

固体推进剂裂纹对流燃烧流场的数值模拟^①

李 江 何国强 蔡体敏

(西北工业大学航天工程学院, 西安, 710072)

摘 要: 对固体推进剂裂纹内的对流燃烧流场进行了数值模拟, 计算采用隐式 TVD 格式求解有加质的二维粘性可压流的控制方程, 并且考虑了侵蚀燃烧效应, 计算获得了对流燃烧条件下裂纹内部压力分布, 讨论了裂纹长度、高度对裂纹尖端压力的影响。

主题词: 推进剂药柱, 推进剂燃烧, 裂纹, 数值仿真

分类号: V435.14

NUMERICAL ANALYSIS OF CONVECTIVE BURNING FLOW FIELD IN PROPELLANT CRACK

Li Jiang He Guoqiang Cai Timin

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

Abstract: A numerical analysis was performed to study convective burning flow field in solid propellant crack. The implicit TVD scheme was used to solve the two-dimensional Navier-Stokes equation with gas injection and erosive burning. The pressure distribution inside the crack was obtained and the relation between the length and height of crack and the pressure in crack tip was also discussed.

Subject terms: Propellant grain, Propellant combustion, Crack, Numerical simulation

1 引 言

固体推进剂裂纹内的流动及燃烧包括发动机点火过程中燃气充填裂纹和裂纹内的对流燃烧两个相关的过程。燃气在充填裂纹的过程中, 裂纹内的压力不可能大于燃烧室总压, 裂纹尖端不会产生很高的压差。如果不考虑点火过程的动载荷, 仅靠燃气充填过程一般不会引起裂纹的进一步扩展。裂纹内的对流燃烧使得裂纹内的压力升高, 裂纹尖端压力大于燃烧室总压, 使得裂纹尖端受到拉应力, 产生变形。在一定条件下, 在这种拉应力作用下裂纹可能出现扩展, 从而导致发动机失效。为了对裂纹进行力学分析, 需要知道对流燃烧条件下裂纹内部的压力分布^[1]。本文采用隐式 TVD 格式对裂纹对流燃烧流场进行数值计算, 获得了对流燃烧条件下裂纹内部压力分布, 并且讨论了裂纹长度、高度对裂纹尖端压力的影响。

2 控制方程和边界条件

2.1 假设和控制方程

为便于计算, 对裂纹对流燃烧流场作一些简化处理:

^① 收稿日期: 1998-07-15, 修回日期: 1999-01-18

- (1) 认为裂纹表面同时点燃;
- (2) 计算中不考虑推进剂变形及燃面推移与流动之间的耦合关系, 将流场按准稳态处理;
- (3) 认为裂纹内的燃烧符合推进剂的一般燃烧规律, 推进剂的燃速公式和侵蚀燃烧函数适用;
- (4) 将裂纹当作平面二维问题处理;
- (5) 不考虑燃气与推进剂之间的传热。

采用二维粘性可压流体的控制方程, 计算坐标下量纲为1的控制方程为:

$$\frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}}{\partial \eta} = \frac{1}{Re_{cr}} \left(\frac{\partial \hat{Q}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{S}}{\partial \eta} \right)$$

式中各项的表达式见参考文献 [2]。控制方程中对流项采用 Yee 和 Harten^[3]的二阶隐式 TVD 计算格式, 粘性项采用显式的中心差分格式离散。

2.2 边界条件

(1) 对称边界条件。对称轴的法向速度分量为零, 即 $v=0$, 对于其他参数 p, u, T 存在: $\partial p / \partial n = \partial u / \partial n = \partial T / \partial n = 0$ 。

