

## 固体推进剂裂纹摩擦热点形成细观模型分析\*

陈广南<sup>1</sup>, 张为华<sup>1</sup>, 刘子如<sup>2</sup>, 王宁飞<sup>2</sup>

(1. 国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要** :分析机械撞击载荷作用下复合固体推进剂内部裂纹摩擦形成热点过程。研究在压应力与剪切应力作用下闭合裂纹滑移、扩展、摩擦生热、热扩散、推进剂热分解及与气相产物相互作用。利用断裂力学、热传导、推进剂热分解动力学方法,建立裂纹摩擦热点细观模型。通过模型数值计算,探讨推进剂裂纹摩擦产生高温热点的过程和条件。分析计算表明裂纹摩擦和扩展可导致推进剂形成高温热点。

**关键词** 固体发动机安全性; 固体推进剂; 裂纹摩擦; 力学-化学过程

中图分类号 :V435 文献标识码 :A

## Meso-scale Hot-spot Model of Crack Friction in Solid Propellant

CHEN Guang-nan<sup>1</sup>, ZHANG Wei-hua<sup>1</sup>, LIU Zi-ru<sup>2</sup>, WANG Ning-fei<sup>2</sup>

(1. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Xian Modern Chemical Research Institute, Xian 710065, China)

**Abstract** :The study was conducted to investigate how the hot-spot formation was caused by crack friction in composite solid propellant under mechanic impact. It was concentrated on processes of crack surfaces slip, crack growth and friction heating of closed crack driven by shear stress, heat conduction, decomposition of solid propellant and its interaction with the gas-phase product. In view of the fracture mechanics, heat conduction and dynamics of thermal decomposition of solid propellant, the meso-scale hot-spot model of crack friction was established. By making numerical calculation of the model, the process and condition for hot-spot formation were discussed, from which it is concluded that friction between crack surfaces slip and crack growth can lead to formation of hot-spot in composite solid propellant.

**Key words** :safety of SRM; solid propellants; cracks friction; mechanical-chemical processes

固体火箭发动机在运输、维护检测和使用过程中可能遇到意外机械撞击。例如运输过程中发生翻覆、装配检测过程中弹体跌落或异物撞击;多级火箭发射异常时与发射装置或建筑物碰撞等。上述情况下,撞击载荷使固体火箭发动机壳体及装药产生大变形甚至结构破坏,在此过程中发动机装药因挤压、剪切作用,一定条件下在局部形成热点,从而导致燃烧爆炸等危险性反应发生。

热点理论是含能材料在外界机械能作用下发生着火燃烧反应,这是被普遍认同的观点。冲击条件下炸药或推进剂产生热点主要机理包括<sup>[1-2]</sup>:颗粒摩擦、高速变形下塑性加热、微孔穴坍塌、绝热剪切带、裂纹尖端热点等。在强度较弱的非爆轰冲击作用下,对颗粒填充聚合物类型的含能材料(如复合推进剂、高聚物粘结炸药等),J. K. Dienes 通过量级分析认为裂纹摩擦是导致热点形成的最可能机理<sup>[3]</sup>。

J. K. Dienes 首先试探性提出统计裂纹力学(Statistical Crack Mechanics, SCRAM)方法研究 HMX 高能炸药冲击点燃问题<sup>[3]</sup>,但对于裂纹摩擦如何形成热点的细观过程未作介绍,而且存在一些疑问。例如:裂纹闭合情况下滑移摩擦是热点形成前提,但模型中只考虑张开型裂纹扩展,这与裂纹闭合相矛盾。

本文分两个阶段建立裂纹摩擦热点模型:无独立气层和有独立气层。在第一阶段,依据断裂力学基本方法,分析研究裂纹面滑移及扩展。当裂纹摩擦使固相推进剂大量分解形成独立气层后,分析研究在气体压力作用下裂纹张开型扩展、气相-固相之间的影响。通过对模型控制方程进行数值计算,分析研

\* 收稿日期:2005-08-30

基金项目:国家 863 高技术资助项目(2002AA765030)

作者简介:陈广南(1964—)男,副研究员,博士。

究裂纹摩擦生成热点过程和条件。本文侧重在理论上探讨热点生成的细观过程,为发动机撞击安全性分析从细观尺度向宏观领域过渡提供必要基础。

## 1 热点模型及控制方程

复合固体推进剂中包含大量初始裂纹,数量密度一般在  $10^6/\text{m}^3$  量级。图 1 为裂纹几何尺寸,假设裂纹为币状,即裂纹面是半径为  $c$  的圆,垂直裂纹面的剖面为椭圆, $h$  为裂纹半高。机械撞击载荷作用下发动机装药变形及应力状态可以通过动力有限元方法分析计算,将裂纹所处位置应力在裂纹面上分解为法向压力  $p_0$  和剪力  $s_0$ 。则  $p_0$ 、 $s_0$  为导致裂纹摩擦形成热点的外部驱动力, $F_f$  为裂纹面摩擦力, $p_g$  为裂隙内部气体压力。

