

文章编号: 2095-2163(2020)12-0054-03

中图分类号: TH 814

文献标志码: A

裂纹钢丝的应力与疲劳寿命分析

李仔艳, 丁思同, 郭 骥, 李 阳

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 本文利用疲劳应力估算法研究含裂纹的钢丝疲劳寿命。通过 Ansys Workbench 模拟现实工况下绞合钢丝受力状态, 研究裂纹扩展过程及裂纹处的应力曲线。结果表明: 因工况受力的钢丝裂纹会在宽度及深度这两个自由度拓宽加深并其前缘会出现应力集中现象。同时, 利用 N-node 对钢丝绳的疲劳寿命进行仿真分析, 得到裂纹前缘处的“蝶形”损斑及裂纹节点处的寿命。结果表明: 裂纹前缘处的等效应力与疲劳损伤呈正相关, 与疲劳寿命呈负相关。仿真得出的裂纹钢丝的应力特征与疲劳寿命的关系, 对及时修补钢丝缺陷让其继续保持机械性能有极大意义。

关键词: 应力集中; “蝶形”损斑; 疲劳寿命

Stress and fatigue life analysis of cracked steel wire

LI Ziyang, DING Sitong, GUO Ji, LI Yang

(School of Optical- Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai Science and Technology, Shanghai 200093, China)

[Abstract] The fatigue life of steel wire with crack is studied by fatigue stress estimation. Ansys Workbench is used to simulate the stress state of stranded steel wire under real working conditions, and the crack growth process and stress curve at the crack were studied. The results show that the width and depth of the two degrees of freedom of the crack increase and deepen, and the stress concentration occurs at the leading edge of the crack. At the same time, N-node is used to simulate and analyze the fatigue life of the wire rope, and the "butterfly-shaped" damage and the life of the crack at the front edge were obtained. The results show that the equivalent stress at the crack front is positively correlated with fatigue damage and negatively correlated with fatigue life. The relationship between stress characteristics and fatigue life of cracked steel wire obtained by simulation is of great significance for repairing defects of steel wire in time to keep its mechanical properties.

[Key words] Stress concentration; "Butterfly-shaped" damage; Fatigue life

0 引言

现阶段钢丝绳在煤炭、交通、运输等主要行业有着极高的使用范围及频率, 但由于目前缺乏合理的安全评价体系, 工程中对服役 15 年前后的钢丝绳普遍采取更换措施来保证使用安全^[1-2]。前人对钢丝绳的安全性分析主要是对绳股间的应力分布, 但对钢丝裂纹处仅有理论估算模型。本研究在此基础上仿真模拟现实工况下钢丝裂纹模型的扩展过程, 并对裂纹处估算出损伤寿命。钢丝缺陷应力特征不仅与裂纹扩展寿命有关, 也可以作为电磁缺陷无损检测领域的补充发展。由于钢丝在现实工况下就固有应力特征, 不需要再施加其它载荷, 再根据磁弹效应, 就可将缺陷应力特征转变为缺陷磁特征^[3]。

钢丝在积年累月地生产作业中会由于锈蚀磨损等原因产生裂纹, 但不是一旦存在裂纹就会造成钢丝绳的机械性能丧失。从裂纹萌生到裂纹失效、扩展断裂并导致破坏性损伤也是需要一定的时间, 即裂纹扩展寿命。只要预判出其裂纹扩展寿命就可保

证在钢丝发生破坏性断裂之前将其裂纹处修补, 继续使钢丝保持机械性能。为估算出钢丝裂纹处的寿命, 本文首先建立符合国际标准 GB/T7673.5-2008 钢丝绳的三维实体模型, 并在其表面添加缺陷裂纹, 再竖直施加拉力载荷模拟现实工况, 得到含裂纹的钢丝在拉力载荷下的扩展过程以及等效应力分布情况, 最后联和疲劳寿命应力法估算出钢丝裂纹处的疲劳寿命。仿真结果表明, 在现实工况下裂纹前缘处极易发生应力集中并伴有“蝶形”损斑出现的现象, 导致其寿命缩短。

1 绞合钢丝疲劳寿命理论

在疲劳加载并且应力强度低于材料断裂韧度的条件下, 原有裂纹会发生扩展。裂纹从初始长度 a_0 扩展到临界长度 a_c , 所经历的循环载荷次数 N 称为疲劳裂纹扩展寿命。以 Paris 裂纹扩展速率公式为基础, 对疲劳扩展寿命进行理论推导。首先根据线弹性力学中的应力强度因子与最大循环应力来确定在拉伸载荷作用下, 发生断裂时的临界裂纹尺寸

作者简介: 李仔艳(1996-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 钢丝无损检测。

收稿日期: 2020-10-14

a_c , 式(1):

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_c}{f\sigma_{max}} \right)^2 \quad (1)$$