(2) 出口边界条件。由于出口是亚声速, 所以出口边界的气流参数中压力给定, 其他参数直接外插。

(3) 加质边界条件。对于加质边界, 压力和密度取内点的值, 温度取推进剂的燃烧温度, 切向速度分量为零, 法向速度分量等于燃气流量除以燃气密度。

3 计算结果及分析

3.1 计算参数

推进剂密度: $\rho=1\,780\text{ kg/m}^3$; 推进剂燃烧温度: $T=3\,500\text{ K}$; 裂纹出口压力: $p_{\text{out}}=6\text{ MPa}$; 燃速公式: $r=6.799\,p^{0.295}$, 侵蚀函数: $\epsilon=1+4.013\,6\,(\lambda-0.239\,6)$ 。

式中: r 为推进剂燃速, 单位为 mm/s ; p 为压力, 单位为 MPa ; ϵ 为侵蚀系数, λ 为特征速度。

3.2 算例

实际裂纹的形状是不规则的, 为了计算方便, 将裂纹的形状简化为规则的几何形状, 如矩形、梯形或者三角形, 计算中将裂纹的形状当作矩形处理。图1是矩形裂纹的示意图, 裂纹的两个特征尺度分别是裂纹的长度(或深度) $L=50\text{ mm}$ 和裂纹的高度 $b=1\text{ mm}$ 。图2是 u 速度分量沿 y 方向的分布图, 可见由于裂纹高度很小, 粘性的影响比较大。从图3压力沿 x 方向网格线的分布看出, 压力沿 x 方向变化比较明显, 沿 y 方向的差别很小, 压力从裂纹尖端到出口逐渐下降, 尖端压力是出口压力的1.15倍。图4是侵蚀系数沿 x 方向的分布, 可以看出, $x=0.027\text{ mm}$ 处开始出现侵蚀燃烧, 而且越靠近出口侵蚀系数越大。

3.3 裂纹长度与裂纹尖端压力的关系

对裂纹高度 $b=1\text{ mm}$, 裂纹长度分别为25, 50, 75和100 mm 的4种裂纹进行了计算。图5为不同裂纹长度下压力沿中心线的分布图, 图6为裂纹尖端压力与裂纹长度之间的关系。从图中可以看出, 在裂纹高度不变的情况下, 随着裂纹长度的增加, 裂纹尖端的压力升高, 对计算点采用二次多项式进行拟合, 拟合函数为:

$$\bar{p} = 1.060\,9 - 0.003\,44x + 0.000\,09x^2$$

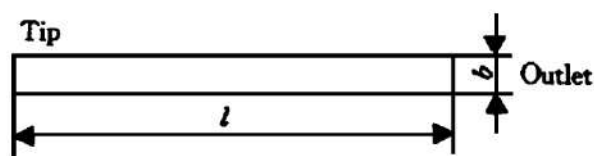
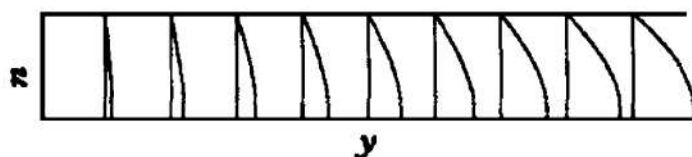