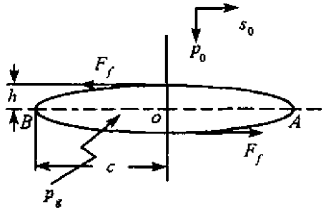


图 1 细观裂纹几何尺寸  
Fig. 1 Geometry of micro-crack

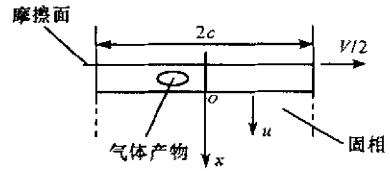


图 2 裂纹摩擦第一阶段计算模型  
Fig. 2 Crack model of the first stage

### 1.1 裂纹面摩擦开始阶段(无气体层)

裂纹面摩擦生热使局部区域温度升高,固相推进剂分解成气体产物。在开始阶段,气体产物量少,粗糙不平的裂纹面间可以容纳少量气体。因此,气体产物的存在不影响裂纹上下表面有效摩擦。如图 2,推进剂为热不良导体,热传导沿垂直于裂纹面方向的影响范围有限,可简化为一维半无限问题计算。坐标原点始终在固相边界面上,质量连续方程、热传导方程及边界条件为

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{Q}{C_s} - (T - T_0) \frac{d \ln A}{dt} \quad (2)$$

$$Q = Q_s \rho Z_s \exp(-E_s/RT) \quad (3)$$

$$T|_{x=\infty} = T_0 \quad (4)$$

$$q_h = -\lambda_s \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} + m \Delta h_{v-s} \quad (5)$$

其中  $\rho$ 、 $\lambda_s$ 、 $\alpha$ 、 $C_s$ 、 $T_0$ 、 $Q_s$ 、 $E_s$ 、 $Z_s$  分别为固相推进剂密度、导热率、导温系数、比热、初始温度、分解热、活化能、指前因子, $A$  为裂纹面积, $q_h$  为单位面积裂纹面摩擦生热率, $\Delta h_{v-s}$  为固相推进剂气化热,吸热为正。式(2)中最后一项是考虑裂纹扩展对温度的影响。速度  $u_x$  等于推进剂线性燃速的负值。

### 1.2 裂纹面摩擦第二阶段(有气体层)

当裂纹内气体平均厚度  $h$  达到一定值时形成独立气体层,这时认为裂纹上下表面不再有效摩擦。凝聚相热分解产物进入气体层,进一步反应后,放出热量并形成最终气体产物。因此气体层的质量、温度、压力随热分解过程及裂纹扩展而变化。气体层的能量守恒方程为

$$M_g C_{vg} \frac{dT_g}{dt} + \dot{M}_g C_{pg} (T_g - T_s) = \dot{M}_g h_r - 2A \dot{q}_{g \rightarrow s} - p_g \frac{dV}{dt} \quad (6)$$

其中  $M_g$ 、 $T_g$ 、 $C_{vg}$ 、 $C_{pg}$  分别为气相产物质量、温度、定容比热和定压比热, $h_r$  为气相反应热, $\dot{q}_{g \rightarrow s}$  为气相产物对固相表面传热率, $T_s$  为固相表面温度。要精确确定  $\dot{q}_{g \rightarrow s}$  是很困难的,这里近似采用稳态燃烧情况时的简化计算公式<sup>[4]</sup>:

$$\dot{q}_{g \rightarrow s} = \frac{\lambda_g}{x_g} (T_g - T_s) \quad (7)$$

$$x_g = \frac{2\lambda_g/C_{pg}}{\sqrt{\dot{m}^2 + \frac{4\lambda_g Z_g^2 \bar{M}_g}{R^2 C_{pg}} - \dot{m}}} \quad (8)$$

其中  $\lambda_g$  为气体导热系数,  $\dot{m}$  为质量燃速,  $\bar{M}_g$  为气体产物平均分子量,  $Z_g$  为气相反应指前因子。

### 1.3 裂纹面滑移与裂纹扩展

在撞击过程中,由于时间很短( $\approx 1\text{ms}$ ),因此固体推进剂力学特性主要表现为线弹性。根据断裂力学理论<sup>[5]</sup>可得到币状裂纹面不连续位移量 $|d_{\perp}|$ ,并推导得出摩擦功率 $\dot{Q}_f$ :

$$|d_{\perp}| = \frac{16(1-\nu^2)\chi(s_0 - F_f)}{\pi E} \sqrt{c^2 - r^2} \quad (9)$$

$$\dot{Q}_f = \frac{3\chi(1-\nu^2)F_f}{3\pi E} \{[(s_0 - F_f)\dot{c} + \alpha(s_0 - F_f)]\} \quad (s_0 > F_f, p_0 > p_g) \quad (10)$$

$$F_f = \mu(p_0 - p_g) \quad (p_0 > p_g) \quad (11)$$

$$\mu = \mu_0 \exp\left[\frac{Q_{\tau}}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (12)$$

