

文章编号: 1000-6893(2002)04-0346-03

螺纹要素对构件断裂力学特性影响的实验研究

尹 峰

(沈阳航空工业学院 研究生部, 辽宁 沈阳 110034)

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THREAD ON THE FRACTURE MECHANICS FEATURES OF STRUCTURE MEMBER

YIN Feng

(Department of Graduate Student, Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110034, China)

摘 要: 在模拟实验的基础上, 对飞机结构中常用的 30CrMnSiA 螺栓的应力强度因子 K 进行了研究。根据已有的螺纹紧固件的应力强度因子的研究成果, 利用类比的方法, 在充分考虑螺纹要素的前提下, 推导出了螺栓根部的应力强度因子 K 表达式, 并通过实验探讨了螺纹要素对构件断裂力学特性的影响。实验还表明, 实验值与理论分析符合的很好。

关键词: 螺栓; 表面裂纹; 应力强度因子; 疲劳试验; 断裂力学; 螺纹要素

中图分类号: V215.6 文献标识码: A

Abstract: The stress intensity factors (SIFs)-K are investigated for surface cracks in the thread ground of 30CrMnSiA bolts used in aircraft structure on the basis of the simulated experiments. According to the SIF research achievements obtained of the thread fastener, the equations for the SIF-K are developed by means of analogy for surface cracks in the thread ground of bolts under the condition of well-considered thread elements. Experiments are conducted to study the influence of the thread on fracture mechanics features of the structure member. The SIFs are compared between the analytical solution and experimental results. It is shown that good agreement is achieved between the experimental results and analytical solution evaluated using the SIFs' equation derived by the author.

Key words: bolt; surface crack; stress intensity factor; fatigue test; fracture mechanics; thread elements

1 螺纹紧固件应力强度因子 K 表达式的推导

对于在考虑螺纹结构参数的前提下如何求解螺纹根部的应力强度因子, 现行的一些方法都是以某个相类似的典型裂纹体作为螺栓模型, 进行一些修正后得出的, 其修正也仅针对螺纹部分结构参数, 用于工程实际还欠全面。如文献[1~4], 将螺纹视为有槽圆柱体, 其螺纹根部的应力强度因子的修正因子 F 仅针对裂纹深度 a 及圆柱体直径 d 等参数修正; 而文献[5, 6]等则根据螺栓的特征, 近似地把螺纹看成裂纹, 其螺纹根部的应力强度因子的修正因子 F 是针对螺纹张角 H 螺纹间相互干涉和螺纹根部曲率半径 Q 等螺纹结构参数进行了修正。由此看出, 螺纹要素对构件断裂力学特性的影响还没有完全统一的认识。

本文以 R. G. Forman 和 V. Shivap Kumar^[7] 推导出的光滑(无槽)圆柱体应力强度因子表达式为基础, 利用刘浏^[2] 已推导出的轴肩应力强度因

子 K 表达式结果, 由于螺栓与具有轴肩的圆柱体形状的近似性, 且当轴肩半径 $Q_{轴肩}$ 减小到一定程度时就变成了螺纹圆角半径 $Q_{螺纹}$, 由此采用类比的推导方法, 根据文献[1]的分析结论, 再考虑到应力集中、螺纹张角 H 螺纹间相互干涉和螺纹根部曲率半径 Q 等螺纹结构参数的综合影响, 参见

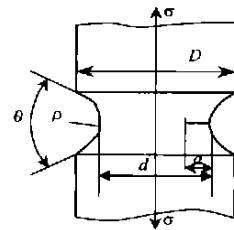


图 1 螺栓简化模型

Fig. 1 Bolt simplified model

图 1, 推导出螺栓根部应力强度因子 K 表达式为

$$K = 1.12F(a/d, d/D)R \sqrt{\rho} \quad (1)$$

式中: $F(a/d, d/D)$ 为修正因子; a 为螺栓螺纹根部裂纹深度; d 为螺纹内径; D 为螺纹外径; R 为名义应力。其中: a/d 项反映了螺栓装配连接使用时裂纹扩展的影响, d/D 项反映了螺栓制造的影响。

2 实验验证与讨论

实验在 PWS-10 型液压伺服疲劳试验机上完成, 采用同一应力比 $R = 0.1$ 和相同的频率 $f = 25\text{Hz}$ 。所有试件都不进行预制疲劳裂纹。裂纹的测量采用变载勾线法, 螺栓试件的材料为航空用 30CrMnSiA 高强度钢, 试件数量为 30 个, 螺栓螺纹参数为: 螺栓直径 $D = 12\text{mm}$, 螺距 $t = 1.75\text{mm}$, 螺栓内径 $d = 10.106\text{mm}$, 螺纹圆角半径 $r = 0.253\text{mm}$ 。实验加载最大载荷为 $p_{\max} = 17.64\text{kN}$, 最小载荷为 $p_{\min} = 1.764\text{kN}$ 。根据导出的螺栓表面裂纹 K 表达式 $K = 1.12F(a/d, d/D)R \overline{Pa}$, 有 $\$K = 1.12F(a/d, d/D)\$R \overline{Pa}$, 所以, 修正因子

