达裂纹顶端的时间越短, 与实验结果<sup>[7]</sup>相一致。从图 2 和图 3 均可得出, 在裂纹进口和顶端, 火焰传播速度较中间段小。

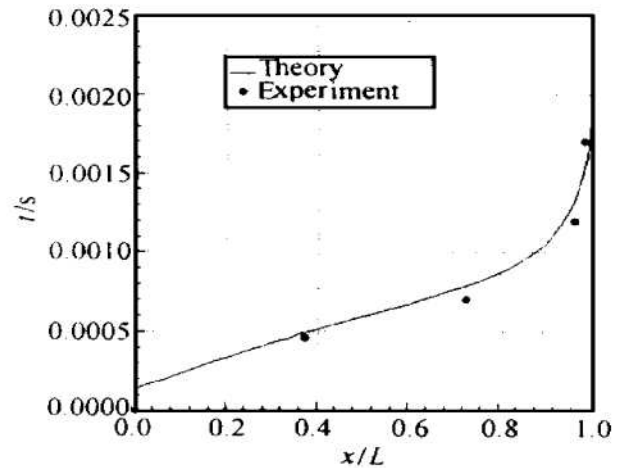


Fig. 1 Flame front position variation with time

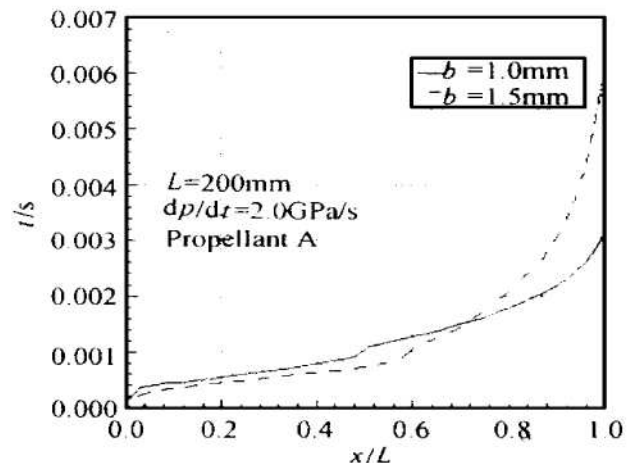


Fig. 2 Effect of width on the flame front position

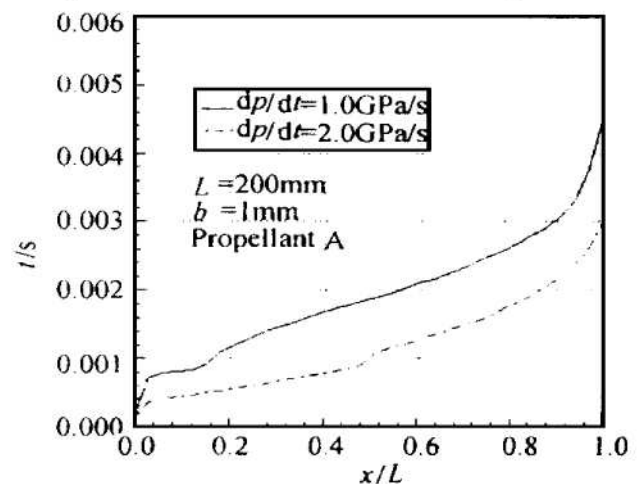


Fig. 3 Effect of pressurization rate on the flame front position

### 4.3 裂纹尖端压强与增压梯度及裂纹几何尺寸的关系

全部计算从燃烧室点火增压开始到裂纹全部点燃为止，裂纹尖端压强随时间的变化曲线如图 4 和图 5 所示，图中各参数均为裂纹内中心线处数值。在图 4 中，增压梯度分别为 1.0 GPa/s 和 2.0 GPa/s，在裂纹全部点燃时的燃烧室内压强分别为 5.1 GPa 和 6.1 GPa，裂尖最大压强与燃烧室压强之比分别为 1.4 和 1.64。在图 5 中，裂纹宽度分别为 1.0 mm 和 1.5 mm，在裂纹全部点燃时的燃烧室压强分别为 6.1 GPa 和 12.1 GPa，裂尖最大压强与燃烧室压强之比分别为 1.64 和 1.37。可见，裂尖最大压强与燃烧室压强之比随增压梯度的增加而增加，随裂纹宽度

