

文章编号: 1000-8055(2008)04-0737-05

三维裂纹整体参数化模化方法

唐俊星, 陆 山

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 发展一种独立于几何结构基于参数设计的三维平片裂纹扩展有限元模拟通用方法. 该方法通过包含整个裂纹面的镶嵌裂纹模型, 具有裂纹体自动形成, 模拟裂纹多自由度扩展的能力. 通过多个典型的工程裂纹扩展模拟算例, 说明该方法的精度、效率与通用性.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 三维裂纹扩展; 应力强度因子; 有限元; 风扇盘; 粉末高温合金

中图分类号: V231.9; O346.1

文献标识码: A

A integral parameter-based modeling method for 3D crack

TANG Jun-xing, LU Shan

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A parameter-based and geometry independent general method was developed for the simulation of 3D planar crack propagation by using finite element method (FEM). This method, on the basis of introducing a crack model containing whole crack surfaces, has a capability of creating cracked block automatically and simulating crack propagation in a multiple degree way. The accuracy, efficiency and versatility of the method were demonstrated by comparison with other analytical or experimental results available in the literature.

Key words: aerospace propulsion system; 3-D crack propagation, stress intensity factor, finite element, fan disk, superalloy powder

在受循环载荷作用下, 工程零部件常常萌生表面裂纹或角隅裂纹. 根据工程使用经验, 相当多构件出现裂纹并不意味着承载功能立即丧失, 甚至仍可可靠服役较长时间. 但普遍面临的问题是难以定量评估出结构的危险程度, 往往凭着经验做出较为保守的估计. 发展三维裂纹疲劳扩展模拟技术, 通过数值模拟方法获知构件的裂纹扩展行为, 不仅可充分挖掘零部件的可靠使用寿命, 提高零部件的经济性, 同时还可对重要零部件安全性评估与检修周期的确定提供技术支持.

应用有限元法研究三维裂纹扩展问题已有不少研究^[1-5], 一般常遇到两个较为突出的问题: 一是精度问题, 二是效率问题. 精度问题又包含两个

方面, 一是裂纹参量的计算精度, 二是裂纹形状模拟精度, 而这两个方面又是相互影响的. 文献[1-2]在计算裂纹强度因子方面与裂纹扩展模拟精度方面具有特色, 但其介绍的裂纹模型只适用于裂纹面处于结构对称面, 在通用性方面显得不足. 在裂纹形状模拟方面, 以假设裂纹呈椭圆状扩展为前提, 研究裂纹沿椭圆长短轴两个自由度方向扩展方法较为常见^[3], 而对精度更高的任意形状多自由度裂纹扩展模拟报道较少^[1]. 效率问题则关系到工程实用性, 是有限元裂纹扩展模拟技术关键性问题之一. 有限元法模拟裂纹扩展包含含裂结构有限元建模、位移/应力场求解、裂纹参量求解, 形成新的裂纹前沿等众多步骤. 在这些步骤

收稿日期: 2007-04-09; 修订日期: 2007-06-19

作者简介: 唐俊星(1977), 男, 江西丰城人, 博士生, 主要从事航空发动机寿命可靠性研究

陆山, 教授, 通信地址: 西安西北工业大学 184 信箱, 710072, Tel: (029) 88493164

中,含裂结构有限元建模包含最核心最复杂的操作,往往需要较多人工干预.在裂纹扩展模拟分析中由于涉及多次网格重构,显然,人工干预效率低且易出错,工程应用难以接受.

类似面向对象程序设计中的封装技术,基于参数化含裂纹结构有限元建模可将一系列复杂的图形界面操作封装在程序内部进行,能够避免大量重复性的人工干预,进而建模效率可提高数个量级.因此发展高效、通用的含裂纹结构建模方法是采用有限元法模拟裂纹扩展的普遍趋势.参数化含裂纹结构建模思想虽未明确提出,但文献[5]基于 ABAQUS 对常见的工程裂纹应力强度因子的计算就是该思想的初步体现.本文进一步扩展该思想,借助 ANSYS 平台 APDL 强大的编程功能,不仅将含裂纹结构建模参数化实现,还将裂纹扩展分析的其他过程参数化,模块化.更进一步,参数设计独立于几何实体,使得裂纹扩展分析技术不依赖于结构的形状.也就是说,无论是平板型表面裂纹或角裂纹,还是其他复杂结构如缺口或弧型表面裂纹、角裂纹,也不论裂纹是否处于结构对称面,只要局部有相同的几何拓扑关系,其建模过程均可由同一套参数描述.从一类结构到另一类结构,只需修改少量几何参数,非常方便工程应用,这也是本文工作与其他研究工作的主要区别之一.

