

文章编号 :1001 - 2486(2006)03 - 0019 - 05

长期贮存的固体发动机药柱脱粘界面裂纹分析*

袁端才,雷勇军,唐国金,蒙上阳

(国防科技大学 航天与材料工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要:为了分析长期贮存的固体导弹发动机药柱脱粘层界面裂纹在燃气内压和轴向过载联合作用下的扩展情况,建立了发动机药柱在包覆层与推进剂之间脱粘的三维有限元计算模型,并于脱粘界面的裂纹尖端设置三维奇异裂纹元,模拟脱粘界面裂纹扩展。在包覆层与推进剂之间设置不同深度脱粘,计算了在燃气内压和轴向过载联合作用下不同贮存期、不同深度的界面裂纹尖端的应力强度因子,得到了界面裂纹应力强度因子随贮存时间、脱粘深度的变化规律,对长期贮存的固体发动机脱粘界面裂纹的扩展进行了分析。

关键词:固体导弹发动机;奇异裂纹单元;界面裂纹;应力强度因子;贮存;脱粘

中图分类号:V512 文献标识码:A

Analysis of the Interfacial Crack in Debonded Layer of Long Term Storage Solid Motor Grain

YUAN Duan-cai, LEI Yong-jun, TANG Guo-jin, MENG Shang-yang

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

Abstract: The interfacial debonded cracks are liable to occur in the stress relief boot of solid missile motor. In order to determine the allowable debonded depth in different storage period, a method to analyze the stability of the interfacial crack is presented. Under the circumstance of internal pressure and axial acceleration loading, the three-dimension finite element models of the motor grain with interfacial debonded cracks were established, and several interfacial debonded cracks were preset along the stress relief boot between cladding and propellant. Thus three-dimension singular crack elements at the tips of fore and rear stress relief boot were established to simulate the debond propagation. Along with the interfacial debonded crack propagation, the stress intensity factors of the crack tips in different storage period were respectively calculated to prejudge its stability. The method and conclusions will be helpful in using solid missile motor with interfacial debonded cracks.

Key words: solid missile motor; singular crack element; interface crack; stress-intensity factor; storage; debond

固体导弹发动机历经浇铸、固化降温后脱模、装配运输、贮存和勤务处理,这些环节都可能导致界面脱粘。含脱粘发动机在点火发射期间最易出现事故,主要原因是当发动机点火增压时,燃气可能进入脱粘裂纹腔内,导致侧面推进剂暴露燃烧,从而引起发动机的内弹道性能改变、穿火或轰爆等事故。因此,发动机界面粘接质量是限制发动机寿命的关键因素之一,对界面脱粘力学行为的研究也一直是工程部门关注的课题。文献[1]通过实验研究了绝热层与药柱界面脱粘的扩展规律,文献[2]通过对含有预制包覆层与推进剂界面脱粘的试件进行了燃烧试验,研究脱粘面的扩展因素,并用有限元法进行二维情况的数值模拟。由于进行固体发动机界面脱粘实验不仅耗资耗时,而且参数测量困难,因此,有限元方法以其经济、快捷和精确等优点而日益受到重视。文献[3]用二维有限元法研究了人工脱粘层对包覆层与推进剂界面的应力分布的影响,文献[4]研究了含缺陷药柱对人工脱粘层前沿应力场的影响,尤其是对人工脱粘层附近的推进剂与包覆层界面的影响。文献[5-6]采用奇异裂纹元,讨论了固体发动机药柱表面裂纹、界面裂纹在内压与轴向过载联合作用下裂纹的稳定性。发动机药型结构日趋复杂,特别是发动机药柱前后两端的复杂药型结构,加之脱粘层位于发动机前端和后端,平面应变单元和轴对称单元不

* 收稿日期:2006-01-11
基金项目:国防科技大学预研基金资助项目(JC02-01-004)
作者简介:袁端才(1963-),男,博士生。

足以描述药柱前端和后端的应力应变情况,为了确保有限元数值模拟的准确性,有必要建立发动机的三维有限元模型,于裂纹尖端最好用奇异单元描述脱粘界面裂纹尖端的奇异性,并且考虑长期贮存材料性能的变化对脱粘界面裂纹的影响。

