

文章编号: 1000-0887(2001) 06_0572_07

K 型管状接头随机疲劳强度和裂纹 扩展规律的研究*

聂国华¹, 张若京¹, 刘人怀²

(1. 同济大学 固体力学教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 暨南大学 应用力学研究所, 广州 510632)

(本刊编委刘人怀来稿)

摘要: 分析了 K 型焊接管状接头受轴向和面外弯曲载荷作用下的随机疲劳问题。通过将焊趾处的表面裂纹的初始尺寸和材料常数作为随机变量处理, 并计及焊缝的影响, 共产生 500 个随机样本, 最终得到裂纹扩展寿命和裂纹形状变化影响的统计计算结果, 并与有关实验数据比较, 给予了回归分析。同时, 也考察了裂纹扩展规律。

关键词: K 型管状接头; 随机疲劳; 表面裂纹; 扩展寿命; 断裂力学

中图分类号: O346.1 **文献标识码:** A

引 言

具有一定厚度的圆柱壳(圆管)通过焊接组成的管状接头(多通管)是工程中一类广泛使用的结构形式。造成许多重大事故的主要原因之一在于管状接头的疲劳强度的不足。对该类结构进行疲劳分析无疑具有重要意义。

管接头中的裂纹产生和扩展是一个非常复杂的过程。简单形状管状接头的实验结果表明, 裂纹通常出现在联接部位的焊趾处^{[1]~[4]}。首先, 一些地方出现小缺陷, 然后小裂纹汇合产生较大裂纹并最终产生具有最大容许尺寸的主裂纹。对于贯穿裂纹, Paris 和 Erdogan^[5]提出了一个与实验数据相吻合的裂纹扩展率和应力强度因子范围之间的幂律关系, 即所谓的 Paris 定律(关系式)。基于这个关系, 对于表面裂纹一对耦合方程也被进一步提出来了^{[6]~[8]}。这些疲劳裂纹损伤模型已用于焊接管状接头疲劳强度的分析和寿命预测中^[9]。在根据目前大多数设计规范的疲劳分析中, 所有参数的获取除了应用保守的表征疲劳强度的 S-N 曲线外, 都是以期望值的方式进行的。然而, 一些因素, 诸如裂纹分布方式、材料特性和动载响应行为等本质上都具有随机性, 在实际分析中应从概率角度对它们进行处理。基于此, 作者等已提出了 T 型管状接头在轴向、面内和面外弯曲载荷作用下的疲劳强度模型和方法^{[10]~[12]}。模型考虑了上述几个因素对结构疲劳强度的影响。

作为进一步工作, 本文具体处理了 K 型管接头(两根支杆分别与弦杆焊接成 90° 和 45°)

* 收稿日期: 2000_01_28; 修订日期: 2000_11_21

基金项目: 上海市重点学科资助项目

作者简介: 聂国华(1964—), 男, 江西南昌人, 教授, 博士, 博士生导师, 已发表论文 40 余篇、出版专著一部。

(如图 1 所示)的随机疲劳问题。通过将位于弦杆一侧焊趾处的表面裂纹尺寸 a_0 、 c_0 (深度和表面方向) 和材料常数 C 作为随机变量, 它们分别服从 Weibull 分布和对数正态分布, 并计及焊缝的影响, 产生 500 个随机样本, 针对每一个样本则采用相应的确定性分析方法, 从而最终得到疲劳裂纹扩展寿命和裂纹形状变化的统计分析结果。其中扩展寿命与英国焊接研究所的实验数据进行了回归分析和比较。

