



杨兴林

基于 FRANC3D 环境的高强度螺栓 应力腐蚀断裂仿真研究

杨兴林^{1,2,3}, 林 轻³, 陈宇光²

(¹ 江苏科技大学 机械工程学院, 镇江 2120031; ² 中国船舶重工集团 第七一三研究所, 郑州, 450015;

³ 南京航空航天大学 能源与动力工程学院, 南京 210016)

摘 要:为研究某产品轴承基座高强度连接螺栓使用中发生的延迟断裂失效问题, 笔者应用三维裂纹扩展软件 FRANC3D 对该型螺栓断裂过程进行计算仿真, 通过对材料参数的设定体现环境对整个断裂过程的影响, 从而达到探索性地对应力腐蚀断裂仿真进行研究的目的。将裂纹扩展后的仿真结果与螺栓实际宏观断口相比较, 仿真结果基本符合螺栓实际断裂情况。

关 键 词:高强度螺栓; 应力腐蚀; 计算仿真; FRANC3D

中图分类号:TH131.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-8728(2010)09-1217-05

Simulation of High Strength Bolt's Stress Corrosion Cracking Based on FRANC3D

Yang Xinglin^{1,2,3}, Lin Qing³, Chen Yuguang²

(¹ School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003;

² The 713th Research Institute of CSIC, Zhengzhou 450015;

³ College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract: Due to the problem of delay rupture of the bolts from the bearing base in a cover system, we use FRANC3D (Fracture Analysis Code in 3Dimensions) to calculate and simulate the process of the bolt's fracture. It represents the influence of environment on the process of fracture through setting material character parameters. It is a new method for fracture simulation of stress corrosion cracking. After comparing the propagated crack's shape and size with the bolt's real macro-fractograph, the simulation results are in fairly good agreement with the bolt's real fracture.

Key words: high-strength bolt; stress corrosion cracking; calculation and simulation; FRANC3D

某型号高强度螺栓用于某海上设备轴承基座上, 其强度要求很高, 该型螺栓在生产检验合格服役 5 个月后, 发现个别螺栓相继在螺纹处发生断裂, 该型高强度螺栓为铰制孔螺栓 (螺纹长度 95 mm), 材料为 35CrMnSiA 钢, 规格为 M56, 螺杆长度为 235 mm, 强度要求以 GB/T3077-1999 为标准。经过前期运用金相检验、氢含量检验和端口电镜扫描分析等相关的手段对断裂螺栓及未断裂的随机抽取样品进行相应的检验和断裂原因分析, 得出其断裂为由应力、氢和腐蚀共同引起的氢质开裂型应力腐蚀

断裂^[1]。

为进一步深入研究该螺栓的断裂过程, 笔者运用三维裂纹扩展软件 FRANC3D 对该螺栓的应力腐蚀断裂过程进行计算仿真。

1 FRANC3D 软件简介

三维断裂分析软件 FRANC3D 是美国康奈尔大学断裂工作组 (cornell fracture group, CFG) 开发的一套具有建模、应力分析、应力强度因子计算、裂纹自动扩展等功能的免费软件。它是基于工作站的一套分析软件, 可以在很多桌面和工作站系统下运行, 包括 Win98, WinNT/2000/XP, RedHat Linux 7.0, IBM AIX 4.2, Solaris 2.6, HP UNIX 10.2, HP UNIX11.0, Solaris2.6/SunOS 5.5.1 等操作系统。

收稿日期: 2009-04-24

基金项目: 江苏省博士后科研项目 (0701017C) 资助

作者简介: 杨兴林 (1964-), 教授, 博士后, 研究方向为材料制备与零件加工一体化, HCYJSB@public.zj.js.cn

断裂分析软件 FRANC3D 由 3 个部分组成:立体对象建模器 OSM(object solid modeler),断裂分析器 FRANC3D(fracture analysis code in 3Dimensions)及边界元系统 BES(boundary element system)。FRANC3D 计算裂纹扩展的步骤如图 1。

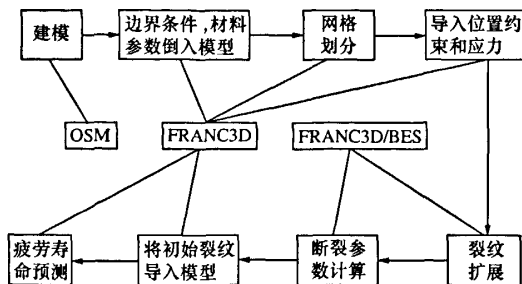


图 1 FRANC3D 断裂问题分析过程步骤^[2]

