

固体药柱燃烧断裂边界一维流场特性^{*}

韩小云 周建平

(国防科技大学航天技术系, 长沙, 410073)

摘要: 以发动机燃烧室增压为条件, 详细模拟了固体药柱燃烧断裂边界一维流场的特性。高温燃气在燃烧室增压驱动下注入药柱裂纹, 在裂纹内形成压力波和火焰锋的传播过程。压力波前和封闭的裂纹顶端会产生拍击作用, 使得裂纹顶端的压力迅速增加, 进而在燃烧室增压率增大的方向上, 裂纹顶端相继出现火焰减速传播、压力突升、超前点火和火焰加速传播等现象。这就找到了国内外学者在一维假设下发现的各现象之间的内在联系, 并描述了四种不同的火焰传播曲线。

主题词: 固体推进剂, 推进剂燃烧, 侵蚀燃烧裂纹, 火焰传播

分类号: V435.12

CHARACTERISTICS OF 1-D FLOW FIELDS ON THE BOUNDARY OF COMBUSTION FRACTURE IN SOLID PROPELLANT

Han Xiaoyun Zhou Jianping

(Dept. of Aerospace Technology, National Univ. of Defence Technology, Changsha, 410073)

Abstract: The characteristics of 1-D flow fields were simulated on the boundary of combustion fracture in solid propellants on the condition of pressurization in chamber. The high temperature combustion gas was driven into crack by the pressurization, so that there were spreading processes of pressure wave and combustion flame. When the pressure wave front got to the close tip of the crack, there must be a shock which would make the pressure increasing rapidly at the tip of port. Therefore, in the direction of pressurization rate increasing, there must be the phenomena of flame spreading deceleration, abrupt pressurization, prior ignition and flame spreading acceleration one after another at the crack tip. So the internal relations are established among the phenomena which were described in literatures, and four kinds of combustion flame spreading curves are described in this paper.

Subject terms: Solid propellant, Propellant combustion, Erosive burning crack, Flame propagation

1 引言

十几年来, 国内外的学者已对燃烧室高温高压作用下药柱裂纹腔内的烧蚀流场^[1]作了一些实验的和理论的研究, 得到了一些结论: (1) 描述了火焰在裂纹腔内传播的一维曲线 (裂

* 收稿日期: 1997-09-18, 修回日期: 1998-02-16, 本课题系国家教委优秀青年教师基金资助项目

纹顶端火焰减速传播)^[2], (2) 揭示了裂纹尖端压力突升的现象^[3], (3) 揭示了裂纹尖端超前点火的现象^[4], (4) 描述了裂纹腔中压力、温度、气流速度的一维分析^[3,5]。本文将在一维假设的条件下, 对对流燃烧特性作详细的讨论, 揭示一维燃烧流场在不同燃烧室增压率下的特征现象, 并建立各现象之间的基于参数的内在联系。

2 药柱燃烧断裂边界流场一维理论模型

固体火箭发动机燃烧室内的高温燃气在燃烧室高压驱动作用下注入裂纹, 使得裂纹腔内形成一个压力波和火焰锋的传播过程, 假设在该过程中: (1) 气流在裂纹腔中呈一维流动, 裂纹长与裂纹截面等效水力学直径之比取 100 左右; (2) 裂纹体不变形, 裂纹不扩展; (3) 气相反应区为准静态的; (4) 火焰离开燃烧表面的距离远小于裂纹张度; (5) 燃气遵从理想状态方程, 忽略粘性和附面层的影响; (6) 药柱的传热是各向性的; (7) 垂直于燃烧表面的燃气加质速度极小; (8) 火焰锋前凸出尺寸远小于裂纹的宽度。

根据上述假设, 建立裂纹内流场的一维守恒型 N-S 方程^[6]:

质量守恒方程: $\partial(\rho A_b)/\partial t + \partial(\rho v A_b)/\partial x = (\rho_p - \rho)rS$