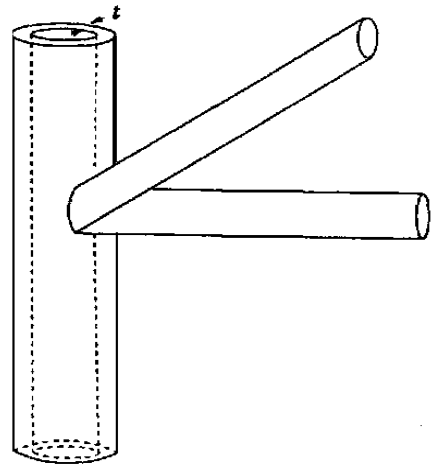


图 1 K型管状接头示意图

1 裂纹扩展 Paris 定律和循环应力强度因子

结构的疲劳寿命一般分三个部分: 第一部分为可见裂纹被检测的寿命, 第二部分为裂纹扩展寿命, 第三部分为结构破坏(或疲劳实验中止)寿命。对于焊接结构, 其疲劳寿命主要是裂纹扩展寿命, 寿命值为结构整体寿命的主要部分。管接头的疲劳裂纹一般视为位于焊趾处主杆(弦杆)一侧的表面裂纹, 在循环载荷作用下沿表面和深度(厚度)方向扩展, 直至贯穿厚度。可应用 Paris 定律描述裂纹扩展过程

$$\frac{da}{dN} = C_d (\Delta K_d)^{m_d}, \tag{1a}$$

$$\frac{dc}{dN} = C_s (\Delta K_s)^{m_s}, \tag{1b}$$

式中, C_d 、 m_d 和 C_s 、 m_s 分别为表面裂纹在厚度和表面方向的材料常数。 ΔK_d 和 ΔK_s 为相应的应力强度因子范围, 它们一般可表示为

$$\Delta K_d = [M_{km(d)} Y_{m(d)} \Delta \sigma_m + M_{kb(d)} Y_{b(d)} \Delta \sigma_b] \sqrt{\pi a}, \tag{2a}$$

$$\Delta K_s = [M_{km(s)} Y_{m(s)} \Delta \sigma_m + M_{kb(s)} Y_{b(s)} \Delta \sigma_b] \sqrt{\pi a}, \tag{2b}$$

这里, $\Delta \sigma_m$ 、 $\Delta \sigma_b$ 分别为薄膜应力范围和弯曲应力范围, M_{km} 、 M_{kb} 为基于焊缝影响的相应的放大因子。为了客观反映管状接头内部尤其是焊趾处真实的应力状态, $\Delta \sigma_m$ 、 $\Delta \sigma_b$ 用“热点”应力范围来表征, 从而也计及了结构整体几何形状的影响。“热点”应力范围 $\Delta \sigma$ 可根据实验中用微应变仪测出的应变范围通过应力-应变关系 $\Delta \sigma = E \Delta \varepsilon$ (E 为材料的弹性模量) 而确定。进一步, 利用三维有限元分析拟合的结果, 应力强度因子范围可表达如下

$$\Delta K_d = \left[M_{km(d)} \Delta \sigma_m + M_{kb(d)} H \left(\frac{\pi}{2} \right) \Delta \sigma_b \right] \sqrt{\pi a} / QF \left[\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{\pi}{2} \right], \tag{3a}$$

$$\Delta K_s = \left[M_{km(s)} \Delta \sigma_m + M_{kb(s)} H \left(0 \right) \Delta \sigma_b \right] \sqrt{\pi a} / QF \left[\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, 0 \right], \tag{3b}$$

式中, a 、 c 、 t 分别为表面裂纹深度和表面方向的尺寸及弦杆厚度, $H(\dots)$ 和 $F(\dots)$ 的表达式见文[7]。放大因子采用下面公式^[13, 14]

$$\begin{cases} M_{km(d)} = 1 + (K_{tm} - 1) \exp \left[-35 (K_{tm} - 1) \frac{a}{t} \right], \\ M_{kb(d)} = 1 + (K_{tb} - 1) \exp \left[-35 (K_{tb} - 1) \frac{a}{t} \right], \\ M_{km(s)} = K_{tm}, \\ M_{kb(s)} = K_{tb}. \end{cases} \tag{4a, b, c, d}$$

