

人工心瓣热解炭表面微裂纹应力强度因子分析

李学鹏, 张建辉

(杭州电子科技大学机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 人工机械心瓣热解炭涂层表面存在着微小缺陷, 大多以半椭圆裂纹的形式存在, 在载荷作用下易发生扩展甚至断裂。应力强度因子是判断裂纹是否进入失稳状态的一个重要指标。该文利用三维断裂分析软件, 结合有限元分析软件计算了人工心瓣热解炭中心半椭圆裂纹拉伸试样不同位置处的 K_I , 并与基于实验基础的理论值进行对比, 同时讨论了初始裂纹大小、位置和形状对 K_I 的影响, 结果表明: 计算值与理论值最大相对误差不超过 3%, 验证了该软件计算热解炭 K_I 的有效性, K_I 随初始裂纹尺寸增大而增大; 初始裂纹位于试样中心或边缘对 K_I 几乎没有影响; 裂纹长半轴与短半轴比值越接近 1, 计算结果越稳定。

关键词: 人工机械心瓣; 热解炭; 应力强度因子

中图分类号: TQ127.1+1

文献标识码: A

文章编号: 1001-9146(2014)01-0047-04

0 引言

人工机械心瓣是植入到人体心脏内的人工脏器, 通过手术置换来挽救心脏瓣膜病患者的生命。植入体内的人工机械心瓣热解炭涂层表面由于各方面原因, 不可避免存在着微小缺陷, 在持续载荷作用下易以裂纹形式发生扩展甚至断裂, 严重影响了人工机械心瓣的耐用性, 给患者造成难以估计的损失^[1-2]。应力强度因子(Stress Intensity Factors, SIFs)是表征弹性体在外力作用下, 裂纹尖端附近应力场强弱的物理量, 是判断裂纹是否失稳的重要指标。热解炭是典型的弹性体, 对热解炭开展裂纹扩展和断裂问题的研究必须首先明确裂纹前缘的 SIFs 及其影响因素^[3]。目前国内对热解炭涂层的研究多集中在生产工艺及微观结构方面, 断裂方面的报道很少; 国外多采用实验方法, 考虑全厚度长裂纹(2~20 mm)条件下去研究材料的断裂韧性和损伤容限寿命, 对物理性表面微小裂纹(50~600 μm)的关注很少。研究表明在施加同样载荷下, 微小裂纹生长速度要远远超过长裂纹, 越来越多的学者意识到准确的断裂韧性计算和完整的人工心瓣寿命预测必须包括微小裂纹在表面的增长^[4-6]。本文利用 FAC 公司研发的断裂分析软件 FRANC3D V6.0, 结合有限元分析软件求解热解炭试样表面微小裂纹前缘处 SIFs, 并讨论裂纹大小、位置和形状对 SIFs 的影响, 为后续研究人工机械心瓣热解炭裂纹扩展和完整的损伤容限寿命预测提供理论支持。

1 计算 SIFs 的理论基础

FRANC3D V6.0 是用来计算结构在任意复杂情况下的裂纹扩展和疲劳寿命的软件, 与 ABAQUS 等有限元软件结合进行断裂力学方面的计算^[7]。表面裂纹是指深度和长度皆处于构件表面的裂纹, 可简化为半椭圆形裂纹, 由于热解炭涂层厚度仅有 1~2 mm, 可以当作是简单的 I 型(张开型)裂纹来研究。

收稿日期: 2013-04-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975070), 浙江省自然科学基金资助项目(LY12E05002)

作者简介: 李学鹏(1988-), 男, 山东潍坊人, 在读研究生, 人工心瓣热解炭涂层材料。

2 运用 FRANC3D V6.0 求解

由于裂纹尺寸远小于结构尺寸,可以将问题等效为两端受均匀拉力含中心半椭圆表面裂纹的无限大平板问题。在 ABAQUS 中建立 3D 有限元模型如图 1(a) 所示,其中材料弹性模量 $E = 30 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.3$, $2h$ 表示模型高度, $2W$ 表示模型长度, t 表示模型厚度, a 表示椭圆裂纹长半轴, b 表示椭圆裂纹短半轴,即裂纹最大深度。本文采用 20 节点六面体二次减缩积分单元 (C3D20R) 对模型进行全局网格划分,FRANC3D V6.0 自适应网格划分后的模型如图 1(b) 所示^[8]。