动量守恒方程^[7]: $\partial(\rho v A_b)/\partial t + \partial(\rho v^2 A_b)/\partial x = -A_b \partial p / \partial x - Sf \rho v |v| / 2$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial \left[\rho A_b \left(e + \frac{v^2}{2} \right) \right]}{\partial t} + \frac{\partial \left[\rho v A_b \left(H + \frac{v^2}{2} \right) \right]}{\partial x} = \rho_p r S \left(H + \frac{v^2}{2} \right) + \frac{\partial \left(\lambda_g A_b \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} - h_c S (T - T_s)$$

点火准则为: $T_s \geq T_{ig}$; 燃气流动遵从理想状态方程: $p = \rho RT$

气固相界面的能量交换^[8]: $\partial T_s / \partial y = -h_c / \lambda_p (T - T_s)$

固相传热各相同性, 仅考虑 y 方向的温度梯度^[8]: $\partial T_p / \partial t = \alpha_p \partial^2 T_p / \partial y^2$

对固体推进剂燃烧, 考虑用 Lenoir-Robillard 侵蚀燃烧公式^[8]。同时考虑与湍流有关的 Colebrook 摩擦系数公式和 Bartz 对流传热系数公式^[8]。

给定初始条件: $p(0, x) = p_i$, $T(0, x) = T_i$, $v(0, x) = v_i$, $T_p(0, x, y) = T_i$ 。

边界条件的确定依赖于热流的流动状态, 当热流亚音速流入裂纹时: $p(0, t) = P_c(t)$, $T(0, t) = T_c(t)$, $v(l, t) = 0$; 当热流亚音速流出裂纹时: $p(0, t) = p_c(t)$, $v(l, t) = 0$; 当热流超音速流出裂纹时: $v(l, t) = 0$ 。

固体推进剂边界的热交换^[8]:

$$y = 0, \quad \partial T_s / \partial y = -h_c / \lambda_p (T - T_s); \quad y = b, \quad T_p(t, x, b) = T_i$$

裂纹内流场差分求解时, 物理边界条件不能使数值解封闭, 所缺的边界条件须根据物理方程由数值解给定, 即在特征线上利用相容关系求解。

3 数值结果及参数分析

3.1 一维流场基本性态

用某固体推进剂预制单端开口的规范裂纹进行数值模拟, 推进剂性能参数见表 1。

Table 1 Parameters of solid propellant

Parameters	Values	Units
ρ_p	1710.0	kg/m ³
α	162	(m/s)/(Pa) ⁿ
n	0.4108	
k	1.21	
R	318.62	Nm/kg · K
M_w	26.1	kg/kmol
λ_g	0.08727	W/m · K
λ_p	0.335	W/m · K
α_p	1.8×10^{-7}	m ² /s
β	53	
k_e	1.67×10^{-7}	m ³ · K/J
T_{ig}	850	K

裂纹内初始状态为: $T_i = 295\text{K}$, $p_i = 101325\text{Pa}$, $v_i = 0$, 燃烧室内的高温点火燃气 T_c 在燃烧室增压 $\dot{p}_c$ ($d p_c / dt$) 的驱动下形成热流, 从裂纹开口端注入裂纹内, 向裂纹端推进, 如图 1 所示。同时高温点火燃气将裂纹内表面烤热, 使内表面温度逐步达到固体推进剂点火临界并点火, 火焰锋向裂纹顶端推进, 如图 1 所示; 裂纹内压力逐步升高, 初始时段, 裂纹开口处的压力高于裂纹内部的压力, 热流从燃烧室单向流入裂纹, 尔后, 随火焰在裂纹内的传播和大量燃气的产生, 压力峰值向裂纹内移动, 热流呈现双向流动, 当压力锋前从裂纹顶端折回, 加上火焰传播到裂纹顶端促使裂纹内产生大量燃气, 使得裂纹顶端的压力高于裂纹开口的压力, 热流从裂纹内单向流出到燃烧室中, 如图 1(a) 和 (c) 所示。

