

横向载荷与预紧力对螺栓断裂寿命的影响

苗兴琳, 黄贤振, 丁鹏飞, 郑智群

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 螺栓连接依靠自身简单可靠的特点被广泛应用于各个行业,然而螺栓的疲劳断裂却是一个非常突出的问题. 因此,为准确预测螺栓断裂失效寿命,进行了螺栓材料的疲劳裂纹扩展实验,求得了螺栓材料的断裂参数,从而建立了Paris裂纹扩展模型. 然后运用有限元方法与疲劳裂纹扩展实验进行对标,并取得较好的效果,为螺栓断裂失效寿命的计算奠定了基础. 最后,考虑到螺栓预紧力与横向载荷对螺栓断裂的影响,建立了带裂纹的螺栓有限元模型,并采用有限元方法进行螺栓失效寿命计算的定量分析. 结果表明:横向载荷与螺栓预紧力对应力强度因子和螺栓使用寿命具有较大的影响.

关键词: 螺栓断裂;失效寿命;有限元计算;横向载荷;定量分析

中图分类号: TG 519.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2024)01-0068-08

Effect of Transverse Load and Preload on the Fracture Life of Bolts

MIAO Xing-lin, HUANG Xian-zhen, DING Peng-fei, ZHENG Zhi-qun

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: HUANG Xian-zhen, E-mail: xzhuang@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Bolted joints are widely used in various industries for their simplicity and reliability, but the fatigue fracture of bolts is still a very prominent problem. Therefore, to accurately predict the bolt fracture failure life, the fatigue crack propagation experiments of bolt materials are conducted to obtain the fracture parameters of bolt materials, so that the Paris model can be established. Then the finite element method is applied with fatigue crack propagation experiments for calibration and achieves better results, which provides a basis for the calculation of the bolt fracture failure life. Finally, considering the influence of bolt pretension and transverse load on bolt fractures, a cracked bolt finite element model is established and the bolt failure life is quantitatively analyzed by the finite element method. The results show that the transverse load and bolt preload have a large effect on the stress intensity factor and bolt life.

Key words: bolt fracture; failure life; finite element calculation; transverse load; quantitative analysis

螺栓是一种较为成熟的标准件,具有易于拆卸和重复使用等诸多优点,广泛应用于交通运输、机械加工及石油开采等的工业设备中. 螺栓依靠自身预紧力在连接部件的表面产生摩擦扭矩连接两个或多个部件,确保螺栓连接的可靠性与紧密性^[1]. 在自身轴力、横向载荷及振动冲击等多种载荷的作用下,螺栓的自身平衡会遭到破坏进而导致螺栓失效. 螺栓失效的模式

主要有两种:螺栓松动和累积损伤导致的螺栓断裂. 使螺栓失效的载荷主要有螺栓的轴向载荷及横向载荷^[2-4]. 横向载荷会破坏螺纹表面载荷的平衡关系,使螺栓发生松动. 而轴向载荷会增加螺栓的平均应力,增加螺栓在最小横截面积或者裂纹处发生疲劳断裂的可能性^[5]. 对于高性能螺栓而言,它能产生较大的螺栓预紧力,则螺栓发生疲劳断裂的可能性较大^[6]. 因此对

收稿日期: 2022-07-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51975110);“兴辽英才计划”项目(XLYC1907171);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2003005,N21003005).

作者简介: 苗兴琳(1991-),男,山东成武人,东北大学博士研究生;黄贤振(1982-),男,山东定陶人,东北大学教授,博士生导师.

于高性能螺栓疲劳断裂的研究在工程上具有重要意义。

螺栓的预紧力与横向载荷是螺栓结构的主要承受载荷,因此必须考虑不同的预紧力与横向载荷来研究螺栓的疲劳行为^[7]。陆飞^[8]建立了不同预紧力和接触的螺栓三维实体有限元模型,并计算了螺栓在不同预紧力下的应力分布。结果表明:螺栓预紧力的大小对螺栓松动有较大的影响。Sancllemente 等^[9]在横向载荷下进行螺栓松动试验,发现紧固件的预紧力和刚度是影响螺栓松动的主要因素。此外,文献^[9]建立了一个统计模型来预测螺栓松动的程度,发现高预紧力和低弹性模量可以降低松动率。因此,在高预紧力和低频交变载荷的情况下,高强度螺栓的失效模式主要表现为疲劳断裂。对于螺栓的疲劳行为,国内外的大量学者取得许多突破性的成果。Liu 等^[10]提出了一种基于连续损伤力学理论和临界面法的累积疲劳损伤评估方法。该方法适用于比例和非比例多轴加载条件。Wang 等^[11]在拉伸和剪切载荷下对不锈钢螺栓进行疲劳试验,通过回归分析获得螺栓的 S-N 曲线。根据不同的设计规范估算了螺栓在拉伸和剪切力作用下的疲劳极限,并提出了螺栓剪切疲劳曲线的设计方法。然而,在某些特定的情况下,使用 S-N 曲线对于螺栓疲劳断裂进行评估是非常激进的,不能对螺栓的断裂机理进行深入的研究。