Fig. 1 Schematic diagram of crack

Fig. 2 Velocity distribution of u along y direction

式中: x 单位为 m , $\bar{p}$ 是无量纲压力, 即压力与出口压力的比值。

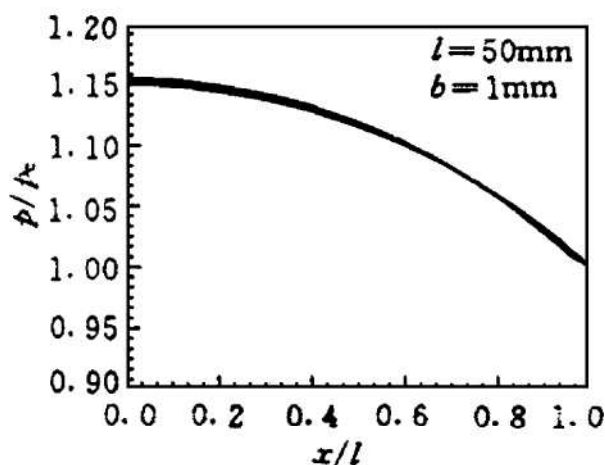
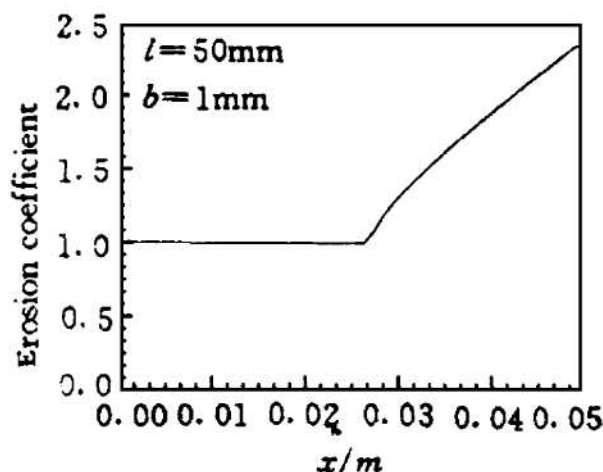
Fig. 3 Pressure distribution along x direction

Fig. 4 Erosion coefficient distribution

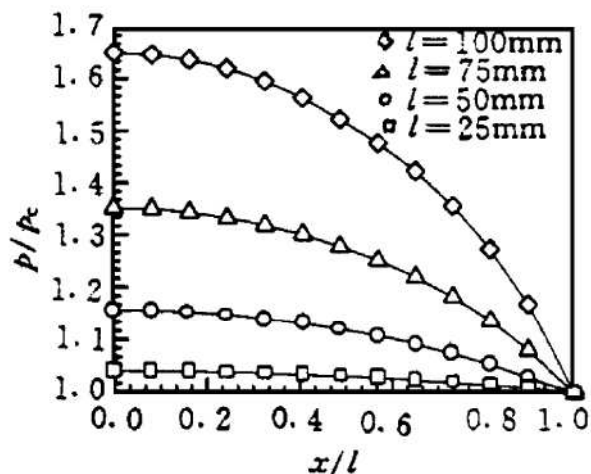


Fig. 5 Pressure distribution along crack axis with different crack length

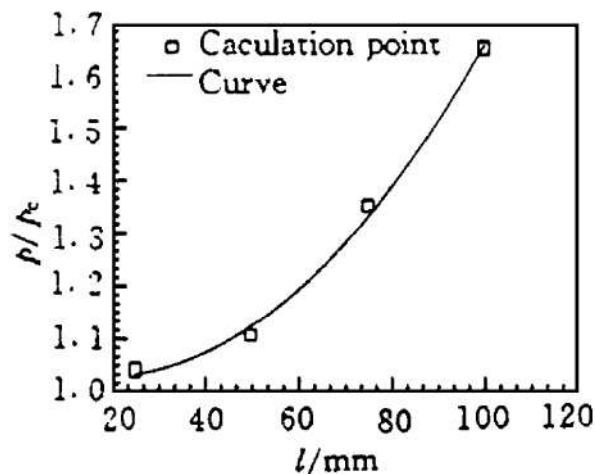


Fig. 6 Relation between the pressure in crack tip and the crack length

3.4 裂纹高度与裂纹尖端压力的关系

对裂纹长度 $L=50\text{ mm}$, 裂纹高度分别为 $2, 1, 0.7$ 和 0.5 mm 的四种裂纹进行了计算。图 7 为不同裂纹高度下压力沿中心线的分布图, 图 8 为裂纹尖端压力与裂纹高度之间的关系。从图中可以看出, 在裂纹长度不变的情况下, 随着裂纹高度的增加, 裂纹尖端的压力下降很快, 图中裂纹高度从 0.5 mm 增加到 2 mm , 压力比从 1.71 下降到 1.04 。说明推进剂越容易变形, 裂纹尖端的压力就越容易降低。裂纹燃烧以后, 裂纹内部压力升高, 在压力的作用下裂纹产生变形, 燃气通道面积增加, 裂纹尖端压力也随之下降。所以推进剂弹性越大, 装药尺寸越大, 约束越小, 裂纹越不容易出现扩展现象。