$$F(a/d, d/D) = \frac{\$K}{1.12\$R \overline{Pa}} \quad (2)$$

由实验采用变载勾线法获取每个试件的有效数据点 (a_i, N_i) 点, 为避免随意性, 在实验数据结果的处理上, 采取每一个试件单独处理的方法。利用局部五点多项式拟合法求得螺栓试件表面裂纹扩展速率 da/dn , 再引用标准件常数 C 和 n , 由 Paris 公式即可求出 $\$K$ 实验数据表达式 $\$K = ((da/dn)/C)^{1/n}$ 代入式(2)即求出 $F(a/d, d/D)$ 。对应于每个 (a_i, N_i) 点, 都有 $F_i(a/d, d/D) = (\$K)_i / [1.12\$R \overline{Pa}_i]$, 将所得全部试件的 $F_i(a/d, d/D)$ 数据点绘制在坐标纸上, 如图 2 所示。从图 2 中可看出, $F_i(a/d, d/D)$ 数据点趋于线性分布, 为了方便起见, 用一直线方程来代替: $F(a/d, d/D) = 1.02 - 0.065a$, 如将此直线方程代入推导式 $K = 1.12F(a/d, d/D)R \overline{Pa}$ 得:

$$K = 1.12(1.02 - 0.065a)R \overline{Pa} \quad (3)$$

由此即可求出任一裂纹长度 a_i 时其对应的 K_i 值, 进而可方便计算螺栓连接件的疲劳强度、疲劳寿命。

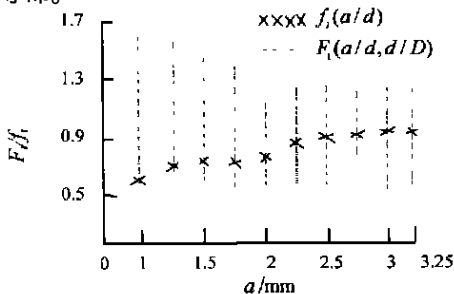


图 2 修正因子 F 与 f 分布示意图

Fig. 2 Diagram of correction factor F and f distribu-

由于修正因子 $F(a/d, d/D)$ 含有 $a/d, d/D$ 两项, 为了更加清楚地反映两项不同的影响, 假设 a/d 项与 d/D 项是线性独立的, 则有

$$F(a/d, d/D) = f(a/D)f(d/D) \quad (4)$$

则 $K = 1.12F(a/d, d/D)R \overline{Pa} = 1.12f(a/D)f(d/D)R \overline{Pa}$ 而式中 $1.12f(a/d)R \overline{Pa}$ 项即为光滑圆柱体应力强度因子公式, 即 Forman 公式: 令 $K_F = 1.12f(a/d)R \overline{Pa}$ 则推导公式

$$K = 1.12F(a/d, d/D)R \overline{Pa} = K_F f(d/D) \quad (5)$$

由式(4)、式(5)可分别求出修正因子 $f(a/D)$ 及 $f(d/D)$ 。对每一个实验数据点 (a_i, N_i) 都可求出对应的 $f_i(a/d), f_i(d/D)$ 。将所有的数据点 $f_i(a/d)$ 与 $f_i(d/D)$ 绘制在坐标纸上, 可看出其各自的影

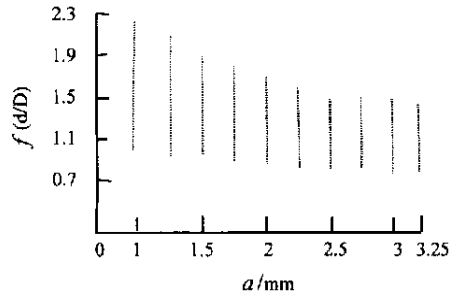


图 3 修正因子 $f(d/D)$ 分布示意图

Fig. 3 Diagram of correction factor $f(d/D)$ distribution

响效果, 见图 2、图 3。从图 2、图 3 中可看出, 不仅修正因子 $F(a/d, d/D)$ 趋于线性分布, 而且修正因子 $f(a/D)$ 及 $f(d/D)$ 都趋于线性分布, 说明 $F(a/d, d/D) = f(a/D)f(d/D)$ 假设是成立的, 为进一步研究修正因子 $f(a/D)$ 与 $f(d/D)$ 各自对螺栓应力强度因子的影响提供了方便。