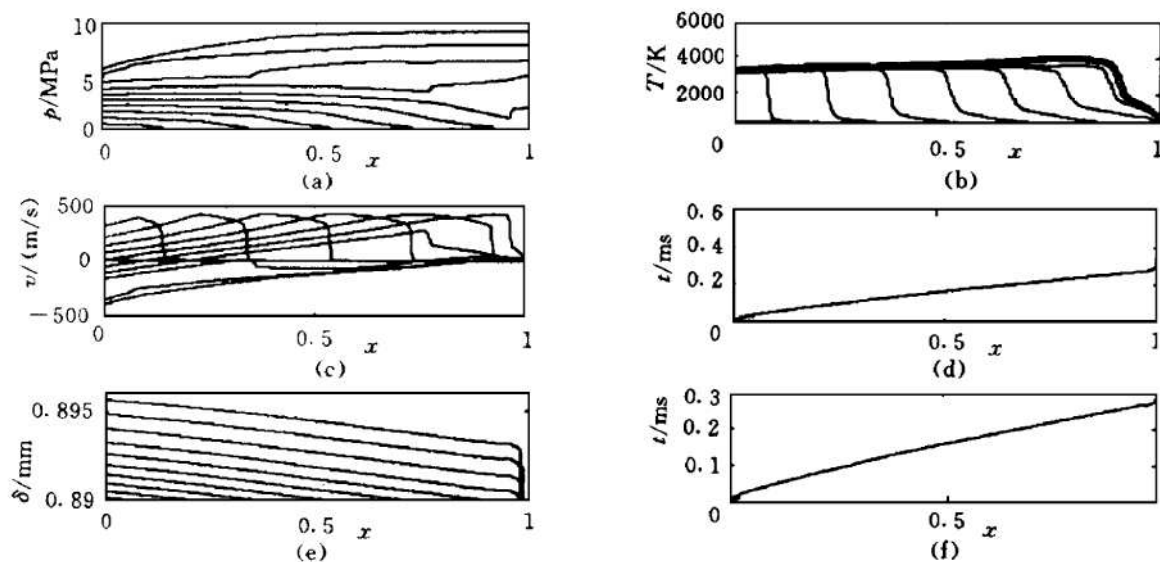


Fig. 1 The characteristics of 1-D flow field in crack.

$l = 195\text{mm}$, $\delta = 0.89\text{mm}$, $\varepsilon = 0.08\text{mm}$, $\dot{p}_c = 12.2\text{GPa/s}$, $T_c = 3000\text{K}$

在这个过程中, 热流锋前向裂纹顶端的传播速度快于火焰锋前传播速度, 如图 1(d) 和 (f) 所示。规范的平行六面体形的裂纹腔被烧蚀成楔形体, 如图 1(e) 所示。(图 1 中 x 表示无量纲的横坐标, 便于不同长度裂纹之间的比较, 下同)。这和文献[3]的结论完全一致。

3.2 火焰传播位置和速度曲线

火焰传播的位置和速度曲线随裂纹表面粗糙度的变化如图 2 所示。在相同的条件下, 裂纹内表面的粗糙度越大, 火焰传播到裂纹顶端所需的时间越长, 传播速度峰值越小。这是因为由摩擦消耗掉的能量和对热流产生的阻止作用就越大, 进而延缓了火焰传播。在燃烧室增压 $\dot{p}_c$ 较低的情况下, 模拟火焰传播位置曲线的四次多项式为:

$$x = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + e$$

其中 e 为拟合误差。速度曲线呈平坦的单拱形, 两端小, 中间大, 火焰在裂纹顶端减速传播。

火焰传播的位置和速度曲线随裂纹长度、初始张度和烧室增压的变化情况与文献[2]的

结果是一致的。但是, 这个结论必须在燃烧室的增压小于某个值时才满足。

3.3 裂纹顶端压力突升

压力波和裂纹顶端的拍击作用使裂纹顶端压力突然升高, 这就是文献 [3] 表述的裂纹顶端的压力突升现象和压力突升受燃烧室增压、裂纹张度影响的情况。裂纹顶端的压力突升随裂纹长度而变化 (如图 3 所示)。裂纹长度越短, 在相同条件下裂纹顶端压力突升产生得越快, 这是因为燃气流到达裂纹顶端所需的时间也缩短了, 但对应力突升的时间率和应力峰值影响比较小。裂纹顶端压力突升为大量集群分布的裂纹, 在燃烧室高压作用下实现 DDT 提供了可能的诱导机制。

