

固体火箭发动机界面脱粘裂纹分析^①

许萌萌, 胡春波, 何国强
(西北工业大学 航天学院, 西安 710072)

摘要:使用有限元法,在裂纹尖端周围布置有限奇异裂纹单元以模拟裂纹尖端附近的奇异性。针对轴对称发动机头部的界面脱粘裂纹,计算了点火内压作用下,发动机衬层/药柱、壳体/绝热层界面不同深度脱粘裂纹尖端的应力强度因子,指出应力强度因子随裂纹深度的发展规律。结果表明,当裂纹深度较小时,衬层/药柱界面处于闭合状态,应力强度因子几乎不发生变化,随着裂纹深度的增加,裂纹呈张开状态,裂纹尖端的应力强度因子不断增大;壳体/绝热层界面裂纹总是处于张开状态,且应力强度因子随裂纹深度的增加而增大。

关键词:固体火箭发动机;界面;裂纹;有限元;奇异性

中图分类号: V430 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-2793(2008)02-0121-04

Analysis on interfacial debond crack of SRM

XU Mengmeng HU Chunbo HE Guoqiang
(College of Astronautics Northwestem Polytechnical University, Xian 710072, China)

Abstract: By means of finite element method, the finite singular crack elements were arranged around the crack tip to simulate the singularity near crack tip. Aiming at the axisymmetric interface debond crack on the motor head, the stress intensity factors of different depth cracks between liner and grain, case and insulation were calculated under internal ignition pressure. The development law of the stress intensity factors with crack depth was pointed out. The results show that interface crack between liner and grain is in close state and the stress intensity factors hardly change when crack depth is small. With the increase of crack depth, crack starts to open, and the stress intensity factors in the crack tip continuously increase. The interfacial crack between case and insulation is always in open state, moreover the stress intensity factors increase with the crack depth.

Key words: solid rocket motor; interface; crack; finite element; singularity

1 引言

固体火箭发动机界面是发动机结构的薄弱环节。在浇注、脱模降温及装配等过程中,均可能引起界面裂纹,尤其在固化降温过程中,由于各种材料的力学性质和热胀系数不同,引起材料的延伸率有差异,可能导致界面产生裂纹。衬层/药柱间裂纹会导致药柱燃烧面积偏离设计燃面,从而影响发动机内弹道曲线,严重的则导致发动机爆炸;壳体/绝热层间如出现裂纹,则压强可能直接作用于壳体,使得壳体局部应力过大,甚至引起壳体结构破坏。

文献[1]探究了固体推进剂裂纹扩展方式及其稳定性。文献[2-3]对推进剂裂纹内的燃烧及裂纹传播和分支作了研究。文献[4]分析了固体发动机包覆层与推进剂界面裂纹的稳定性。本文针对某典型结构发动机(轴对称发动机),应用有限元法开展了发动机界面裂纹的研究,分别在衬层/药柱及壳体/绝热层界面设置了不同深度的裂纹,用有限奇异裂纹单元模拟裂纹尖端的奇异性,分析点火内压作用下界面裂纹发生扩展的可能性。

2 有限奇异裂纹单元

由断裂力学可知,在裂纹尖端,应力应变为无限大,即在裂纹尖端出现奇点。常规的有限单元已经不能满足裂纹计算的需要,通常采用变异的 8 节点奇异裂纹单元来模拟裂纹尖端附近的奇异性。

如图 1 所示,8 节点单元某边上 3 个节点重合,相邻 2 边上的中节点移至该边的 1/4 处,形成三角形奇异单元。证明如下:

① 收稿日期: 2007-01-05;修回日期: 2007-02-05。
作者简介: 许萌萌(1982—),女,硕士,研究领域为航空宇航推进理论与工程。Email: asmildy@126.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

— 121 —

将 8 节点单元利用形状函数进行坐标变换, 其坐标可表示为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}$$

将其映射到正方空间 (ξ, η) , $-1 \leq \xi \leq 1, -1 \leq \eta \leq 1$ 。

对应节点 i 的形状函数为

(1) $N(\xi, \eta) = (1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)(\xi_i \xi + \eta_i \eta - 1) /$

4, i 为角节点;

(2) $N(\xi, \eta) = (1 - \eta_i^2 \xi^2 - \xi_i^2 \eta^2)(1 + \xi_i \xi + \eta_i \eta) /$

2, i 为边中节点。

x, y 方向位移为
$$\begin{cases} u = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) u_i \\ v = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) v_i \end{cases}$$