从上面式子可知, 当 a/t 较小时(小裂纹) $M_{km(d)} \rightarrow K_{tm}$, $M_{kb(d)} \rightarrow K_{tb}$; 当 a/t 变大时(如 $a/t = 0.4$), $M_{km(d)} \rightarrow 1$, $M_{kb(d)} \rightarrow 1$ 即表明此时在裂纹深度方向焊缝的影响可忽略。

2 随机变量与随机数的产生

对于服从三参数为 α (形状参数), β (尺度参数) 和 δ (平移参数) 的 Weibull 分布的随机变量, 如初始裂纹尺寸 a_0, c_0 , 它们的随机数, 计为 y , 可由下面式子确定

$$y = \delta + (-\beta \ln x)^{1/\alpha}, \quad (5)$$

其中, x 为 0 到 1 之间均匀分布的随机数。

对于服从均值为 μ , 方差为 σ^2 的正态分布的随机变量, 如 $\ln C$ (\ln 为以 e 为底的对数), 它的随机数, 计为 z , 可从下面公式产生

$$z = \mu + \sigma \left[\frac{\sum_{i=1}^n x_i - \frac{n}{2}}{\sqrt{\frac{n}{12}}} \right] \sqrt{\frac{n}{12}}, \quad (6a)$$

式中, n 为足够大, 通常取 $n = 12$ 。这样, 上式变成

$$z = \mu + \sigma \left[\frac{\sum_{i=1}^{12} x_i - 6}{6} \right], \quad (6b)$$

这里, x_i 意义同 x 。

3 表面裂纹扩展寿命的数值计算方法

对于初始裂纹尺寸 a_0, c_0 和材料常数 C 的每个随机样本, 应用公式(1) 进行迭代计算, 最终可获得裂纹贯穿的疲劳裂纹扩展寿命 N 。本文具体选用深度方向尺寸的扩展量 Δa 作为迭代参量, 迭代过程如下^{[11], [12]}:

1) 给定迭代初值 Δa_1 , 通过式(1a) 计算得到扩展寿命 $N_1 = \Delta N_1$, 再利用式(1b) 获得裂纹表面方向的扩展量 Δc_1 。此时, 裂纹在两个方向的尺寸变为 $a_1 = a_0 + \Delta a_1$, $c_1 = c_0 + \Delta c_1$;

2) 给定迭代值 Δa_2 , 重复步骤 1), 得到

$$a_2 = a_1 + \Delta a_2 = a_0 + \Delta a_1 + \Delta a_2,$$

$$c_2 = c_1 + \Delta c_2 = c_0 + \Delta c_1 + \Delta c_2,$$

$$N_2 = N_1 + \Delta N_2 = \Delta N_1 + \Delta N_2;$$

3) 重复上述步骤直至裂纹贯穿, 即

$$a_M = a_0 + \sum_{i=1}^M \Delta a_i = t.$$

此时表面方向的裂纹长:

$$c_M = c_0 + \sum_{i=1}^M \Delta c_i.$$

疲劳裂纹扩展总寿命为:

$$N = \sum_{i=1}^M \Delta N_i.$$

为了保证数值计算的精确度, 每次选取迭代值 Δa_i 时, 都使裂纹扩展前后的应力强度因子范围(相对误差) 控制在 1% 以内。

4 实例计算结果与分析

数值计算采用的结构尺寸选用英国焊接研究所的实验模型^[15, 16], 有关数据见表 1。材料

的弹性模量 $E = 0.21 \times 10^6 \text{ N/mm}^2$, 疲劳扩展材料常数 $m = 3.1$, $\ln C$ 服从正态分布, 即 $\ln C \sim N(\mu, \sigma^2)$. 其中, $\mu = -29.84$, $\sigma^2 = 0.55$. a_0 服从三参数 Weibull 分布, 即 $a_0 \sim \text{Weibull}(\alpha, \beta, \delta)$, 这里 $\alpha = 2.101$, $\beta = 0.024$, $\delta = 0.00002$, $a_0/c_0 = 0.15^{[12]}$. 迭代初值选取 $\Delta a_1 = 0.0005 \text{ mm}$.