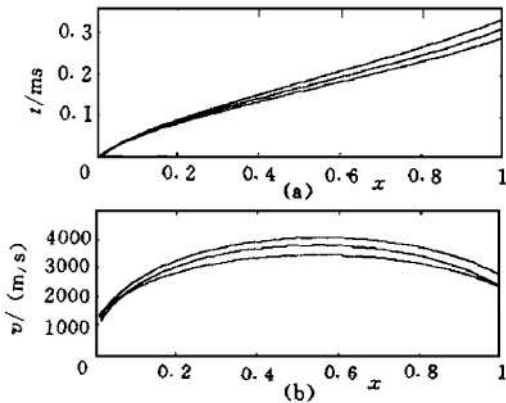


Fig. 2 Effect of surface roughness on ignition front propagation

$T_c = 3000\text{K}$, $\delta = 0.89\text{mm}$,
 $l = 195\text{mm}$, $\dot{p}_c = 12.2\text{GPa/s}$

The three curves of (a) upwards and those of (b) downwards; $\epsilon = 0.08, 0.16, 0.32\text{mm}$

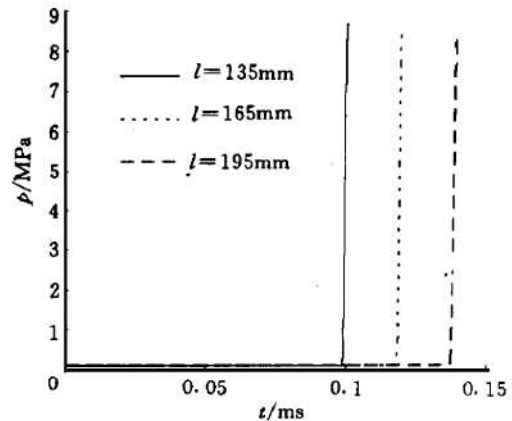


Fig. 3 Effect of length on abrupt pressurization at crack tip

$\epsilon = 0.004\text{mm}$, $T_c = 3000\text{K}$,
 $\delta = 0.89\text{mm}$, $\dot{p}_c = 51\text{GPa/s}$

3.4 裂纹顶端超前点火

裂纹顶端压力突升使得裂纹顶端的温度也随之突然升高。当该温度达到固体推进剂点火临界温度时, 裂纹顶端就会在火焰锋到达之前点火。这就是文献 [4] 所述的在燃烧室高压条件下, 裂纹顶端发生超前点火。裂纹顶端点火延迟时间与裂纹表面粗糙度和燃烧室增压之间的关系如图 4 所示。在给定裂纹表面粗糙度时, 裂纹顶端点火延迟时间随燃烧室增压的增大而缩短; 在给定燃烧室增压时, 裂纹表面粗糙度越小, 裂纹顶端点火延迟时间越短。图 4 中的每条曲线的前后两端是不可以随意延伸的。在燃烧室增压减小的一端, 当燃烧室增压减小到一定值时, 裂纹顶端将不再发生超前点火, 即裂纹顶端点火时间等于火焰传播到达裂纹顶端的时间。从图 5 (a) 描述的火焰位置时间曲线可以看出, 裂纹顶端产生超前点火以后, 裂纹腔内出现两个火焰锋, 新的火焰锋将从裂纹顶端开始反向传播, 直到两个火焰锋在裂纹内某点相会, 火焰传播过程即告结束。不妨定义从裂纹顶端超前点火到两个火焰锋相会所需的时间为两锋相会时间 t_m 。图 5 (b) 可以看出, 两锋相会时间随燃烧室增压的增大而减小, 当燃烧室增压足够大, 或两锋相会时间足够小时, 裂纹顶端将不再产生超前点火, 此时, 裂纹顶端点火的时间和火焰传播到达裂纹顶端的时间相等。在这种情况下, 火焰传播的位置和速度曲线将有所不同。如图 6 (d) 所示, 在燃烧室增压很高时, 裂纹内的火焰一直加速传播到裂纹顶端。速度曲线将不再是两端小, 中间大的单拱形。这种不连续的火焰传播方式很可能