其中,  $\nu$ 、 $E$  分别为推进剂泊松比和弹性模量,  $\mu$  为摩擦系数。式(12)描述了  $\mu$  与温度的关系。当  $s_0 \leq F_f$  或  $p_0 \leq p_g$  时,  $\dot{Q}_f = 0$ 。

当同时存在张开型和剪切型裂纹扩展时,假设裂纹扩展是自相似的,且扩展速率与应力强度因子的关系用 S 型函数描述,对于币状裂纹,扩展准则及扩展速度为

$$\left(\frac{K_{\perp}}{K_{\perp c}}\right)^2 + \left(\frac{K_{\parallel}}{K_{\parallel c}}\right) \geq 1 \quad (13)$$

$$\kappa = \left[\left(\frac{K_{\perp}}{K_{\perp c}}\right)^2 + \left(\frac{K_{\parallel}}{K_{\parallel c}}\right)^2\right]^{1/2} \quad (14)$$

$$\dot{c} = \frac{1 + U[\chi(\kappa)]}{2} U_R \quad (15)$$

$$\chi(\kappa) = \frac{2}{\kappa_m} \lg(\kappa) - 1 \quad (16)$$

$$U(\chi) = \begin{cases} -1, & (\chi < -1) \\ \frac{\chi}{8}(3\chi^4 - 10\chi + 15), & (|\chi| \leq 1) \\ 1, & (\chi > 1) \end{cases} \quad (17)$$

其中  $K_{\perp}$ 、 $K_{\parallel}$ 、 $K_{\perp c}$ 、 $K_{\parallel c}$  分别为 I 型和 II 型应力强度因子及对应的临界应力强度因子,  $U_R$  为裂纹扩展极限速度,即材料瑞利波速,常数  $\kappa_m$  为形状因子。

## 2 数值计算与分析

考虑 AP/HTPB 复合推进剂内初始裂纹,裂纹半径  $c_0 = 40\mu\text{m}$ ,在机械撞击过程中,该裂纹面上法向压力  $p_0$  和切向剪力  $s_0$  在  $0 \sim 1\text{ms}$  时间内从零线性增加,  $p_0$  最大值为  $10\text{MPa}$ ,  $s_0$  和  $p_0$  之比为定值  $a$ ,初始温度  $T_0 = 300\text{K}$ 。推进剂瞬时模量  $E = 15\text{MPa}$ ,泊松比  $\nu = 0.495$ ,  $\mu_0 = 1.1$ ,  $Q_{\tau} = 4.6 \times 10^3 \text{J/mol}$ 。热分解参数:  $E_s = 1.36 \times 10^5 \text{J/mol}$ ,  $Z_s = 1.7 \times 10^9 \text{s}^{-1}$ ,  $Q_s = 3.7 \times 10^6 \text{J/kg}$ 。瞬时载荷作用下推进剂临界应力强度因子  $K_{\perp c} = 1.3 \times 10^5 \text{Pa} \cdot \text{m}^{-1/2}$ ,  $K_{\parallel c} = 1.2 \times 10^5 \text{Pa} \cdot \text{m}^{-1/2}$ 。

图 3~图 5 为  $a$  取不同值时裂纹面温度  $T_s$ 、裂纹半径  $c$  随时间变化情况。 $a = 1.5$  和  $a = 2$  时,  $T_s$  最大值分别为  $307\text{K}$  和  $314\text{K}$ ,由于剪应力小,裂纹未扩展,裂纹面相对滑移速度很小,因而温度  $T_s$  升幅小。对于  $a = 2.5$  和  $a = 3$ ,分别在  $t = 0.85\text{ms}$  和  $t = 0.64\text{ms}$  时,裂纹开始扩展,滑移速度迅速增加,裂纹表面温度  $T_s$  很快超过  $800\text{K}$ 。由此可见,裂纹扩展对热点形成至关重要。图 6 为  $a = 2.5$  时裂纹面温度  $T_s$ 、

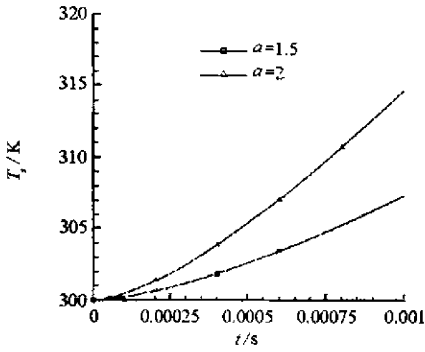


图3 裂纹面温度  $T_s$  ( $a = 1.5, a = 2$ )  
Fig.3 Crack temperature ( $a = 1.5, a = 2$ )