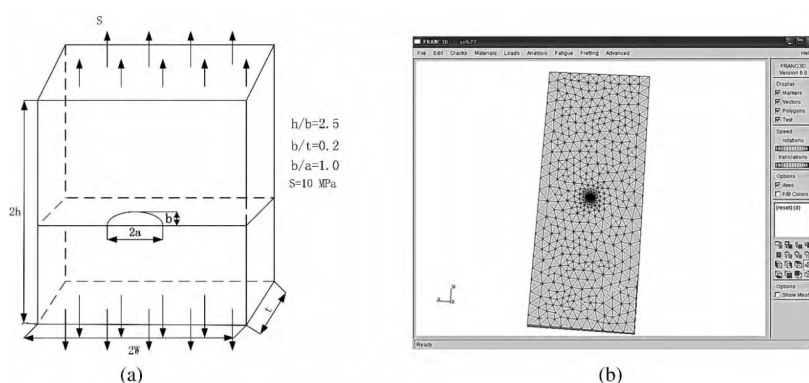


图 1 ABAQUS 中 3D 有限元模型及在 FRANC3D V6.0 自适应网格划分后的模型

FRANC3D V6.0 读取有限元模型,使用图形化的裂纹引入向导植入半椭圆形表面裂纹,本文采用 1/4 节点技术对裂纹区域进行自适应网格划分,这样在裂纹前缘生成 8 个 15 节点的楔形单元,以实现理论上的 $r^{-1/2}$ 应力分布。为了确定表面裂纹前缘不同位置处 SIFs,同时由于形状左右对称,把半椭圆形裂纹左侧平均分成 8 等份,每份占 $\pi/16$,按照裂纹尖端位置依次编号为 1~9,节点 1 为裂纹表面点,节点 9 为裂纹最深点。半椭圆形裂纹网格划分如图 2 所示。

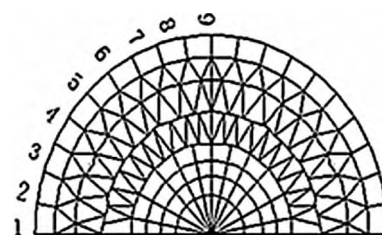


图 2 半椭圆形裂纹网格划分

对裂纹前缘进行数值计算前,首先利用 ABAQUS 对植入裂纹的 3D 有限元模型进行应力分析,同时保持单元类型不变,把结果保存在 fdb 文件中,使用 FRANC3D V6.0 中 Compute SIFs 命令即可计算裂纹前缘各节点 K_I 值。FRANC3D V6.0 在半椭圆表面裂纹长半周与短半周分别取 0.5 的条件下得出 K_I 值与按照应力强度因子手册中基于实验基础的理论值^[9]进行对比,如表 1 所示。由表 1 可以看出两者结果非常接近,最大相对误差不超过 3%,验证了该软件对于计算热解炭 K_I 的实用性。同时可以得出 K_I 分布规律为两端大中间小的对称分布,越靠近表面 K_I 值越大,表明在当前条件下裂纹沿表面的扩展是主要的。

表 1 FRANC3D V6.0 计算的无量纲 K_I 值与基于实验基础的理论值对比

节点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
计算值	9.28	8.91	8.56	8.43	8.35	8.30	8.27	8.25	8.26
理论值	9.37	9.14	8.82	8.64	8.52	8.45	8.41	8.38	8.37
相对误差/%	1.01	2.54	2.94	2.43	1.99	1.77	1.66	1.55	1.31

3 讨论

根据应力强度因子理论,SIFs 的大小与裂纹长度、裂纹数目、裂纹位置、载荷大小及裂纹体几何形状等因素有关^[9]。裂纹前缘的 K_I 在表面裂纹扩展中起主导作用,本文分别对初始裂纹大小、位置和形状