所有计算皆在 HP_UX 系统的工作站上完成.

疲劳寿命试验值与计算值列于表 2 中. 结果表明, 计算值接近试验值, 且数值要小. 将相同尺寸的结构试件 4、5、6 的扩展寿命试验值和样本均值给予线性回归, 回归结果为

$$\lg N_p = 14.5802 - 3.55513 \lg \Delta \sigma, \tag{7a}$$

或

$$\lg N_p = -4.34097 - 3.55513 \lg \Delta \varepsilon; \tag{7b}$$

和

$$\lg \overline{N}_r = 13.162 - 3.10003 \lg \Delta \sigma, \tag{8a}$$

或

$$\lg \overline{N}_r = -3.33705 - 3.10003 \lg \Delta \varepsilon. \tag{8b}$$

上面结果显示, 试验值与计算值吻合较好.

用数值计算还进一步考察了初始裂纹形状对疲劳裂纹扩展寿命的影响. 以试件 1 为例, 各种初始裂纹形状 (a_0/c_0 变化值) 对应的扩展寿命样本均值见表 3. 计算表明, 寿命之间的相对误差不超过 10%. 这说明, 初始裂纹形状的改变并不显著影响裂纹的扩展寿命.

表 1 K 型管接头有关数据

试件号	弦杆直径 d/mm	弦杆厚度 t/mm	热点应变范围 $\Delta \varepsilon$ ($\times 10^{-6}$)	载荷形式	备注
1	457	16	600	轴向	两支管未完全重叠焊在弦杆上
2	457	16	780	轴向	同上
3	168	6.3	930	面外弯曲	同上
4	168	6.3	1110	面外弯曲	两支管重叠焊在弦杆上
5	168	6.3	1190	面外弯曲	同上
6	168	6.3	1300	面外弯曲	同上

表 2 疲劳寿命实验值与计算值

试件号	总寿命试验值 N	扩展寿命试验值 $N_p = 66\%N$	扩展寿命随机样本均值 N_r
1	4.9×10^6	3.2340×10^6	3.18998×10^6
2	1.2×10^6	0.7920×10^6	1.41438×10^6
3	1.2×10^7	0.7920×10^7	0.115014×10^7
4	2.3×10^6	0.1518×10^7	0.664583×10^6
5	1.6×10^6	0.1056×10^7	0.535617×10^6
6	1.3×10^6	0.8580×10^6	0.407215×10^6

表 3 初始裂纹形状对应的寿命均值

a_0/c_0	0.15	0.20	0.30	0.50	0.60	0.80	1.00
N_r ($\times 10^6$)	3.189 98	3.239 21	3.307 18	3.389 48	3.417 81	3.461 52	3.494 72