为了检验推导式(1)的使用效果, 可从另一个角度进行验证, 按高等数学微分定义知 $da/dN = \$a/\N , 从 $a-N$ 实验曲线图上可求出任一点 i 的 $(\$a/\$N)_i$, 由于 $(\$a/\$N)_i = (a_{i+1} - a_{i-1}) / (N_{i+1} - N_{i-1})$, 将 $(\$a/\$N)_i$ 值作为 $(da/dN)_i$ 的近似值, 又将 N_i 对应 a_i 的值代入 $F(a/d, d/D)$ 直线方程, 求出 $F_i(a/d, d/D)$, 再代回 $\$K = 1.12F(a/d, d/D)\$R \overline{Pa}$, 求 $(\$K)_i$, 将从实验曲线 $a-N$ 得到对应的所有 $\{(\$a/\$N)_i, (\$K)_i\}$ 数据对与理论值求出的 $\{(da/dN)_i, (\$K)_i\}$ 数据对一起绘制在同一坐标下, 将理论值与实验值作比较, 如图 4 所示。从图 4 中可看出理论值与实际值符合得较好, 只是在裂纹扩展后期误差偏大, 这是由于推导公

式使用范围是裂纹稳定扩展区内(0.5~3.7mm),超出了这个范围,裂纹尖端塑性区增大,超出了线弹性范围,使 Paris 公式失效的结果。

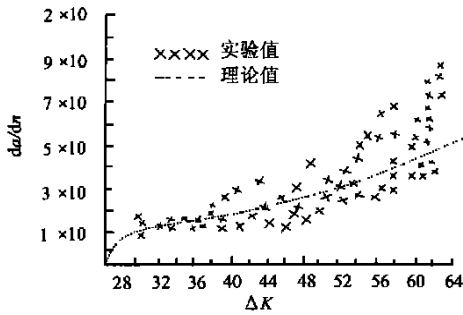


图4 da/dn - ΔK 关系图

Fig. 4 Diagram of da/dn vs ΔK relation

3 结论

(1)从实验数据看,各个螺栓试件的起裂时间相差很大,这说明由于螺栓原材料的制造及螺栓试件加工过程中形成的表面缺陷对裂纹扩展及疲劳强度的影响很大。

(2)从图3中看出,螺栓内外径之比修正因子 $f(d/D)$ 随裂纹扩展呈下降趋势,当裂纹扩展至一定深度时,这种影响消失,这正说明了理论应力集中的影响,即对表面小裂纹影响最大,而对深裂纹无影响,这也与 J. Toribio^[8] 的研究结论相一致。

(3)本文所推导出的螺栓的应力强度因子表达式 K 较好地描述了螺纹结构参数对螺纹紧固件断裂力学特性的影响,图5中的实验结果也表明导出公式更接近于实际工况,是比较合理的,因而具有一定的工程使用价值。

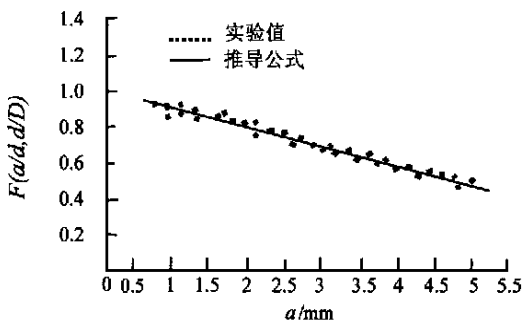


图5 计算结果与实验结果的比较

Fig. 5 Results calculated comparing with the experimented ones

参考文献

- [1] Si E. Stress intensity factors for edge cracks in round bars [J]. Engineer Fracture Mechanics, 1992, 37(4): 805-812.
- [2] 刘浏. 圆柱体轴肩处表面应力强度因子估算 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 1992.
(Liu L. Evaluation of stress-intensity factors for surface crack in round bars shoulder [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1992.)
- [3] 陈振中. 圆柱体表面裂纹在应力集中区的行为 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 1991.
(Chen Z Z. Behavior of circumferential surface cracks in stress concentration zone [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1991.)
- [4] James L A, Mills W J. Review and synthesis of stress intensity factor solutions applicable to cracks [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1988, 30(5): 641-654.
- [5] 董晓源, 王天宰. 螺栓螺纹根部应力强度因子的计算 [J]. 力学学报, 1992, 24(5): 574-583.
(Dong X Y, Wang T Z. Calculation of stress intensity factor in the thread ground of bolts [J]. Acta Mechanica Sinica, 1992, 24(5): 574-583.)
- [6] 肖纪美. 化学介质与断裂过程 [M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1980.
(Xiao J M. Chemical mediator and fracture [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1980.)
- [7] Forman R G, Shivkumar V. Growth behavior of surface cracks in the circumferential plane of solid and hollow cylinders [J]. Fracture Mech, 1986, 17: 59-74.
- [8] Toribio J. Stress-intensity factor solutions for a cracked bolt loaded by a nut [J]. International Journal of Fracture, 1992, 53: 367-385.

作者简介:



尹峰(1965-)男,辽宁省朝阳市人,沈阳航空工业学院副教授,工学硕士,1994年毕业于南京航空航天大学固体力学专业,现任研究生部副主任。先后获航空总公司科学技术进步一等奖一项,沈阳市二等奖一项,沈阳航空工业学院优秀科研项目一项,主研及参研省(部)级科研课题4项,主持国家级教改课题一项,参编教材2本。近期在国内学术刊物及学术会议发表论文10余篇。目前主要研究方向为断裂力学耐久性分析等。

(责任编辑:李铁柏)