1 含裂结构参数化建模与裂纹扩展模拟方法

1.1 含裂结构几何构造

裂纹问题是非连续性问题,模拟裂纹扩展时,不仅需要表达上下裂纹面的非连续性,还需要描述裂纹前沿不断变化的形状.对于这两个方面问题,一种解决思路是基于有限元网格的变动,即在裂纹扩展过程中,维持结构的几何体划分不变,而

在单元或节点层次上表达结构的非连续性以及描述不断变化的裂纹前缘^[2].例如,当移动裂纹前缘节点位置,而节点与单元间的拓扑关系保持不变,就可实现改变裂纹前缘的形状.这种方法的优点是显而易见的,即只变动局部单元网格.结构大部分区域的单元网格可维持不动,减少了工作量.其不足之处是需要额外对网格进行特别控制,这对一般通用软件的计算模拟是不方便的.

本文提出模拟三维裂纹扩展的另外一种思路:在实体模型层次上表达结构的非连续性,而裂纹扩展则通过不断变换实体的形状来实现.针对一般含裂结构并不关于裂纹面对称,为实现建立独立于特定形状结构的三维裂纹,本文构造含上下裂纹面的镶嵌裂纹模型,这种模型可以适应一般结构的裂纹建模.图 1 为含裂体结构几何构造过程示意图.整个含裂纹结构(裂纹体与无裂体的组合在本文称为含裂结构)分为无裂体及裂纹体,裂纹体由上下对称的 6 个子块组成,裂纹面处于 3~6 号 4 个子块的对称面之间,如图 2 阴影所示.整个剖分思想可简单表述为:裂纹面包含于裂纹体中,裂纹体又镶嵌于无裂体中.该镶嵌模型几何形状独立性还表现在被镶嵌体自由表面不局限于平面,与表面无关性的建模特点增强了程序的通用性,使得对工程中各类常见的缺口或孔边裂纹建模同样方便.

创建该裂纹模型的一个重要环节是由控制裂纹形状的点列与完整结构共同形成无裂纹体与裂纹体的过程,其中涉及较多的图形操作,现将其主要操作流程列出如下:

- (a) 读入裂纹前沿控制点列坐标;
- (b) 由点列 B 样条拟合生成裂纹前沿曲线;再以该线为中心,创建 8 条在裂纹面法向与扩展方向的等间距线,如图 3(a) 所示;

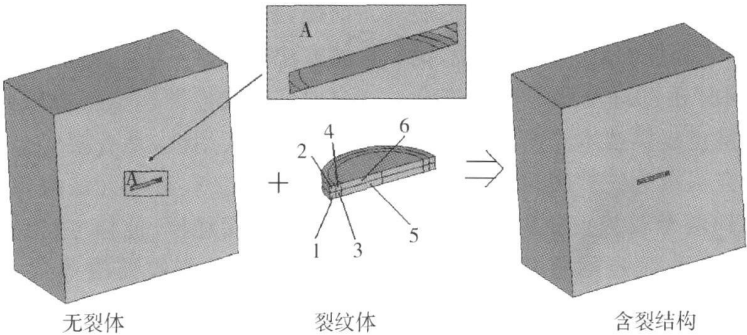


图 1 含裂结构几何体划分

Fig. 1 Geometric subdivision of cracked structure

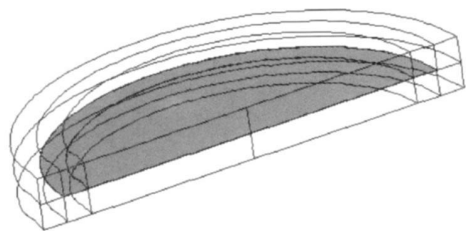


图 2 裂纹体包含的裂纹面

Fig.2 Embodied crack surfaces of cracked block

(c) 由裂纹前沿曲线与 8 条周围线为框架, 形成裂纹前沿附近 6 个比较规则的小子块, 如图 3(b) 子块 1~ 6 所示;

(d) 布尔运算生成无裂体、裂纹体, 并在裂纹体中形成裂纹面. 如图 3(c), 3(d) 所示.