式中, K_c 是材料的断裂韧性; σ_{max} 是最大循环应力; f 是几何构件与裂纹尺寸的函数(查应力强度因子手册可得)。

其次, 疲劳裂纹扩展速率也可以由应力强度因子来表征, 式(2):

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (2)$$

式中, ΔK 是应力强度因子范围, 材料参数 C 、 m 的确定都是由标准试件进行疲劳扩展裂纹实验所得。为了保证分析结果的准确性, 查阅机械设计手册对 ΔK 进一步表征为式(3):

$$\Delta K = f\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (3)$$

将 ΔK 与 a_c 代入式(2)并移项积分可得裂纹扩展寿命的计算表达式(4):

$$N = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C (f\Delta\sigma\sqrt{\pi a})^m} \quad (4)$$

式中, 积分上、下限分别为初始裂纹深度 a_0 和临界裂纹深度 a_c ; $\Delta\sigma$ 是循环应力范围; N 是载荷循环次数。对式(4)进行整理计算可得式(5):

$$N = \begin{cases} \frac{a_c^{(1-\frac{m}{2})} - a_0^{(1-\frac{m}{2})}}{(1-\frac{m}{2})C(f\Delta\sigma)^m\pi^{\frac{m}{2}}}, & m \neq 2 \\ \frac{1}{C(f\Delta\sigma)^m\pi^{\frac{m}{2}}} \ln\left(\frac{a_c}{a_0}\right), & m = 2 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)为应力-寿命($\Delta\sigma - N$)函数, 进一步表征裂纹扩展寿命。

2 裂纹绞合钢丝有限元仿真分析

2.1 现实工况中钢丝受力模型

本文借助 SolidWorks 建立符合国际标准 GB/T7673.5-2008 的钢丝绳三维实体模型, 将其导入到 ANSYS Workbench 中添加其材料属性。材料选用符合实际的奥氏体不锈钢, 其杨氏模量为 $1.735e11$, 泊松比为 0.3。裂纹产生的位置包括表面裂纹、深埋裂纹、穿透裂纹这 3 种, 但是考虑到本文研究的重点是钢丝疲劳处的裂纹应力特征, 其对应的是表面椭圆裂纹。绞合钢丝在现实工况下不仅仅是受拉伸载荷, 还受接触载荷、摩擦载荷等对其的影响。考虑到这些现实因素, 首先对模型采用 Splitting-Lagrangian 算法进行接触位置搜索, 并采用 Augment-Lagrangian 算法对接触载荷进行设置^[4]。这里的钢丝绳在润滑良好的

情况下, 忽略绳股间的摩擦力^[5]。最后是对约束载荷的设置, 将钢丝绳一端(A端)的所有面施加固定约束, 在钢丝绳另一端(B端)所有面施加垂直于钢丝绳端面大小为 10 000 N 的拉力, 其模型示意如图 1 所示。



图 1 钢丝工况中受力模型图

Fig. 1 Stress model diagram of steel wire under working condition

2.2 钢丝疲劳裂纹的应力分析

钢丝预置裂纹在 10 000 N 拉伸载荷的作用下, 使得裂纹尖端应力高度集中, 处于循环塑性变形, 进而导致椭圆裂纹在宽度及深度这两个自由度拓宽加深, 裂纹萌生阶段到裂纹拓宽发生的形变为 $1.1318e-5$ m, 扩展过程如图 2 所示。



图 2 疲劳裂纹扩展过程图

Fig. 2 Process diagram of fatigue crack propagation

裂纹前缘会出现应力集中现象, 最大等效应力为 $2.416e7$ Pa, 如下图 3 所示。等效应力是一种服从遵循材料力学第四强度理论的屈服准则, 可以对疲劳、破坏等进行评价。等效应力越大, 裂纹越容易发生失效断裂。同时, 根据前人的研究可知随着等效应力的增加, 磁感应强度呈减弱趋势, 此特性可作为电磁缺陷无损检测领域的补充发展^[6]。

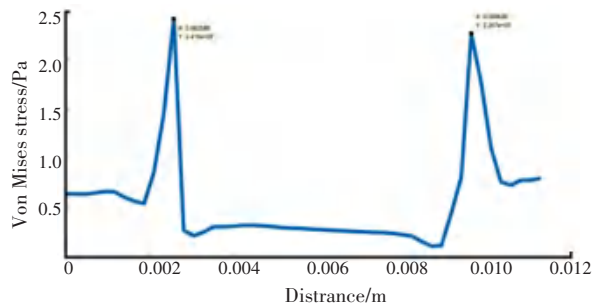


图 3 裂纹处等效应力图

Fig. 3 The diagram of equivalent stress at the crack

3 疲劳损伤-寿命分析

根据标准试件试验下取得的材料应力-寿命(S-N)曲线, 估算疲劳裂纹的扩展寿命。将钢丝受拉力载荷下的有限元分析结果导入到 ncode 中, 添加高斯 (下转第 61 页)