1 奇异裂纹单元

有限元法的收敛性定理指出,只有当增加单元能使近似位移场及其一阶导数场到处任意地接近真实场时才能保证算法收敛,而裂纹尖端附近位移场精确解的一阶导数在裂纹尖端无界,普通常规单元位移模式不能反映裂纹尖端处的奇异性,不满足收敛性条件,即使使用很细的网格也难以达到足够的精度。如果先解析在奇异端点的奇异性,在奇异点周围设置一层奇异单元,其它区域仍用普通单元,计算应力强度因子及应力分布会得到令人满意的结果。Tracey^[7]与 Cook 构建了一种三角奇异单元,该单元的一个节点包含了 $r^{\lambda-1}$ 的奇异性。Benzley 提出于任意双线性位移模式的四边形单元节点“加入”奇异性构成“加料”单元。Biggers、Pageau 和 Joseph^[8-11]从 Benzley 的“加料”单元出发,构建了一种由多个奇异单元绕裂纹尖端一周的复合奇异元,并将该单元成功应用到弹性各向异性材料楔形体、弹性三维裂纹体以及双材料界面裂纹等几何和(或)材料不连续的结构之中。Hughes 和 Akin^[12]将解析的裂纹尖端渐近行为套入内插函数,有效地模拟裂纹尖端应力(应变)的奇异行为。所有这些奇异单元都是进行裂纹分析的强有力工具。

如图 1 所示,由断裂力学分析知^[13],裂纹尖端的应力场与位移场的表达式为

$$\sigma_{ij}^{(N)} = \frac{K_N}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(N)}(\theta) \tag{1a}$$

$$u_i^{(N)} = K_N \sqrt{\frac{r}{\pi}} g_i^{(N)}(\theta) \tag{1b}$$

式中 σ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) 为应力分量, u_i ($i = 1, 2, 3$) 为位移分量, $N = \text{I, II, III}$ 表示裂纹的类型, $f_{ij}(\theta)$ 和 $g_i(\theta)$ 是极角 θ 的函数。

由(1)式可知,应力在裂纹尖端附近具有 $1/\sqrt{r}$ 的奇异行为,位移具有 \sqrt{r} 行为。为了模拟这种裂纹尖端的奇异性,将解析的裂纹尖端渐近行为套入内插函数^[6],使得位移在裂纹尖端附近具有 \sqrt{r} 行为,则应力具有 $1/\sqrt{r}$ 的奇异行为,构成一种奇异单元。

如图 2 所示,于裂纹尖端用 8 个楔形体奇异单元绕一圈构建三维奇异裂纹元,简称为体裂纹元,每个奇异裂纹体单元的奇异边为 1~11 边。

对包含裂纹尖端的单元用奇异裂纹单元模拟,对于不含裂纹尖端的单元则用一般的单元模拟,组合刚度矩阵后,即可求得整个位移场、应力场与应变场,再用奇异裂纹单元的位移量,套用式(1b)即可求得应力强度因子 K_{I} 、 K_{II} 与 K_{III} 。

取围绕裂纹尖端的 8 个奇异单元的应力强度因子的平均值作为裂纹尖端的应力强度因子,即

$$K_N = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 K_{Ni} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \frac{u_i^{*(N)}}{g_i^{(N)}(\theta_i^*)} \sqrt{\frac{\pi}{r_i^*}} \tag{2}$$