对 K_I 的影响进行分析。

3.1 初始裂纹大小对 K_I 的影响

研究初始裂纹大小对 K_I 的影响, 为了便于与理论值对比, 保持裂纹尺寸 $b/a = 1$, a 从 0.1 ~ 0.6 变化, 每隔 0.1 数量级重新建模并计算 K_I 。横坐标轴采用归一化裂纹前缘长度来表示裂纹因子所在的位置, 归一化裂纹前缘长度指半椭圆型裂纹前缘裂纹点到起始点的弧长与整个弧长的比值, 纵坐标代表无量纲 K_I 。6 组不同裂纹半径裂纹前缘 K_I 分布曲线如图 3(a) 所示, 裂纹前缘第 1、3、7 点 K_I 随半径变化的规律如图 3(b) 所示, 由图 3 可知在其它条件一定的情况下随着裂纹半径的增大, K_I 值也相应增大。

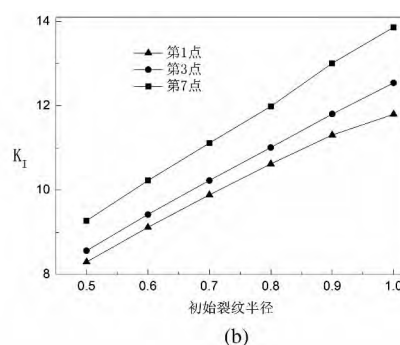
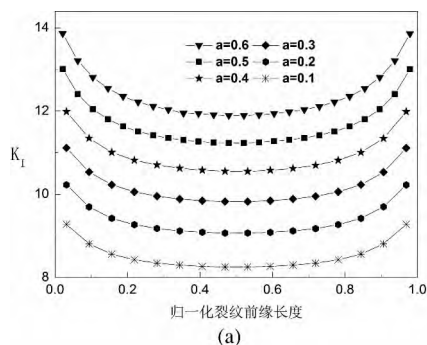


图 3 同裂纹半径时初始裂纹前缘 K_I 分布曲线

3.2 初始裂纹位置对 K_I 的影响

改变初始裂纹位置, 让半椭圆形表面裂纹位于试样的边缘, 裂纹的变化量与中心裂纹一致, 同样可以得到随着初始裂纹长度的增加, K_I 值也相应变大的结果, 与中心裂纹规律相同。保持 $b/a = 1$ 不变, 长轴半径 a 分别取 0.1, 0.4, 0.6 时边缘裂纹与中心裂纹 K_I 的比较如图 4 所示, 可以看出在其它条件相同的情况下, 两者 K_I 值仅有微小的差别, 说明初始裂纹位于试样的中间或边缘对 K_I 影响很小。

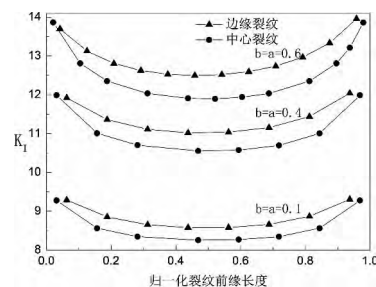


图 4 相同尺寸中心裂纹与边缘裂纹 K_I 值对比

3.3 初始裂纹形状对 K_I 的影响

保持 $b = 0.5$ 不变, a 在 0.3 ~ 0.6 范围内变化, 每增加 0.1 数量级重新建模一次, 并计算 K_I , 得到 4 组不同形状的半椭圆形表面裂纹 K_I 曲线图, 随着长轴半径的增大, 靠近表面位置的 K_I 变化不大, 而裂纹深度方向 K_I 变化明显, 如图 5(a) 所示, 裂纹前缘第 1、3 和 7 点的 K_I 随着 a 变化的规律如图 5(b) 所示。表明 a 与 b 比值越接近 1, K_I 在表面和深度方向越稳定, 随着 a 的增大, 各节点 K_I 也相应增大。