为 DDT 过程提供动力^[4]。

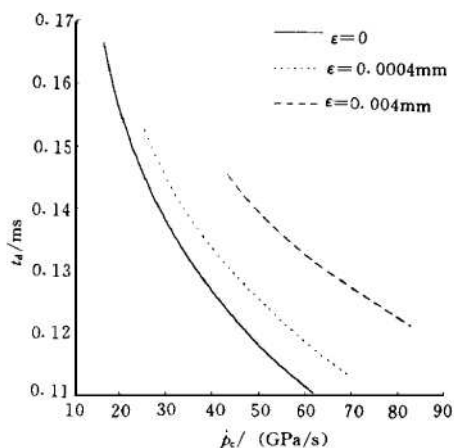


Fig. 4 Effect of surface roughness and chamber pressurization rate on ignition delays at crack tip

$l=195\text{mm}$, $\delta=0.89\text{mm}$, $T_c=3000\text{K}$

3.5 四种不同的火焰传播曲线

在一维流动的假设下,裂纹内的火焰传播是受燃烧室的压力过程控制的。通常的固体火箭发动机的压力时间曲线由三段构成:点火增压段,定常恒压段,熄火降压段。在燃烧室增压的情况,若比裂纹顶附近区域的压力稍大,对此处火焰传播有一定的迟滞作用,使火焰传播减速,火焰传播速度曲线呈向上凸的单拱形,如图 6 (a) 所示。当燃烧室的增压稍大一些,致使裂纹顶端产生压力突升,使得裂纹顶端的压力大大超过裂纹顶端附近区域的压力。这时此处火焰的传播将受到极大的阻碍,使得火焰传播的位置时间曲线几乎是平行于时间轴向上爬升,如图 6 (b) 所示。当燃烧室增压再大一些,压力波和裂纹顶端的拍击作用使得裂纹顶端的温度达到了点火临界温度,这时裂纹顶端就产生超前点火,新的火焰锋从裂纹顶端出发反向传播,直到两个火焰锋在裂纹内某点上相会,如图 6 (c) 所示。

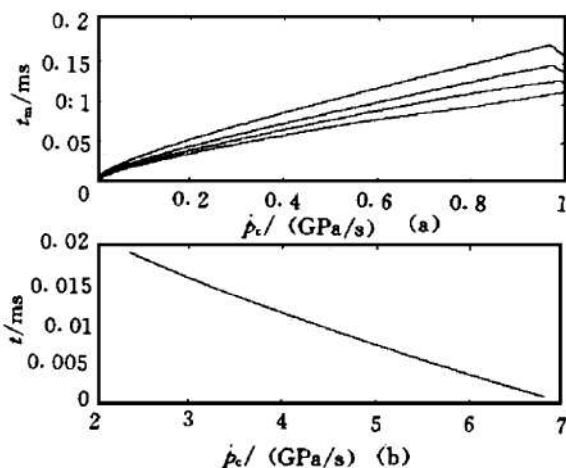


Fig. 5 Effect of chamber pressurization rate on meeting time of two fronts

$l=195\text{mm}$, $\delta=0.89\text{mm}$,

$\epsilon=0.0004\text{mm}$, $T_c=3000\text{K}$

The curves of (a) downwards:

$\dot{P}_c=23, 39, 54, 69\text{GPa/s}$

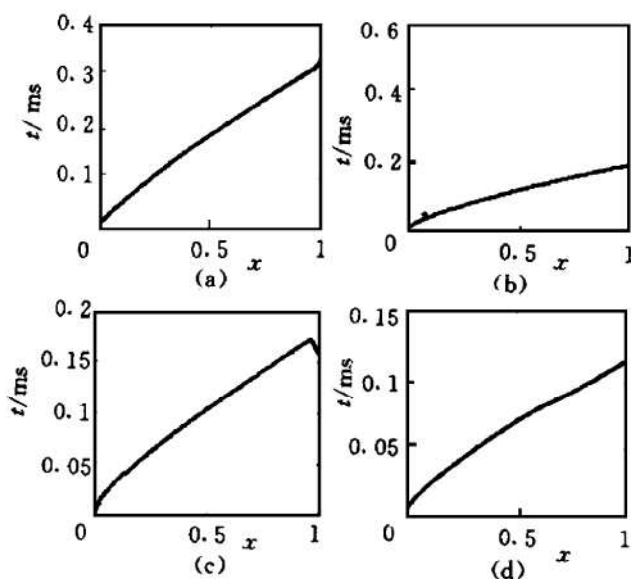


Fig. 6 Four kinds of combustion flame spreading curves

$l=195\text{mm}$, $\delta=0.89\text{mm}$, $\epsilon=0.0004\text{mm}$, $T_c=3000\text{K}$

from (a) to (d): $\dot{P}_c=10, 20, 51, 71\text{GPa/s}$

(下转第 109 页)

碳纤维导致硅橡胶拉伸强度降低,而方法 D 处理的碳纤维却使硅橡胶拉伸强度有所增加。

(2) 用不同氧化剂处理的碳纤维均使硅橡胶与 HMX-CMDB 推进剂粘接剪切强度提高。

(3) 采用 $5\% \text{KMnO}_4 + 10\% \text{H}_2\text{SO}_4$ 溶液处理碳纤维的方法 D,是效果最佳的方法。

参 考 文 献

- 1 赵凤起. 硅橡胶在固体火箭发动机中的应用研究综述. 河北化工学院学报, 1995, 16 (3): 50~54
- 2 赵凤起. 白炭黑对推进剂硅橡胶包覆层材料性能的影响. 含能材料, 1997, 5 (2): 82~87
- 3 朱玉俊. 弹性体的力学改性. 北京: 科学技术出版社, 1992.
- 4 Gonthier B F. Minimum smoke rocket motors with silicone inhibitors. AIAA-84-1418
- 5 孙慕瑾. 碳纤维的表面处理. 现代化工, 1993, (2)
- 6 赵凤起. 短纤维补强硅橡胶包覆材料研究. 固体火箭技术, 1997, 20 (4): 61~64
- 7 王 静. 氯化处理的碳纤维的表面表征. 北京化工学院学报, 1986, (4): 41~45

(上接第 96 页)

4 结 论

从讨论中可以看出,规范裂纹在一维流动假设下,裂纹中的流场乃至火焰传播特性主要受燃烧室中的压力过程控制。裂纹中的流场基本特性、裂纹顶端的压力突升和超前点火、以及在燃烧室低增压时火焰传播曲线与国内外同行的结论是基本相同的。从燃烧室增压为条件这个角度,本文将裂纹顶端的压力突升、超前点火和火焰传播曲线整合到一个统一的思路,描述了在不同增压条件下不同的火焰传播曲线,对一维流动假设下裂纹内流场和火焰传播特性形成了较为完整的概念。对燃烧室恒压和降压条件下的情形尚需进一步探讨。

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(6)
- 2 Kumar M. Kovacic S M. Kuo K K Flame propagation and combustion processes in solid propellant cracks. AIAA Journal, 1981, 19(5)
- 3 Kuo K. K. Chen A T. Davis T R. Convective burning in solid-propellant cracks. AIAA Journal, 1978, 16 (6): 600~607
- 4 Kumar M. Kuo K K. Ignition of solid propellant crack tip under rapid pressurization. AIAA Journal, 1980, 18(7): 825~833.
- 5 李磊,斐海涛. 固体推进剂药柱裂缝燃烧研究. 航空动力学报, 1991(4): 359~363
- 6 何洪庆主编. 固体火箭发动机气体动力学. 西安: 西北工大出版社, 1988.
- 7 Griffiths S K, et al. Similarity Analysis of fracture growth and flame spread in deformable solid propellants. Combustion and flame, 1992, 88: 369~383
- 8 Kumar M, Kuo K K. Effect of deformation on flame spreading and combustion in propellant cracks. AIAA Journal, 1981, 19(12): 1580~1589