1-2 边上的形函数:

$$N_1 = \frac{-(1-\xi)\xi}{2}, N_2 = 1 - \xi^2, N_5 = \frac{(1+\xi)\xi}{2}$$

轴向应变为

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial N_1}{\partial x} u_1 + \frac{\partial N_1}{\partial x} u_2 + \frac{\partial N_1}{\partial x} u_5$$

由 $\frac{\partial}{\partial \xi} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi}$ 可得

$$\frac{\partial}{\partial x} = J^{-1} \frac{\partial}{\partial \xi}$$

其中

$$J = \frac{\partial x}{\partial \xi} = -x_1 \frac{(1-2\xi)}{2} - x_5 2\xi + x_2 \frac{(1+2\xi)}{2}$$

代入已知节点坐标得: $J = 1 - 2\xi x_5$, 当 $|x| = 1/2$ 时, 使 $J(\xi = \pm 1) = 0$, 即 J 在 $\xi = \pm 1$ 点可能不可逆, 由此得出应变在该点为无穷 (奇异)。通常用一系列围绕裂纹尖点有限奇异单元来模拟裂纹尖端附近的奇异性, 如图 2 所示。

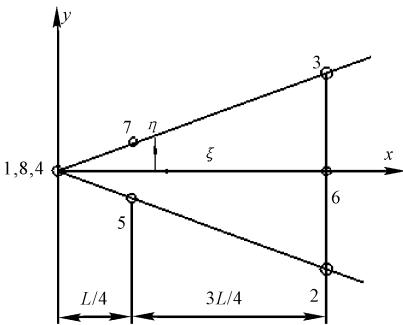


图 1 奇异裂纹单元
Fig 1 Singular crack element

力强度因子 K_I 可按 $K_I = M \sigma \sqrt{\pi a}$ 求得。

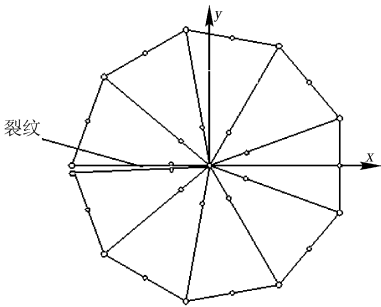


图 2 裂纹尖端附近奇异性模拟
Fig 2 Singularity simulation around crack tip

图 3 中的平板宽为 W , 板长 L 远大于 W 。板中心裂纹长 $2a$ 两端受垂直于裂纹方向的拉应力 σ 作用。由文献 [5] 可知, 对于该平板:

$$M = \frac{K_I}{\sigma \sqrt{\pi a}} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left[1.77 + 0.227 \frac{a}{W} - 0.51 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 2.7 \left(\frac{a}{W} \right)^3 \right] \quad (0.1 \leq a/W \leq 0.4)$$

令 $L/W = 10$, 分别使用边界配置法和有限元法进行计算。根据平板的对称性, 使用有限元法时取其 $1/4$ 为研究对象。图 4 为划分的部分有限元网格, 从图 4 中可清楚看出裂纹尖端处的有限奇异裂纹单元分布。

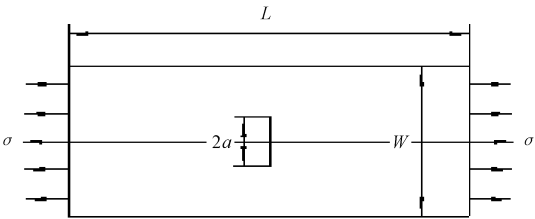


图 3 受拉伸中心裂纹平板
Fig 3 Extended plane with center crack

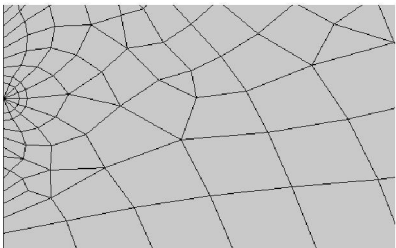


图 4 局部网格
Fig 4 Local mesh

3 发动机界面裂纹研究

3.1 奇异裂纹单元法的验证

对于含裂纹有限宽板, 当受拉伸或者弯曲时, 其应

表 1 为边界配置法与有限单元法所得 $\frac{K_I}{\sigma \sqrt{\pi a}}$ 结果比较。通过比较可知, 有限奇异单元法和边界配置法计算结果误差均在 1% 以内, 说明有限奇异裂纹单元