其中, $u_i^{*(N)}$ 为第 i 个奇异单元中点的位移, r_i^* 、 θ_i^* 为相应中点的极坐标。

2 长期贮存的固体发动机药柱前后脱粘界面裂纹分析

2.1 发动机药柱含界面裂纹的有限元计算模型

发动机结构在几何上具有对称性,纵向(z 方向)共有 6 个对称剖面,将发动机均分成完全对称的 12

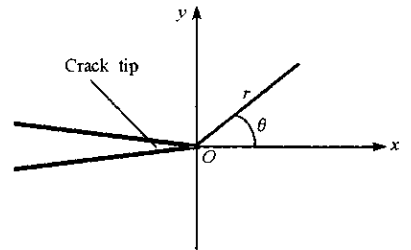


图 1 裂纹截面

Fig.1 Cross-section of the crack

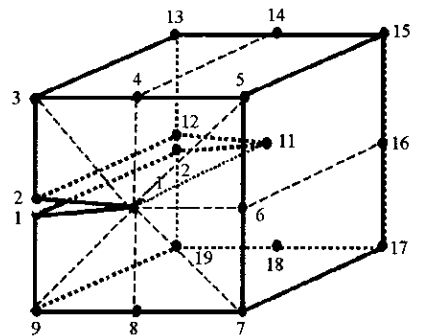


图 2 体奇异裂纹单元

Fig.2 Solid singular crack element

等份,每一份的夹角为 30° ,取其中对称的一份建立三维有限元计算模型,其中单元划分总数为19 800个,节点总数为21 002个。图3所示为发动机的前后两端的三维有限元计算模型示意图,根据脱粘深度的不同,建立多个计算模型,发动机前端设置脱粘深度 $20 \sim 256\text{mm}$,发动机后端设置脱粘深度 $20 \sim 230\text{mm}$ 。

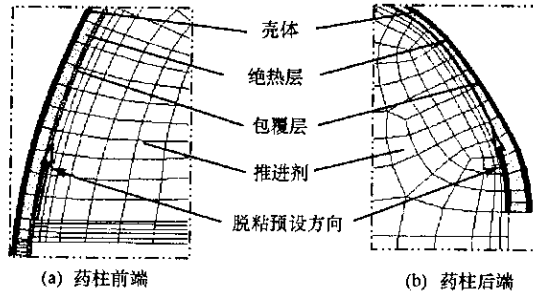


图3 局部有限元模型和预设脱粘扩展方向示意图

Fig.3 The regional finite element model of the solid motor grain and presetting the debonded propagation direction

包覆层材料与推进剂贮箱的材料都是采用丁羟作为粘合剂,其力学行为近似相同,因此将包覆层与推进剂视为同一种材料,不同贮存时期的松弛模量由老化实验得到。壳体与绝热层的弹性模量与泊松比分别为 $2.06 \times 10^4 \text{MPa}$ 、0.3和 30.0MPa 、0.490。

发动机点火建压时间为 200ms ,线性增压至最大内压 12MPa ,轴向加速度为 $12g$ 。

2.2 发动机药柱前包覆层与推进剂脱粘界面裂纹应力强度因子随脱粘深度、贮存时间的变化规律

对发动机进行三维裂纹分析,计算发动机点火增压和轴向过载联合下,室温贮存时,不同贮存期前包覆层与推进剂不同深度脱粘界面裂纹尖端的应力强度因子,得到应力强度因子随贮存时间、脱粘深度的变化规律。

根据工程实际,考虑发动机的实际结构,于裂纹尖端构建奇异三维裂纹单元,模拟裂纹扩展,并计算相应裂纹长度的应力强度因子。由于研究的载荷是燃气内压和轴向过载,发动机点火建压的时间为几百毫秒,材料的粘弹性特性在这么短的时间内表现不明显,因而对计算结果影响不大,计算表明误差仅在 5% 以内,为简化计算,应用线弹性有限元模型。计算时假设发动机燃烧室及裂纹腔内压力均匀且为峰值,并且假设内孔边界不变,即不考虑烧蚀的影响。

计算结果表明,前脱粘裂纹第一类应力强度因子始终为零,说明脱粘裂纹不会以张开方式扩展。

前脱粘裂纹的第二类应力强度因子如图4所示。脱粘深度在 170.0mm 以前,其第二类应力强度因子为零,说明即使存在长达 170.0mm 的深脱粘,裂纹也不会扩展,脱粘层深度在 $180.0 \sim 230.0\text{mm}$,正好是发动机前翼槽的圆弧形过渡区域,为应力应变集中区,其第二类应力强度因子迅速增加,表明脱粘深度在此范围内时裂纹有可能扩展,然而当脱粘深度超过 230.0mm 后,界面脱粘裂纹的第二类应力强度因子急剧减少到零(当脱粘深度为 250.0mm 时),表明扩展的裂纹会自动止裂。