相比于 S-N 曲线的评估方法,断裂力学中的裂纹扩展方法显得更加安全^[12]。随着有限元技术的进步,金属材料的裂纹扩展研究在近些年得到了飞速的发展^[13]。Yang 等^[14]通过有限元分析与理论计算的方法研究了金属材料在复合裂纹扩展中能量释放率与裂纹角度的关系,与其他参考文献相比取得了较好的效果。Ayhan^[15]提出了一种三维裂纹的计算方法,通过对有限元模型网格精细化使计算误差最小。结果表明在较好的网格质量下,有限元结果与实验结果吻合度较高。Li 等^[16]研究了金属材料在混合模式 I+II 及 I+III 下裂纹扩展的路径及方向,指出裂纹扩展的等效强度因子仅适用于低应力强度因子的情况。Rozumek 等^[17]通过实验方法研究了不同应力比下的混合裂纹的扩展机理,讨论了不同加载模式对混合模式疲劳裂纹扩展的影响。众多文献表明在金属材料的裂纹扩展中,有限元方法的精度与实验测试相近。有限元方法可以消除材料的差异

性所带来的影响,广泛应用于裂纹扩展的定量分析中^[18-20]。

以上研究结果为螺栓的疲劳断裂计算奠定了基础,但是对于螺栓疲劳断裂计算的研究相对较少。本文根据 Paris 裂纹扩展模型,提出了一种微裂纹扩展的计算评估方法。螺栓为 25CrNiMo 金属材料,首先,针对 25CrNiMo 材料进行紧凑疲劳拉伸裂纹扩展实验,求得该材料的裂纹扩展参数并进行有限元验证。其次,在有限元结果与实验测试结果高度契合的基础上,在螺栓过渡区插入一个微裂纹进行裂纹扩展求解。研究螺栓断裂过程中应力强度因子的变化、螺栓预紧力与横向载荷的竞争关系及裂纹扩展寿命。

1 螺栓裂纹扩展计算

1.1 螺栓断裂有限元计算

由于高强度螺栓在工作过程中承受较大的载荷,因此螺栓常常会发生塑性变形。在螺栓的断裂计算中,应用有限元方法可以计算裂纹尖端的应力场和应变场、应力强度因子及 J 积分等物理量,并采用全应变塑性理论和应变增量塑性理论。对裂纹尖端单元的处理一般采用奇异单元法,以减少裂纹尖端应变困难所造成的误差。对于受载苛刻的高强度螺栓,应用应变增量理论有式(1)和式(2)。

$$d\epsilon_{ij}^p = \sigma'_{ij} d\lambda, \quad (1)$$

$$d\lambda = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}H'}. \quad (2)$$

式中: ϵ_{ij}^p 与 σ'_{ij} 分别为塑性应变与应力分量; $d\lambda$ 代表比例数; $\bar{\sigma}$ 为等效应力; H' 为等效应力增量与等效应变增量的比值。

由弹性理论中的广义胡克定律可知,弹性应变增量可由式(3)表达:

$$d\epsilon_{ij}^e = \frac{1-2\nu}{E} d\sigma_{ij} + \frac{d\sigma'_{ij}}{2\mu}. \quad (3)$$

式中: ϵ_{ij}^e 为弹性应变; ν 为泊松比; E 为杨氏弹性模量; μ 为剪切弹性模量。全应变增量是弹性应变增量与塑性应变增量的和,矩阵的形式表达见式(4)。