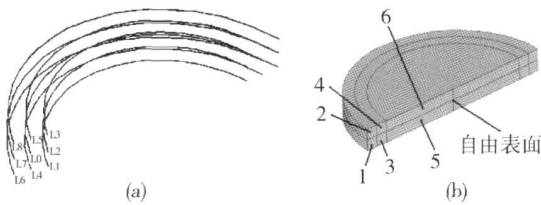


图 3 裂纹体与无裂体形成过程

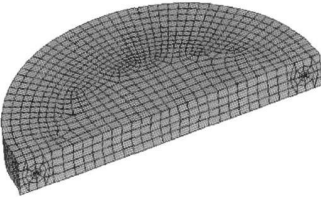
Fig.3 Establishment of cracked block and uncracked block

以上整个操作过程步骤较多, 但均可在 AN-SYS 平台中由程序自动完成, 耗时与有限元计算相比微不足道. 这种实体建模方式由于是由底向上的建模, 因此可使实体建模参数化、规范化. 控制裂纹前沿形状的点列坐标按参数形式传递给程序, 程序能自动生成裂纹体、无裂体. 实体参数化建模是裂纹扩展模拟过程可参数化实现的前提. 例如, 当不断按新裂纹形状更新点列坐标时, 则所创建的实体可描述不断变化的裂纹形状, 也即模拟裂纹不断扩展的过程.

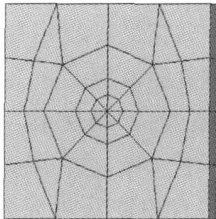
1.2 裂纹前沿网格划分

本文创建的镶嵌裂纹模型可在裂纹前缘附近形成较规则的几何体, 容易保证裂纹前缘附近具有良好的网格质量. 裂纹前缘各子块的特征尺寸与裂纹长度相关, 综合考虑计算效率与裂纹尖端单元形状比, 沿裂纹前缘一般可划分 50~ 100 个单元. 图 4 为裂纹体的典型网格划分, 其中 4(a) 是裂纹体整体划分. 图 4(b) 是裂纹前缘区域典型截面网格划分, 围绕

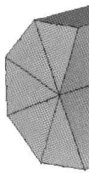
裂尖沿周向分为 8 个单元, 径向安排 3 层(层数可控) 单元, 层与层之间单元尺寸比可控. 为模拟裂纹尖端应力奇异性, 最靠近裂纹前缘的单元边中节点移至单元边长的 1/4 边长处, 如图 4(c) 所示.



(a) 裂纹体网格划分



(b) 裂纹前缘区域
典型截面网格划分



(c) 裂纹尖端单元
1/4 边中节点

图 4 裂纹体网格

Fig.4 Mesh of cracked block

1.3 裂纹应力强度因子的计算

求解应力强度因子的方法有位移法、J 积分法、应力法、节点力法等, 现有文献已有相当丰富的介绍^[5-7], 本文不再赘述. 本文采用公认简单又具有较好精度的位移法求解裂纹应力强度因子.

图 5 为受均匀拉伸有限厚板表面椭圆裂纹应力强度因子随角度变化计算结果. 椭圆短长轴比 $a/c=0.5$, 短轴与板厚比 $a/t=0.2$. 从图 5 中可以看出, 除在裂纹表面附近区域外, 本文结果基本介于 Newman-Raju^[8] 与林晓斌, Smith R A^[9] 结果之间, 相对差别一般均在 3% 以内, 说明本文的裂纹模型及网格具有良好的计算精度.

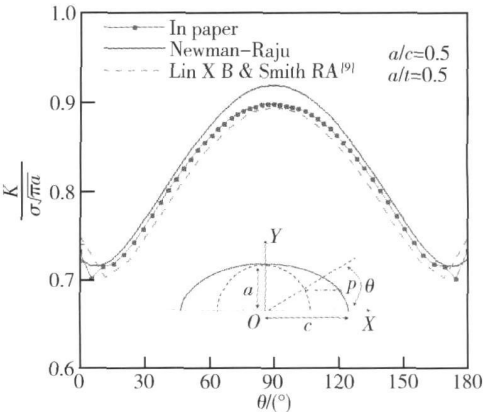


图 5 受拉伸有限宽板表面半椭圆裂纹应力强度因子
Fig.5 SIFs of semi elliptic surface crack in
finite thickness plate subjected to tension

1.4 三维裂纹扩展模拟

本文采用多自由度方法模拟三维裂纹扩展^[1]. 裂纹前缘以参数形式的离散点列描述, 不同的裂纹前缘对于点列而言只是 X, Y, Z 坐标不同, 新的裂纹前缘的建立只需对离散点列赋以新的裂纹前缘位置, 因而裂纹扩展的数值模拟变得较为简单.