随着贮存时间的延长,界面脱粘裂纹的第二类应力强度因子略有下降。

讨论第三类应力强度因子,探讨发动机药柱前包覆层与推进剂界面脱粘裂纹以撕开方式扩展的趋势。图5为第三类应力强度因子随脱粘深度、贮存时间变化的曲面,由图可知,脱粘裂纹的深度小于 80mm 前,第三类应力强度因子急剧下降,而后趋于平缓。

常温贮存时,第三类应力强度因子随着贮存时间的延长呈明显的增加趋势。

2.3 发动机药柱后包覆层与推进剂脱粘界面裂纹应力强度因子随脱粘深度、贮存时间的变化规律

在点火发射时,后端药柱与包覆层存在脱粘时,由于在垂直于脱粘层的方向上受压力的作用,加上轴向过载使得药柱下沉,脱粘层呈闭合状态,所以第一类应力强度因子始终为负值,因此该脱粘层不会以张开方式扩展。

讨论第二类应力强度因子,发动机药柱后包覆层与推进剂界面脱粘裂纹以滑开方式扩展的情况。由图6可知,脱粘一开始,第二类应力强度因子的值很高,但随脱粘深度增加迅速降低。这是由于发动

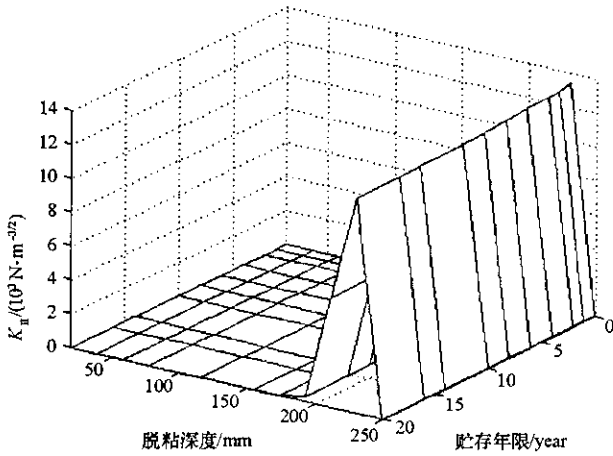


图4 前包覆层与药柱脱粘第二类应力强度因子随脱粘深度、贮存年限的变化曲面

Fig.4 The second stress intensity factor variation with debonded depth and storage period

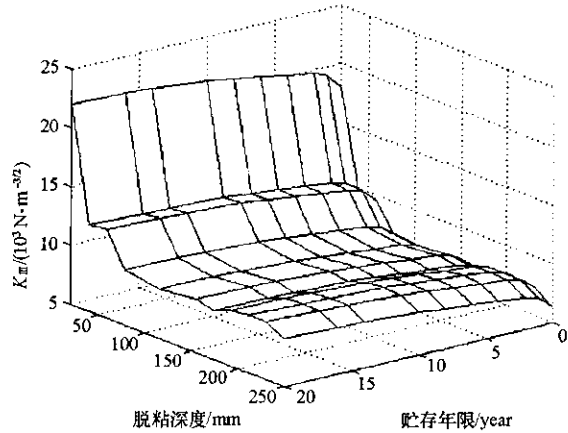


图5 前包覆层与药柱脱粘的第三类应力强度因子随脱粘深度、贮存年限的变化曲面

Fig.5 The third stress intensity factor variation with debonded depth and storage period

机的结构造成的,由于脱粘层起始位置位于壳体外,即与包覆层粘接的绝热层是自由的,并且形成一凸台,脱粘恰位于其根部,从而在内压的作用下产生较大的剪应力导致了这段脱粘层应力强度因子也很大。

讨论第三类应力强度因子,探讨发动机药柱后包覆层与推进剂界面脱粘裂纹以撕开方式扩展的趋势。图7为第三类应力强度因子随脱粘深度、贮存时间变化的曲面,由图可知,第三类应力强度因子先急剧下降,而后趋于平缓。