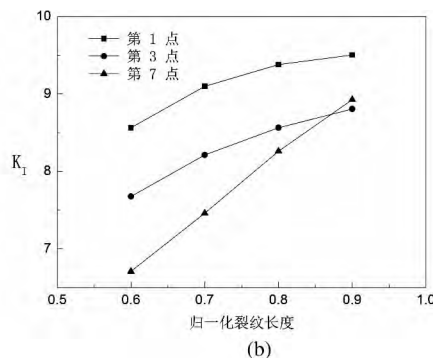
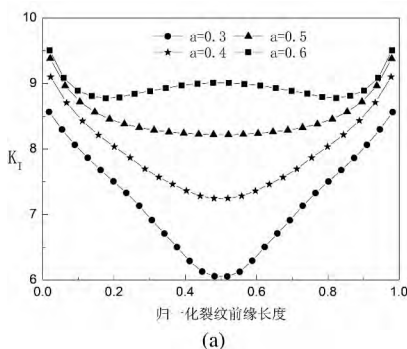


图 5 长轴半径 a 对应的裂纹前缘应力强度因子曲线

4 结束语

本文使用专业的三维断裂分析软件 FRANC3D V6.0, 结合有限元分析软件 ABAQUS, 计算了人工心瓣热解炭试样半椭圆表面裂纹处 K_I , 计算结果与基于实验基础的理论值吻合良好, 最大相对误差不超过 3%, 验证了该软件计算热解炭表面裂纹处 K_I 值的有效性; 在其它条件一定的情况下, 随着裂纹半径的增大, K_I 值也相应增大; 裂纹位于试样的边缘或者中间对 K_I 影响很小; 裂纹长半轴与短半轴比值越接近 1, K_I 计算结果越稳定。

参考文献

- [1] 张建辉. 人工心瓣瓣片热解炭涂层工艺 [J]. 兰州铁道学院学报, 2003, 22(6): 119 – 121.
- [2] Ritchie R O. Fatigue and fracture of pyrolytic carbon: a damage-tolerant approach to structural integrity and life prediction in “Ceramic” heart valve prostheses [J]. The Journal of heart valve disease, 1996, 5(1): 9 – 31.
- [3] 张安哥. 疲劳、断裂与损伤 [M]. 成都: 西南财经大学出版社, 2006: 25 – 27.
- [4] 张建辉, 孙海博, 王根明, 等. 人工心瓣含硅热解炭涂层的微观结构 [J]. 中国生物医学工程学报, 2011, 30(5): 60 – 64.
- [5] Cao H C. Mechanical performance of pyrolytic carbon in prosthetic heart valve applications [J]. The Journal of heart valve disease, 1996, 5(1): 32 – 49.
- [6] Dauskardt R H, Ritchie R O, Takernoto J K, et al. Cyclic fatigue and fracture in pyrolytic carbon-coated graphite mechanical heart-valve prostheses: Role of small cracks in life prediction [J]. Journal of Biomedical Materials Research. 1993. 28(6): 229 – 236.
- [7] Rybicki E F, Kanninen M F. A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1977, 9(4): 931 – 938.
- [8] Raju I S, Newman J C. Stress-intensity factors for a wide range of semi-elliptical surface cracks in finite thickness plates [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1979, 11(2): 817 – 829.
- [9] 中国航空研究院. 应力强度因子手册 [M]. 北京: 科学出版社, 1993: 715 – 1 118.

Analysis of Stress Intensity Factor of Artificial Heart Valves Pyrocarbon Surface Microcracks Li Xuepeng, Zhang Jianhui

(School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang 310018, China)

Abstract: There are small defects in artificial mechanical heart valves pyrolytic carbon coating, mostly present in semi-elliptical crack form, easy to induce expansion even fracture under load conditions. The stress intensity factors is an important indicator to judge cracks whether the instability state. This paper used the three-dimensional fracture analysis software combine with finite element analysis software to calculate I-mode stress intensity factors(K_I) of semi-elliptical surface crack of artificial mechanical heart valves pyrolytic carbon center crack tension specimen, and compared with the theoretical values of stress intensity factors based on the experimental basis, and discussed the influence of the initial crack size, position and shape. The results show that: maximum relative error less than 3.0%, verify the effectiveness of the software to calculate K_I , K_I value increases with the initial crack size; the initial cracks located at the middle or edge almost no effect on the K_I ; elliptical crack semimajor and semiminor axis ratio is more close to 1, the results more stable.

Key words: artificial mechanical heart; pyrolytic carbon; stress intensity factors