裂纹扩展准则采用工程分析中普遍认为简单实用的 Paris 公式

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

该公式中与材料相关的参数 C, m 一般由某一特定尺寸的 CT 试验获得. 严格说来, 三维裂纹前缘各点的应力状态均不一样, 也与特定尺度的 CT 试件不一样. 采用多自由度法可充分考虑当前裂纹前缘应力状态因素, 发展更为精确的三维裂纹扩展规律模型. 但由于该方面的试验数据较少, 本文仍假设裂纹前缘扩展遵循(1)式.

本文已将含裂结构几何体生成、含裂有限元网格划分、加载求解运算、应力强度因子计算及重新生成新的裂纹前缘等步骤模块化、参数化. 用户只需提供几何实体模型及初始裂纹位置、方位、形状、大小及修改材料载荷等信息, 应用本文的程序模块就可自动完成裂纹扩展分析的整个过程.

2 方法验证及应用实例

2.1 平板表面裂纹扩展

构件的三维裂纹扩展试验轨迹测量困难, 三维裂纹扩展轨迹试验数据很少见. 本例是少数能够查到具有裂纹扩展试验数据的例子, 希望借此能对本文方法进行验证. 平板表面裂纹在均匀拉伸作用下裂纹前缘轮廓线模拟见图 6. 初始裂纹假设为椭圆形, 初始短长轴比 $a_0/c_0 = 0.5$, 短轴与板厚比 $a_0/t = 0.2$, Paris 公式中扩展指数 3 (除特别说明外, 下同). 裂纹扩展形状与文献[1]结果基本一致: 受拉伸载荷时裂纹形状基本呈椭圆形. 不同初始形状裂纹扩展变化计算结果见图 7. 本文预测结果与 Newman & Raju^[10] 结果较接近; 对于 $a_0/c_0 = 0.2, 0.4, 0.8$ 本文预测结果与试验结果^[11] 也吻合良好; 对于 $a_0/c_0 = 0.6, 1.0$ 预测结果与试验结果开始存在较大误差, 随着裂纹的扩展, 预测结果与试验结果最终趋于一致. 造成初始误差较大的可能原因有二: 一是疲劳裂纹扩展固有的分散性; 二是预制的裂纹尖端可能存在钝化, 与

理想裂纹尖端曲率半径为 0 不符

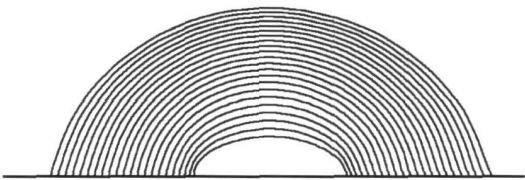


图 6 受均匀拉伸平板表面裂纹扩展形状
Fig. 6 Crack shape development of a surface crack in finite thickness plate subjected to tension

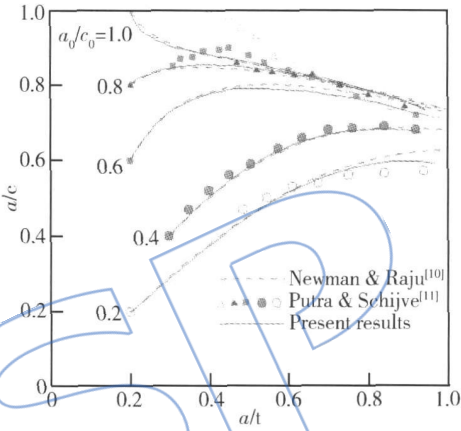


图 7 裂纹扩展特征尺寸比值($m=2.88$)
Fig. 7 Crack propagation characteristic aspect ratio($m=2.88$)

2.2 风扇盘榫槽角裂纹扩展

上例裂纹面处于结构对称面内, 建模相对较容易, 尚不能体现本文方法的优势. 本节算例裂纹面附近结构无对称性, 用以考核本文方法对非对称裂纹结构的适应能力. 风扇盘榫槽部位在离心力与叶片拉力作用下常常会萌生表面裂纹或角裂纹, 图 8 为榫槽排气端部角裂纹的扩展模拟情况, 计算结果表明, 对于该风扇盘, 裂纹沿槽向有较快的扩展速度.

2.3 半无限体亚表面内埋夹杂扩展

以上 2 例均为表面裂纹问题. 当裂纹处于物体亚表面时, 其裂纹扩展过程由于受物体边界干涉影响, 使数值模拟遇到新的困难. 本例给出一个亚表面裂纹扩展演变为表面裂纹的过程, 以说明采用本文方法模拟此类问题的能力. 粉末高温合金具有优良特性, 被认为是航空发动机盘首选材料. 由于制备过程中不可避免存在夹杂或空洞, 特别是亚表面夹杂的存在, 会严重影响轮盘的疲劳特性. 受均匀拉伸或弯曲载荷半无限体, 具有初始半径 a_0 的亚表面圆形夹杂缺陷, 缺陷由内埋扩展

至表面的数值模拟结果见图 9. 其中 d_0 为缺陷中心距表面初始距离.