$$d\sigma = D^p d\epsilon. \quad (4)$$

式中: $d\sigma$ 为应力增量矩阵; $d\epsilon$ 为应变增量矩阵;矩阵 D^p 为塑性应力应变矩阵;矩阵分量形式可由式(5)表示。

$$D^p = 2\mu \begin{bmatrix} \frac{1-\nu}{1-2\nu} - \frac{\sigma'_x{}^2}{S} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} - \frac{\sigma'_x\sigma'_y}{S} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} - \frac{\sigma'_y{}^2}{S} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} - \frac{\sigma'_x\sigma'_y}{S} & \frac{\nu}{1-2\nu} - \frac{\sigma'_y\sigma'_z}{S} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} - \frac{\sigma'_z{}^2}{S} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\sigma'_x\tau'_{xy}}{S} & -\frac{\sigma'_y\tau'_{xy}}{S} & -\frac{\sigma'_z\tau'_{xy}}{S} & \frac{1}{2} - \frac{\tau_{xy}^2}{S} & 0 & 0 \\ -\frac{\sigma'_x\tau'_{yz}}{S} & -\frac{\sigma'_y\tau'_{yz}}{S} & -\frac{\sigma'_z\tau'_{yz}}{S} & -\frac{\tau_{xy}\tau_{yz}}{S} & \frac{1}{2} - \frac{\tau_{yz}^2}{S} & 0 \\ -\frac{\sigma'_x\tau'_{xz}}{S} & -\frac{\sigma'_y\tau'_{xz}}{S} & -\frac{\sigma'_z\tau'_{xz}}{S} & -\frac{\tau_{xy}\tau_{xz}}{S} & -\frac{\tau_{yz}\tau_{xz}}{S} & \frac{1}{2} - \frac{\tau_{xz}^2}{S} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

式中: τ 为切应力; S 表达式见式(6).

$$S = \frac{2}{3} \sigma^{-2} \left(\frac{H'}{3\mu} + 1 \right). \quad (6)$$

应用塑性应力应变矩阵,可以计算各个单元在塑性状态中的刚度矩阵.对于系统的整体刚度矩阵,与弹性问题求法类似,只是对于达到屈服的元素需要应用塑性刚度矩阵,而对于没有屈服的元素则直接使用弹性刚度矩阵.当 S 趋于无穷大时,塑性刚度矩阵就会转变为弹性刚度矩阵.在对有限元模型加载过程中,利用弹塑性刚度矩阵可以求解出每个单元的应力与应变的变化,再根据Mises屈服条件判定单元的状态.

1.2 裂纹扩展速率及寿命计算

研究疲劳裂纹的扩展规律一般有两种途径:一种是通过实验测试,根据结果总结出表达裂纹扩展规律的经验公式;另一种是结合微观实验研究,提出裂纹扩展机理的假设模型,推导出裂纹扩展规律的理论公式.本文采用第一种方式,根据实验结果结合Paris模型进行疲劳裂纹扩展速率计算.研究疲劳裂纹扩展速率是为了获取裂纹扩展理论,建立裂纹扩展速率、裂纹扩展长度、名义应力强度和材料性质之间的关系.

疲劳裂纹扩展速率的研究通常包含两个方面:①选择合适的疲劳裂纹扩展模型;②计算疲劳裂纹扩展量.根据Paris公式,疲劳裂纹扩展量可以表示为式(7)与式(8).

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m, \quad (7)$$

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}. \quad (8)$$

式中: a 为裂纹扩展长度; N 为载荷循环次数; K 为应力强度因子; C 与 m 均为材料相关系数.经过对数化处理,可以把Paris公式中裂纹扩展速率 da/dN 与应力强度因子 ΔK 的幂指数函数关系转换成一次线性函数关系,如式(9)所示.在交变载荷作用下,裂纹缓慢扩展,记录每隔一定时间

的裂纹长度 a_i 及其对应的循环次数 N_i .通过数据处理得出 C 与 m 的值,确定Paris公式的具体参数.

$$\lg \left(\frac{da}{dN} \right) = \lg C + m \lg (\Delta K). \quad (9)$$

在已知载荷初始裂纹的情况下,计算裂纹扩展到临界长度 a_c 的循环数为裂纹疲劳寿命.本文中实验与有限元计算均采用循环载荷,所以 ΔK 一般可表述为

$$\Delta K = \Delta \sigma f(a). \quad (10)$$

式中: $\Delta \sigma$ 为名义应力强度; $f(a)$ 是裂纹长度函数,与零件的几何尺寸有关.裂纹长度由 a_i 扩展到 a_c ,直到裂纹失稳断裂的载荷循环数 N_p 为

$$N_p = \frac{1}{C} \int_{a_i}^{a_c} \frac{da}{(\Delta K)^m} = \frac{1}{C(\Delta \sigma)^m} \int_{a_i}^{a_c} f(a)^{-m} da. \quad (11)$$

式中: a_i 是预制裂纹长度; a_c 可根据失稳断裂的准则确定; $\Delta \sigma$ 按照载荷时间历史确定.利用裂纹扩展理论研究疲劳裂纹扩展速率不仅能够预测裂纹扩展的剩余寿命,也能为抗疲劳设计提供参考.

2 螺栓材料的疲劳断裂实验与仿真

2.1 螺栓材料的疲劳断裂实验

本文中螺栓采用25CrNiMo金属材料,材料硬度为197~235 HB.对该材料样件进行紧凑拉伸疲劳裂纹扩展实验,获得准确的裂纹扩展参数.对该材料的裂纹扩展特性与裂纹扩展寿命进行分析,以便选择合适的疲劳裂纹扩展模型.疲劳裂纹扩展实验按照GB/T6398—2017执行,实验采用MTS809.25材料动态测试系统,如图1所示.其主要性能参数:轴向位移 ± 75 mm;载荷 ± 250 kN;扭转角度 $\pm 50^\circ$;最大扭矩2 000 N·m;频率0.001~100 Hz.