2 理论基础

2.1 断裂判据

K_I 为裂纹尖端应力场强度因子,简称应力强度因子。它是表示场强的物理量。其中, I 代表 I 型裂纹。

I 型裂纹是低应力断裂的主因,在工程构件内部, I 型裂纹是最危险的,实际裂纹即使是复合型裂纹,为了更加安全也往往把它作为 I 型处理。因此,对断裂螺栓的裂纹按 I 型裂纹进行探讨研究。

一般的 K_I 的表达式都是建立在典型的平板具有贯穿裂纹的模型上的,而且是属于二维裂纹问题。显然,平板贯穿裂纹的模型是不符合螺栓内部的裂纹实际情况的。而断裂螺栓的内部微裂纹应当属于深埋型裂纹,属于典型的三维裂纹问题。深埋裂纹的计算模型可按照“无限大体”中的片状裂纹来进行计算。由于片状裂纹在物体内部的取向通常较难从超声波探伤的结果来判断,所以计算时总是取裂纹面垂直与拉应力的方向,以确保计算结果偏于安全。

假设螺栓内部裂纹为圆片状裂纹,远场受垂直于圆片所在平面的均匀拉应力作用,圆片的半径为 a 。任一点的应力强度因子 K_I 求出为

$$K_I = a\sigma\sqrt{2\pi a} \quad (1)$$

式中: a 为形状系数(与裂纹大小、位置等有关); σ 为外应力; $2a$ 为裂纹尺寸。

由式(1)可知, K_I 和外加应力以及裂纹长度有关。随外应力 σ 增大(或随裂纹慢慢扩展),裂纹前端 K_I 增大,当 K_I 大到足以使裂纹失稳扩展,从而导致试样或构件断裂时,就称为临界状态。裂纹失稳

扩展的临界应力场强度因子也称为断裂韧性,用 K_{IC} 表示。 K_{IC} 是材料性能,每种材料都会有与之相对应的 K_{IC} 。 K_{IC} 的表达式为

$$K_{IC} = a\sigma_c\sqrt{2\pi a_c} \quad (2)$$

式中: σ_c 和 a_c 是临界状态的应力及裂纹尺寸。

当 $K_I > K_{IC}$ 时,裂纹开始失稳扩展,这是在一般空气环境中的情况。当构件在海洋大气环境中,其断裂韧性已经不再是 K_{IC} ,而是 K_{ISCC} 。 K_{ISCC} 称为应力腐蚀门槛应力强度因子,即能产生应力腐蚀最小的 K_I 。一般来说 K_{ISCC} 远小于 K_{IC} ,这就是导致构件在海洋大气环境中,在远小于其最大许用应力的情况下,发生低应力脆性断裂的真正原因。在海洋大气环境中,当 $K_I > K_{ISCC}$ 时,裂纹开始扩展,其中 K_{ISCC} 可通过试验测的。

2.2 K_{ISCC} 的测定

一般情况, K_{ISCC} 可以用恒载荷试样和恒位移试样来测量。关于 35CrMnSiA 钢的 K_{ISCC} 值,相关单位已在相关研究中进行了恒位移试验(WOL 型)测定,其结果见表 1。

表 1 35CrMnSiA 钢 K_{ISCC} 测试结果

状态	介质	K_{ISCC} (MPa $\sqrt{m}$)
未断裂的螺栓	盐雾	18.5
已断裂的螺栓试样	盐雾	19.7
	3.5% NaCl 水溶液	21.6

注:为了尽量接近螺栓的实际工作环境,用 3.5% NaCl 水溶液模拟海水,用盐雾(将 3.5% NaCl 水溶液雾化)模拟海洋大气,分别测试该螺栓在这两种环境中的 K_{ISCC} 值。

基于上述数据,建议在模拟海洋大气环境中的 K_{ISCC} 值约为 20 MPa $\sqrt{m}$ 。

2.3 三维裂纹扩展理论^[3]

一般来说,对于复合型裂纹扩展判定准则主要有 3 种,即:最大周向应力准则、能量释放率准则和应变能密度因子准则。

而 FRANC3D 所使用的是最大周向应力准则作为断裂判据确定裂纹扩展方向,即裂纹将沿最大周向应力的方向,同时即剪应力为 0 方向进行开裂。当此方向的周向应力达到临界值时,裂纹失稳扩展。裂纹在未扩展前,其前缘已被离散成许多点,而后使用最大周向应力准则二维平面应变方程确定这些点的扩展方向。裂纹尖端的应力及位移大小仅与 r 和 θ 有关,见图 2。