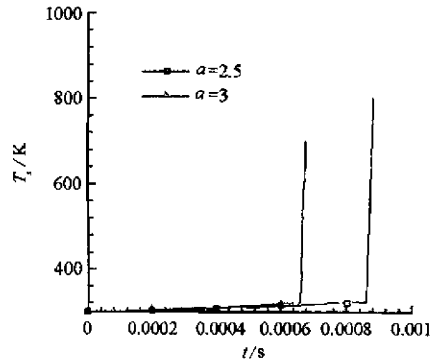


图4 裂纹面温度  $T_s$  ( $a = 2.5, a = 3$ )  
Fig.4 Crack temperature ( $a = 2.5, a = 3$ )

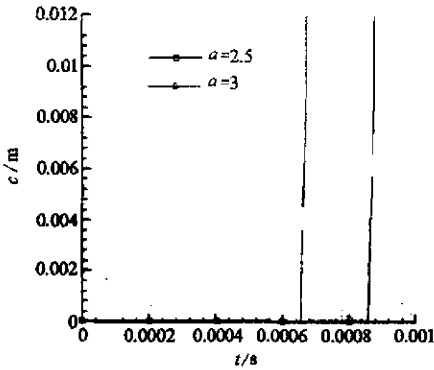


图5 裂纹半径  $c$  ( $a = 2.5, a = 3$ )  
Fig.5 Crack radius ( $a = 2.5, a = 3$ )

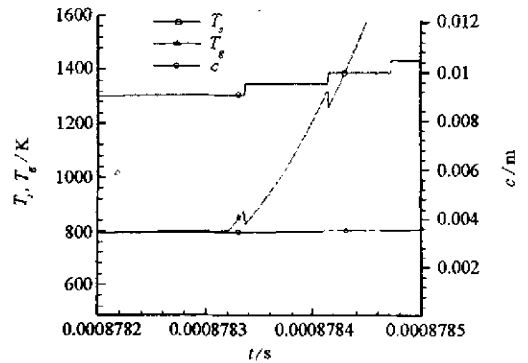


图6  $T_s, T_g, c$  局部曲线 ( $a = 2.5$ )  
Fig.6  $T_s, T_g, c$  ( $a = 2.5$ )

内部气体温度  $T_g$  及裂纹半径  $c$  在局部时间区间内的曲线。当  $T_s = 794K$  时, 裂纹内部形成独立气体层, 气体温度  $T_g$  迅速上升, 气体压力增大导致裂纹多次扩展。计算过程中, 当形成独立气体层后, 将剪应力置为零, 所以此时裂纹扩展完全是由气体膨胀引起的张开型扩展。计算结果表明: 由于存在气相 - 固相质量和能量交换, 即使气体层的形成使裂纹面不再有效摩擦, 固相温度仍然继续上升, 也就是说在裂纹面局部区域发生了自加速反应, 形成了真正意义上的热点, 从而导致推进剂着火燃烧。

### 3 结论

本文对推进剂裂纹摩擦形成热点的微观过程进行了分析探讨。热点生成和发展过程分为无独立气体层和有独立气体层两个阶段, 热点模型中考虑了剪切型和张开型裂纹扩展、推进剂热分解、热传导、气相 - 固相质量和能量交换、力学 - 化学过程相互耦合等情况。

对压力和剪应力作用下 AP/HTPB 推进剂裂纹摩擦、扩展、热点形成过程进行了分析计算, 得出如下结论: 如果剪应力小, 裂纹不扩展, 裂纹面滑移速度小, 裂纹面温升幅度不大。剪应力增大到一定值使裂纹发生扩展, 裂纹面滑移速度迅速增大, 裂纹面温度很快上升, 在局部形成高温热点, 从而引发推进剂着火燃烧。裂纹摩擦微观模型的建立, 为分析研究机械撞击载荷作用下发动机安全特性提供了必要的基础。

### 参考文献:

[1] Mellor A M, et al. Hot Spot Histories in Energetic Material[J]. Combustion and Flame, 1995, 101: 26 - 35.  
 [2] Field J E. Hot Spot Ignition Mechanisms for Explosives[J]. Acc. Chem. Res., 1992, 25: 489 - 496.  
 [3] Dienes J K, Kershner J D. Multiple-Shock Initiation Via Statistical Crack Mechanics[A]. 11th international Detonation Symposium, 1998.  
 [4] Ward M J, et al. Steady Deflagration of HMX With Simple Kinetics: A Gas Phase Chain Reaction Mode[J]. Combustion and Flame, 1998, 114: 556 - 568.  
 [5] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.