为了满足平面应变和小范围屈服条件,紧凑拉

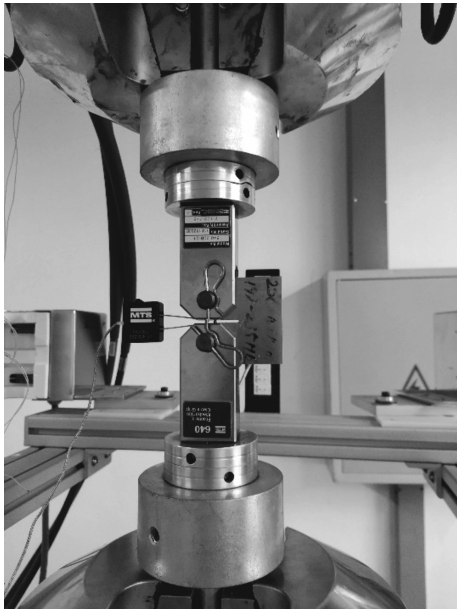


图 1 疲劳裂纹扩展实验测试系统

Fig. 1 Fatigue crack propagation experiment testing system

伸样件尺寸长度 $H=60.96$ mm, 宽度 $W=61.30$ mm, 厚度 $B=13.1$ mm. 在实验进行前需对试样进行预制裂纹处理, 预制裂纹后裂纹的总长度应包含两部分, 即机加工裂纹长度 $a_n=21$ mm 和预制裂纹长度 $a_p=2$ mm, 样件尺寸及预制裂纹如图 2 所示.

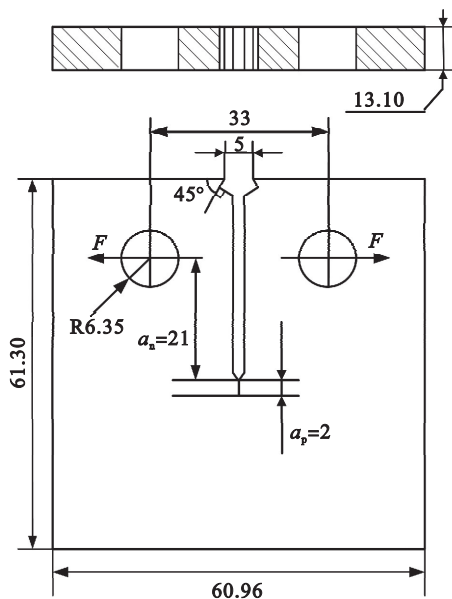


图 2 样件尺寸图(单位:mm)

Fig. 2 Sample size drawing(unit:mm)

设置实验最大载荷 $F_{max}=9$ kN, 载荷比值 $R=0.1$ 、载荷加载频率 $f=10$ Hz 进行裂纹扩展实验. 实验过程中收集了裂纹扩展长度 a 与载荷循环次数 N 等参数数据. 图 3 为实验结果, 运用 Paris 公

式对 $a-N$ 数据进行对数化处理, 计算出断裂参数 C 与 m 的值分别为 2.582×10^{-11} 与 4.199 , 因此 Paris 公式表述见式(12).

$$\frac{da}{dN} = 2.582 \times 10^{-11} \cdot (\Delta K)^{4.199} \quad (12)$$

由实验结果可知, 在恒幅载荷下, 裂纹扩展的能量由外部提供, 其中一部分用于裂纹扩展, 一部分用于增加部件的应变能; 另一方面, 随着裂纹扩展过程的持续进行, 裂纹扩展区内单位受力增加, 导致应力强度因子与能量释放率变大, 意味着不可恢复的消耗能变大, 使得产生新裂纹的面积变大, 裂纹扩展速率随之增大.