可用来模拟裂纹,并得到精度很高的结果。

表 1 边界配置法与有限单元法的比较
Table 1 Comparison of boundary collocation and finite element methods

a/W	$K_{\text{I}}/(\sigma\sqrt{\pi a})$		
	边界配置法	奇异裂纹单元法	相对误差/%
0.1	1.010	1.006	0.40
0.15	1.016	1.014	0.25
0.2	1.025	1.025	0.01
0.25	1.036	1.040	0.34
0.3	1.052	1.058	0.54
0.35	1.073	1.081	0.70
0.4	1.101	1.110	0.79

3.2 轴对称模型分析

计算取壳体泊松比为 0.3,弹性模量为 2×10^5 MPa;绝热层、衬层、药柱是性质相近的粘弹性材料,其泊松比均取 0.495,则松弛模量分别为

$$E_{\text{绝}}(t) = 14.11772 + 3.68169e^{-0.000031887t} + 5.98714e^{-0.000331887t} + 8.93038e^{-0.00331887t}$$
$$E_{\text{衬}}(t) = 3.0 + 3.68169e^{-0.000031887t} + 5.98714e^{-0.000331887t} + 8.93038e^{-0.00331887t}$$
$$E_{\text{药}}(t) = 7.05886 + 3.68169e^{-0.000031887t} + 5.98714e^{-0.000331887t} + 8.93038e^{-0.00331887t}$$

由于点火时间很短,药柱等材料粘弹性模型与玻璃态弹性模型基本一致,因此可简化为弹性模型来研究。其弹性模量分别等同于各材料的玻璃态模量 $E(0)$ 。

首先对完整结构发动机进行内压作用下应力应变场分析。计算结果表明,发动机头部应力场相对较恶劣。

3.2.1 衬层/药柱脱粘裂纹

在衬层/药柱界面预设不同深度的裂纹,为简便起见,假设裂纹表面与药柱内孔受压均为 8 MPa。根据实际情况考虑到裂纹脱粘面可能闭合,两表面定义为接触表面,摩擦系数为 0.3。计算结果如图 5 所示。

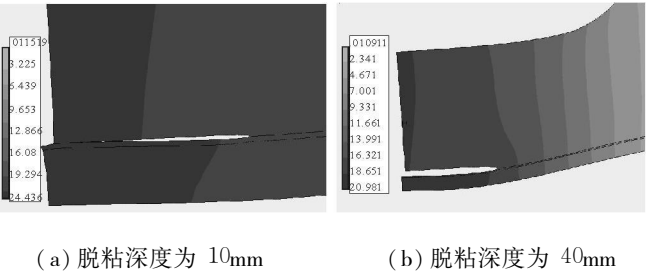


图 5 不同脱粘深度下衬层/药柱状态

Fig 5 State of liner/grain under different debond depth

由图 5 可观察到,当脱粘裂纹深度较小时,脱粘前缘处于闭合状态。这是按照脱粘裂纹内受压来计算的,分析可知,实际情况下脱粘缝内未受压强作用,这时发动机是安全的,可按设计的弹道来工作。若脱粘裂纹深度超过某一临界值时,衬层/药柱脱粘表面会暴露在燃气中,界面发生蹿火,药柱燃面偏离设计燃面,发动机工作可能发生危险。

计算应力强度因子时,裂纹前缘闭合情况下应处理为裂纹表面不受压强作用,结果如图 6(a)所示。可看出,裂纹闭合情况下 I 型 (K_{I}) 和 II 型 (K_{II}) 应力强度因子都很小,且基本不发生变化。若裂纹不能保持闭合状态,则 K_{I} 和 K_{II} 发生较大变化。 K_{I} 随着裂纹深度的增加而增加, K_{II} 则随裂纹深度增加先增加,随后略有下降,接着平缓变化。这时裂纹深度对 K_{II} 影响较小。同时说明,衬层/药柱间的脱粘裂纹扩展方式主要为张开型。