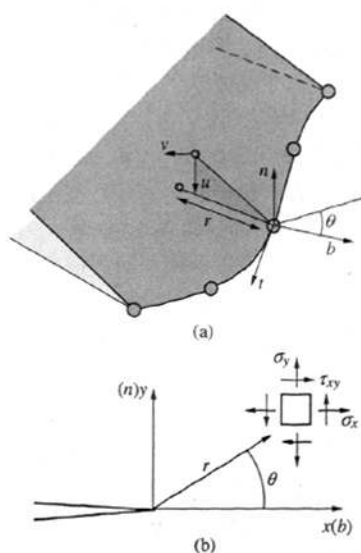


图2 裂纹尖端相关参量

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}) \quad (3)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}) \quad (4)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (5)$$

$$u = 2(1+\nu) \frac{K_I}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} [1 - 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2}] \quad (6)$$

$$v = 2(1+\nu) \frac{K_I}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} [2 - 2\nu + \cos^2 \frac{\theta}{2}] \quad (7)$$

通过位移相关性对边界条件或有限单元体进行分析,可求出应力强度因子。裂纹尖端位移场可由下式得到

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = 2(1+\nu) \frac{K_I}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{Bmatrix} \cos \frac{\theta}{2} [1 - 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2}] \\ \sin \frac{\theta}{2} [2 - 2\nu + \cos^2 \frac{\theta}{2}] \end{Bmatrix} +$$

$$2(1+\nu) \frac{K_I}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{Bmatrix} \sin \frac{\theta}{2} [2 - 2\nu + \cos^2 \frac{\theta}{2}] \\ \cos \frac{\theta}{2} [-1 + 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2}] \end{Bmatrix} \quad (8)$$

通过对有限单元体或边界条件的位移分析,可得出应力强度因子 K 的计算公式,如下式

$$\begin{Bmatrix} K_{II} \\ K_I \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-\nu)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \begin{Bmatrix} u_{FEM} \\ v_{FEM} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

裂纹的扩展尺寸则由各点相对应力强度因子的

大小和用户确定的最大扩展尺寸共同决定,以 I 型裂纹为例,其示意图如图 3 所示。裂纹扩展量为

$$a_i = a_{\max} \left[\frac{K_i}{K_{I\max}} \right]^b \quad (10)$$

式中: $a_{\max}$ 为最大扩展尺寸; K_I 为 I 型裂纹应力强度因子; b 为自定参数。

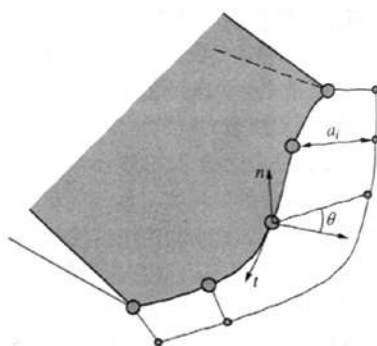


图3 裂纹扩展示意图

这些扩展后的点通过多项式拟合成平滑曲线,最后重新组成新的裂纹面,以椭圆形裂纹为例,新裂纹面形成过程如图 4 所示。

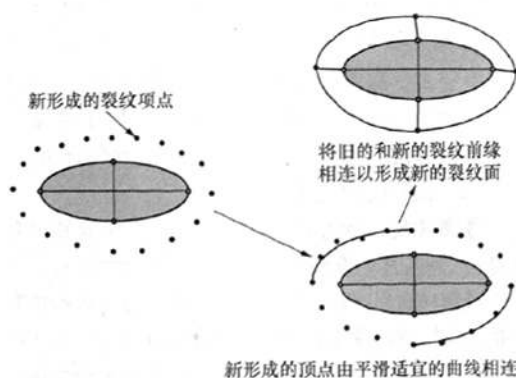


图4 新裂纹面形成过程

3 高强度螺栓断裂计算仿真

3.1 实体建模

实体模型建立的方式主要分为两种,一种是使用 FRANC3D 自带的建模模块 OSM (object solid modeler),另一种是使用其他实体建模软件,如 PRO-E, UG 等,但是必须要将建好的模型