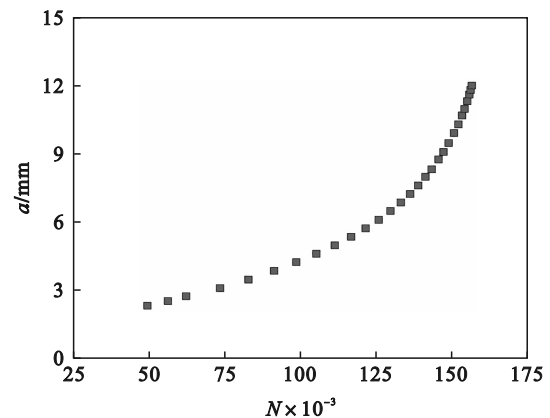


图 3 25CrNiMo 材料疲劳裂纹扩展实验结果

Fig. 3 Experimental results of fatigue crack growth of 25CrNiMo material

2.2 有限元仿真验证

通过有限元仿真计算与实验进行对比, 两者互为验证. 在两种结果高度吻合的基础上进行有限元计算, 不仅可以准确分析某一变量的影响, 而且还可以过滤掉外部环境所产生的误差, 如材料的影响, 加工缺陷的影响等. 有限元计算模型、边界条件及载荷与实验测试均保持一致. 材料参数如下: 弹性模量 $E=210$ GPa、泊松比 $\nu=0.3$ 、材料屈服强度 $\sigma_m=420$ MPa. 计算流程如图 4 所示.

根据有限元计算结果, 对裂纹稳定扩展阶段的相关参数进行处理. 图 5 为实验测试与有限元计算在裂纹稳定扩展阶段的对比结果. 结果表明: 有限元方法计算结果与实验测试具有较好的契合度, 且有限元计算精度较高, 两者总体误差在 3% 之内.

然而有限元计算结果是略低于实验测试结果的, 导致这个现象主要源于两个方面: ①材料的差异, 实验测试中的材料是真实材料, 从严格意义上来讲并不是各向同性的, 然而有限元计算中的材料是各向同性的; ②载荷差异, 在有限元

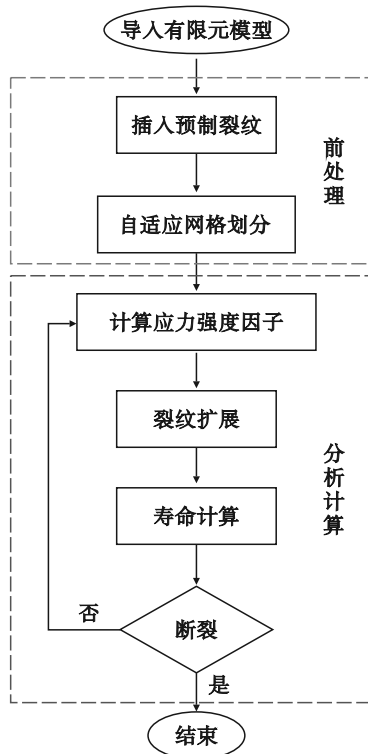


图 4 计算流程

Fig. 4 Calculation process

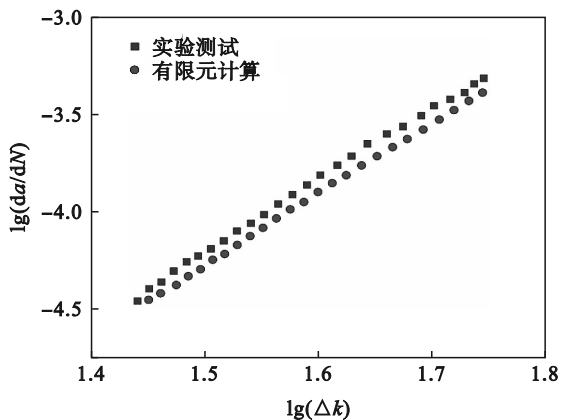


图 5 实验与仿真结果对比图

Fig. 5 Comparison of experimental and simulation results

计算中, 载荷幅是恒定的, 不会因为外界因素的波动而产生变化. 经过对采集载荷的统计发现: 在实验测试中, 由于实验误差和其他因素的影响, 载荷幅并不是恒定值, 而是具有一定的波动范围.

3 螺栓断裂失效寿命的定量分析

为了研究载荷对螺栓断裂失效寿命的影响, 需要对螺栓连接模型进行有限元分析, 有限元模型如图 6 所示. 螺栓为 M10 型号, 安全等级为 12.9, 螺栓预紧力为 64.9 kN, 屈服度为 90%. 横

向载荷为 2 kN, 应力比值为 0.1. 对于高性能螺栓, 在螺栓预紧力远大于横向载荷的情况下, 螺栓发生松动的概率远小于螺栓断裂的概率. 由于螺栓过渡区域的横截面积突变且有可能含有杂质或气泡, 所以该区域的应力集中现象较为严重, 更容易发生断裂. 因此, 研究螺栓在过渡区的断裂问题至关重要.