4 结 论

- (1) 裂纹对流燃烧使得裂纹尖端压力比裂纹出口压力高, 这是裂纹扩展的一种驱动力。
- (2) 裂纹长度越长, 裂纹高度越小, 则裂纹尖端压力越高, 裂纹高度的影响更为严重。
- (3) 由于裂纹的通气面积比较小, 气流速度比较高, 裂纹内存在比较严重的侵蚀燃烧现象, 从裂纹尖端到裂纹出口, 气流速度逐渐增加, 越靠近裂纹出口, 侵蚀效应越严重。
- (4) 侵蚀燃烧增加了推进剂的燃烧速度, 使得裂纹内部压力升高, 燃烧速度加快; 燃烧速度加快又加剧了侵蚀燃烧效应, 这两者相互耦合, 影响裂纹内的流动情况。
- (5) 推进剂越容易变形, 则推进剂裂纹尖端压力越容易降低, 所以推进剂弹性越大, 装药尺寸越大, 约束越小, 裂纹出现扩展的可能性越小。

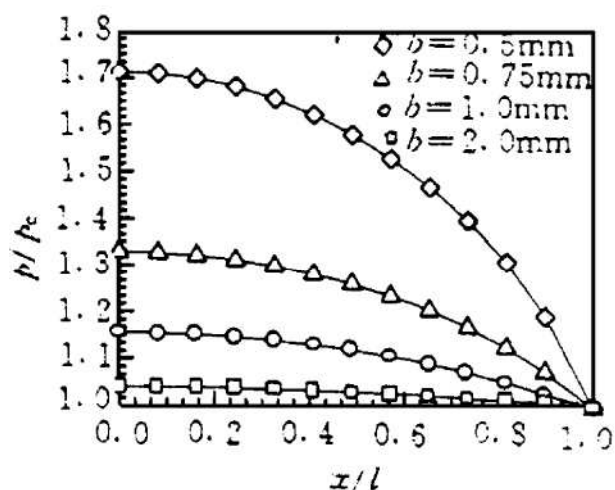


Fig. 7 Pressure distribution along crack axis with different crack length

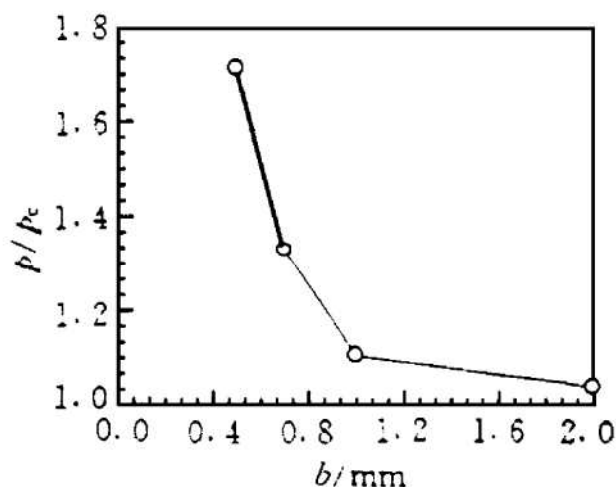


Fig. 8 Relation between the pressure in crack tip and the crack length

参 考 文 献

- 1 韩小云, 周建平. 固体推进剂裂纹对流燃烧和扩展的研究分析. 推进技术, 1997, 18 (6)
- 2 方丁酉. 固体火箭发动机内弹道学. 长沙: 国防科技大学出版社, 1997.
- 3 Yee H C, Harten A. Implicit TVD scheme for hyperbolic conservation laws in curvilinear coordinates. AIAA 85-1513