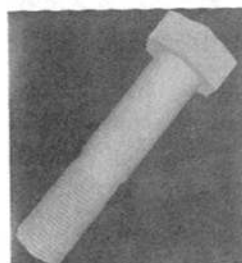


图5 某高强度螺栓实体模型

数据转换成 FRANC3D 所能读取的格式。

笔者采用的是 FRANC3D 自带的 OSM 模块对 35CrMnSiA 高强度螺栓进行建模,实体模型见图 5。

3.2 材料参数设定

材料特征参数设定中,一般对以下参数进行设定:杨氏模量,泊松比,断裂韧性,密度,热系数,热传导率,及材料所处的环境温度等。

在整个仿真过程中,可以通过对断裂韧性这个材料参数的设定来充分体现环境对整个断裂过程的影响。理由如下:从断裂力学的角度来说,裂纹如果要进行扩展,其裂纹尖端的 K_I 必须要大于其材料的断裂韧性。外界富含氢的环境对材料的影响即使材料的断裂韧性下降。因此,此时材料的断裂韧性已不再是空气环境中的 K_{IC} ,而已经是材料在海洋大气环境中的断裂韧性 K_{ISCC} 。一般情况下, K_{ISCC} 远小于 K_{IC} ,这就是导致构件在远小于其最大许用应力的情况下发生延迟断裂的原因。因此,要想在整个断裂过程中体现环境对断裂的影响,只须在断裂韧性值的设定上选用相应值的 K_{ISCC} 即可。

3.3 初始裂纹形状、大小及所处位置的探讨

(1) 微裂纹的形状

按照几何特征分类的话,裂纹分为穿透裂纹、表面裂纹、深埋裂纹。显然,螺栓内部的微裂纹应当属于深埋裂纹。深埋裂纹一般处于构件内部,通常简化为圆片状或椭圆片状裂纹处理^[4]。鉴于微裂纹尺寸的考虑,在仿真中选用圆片状裂纹比较合理。

(2) 微裂纹的尺寸

微裂纹尺寸大小的确定:一是通过实验和仪器获得;二是通过估算法获得。笔者采用估算法。

该螺栓在生产后,采用无损检测的方法进行内部微裂纹探伤,现有检测工具只能检测到 0.2 mm 以上的微裂纹。因此,根据经验,检测工具所能检测到的最小裂纹值即为估算值,所以笔者采用 0.2 mm 为初始裂纹尺寸,这也是初始裂纹采用圆片状的原因之一。

(3) 微裂纹所处的位置

根据经验,在螺栓等缺口几何存在的情况下,应力腐蚀裂纹通常从螺纹根部的表面萌生。该螺栓运

用于特种装备上,生产厂家的质检部门和相关科研单位对成品的螺栓进行过裂纹探伤检测,均未在成品螺栓的螺纹根部表面发现微裂纹。当然,螺栓在加工成型的工程中,由于外力的作用致使其内部材料组织遭到破坏,使其内部产生微裂纹的情况也是有可能会存在的。一般对高强度螺栓断裂的研究都是认为初始微裂纹在螺纹的根部,而初始裂纹在螺栓内部的研究少有提及。笔者作为高强度螺栓断裂仿真探索性研究,这里将初始裂纹的位置放在螺栓内部,为深埋型裂纹的扩展仿真提供一个探索性的借鉴。

应力腐蚀按机理可分为阳极溶解型和氢致开裂型两类。如果阳极金属溶解所对应的阴极过程是析氢反应,且原子氢能扩散进入试样并控制了裂纹的形核和扩展,这类应力腐蚀就称为氢致开裂型应力腐蚀,其中高强度钢在水溶液中的应力腐蚀就属于氢致开裂型^[5]。文献[1]指出:该螺栓的断裂属于氢致开裂型应力腐蚀,氢被螺栓材料吸收进入螺栓内部,由于应力诱导扩散,使氢向螺栓内微裂纹前沿最大三向应力处聚集,经过一段孕育期,当微裂纹前沿聚集的氢浓度达到临界值时,在氢和应力的共同作用下微裂纹就会开裂。因此,可以假定判断螺栓内部微裂纹前沿最大三向应力集中处就是氢含量最大的区域。螺栓材料中氢含量最大的区域也就有可能是裂纹尖端区域。通过前期的理化试验中的材料氢含量检测知,螺栓中二分之一半径处的氢含量是最大的。因螺栓内部初始微裂纹的尺寸相对整个螺栓尺寸而言是极其微小的,因此,可以初步断定就应当在螺栓断口平面二分之一半径处。

3.4 添加初始裂纹及裂纹自动扩展

在 FRANC3D 中添加微裂纹有两种方式,一种是手工添加,即裂纹形状、大小等均由操作者自行进行选择添加;另一种是自动添加,即 FRANC3D 中含有一个裂纹库,可在该裂纹库中选择相应的裂纹,选择好裂纹形状,对裂纹大小进行设置,并且根据实际的三维坐标系放置裂纹。笔者就采用了从裂纹库选择裂纹,并且设置裂纹大小等,添加裂纹后的螺栓实体如图 6 所示。