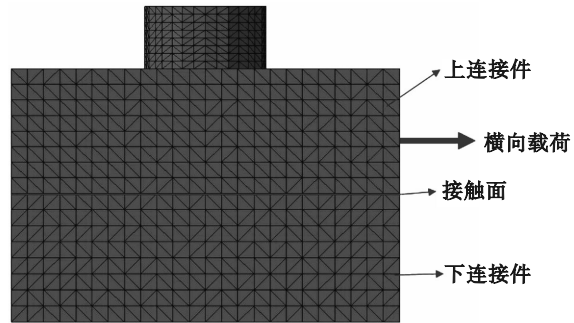


图 6 螺栓计算模型

Fig. 6 Bolt calculation model

为了更直观地进行螺栓断裂计算, 需要增加上下连接块的刚度, 消除因连接块刚度偏小产生的大变形而影响螺栓的受力状态. 针对装配体中螺栓裂纹的扩展计算, 首先要保证各接触面的刚度不失真. 其次在横向载荷作用下螺栓头部会发生偏移, 需要在受拉的一侧插入裂纹进行分析. 图 7 为螺栓在各种载荷下的应力状态云图, 在螺栓过渡区左侧的应力集中处插入微裂纹进行断裂分析.

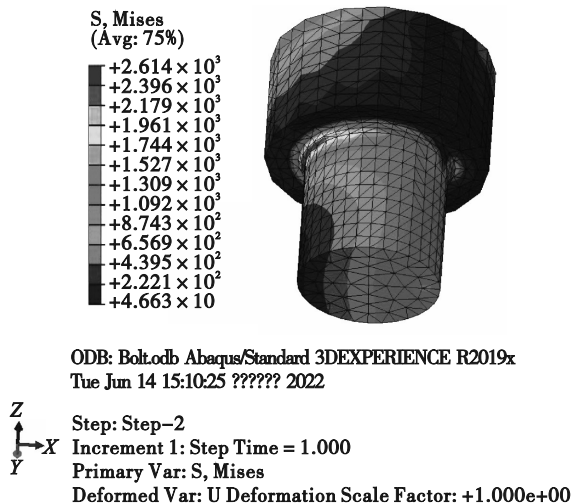


图 7 螺栓应力计算结果

Fig. 7 Stress calculation results of bolt

3.1 预紧力对螺栓断裂寿命的影响

为了定量分析螺栓预紧力对螺栓过渡区断裂的影响, 分别选取三种螺栓屈服状态: 60%, 75% 及 90% 螺栓屈服, 在 2 000 N 的横向振动载

荷下进行断裂分析. 图 8~图 10 为在横向载荷下, 不同预紧力对应力强度因子的影响, 图中虚线为横向载荷为 2 000 N 时单独对 I 型应力强度因子的影响. 图 8 为在三种不同预紧力下复合载荷(螺栓轴力与横向载荷的共同作用形式)对 I 型应力强度因子的影响. 图 9 为在三种屈服状态下, 仅有螺栓预紧力对 I 型应力强度因子的影响. 由图可知, 横向载荷与螺栓预紧力对裂纹尖端应力场均有较大的贡献. 最初两者处于相近水平, 随着裂纹长度的增加, 预紧力的贡献度也变大. 图 10 为在三种屈服状态下, 仅有螺栓预紧力对 III 型应力强度因子的影响. 预紧力越大, 则 III 型应力强度因子越大; 随着裂纹长度的增加, 不同预紧力对 III 型应力强度因子影响的差异性逐渐增大.

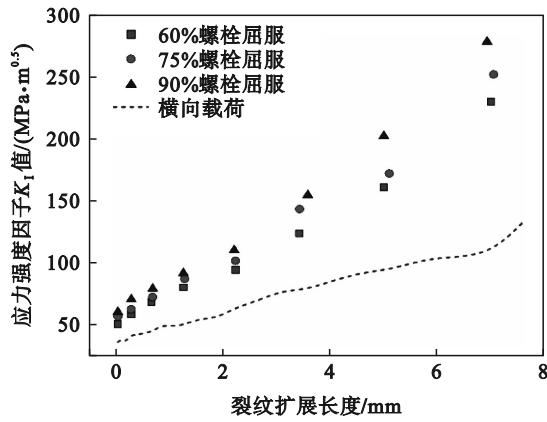


图 8 总载荷对 I 型应力强度因子的影响

Fig. 8 Effect of total load on type I stress intensity factor

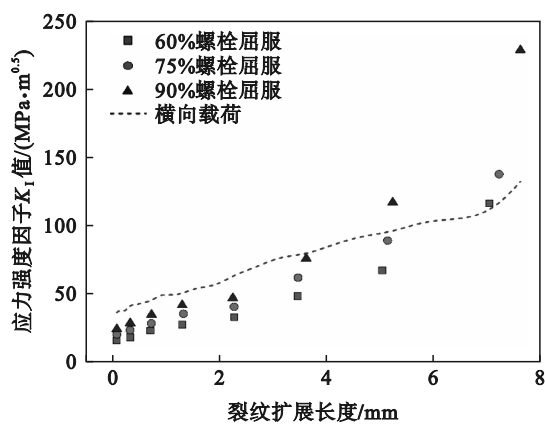


图 9 不同预紧力对 I 型应力强度因子的影响

Fig. 9 Effect of different preload forces on type I stress intensity factor

在横向载荷的作用下, 裂纹以复合裂纹的形式进行扩展, 裂纹断裂面在空间上表现为一张曲面. 从图 10 可知, 随着裂纹扩展长度的增加, 螺栓的连接面积逐渐减小, 螺栓力与横向载荷对裂