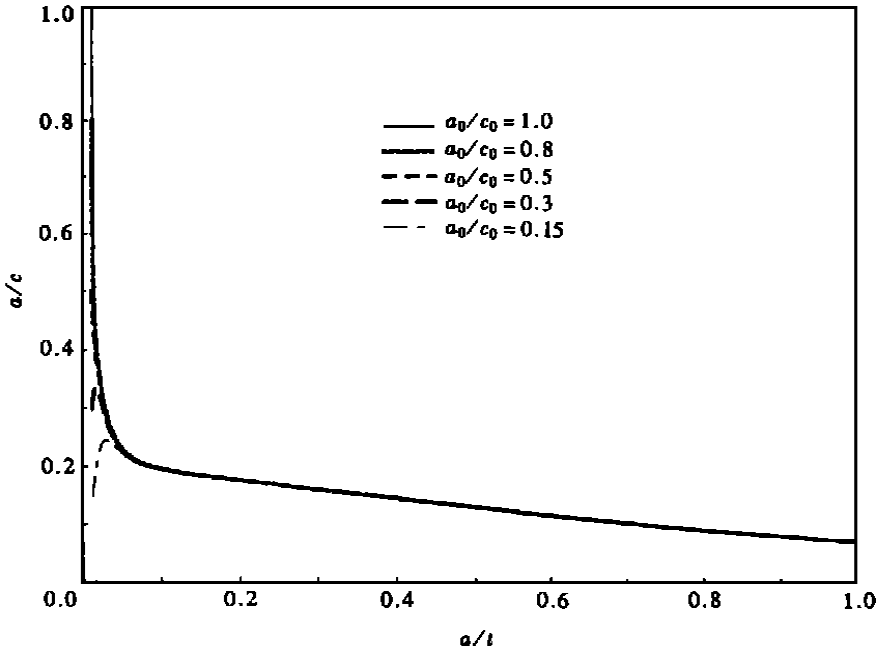


图 2 轴向疲劳载荷作用下 K 型管状接头表面裂纹扩展规律

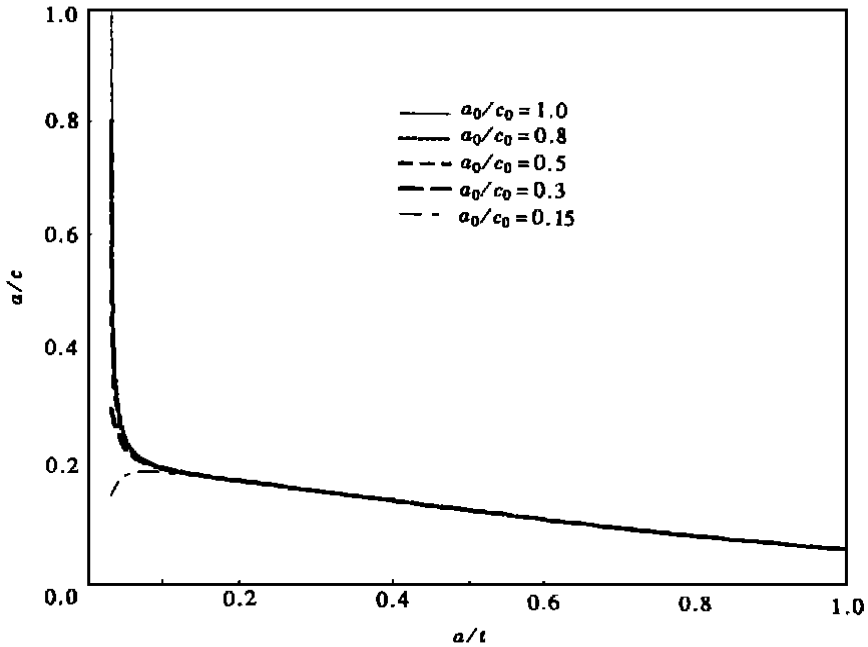


图 3 面外弯曲疲劳载荷作用下 K 型管状接头表面裂纹扩展规律

轴向和面外弯曲疲劳载荷作用下表面裂纹的扩展规律见图 2 和图 3 所示。结果显示, 裂纹扩展最终都趋于一个稳定的形状(裂纹贯穿时)。对于轴向载荷 $a/c \rightarrow 0.075$; 对于面外弯曲载荷, $a/c \rightarrow 0.074$ 。

5 总 结

1. 通过将裂纹初始尺寸及材料常数作为随机变量, 采用适当的分布和产生相应的随机样本, 应用 Paris 定律能够对管状接头的随机疲劳问题进行有效的分析。本研究使用的方法和计算步骤适用于各种形状的管接头结构的随机疲劳(寿命预测)分析。
2. 焊趾处表面裂纹的初始形状对疲劳裂纹扩展寿命的影响不大。
3. 表面裂纹贯穿管接头弦杆时, 裂纹形状是稳定的, 与初始裂纹形状无关。

[参 考 文 献]