20℃常温贮存时,随着贮存时间的延长,界面脱粘裂纹的第三类应力强度因子随着贮存时间的增加而增加。

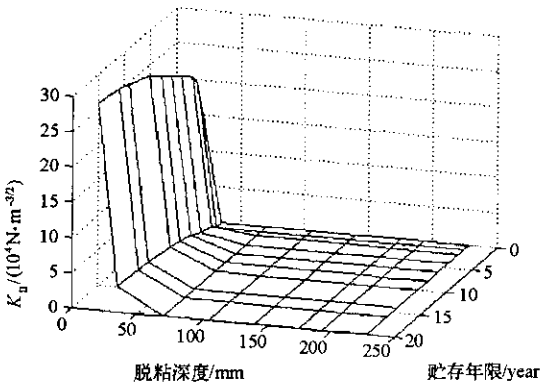


图6 后包覆层与药柱脱粘的第二类应力强度因子随脱粘深度、贮存年限的变化曲面

Fig.6 The second stress intensity factor variation with debonded depth and storage period

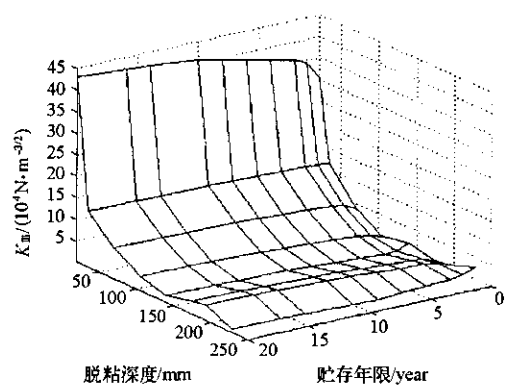


图7 后包覆层与药柱脱粘的第三类应力强度因子随脱粘深度、贮存年限的变化曲面

Fig.7 The third stress intensity factor variation with debonded depth and storage period

2.4 发动机药柱脱粘界面裂纹扩展分析

通过以上计算,得到了发动机药柱前、后端包覆层与推进剂脱粘界面裂纹的应力强度因子随贮存时间、脱粘深度的变化规律,材料的界面断裂韧性 K_{IIc} 和 K_{IIIc} 可由实验得到。于是,用断裂准则 $K_{II} \leq K_{IIc}$ 和 $K_{III} \leq K_{IIIc}$ 可以判断裂纹是否扩展。当 $\partial K_i / \partial x > 0$ ($i = II, III$) 时,裂纹将失稳扩展; $\partial K_i / \partial x = 0$ 时,则裂纹以常速扩展; $\partial K_i / \partial x < 0$ 时,裂纹将止裂。由应力强度因子随脱粘深度、贮存时间变化的曲面图,可以得到发动机药柱贮存时间多长、界面裂纹多深时裂纹尖端的应力强度因子大小。通过现有无损检测技术,得到发动机的伤情程度,即发动机药柱不同贮存期界面脱粘裂纹的深度,由药柱界面断裂韧性可以确定发动机的失效与否。

如 20℃ 常温贮存的固体发动机,贮存 10 年后常温点火发射时,由图 5 可知,若发动机药柱前端包覆层与推进剂界面撕开断裂韧性 $K_{IIIc} > 21\ 400\text{Nm}^{-3/2}$,粘结界面之间即使存在裂纹,裂纹也不会以撕开方式扩展;当界面的撕开断裂韧性 K_{IIIc} 的值在 $8600 \sim 21\ 400\text{Nm}^{-3/2}$ 时,其第三类应力强度因子随着界面脱粘裂纹的增长呈减小的趋势,表明裂纹的扩展会自动止裂;贮存 10 年后的发动机药柱前端包覆层与推进剂界面的撕开断裂韧性 K_{IIIc} 应当大于 $8600\text{Nm}^{-3/2}$,若界面的撕开断裂韧性 K_{IIIc} 低于 $5500\text{Nm}^{-3/2}$,界面一经脱粘,裂纹就会以撕开方式失稳扩展。

如 20℃ 常温贮存的固体发动机,贮存 10 年后常温点火发射时,由图 7 可知,若发动机药柱后端包覆层与推进剂界面撕开断裂韧性 $K_{IIIc} > 40\ 700\text{Nm}^{-3/2}$,后端包覆层与推进剂之间即使存在裂纹,其脱粘裂纹也不会以撕开方式扩展;若界面的撕开断裂韧性 K_{IIIc} 的值在 $3100 \sim 40\ 700\text{Nm}^{-3/2}$ 时,界面脱粘裂纹的扩展将会自动止裂;若后端的界面撕开断裂韧性 K_{IIIc} 低于 $3100\text{Nm}^{-3/2}$,界面一经脱粘,裂纹就会以撕开方式失稳扩展。