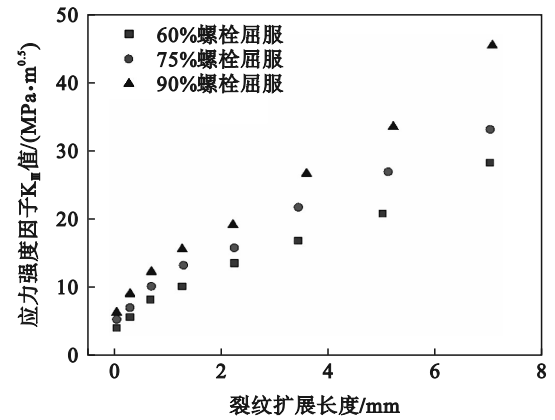


图 10 不同预紧力对 III 型应力强度因子的影响

Fig. 10 Effect of different preload forces on type III stress intensity factor

纹扩展的影响逐渐增大. 裂纹扩展初期, 不同的螺栓预紧力对螺栓裂纹的扩展影响差异较小; 随着裂纹扩展长度的增加, 不同预紧力对裂纹扩展影响的差异逐渐变大, 这种差异近似于幂函数形式变化. 同时, 这种差异会影响裂纹扩展速率, 最终反映在疲劳裂纹扩展寿命上, 进而严重影响螺栓的使用寿命.

在裂纹扩展过程中, 尽管预紧力裂纹尖端应力场的影响较大, 但是对螺栓裂纹扩展的寿命影响较小, 如图 11 所示. 在裂纹扩展过程中横向循环载荷为裂纹扩展驱动力, 使角裂纹逐渐演变成穿透型裂纹, 在整个裂纹扩展寿命周期内占绝对主导地位.

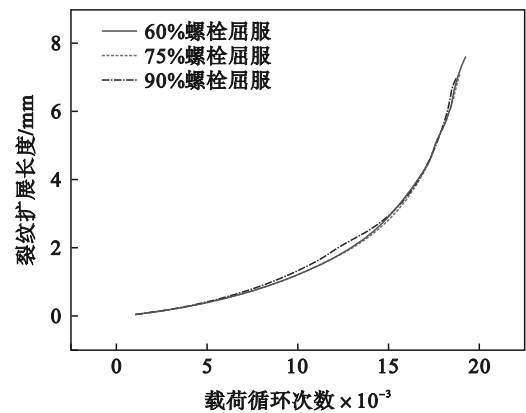


图 11 不同预紧力对疲劳寿命的影响

Fig. 11 Effect of different preload forces on fatigue life

3.2 横向载荷对螺栓断裂寿命的影响

横向载荷对螺栓断裂寿命的影响是通过改变载荷幅值实现的. 在 90% 螺栓屈服的状态下, 施加 1 400, 1 700 及 2 000 N 的横向循环载荷进行裂纹扩展计算. 如图 12 ~ 图 13 所示, 在 90% 螺栓屈服的状态下, 不同横向载荷对应力强度因子的影响, 图中虚线为 90% 螺栓屈服的状态下的螺栓

预紧力单独对 I 型应力强度因子的影响. 图 12 为在三种不同的横向载荷作用下, 复合载荷(螺栓轴力与横向载荷的共同作用形式)对 I 型应力强度因子的影响. 图 13 为仅在横向载荷作用下 I 型应力强度因子随裂纹的变化. 由图可知, 随着裂纹的增加, 不同的横向载荷对 I 型应力强度因子的影响近似为线性关系.