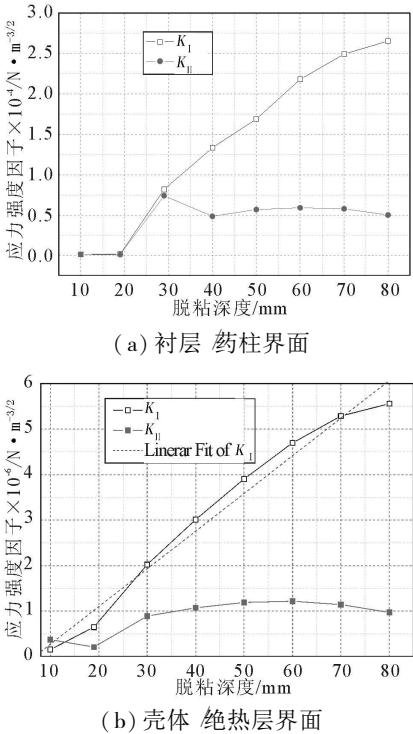


图 6 应力强度因子随脱粘深度的变化

Fig 6 Variation of stress intensity factor with debond depth

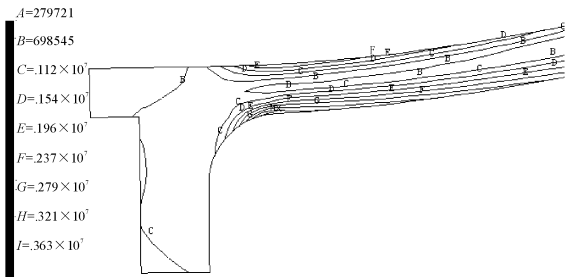
3.2.2 壳体/绝热层脱粘裂纹

同样设壳体/绝热层脱粘裂纹表面压强为 8 MPa,两表面定义为接触表面,摩擦系数为 0.3。通过计算得知,该部位裂纹面始终张开,即若该界面产生裂纹,裂纹面一定会受到压强作用。

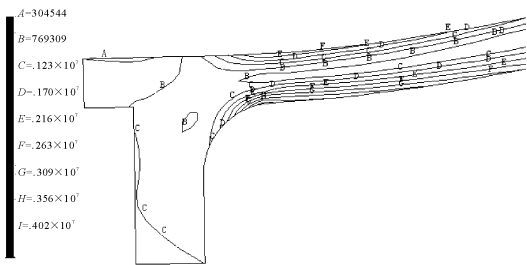
由图 6(b)看到,发动机壳体/绝热层脱粘裂纹尖端的 I 型应力强度因子 (K_{I}) 随裂纹深度增加呈单调递增; II 型应力强度因子 (K_{II}) 随着裂纹深度增加呈先略

有下降随后又增加,然后平缓变化。因此对于壳体 绝热层界面脱粘裂纹,主要是 I型应力强度因子起作用,且裂纹越深, I型裂纹扩展方式的主导性越大。一旦发动机壳体 绝热层脱粘,则高温高压的燃气直接作用在发动机壳体内表面,壳体承受的应力变得很大,且受高温燃气作用而引起烧蚀,极可能造成发动机烧穿爆炸。

图 7(a)是压强作用于药柱,从而在壳体上引起的应力;图 7(b)是压强直接作用在壳体内壁而引起的应力分布。可看出,后者的最大最小 Von m ises应力比前者约大 10%,可见,绝热层 壳体间裂纹对发动机结构安全性影响非常大。



(a) 结构完整的发动机壳体



(b) 压强从脱粘处直接作用于壳体

图 7 不同状态下发动机壳体 Von m ises应力分布

Fig 7 Von m ises stress distribution on SRM case under different condition

裂纹会不会发生扩展需根据实测临界应力强度因子 K_{IC} 及 K_{IK} 确定。若应力强度因子小于临界应力强度因子,则裂纹稳定,不会发生扩展;若应力强度因子大于临界应力强度因子,则裂纹失稳扩展。

4 结论

(1) 2种位置的界面裂纹都主要以张开型方式扩展。对于衬层 药柱界面,在脱粘裂纹闭合时, K_I 和 K_{II} 数量相当,且基本不变。随着裂纹深度的增加,裂纹表面不能保持闭合状态, K_I 和 K_{II} 发生较大变化;对于壳体 绝热层界面裂纹,在压强作用下始终处于张开状态, K_I 是造成裂纹扩展的主要因素;

(2) 壳体 绝热层界面及药柱 衬层界面裂纹应力强度因子在数值上差异很大,前者比后者大 2个数量级,表明壳体 绝热层界面裂纹更易扩展。这主要是由于发动机壳体的弹性模量过大引起的。

参考文献:

[1] Gdoutos E E, Papkaliatakis G. Study of crack growth in solid propellants[R]. 2001 Black Science Ltd , Fatigue Fract Enging Master Struct 24.

[2] Lu Yeu-Cheng, Kuo K K. Modeling and numerical simulation of combustion process inside a solid propellant crack [J]. Propellant Explosives Pyrotechnics 1994(19).

[3] Kuo K K, Moreci J A. Crack propagation and branching in burning solid propellants [C] //Twenty-first Symposium on Combustion 1986.

[4] 蒙上阳. 固体发动机包覆层与推进剂界面脱粘裂纹稳定性分析 [J]. 固体火箭技术, 2004, 28(1).

[5] 沈成康. 断裂力学 (第 1版) [M]. 上海: 同济大学出版社, 1996.

(编辑:何晓兴)