总之,20℃ 常温贮存一定时期的发动机药柱点火发射时,从滑开方式扩展来看,前端包覆层与推进剂界面脱粘裂纹的危险性较后端大;就撕开方式扩展来看,发动机前端包覆层与推进剂的界面脱粘要比后端的严重得多。因此,发动机药柱前、后包覆层与推进剂界面脱粘裂纹在点火发射时,前端界面脱粘最为危险,工程应重点加强发动机药柱前端各粘接界面的检测,确保发动机的正常发射。

3 结束语

在燃气内压与轴向过载的作用下,分别计算了不同贮存期发动机药柱前端和后端包覆层与推进剂脱粘时界面裂纹的各类应力强度因子,得到了应力强度因子随脱粘深度、贮存时间变化的规律。结果表明,在两种脱粘情况下,尽管燃气内压窜入脱粘层内,但是脱粘层不会以张开方式扩展,这与药柱处于三向受压状态是吻合的。

发动机前后脱粘层的第二类应力强度因子有很大区别。由于药型结构的原因,发动机前端脱粘深度在 $170 \sim 250\text{mm}$ 时,存在第二类应力强度因子。而发动机后端人工脱粘层界面裂纹尖端的应力强度因子随着脱粘深度的增加下降很快,脱粘深度约为 50mm 时下降到零。发动机前后脱粘层以滑开方式扩展的裂纹均会自动止裂。

20℃ 常温贮存时,发动机药柱的前后界面脱粘时裂尖的第三类应力强度因子的变化趋势大致相同,都是开始呈下降趋势,然后维持一定的水平。并且,随着贮存时间的延长,第三类应力强度因子呈明显增加的趋势,这与长期贮存的固体发动机药柱容易产生脱粘的事实相吻合。

参考文献:

- [1] 何国强,肖育民,陈宏,等.装药燃烧增压过程中脱粘扩展条件实验分析[J].固体火箭技术,1998,21(1):16-19.
- [2] 邢耀国,王立波,董可海,等.燃烧条件下影响推进剂脱粘面扩展的因素[J].推进技术,2001,22(1):77-80.
- [3] 史宏斌,朱祖念,张善祁.多种材料人工脱粘应力场分析[J].固体火箭技术,1995,18(1):24-29.
- [4] 史宏斌,侯晓,朱祖念,等.含缺陷药柱人工脱粘层前缘应力分析[J].固体火箭技术,1999,22(3):46-49.
- [5] 蒙上阳,唐国金,雷勇军.固体发动机药柱的裂纹稳定性分析[J].推进技术,2002,23(4):335-338.
- [6] 蒙上阳,唐国金,雷勇军.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,2004,27(1):46-49.
- [7] Tracey D M, Cook T S. Analysis of Power Type Singularities Using Finite Elements[J]. Int. J. Number Methods, 1977, 11:1225-1233.
- [8] Pageau S S, Joseph P F, Biggers JR S B. A Finite Element Analysis of the Singular Stress Fields in Anisotropic Materials Loaded in Antiplane Shear[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1995, 38:81-97.
- [9] Pageau S S, Joseph S P, Biggers JR S B. Finite Element Evaluation of Free-edge Singular Stress Fields in Anisotropic Materials[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1995, 38:2225-2239.
- [10] Pageau S S, Biggers JR S B. Enriched Finite Elements for Regions with Multiple, Interacting Singular Fields[J]. AIAA Journal, 1996, 34(9):1927-1933.
- [11] Pageau S S, Biggers Jr S B. Enrichment of Finite Elements with Numerical Solutions for Singular Stress Fields[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1997, 40:2693-2713.
- [12] Hughes T J R, Akin J E. Techniques for Developing Special Finite Shape Function with Particular Reference to Singularities[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1980, 15:733-751.
- [13] 沈成康.断裂力学[M].上海:同济大学出版社,1996.