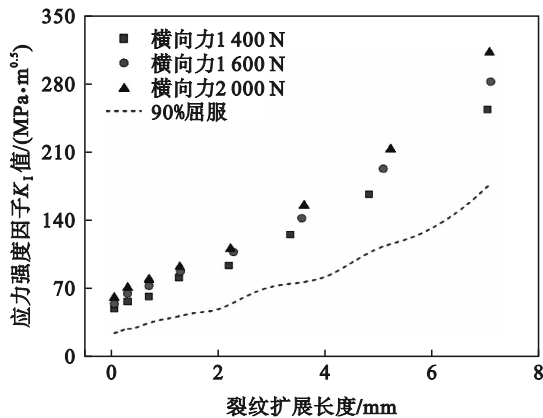


图 12 不同横向载荷对 I 型应力强度因子的影响

Fig. 12 Effect of different transverse loads on type I stress intensity factor

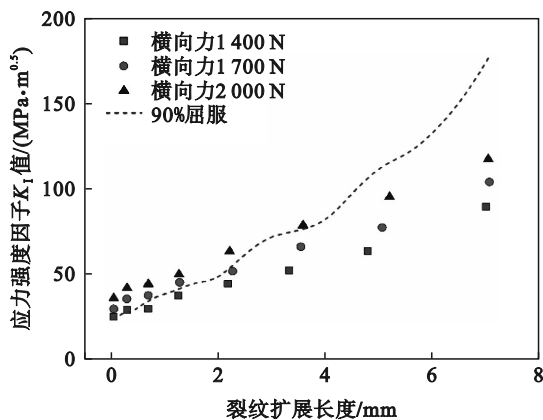


图 13 不同横向载荷对 I 型应力强度因子的影响

Fig. 13 Effect of different transverse loads on type I stress intensity factor

在螺栓断裂过程中, 裂纹扩展的方向与载荷形式有较大关系. 螺栓预紧力与裂纹断裂面近似于垂直, 因此预紧力对 I 型应力强度因子影响较大. 横向载荷的作用方向与断裂面近似于平行, 所以横向载荷对 III 型应力强度因子的贡献度最大. 然而横向载荷作为裂纹扩展的主要驱动力, 对裂纹的寿命影响较大, 且不同的横向载荷具有较大的差异, 如图 14 所示. 横向载荷为 1 400 N 时, 相对于横向载荷 2 000 N 裂纹寿命增加约 1.8 倍; 同时, 横向载荷为 1 700 N 时, 裂纹寿命增加约 0.6 倍.

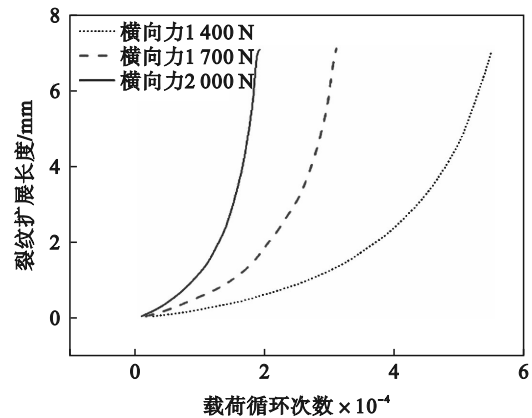


图 14 不同横向载荷对疲劳寿命的影响

Fig. 14 Effect of different transverse loads on fatigue life

4 结 论

1) 本文对 25CrNiMo 材料进行了疲劳裂纹扩展实验研究, 利用 Paris 裂纹扩展模型获得了该材料的断裂参数, 并使用有限元方法进行验证, 取得了较好的效果, 为螺栓疲劳断裂失效寿命的计算奠定了基础.

2) 与螺栓预紧力相比, 横向载荷在裂纹的扩展中具有主导作用. 横向循环载荷作为螺栓裂纹扩展的驱动力, 使角裂纹逐渐变成穿透型裂纹; 然而螺栓预紧力对裂纹尖端应力场的贡献与横向载荷处于相同水平.

3) 横向载荷对螺栓疲劳断裂寿命具有较大的影响. 不同的横向载荷对螺栓疲劳断裂寿命的影响差异较大, 与横向载荷为 2 000 N 时相比, 横向载荷为 1 400 N 时, 裂纹寿命增加约 1.8 倍; 横向载荷为 1 700 N 时, 裂纹寿命增加约 0.6 倍.

参考文献:

- [1] Yang L, Yang B, Yang G W, et al. Analysis of competitive failure life of bolt loosening and fatigue [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 129: 105697.
- [2] Jiang Y Y, Zhang M, Park T W, et al. An experimental study of self-loosening of bolted joints [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2004, 126(5): 925-931.
- [3] Jiang X J, Zhu Y S, Hong J, et al. Investigation into the loosening mechanism of bolt in curvic coupling subjected to transverse loading [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 32: 360-373.
- [4] Pai N G, Hess D P. Three - dimensional finite element analysis of threaded fastener loosening due to dynamic shear load [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2002, 9(4): 383-402.
- [5] 冯秀娟, 林醒山, 潘文, 等. 在悬挂吊车作用下螺栓球节点网架的疲劳性能 [J]. *建筑结构学报*, 1995, 16(4): 3-12. (Feng Xiu-juan, Lin Xing-shan, Pan Wen, et al. Fatigue behavior of space grid with bolt sphere joints under suspended crane loading [J]. *Journal of Building Structures*, 1995, 16(4): 3-12.)