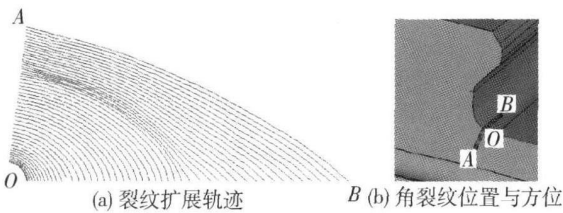


图 8 风扇盘榫槽端部角裂纹扩展
Fig. 8 Crack shape development of a corner crack on a fan disk

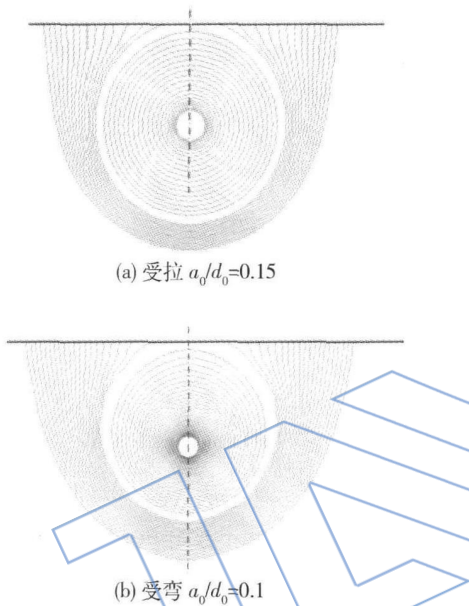


图 9 受拉伸或弯曲载荷作用半无限体内埋圆形夹杂缺陷扩展轨迹
Fig. 9 The crack shape development from an internal circular crack to a surface crack in a half-infinite body subjected to tension or bending

3 结 论

本文基于参数化设计思想发展了一种模拟结构三维疲劳裂纹扩展的通用技术. 该技术具有高度自动化、较强的裂纹形状跟踪能力与适应能力, 并具有良好的几何独立性. 通过应用实例比较, 不论是应力强度因子的计算结果还是裂纹扩展形状的模拟结果与相关文献结果吻合良好. 参数化设计特点使得含裂结构有限元建模及裂纹扩展模拟

效率得到提高. 通过不同的实例还说明该技术具有良好的通用性. 可以相信, 该技术能为结构损伤容限设计、剩余寿命评估以及疲劳裂纹扩展寿命预测提供一种有效的计算工具.

参考文献:

[1] Lin X B, Smith R A. Finite element modeling of fatigue crack growth of surface cracked plates Part II: Crack shape change[J]. Engng. Fracture Mech., 1999, 63: 523-540.

[2] Lin X B, Smith R A. Finite element modeling of fatigue crack growth of surface cracked plates Part I: The numerical technique[J]. Engng. Fracture Mech., 1999, 63: 503-522.

[3] 王永伟. 结构疲劳裂纹扩展的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.

WANG Yongwei. The numerical simulation of fatigue crack growth of structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.

[4] Tinga T. Stress intensity factors and crack propagation in a single crystal nickel based superalloy[J]. Engng. Fracture Mech, 2006, 73: 1679-1692.

[5] 林晓斌. 应用三维有限单元法计算应力强度因子[J]. 中国机械工程学报, 1998, 9(11): 39-43.

LIN Xiaobin. Calculation of stress intensity factors using the 3D finite element method[J]. China Mechanical Engineering, 1998, 9(11): 39-43.

[6] Sanford R J. Principles of fracture mechanics[M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2003.

[7] 崔振源. 表面裂纹理论及其应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1982.

[8] Newman Jr J C, Raju I S. An empirical stress intensity factor equation for the surface crack[J]. Engng. Fracture Mech., 1981, 15: 185-192.

[9] Lin X B, Smith R A. Finite element modeling of fatigue crack growth of surface cracked plates Part III: Stress intensity factor and fatigue crack growth life[J]. Engng. Fracture Mech., 1999, 63: 541-556.

[10] Hosseini A, Mahmoud M A. Evaluation of stress intensity factor and fatigue growth of surface cracks in tension plates[J]. Engng. Fracture Mech., 1985, 22: 957-974.

[11] Putra I S, Schijve J. Crack opening stress measurements of surface cracks in 7075-T6 aluminum alloy plate specimen through electron fractography[J]. Fatigue Fract Engng Mater Struct, 1992, 15: 323-338.