- [1] Dover W D, Holdbrook S J, Hibberd R D, et al. Fatigue crack growth in T joints, out_of_plane bending[A]. Proc OTC[C]. Paper 3252, Houston: Texas, 1978.
- [2] Dover W D, Chaudhury G K, Dharmavasan S. Experimental and finite element comparisons of local stresses and compliance in tubular welded T joints[A]. Proc Int Conf on Steel in Marine Structure [C]. Paper No. 4. 3, Paris, 1981.
- [3] Gibstein M B. Fatigue strength of welded tubular joints tested at det norske veritas laboratories[A]. Proc Int Conf on Steel in Marine Structures [C]. Paper No 8. 4, Paris, 1981.
- [4] Clayton A M. Assessment of UKOSRP crack growth data to investigate the remaining life of offshore structures after inspection[R]. UKAEA, Report No ND_R_852(R), HSMO, London, 1982.
- [5] Paris P, Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws[J]. Journal of Basic Engineering, Trans ASME, 1963, **85**: 528—534.
- [6] Aamodt B. Application of finite element method to problems in linear and nonlinear fracture mechanics[D]. Dr_Ing thesis. Trondheim, Norway: The Norwegian Institute of Technology, 1974.
- [7] Newman J C, Raju I S. An empirical stress_intensity factor equation for the surface crack[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1981, **15**(1_2): 185—192.
- [8] Shang_Xian W. Shape change of surface crack during fatigue growth[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, **22**(5): 897—913.
- [9] Delft D R V, Dijkstra O D, Snijder H H. The calculation of fatigue crack growth in welded tubular joints using fracture mechanics[A]. Proc OTC [C]. Paper 5352, Houston: Texas, 1986.
- [10] 张延宏, 柳春图, 梅红. 管节点疲劳寿命估算的统计分析方法[J]. 海洋工程, 1990, **8**(4): 15—23.
- [11] Nie G H, Weng Z Y. A random numerical simulation analysis of fatigue strength of tubular joints in offshore platforms[A]. Proc of Int Conf on Comp Meth in Struct and Geotech Engng [C]. Hong Kong: The University of Hong Kong, 1994, 1226—1231.
- [12] 聂国华, 翁智远, 刘人怀. 用概率断裂力学方法预测管状接头的疲劳寿命[J]. 应用数学和力学, 1994, **15**(11): 963—969.
- [13] Lawrence F V, Ho N J, Mazumdar P K. Predicting the fatigue resistance of welds[J]. Ann Rev Mater Sci, 1981, **11**: 401—425.
- [14] Dijkstra O D, Snijder H H, Overbeeke J L, et al. Prediction of fatigue crack growth for welded joints using stress intensity factors determined by FEM calculations[A]. Steel in Marine Structures [C]. Amsterdam: The Netherlands, 1987, 885—899.

- [15] Wylde J G, McDonald A. The influence of joint dimensions on the fatigue strength of welded tubular joints [A]. Proceedings of the Second International Conference on Behavior of Off_Shore Structures [C]. London: England, 1979, 535—550.
- [16] McDonald A, Wylde J G. Experimental Results of Fatigue Tests on Tubular Welded Joints, Fatigue in Off_Shore Structural Steels [M]. London, England: Thomas Telford Ltd, 1981, 89—100.

An Investigation on Random Fatigue Strength of K_Type Tubular Joints and Crack Propagation Behaviors

NIE Guo_hua¹, ZHANG Ruo_jing¹, LIU Ren_huai²

(1. Key Laboratory of Solid Mechanics of MOE, Tongji University, Shanghai 200092, P R China;

2. Institute of Applied Mechanics, Jinan University, Guangzhou 510632, P R China)

Abstract: Random fatigue of welded K_type tubular joints subjected to axial or out_of_plane bending load is analyzed. By considering the sizes of initial surface cracks and material constants as random variables with some probabilistic distributions, incorporating the effect of the weld, five hundred random samples are generated. Statistical computational results of life of crack propagation and effect of change of crack shape are finally obtained and compared with experimental data available based on a regression analysis. Meanwhile, crack propagation behaviors are also investigated.

Key words: K_type tubular joints; random fatigue; surface crack; life of propagation; fracture mechanics