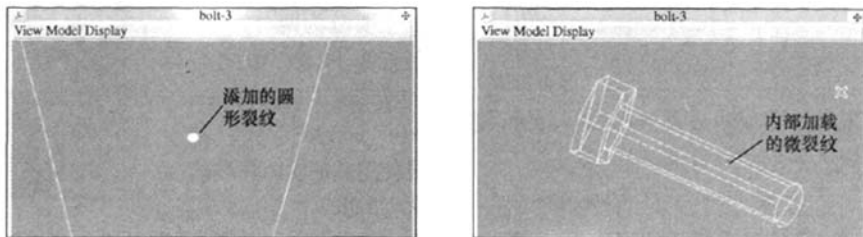


图6 螺栓内部添加的微裂纹

FRANC3D 的最大特色是能够模拟裂纹的自动扩展,而其所使用的是最大周向应力准则作为断裂判据确定裂纹扩展方向,且裂纹的最大扩展尺寸则由用户自己确定,笔者设置最大扩展尺寸为 0.2 mm。而后利用 BES 对加载的初始裂纹尖端进行计算,裂纹开始扩展。

对于高强度螺栓来说,氢脆通常是其应力腐蚀的主要机制,氢通常富集在裂纹的三向拉应力集中部位,当裂纹前沿聚集的氢浓度达到临界值时,在氢和拉应力共同作用下微裂纹就会开裂。从断裂力学的角度来说,氢使得裂纹开始扩展的临界应力强度因子下降了,已经不再是材料原本的 K_{IC} ,而是应力腐蚀强度因子 K_{ISCC} 。随即氢又进

行上坡扩散向微裂纹前沿聚集,经过一段孕育期后微裂纹又发烧开裂,这一过程不断反复进行。FRANC3D 在进行裂纹扩展仿真的时候,先通过计算相应一些点的应力强度因子值,当该点应力强度因子值大于材料参数中设定的断裂韧性,则该点进行扩展,如此反复,则裂纹不断的进行扩展。这与实际微裂纹的扩展极其相似,能够对裂纹扩展进行再现和模拟仿真。

4 计算仿真结果分析

自动扩展的裂纹在扩展到螺柱表面的时候,即停止扩展。其裂纹扩展仿真形貌如图 7。实际螺栓断裂的宏观断口如图 8 所示。

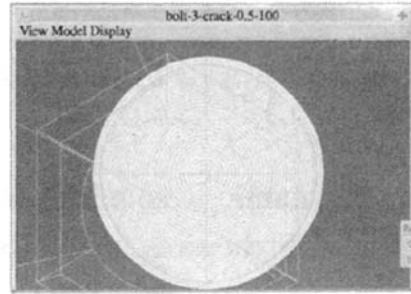
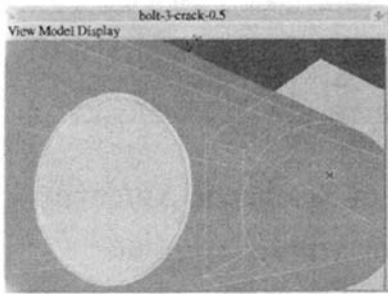


图 7 自动扩展后的裂纹形貌图



图 8 螺栓宏观断口

由图 7、图 8 相比较可知,计算仿真后的裂纹扩展形貌与实际宏观断口形貌基本相符,是符合实际断裂情况的。因此,计算仿真的结果基本上是可以接受的。

5 结束语

笔者利用三维裂纹扩展软件 FRANC3D 对 35CrMnSiA 高强度螺栓因环境所造成的延迟断裂进行计算仿真研究,由于相关研究目前在已有文献中

涉及甚少,因此属于探索性研究。在计算仿真的过程中,笔者采用通过对材料参数的设定来体现环境因素对整个螺栓断裂过程的影响作用,同时也深入讨论了构件内部初始微裂纹的形状、大小及所处构件位置的影响。计算仿真的结果与螺栓实际断裂情况基本相符合,这不仅证明了裂纹扩展计算仿真的正确性和实用性,也提出并演绎了一种对应力腐蚀断裂进行计算仿真的方法和实例。

【参考文献】

- [1] 林轻,杨兴林. 某型高强度螺栓断裂失效分析[J]. 热加工工艺,2009,38(2):128~130
- [2] 刘斌,沈士明. 基于 FRANC3D 的三维疲劳裂纹扩展的数值模拟[J]. 煤矿机械,2007,28(12):52~54
- [3] FRANC3D/OSM Overview Sides [EB]. _ <http://www.cfd.cornell.edu/>,2003
- [4] 李庆芬,胡胜海,朱世范. 断裂力学及其工程应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2006
- [5] 褚武扬,乔利杰,陈奇志,高克玮. 断裂与环境断裂[M]. 北京:科学出版社,2000