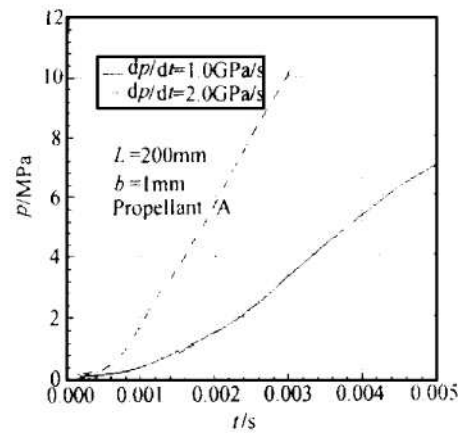


Fig. 4 Effect of the pressurization rate on the pressure at the crack tip

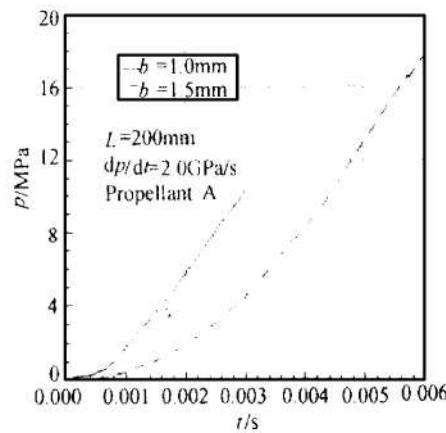


Fig. 5 Effect of crack width on the pressure at the crack tip

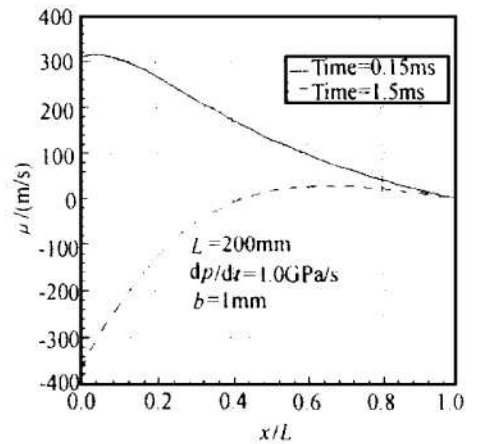


Fig. 6 Longitudinal velocity distribution along crack length at various times

的增加而减小。

### 4.4 裂纹内部的燃气流动速度随时间变化的情况

图 6 为裂纹在不同时刻速度分布曲线，从图中可以看出，开始阶段，速度为正，燃气流入裂纹内。之后，裂纹内燃气一部分速度为负，即向外流出裂纹，一部分速度为正，继续向裂尖流动，存在双向流动。在最后阶段，燃气单向向裂纹外流动。

从图 1 和其它图示曲线可以看出，不同的推进剂对火焰传播速度的影响相当大，但由于推进剂性能参数较多，各个参数对裂纹内燃烧流动过程的影响还有待于进一步研究。

## 五 结 论

对于同一种推进剂，增压梯度和裂纹宽度对裂纹中的火焰传播速度有较大的影响。裂纹宽度越小，火焰到达裂纹顶端所需时间越短。增压梯度越大，火焰到达裂纹顶端的时间也越短。在裂纹进口和顶端，火焰传播速度较中间段小。

推进剂相同的条件下，裂尖最大压强与燃烧室压强之比随增压梯度的增加而增加，随裂纹宽度的增加而减小。

在整个过程中，燃气气流先是流入裂纹，在裂纹被部分点燃之后，一部燃气开始流出裂纹，另一部分继续向裂尖流动，出现双向流动，最后，燃气单向向裂纹外流动。

## 参 考 文 献

[1] Jenkis R M, Foster W A. A Semi-empirical model for heat

transfer and flame spreading in slotted solid rocket motor [R]. AIAA 93-2308.

[2] Kumar M, Kuo K K. Effect of deformation on flame spreading and combustion in propellant cracks [R]. AIAA 81-4325.

[3] 韩小云, 周建平. 固体药柱燃烧断裂边界一维流场特性 [J]. 推进技术, 1998, 19 (5).

[4] 韩小云, 周建平. 固体推进剂燃烧断裂边界二维流场特性 [J]. 推进技术, 1998, 19 (6).

[5] Kuo K K. Combustion process in solid propellants cracks [R]. AD-A126796.

[6] Lu Y C, Kuo K K. Modeling and numerical simulation of combustion process inside a solid propellant crack [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1994, 19: 217~ 226.

[7] 张文普, 何国强, 刘佩进, 等. 固体推进剂装药裂纹内燃烧流动的实验研究 [J]. 推进技术, 2000, 21 (5).

(责任编辑: 王居信)