

文章编号: 1007-4708(2007)05-0643-05

海洋平台 K 型管节点的疲劳裂纹扩展分析 I: 试验测试

张宝峰¹, 曲淑英^{*1}, 邵永波¹, 杨春秋²

(1. 烟台大学 土木工程学院, 烟台 264005; 2. 大连理工大学 工程力学系, 大连 116023)

摘要: 对承受疲劳载荷的海洋平台 K 型管节点首先进行了静力测试, 确定了沿着焊缝的热应力区的应力分布及热应力区最大应力点的位置, 从而判断裂纹产生的位置; 然后通过专用测试设备提供循环疲劳载荷, 用 ACPD (Alternating Current Potential Drop, 即交流电流势能落差法) 技术检测裂纹的产生和增长过程, 得到裂纹最深点, 用 S-N 曲线估算其疲劳寿命。对已有裂纹的 K 型管节点, 用应力强度因子估计其剩余寿命。同时用测试的结果验证了 S-N 的准确性和可靠性。

关键词: K 型管道节点; ACPD 技术; 裂纹增长; 疲劳寿命; S-N 曲线; 应力强度因子

中图分类号: TU398 **文献标识码:** A

1 引言

K 型管节点广泛应用于海洋平台中, 作为支撑结构, 这些节点常年承受由海浪和风所造成的循环载荷。因此, 疲劳破坏是经常发生的一种现象。由于表面裂纹常出现在焊缝处, 而此处的曲率不连续和由于焊接造成的初始缺陷导致焊缝处应力集中。表面裂纹的产生和扩展将造成结构在强度上的减弱。一旦裂纹穿透管壁, 不但发生渗漏现象, 更将导致结构的失效, 而要修补水下管是非常昂贵的, 因此, 对于 K 型管节点的疲劳分析是非常重要的。

估计 K 型管节点的疲劳寿命最常用的方法是依照 S-N 曲线^[1,2]。当 K 型节点承受疲劳载荷时, 热点应力区的应力范围可以通过有限元分析或试验测试得到, 节点的疲劳寿命就可以从 S-N 曲线上预估到。但是, 这种方法只适用于无裂纹的 K 型管节点。如果一个 K 型节点有初始裂纹, S-N 曲线就不能用来估计此节点的剩余寿命, 必须在精确计算应力强度因子的基础上, 估算有裂纹节点的剩余寿命。尽管应力强度因子可以通过有限元分析或实验测得, 但数值结果的精确度依赖于对焊缝

和表面裂纹的精确模拟, 且必须依靠试验结果的验证。而要通过试验验证数值结果的精确性, 就必须准确地测出疲劳试验过程中裂纹的产生和增长过程。

工程中, K 型节点承受的是非常复杂的组合载荷。但是在组合载荷中, 通常一种或者两种载荷是占主要地位的。对于 K 型节点来说, 轴向载荷和平面内弯曲载荷是两种最重要的载荷。因此本文测试了一个大型 K 型管状节点承受轴向力和平面内弯曲的疲劳实验。在实验过程中, 裂纹形状的发展通过 ACPD 技术^[3]跟踪, 并在疲劳试验前, 用静力试验去确定沿着焊缝的应力分布以及最大应力点的位置。测试结果验证了 S-N 曲线预测 K 节点寿命的精确性和可靠性, 且得到了裂纹扩展过程中各阶段与 Paris 公式相关的应力强度因子值。

2 K 节点试件和测试装置

实验中使用的 K 型管节点试件的基本尺寸如图 1 所示。试件选用 API 规范^[4]的 5L B 级结构钢圆管。

图 2 所示是疲劳实验装置。该装置既能对节点在三个相互垂直方向上施加静力载荷, 也可施加循环动载研究疲劳现象。这三个方向分别施加轴向力, 平面内弯曲力和平面外弯曲力。K 节点主管的两端固定在墙壁上, 一个支管的端部也固定在墙壁上, 另外一个支管的端部用来施加循环疲劳载荷。

收稿日期: 2005-10-08; 修改稿收到日期: 2006-02-09.

基金项目: 国家自然科学基金(10142001); 山东省自然科学基金(Y2003L01)资助项目.

作者简介: 张宝峰(1981-), 男, 硕士;

曲淑英^{*}(1963-), 女, 教授(E-mail: qsy_qu @163.com).

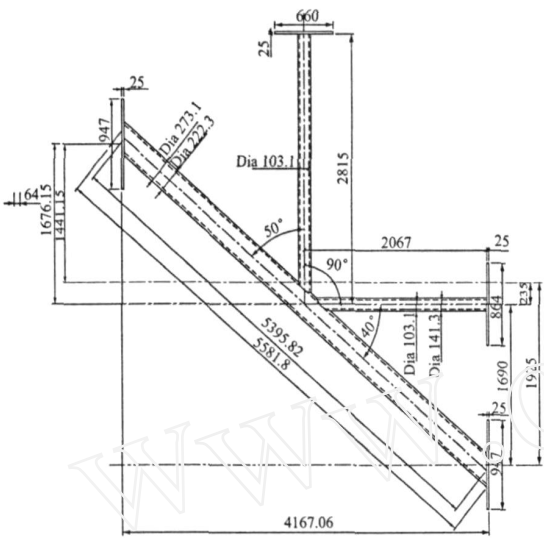


图 1 K 节点试件的尺寸图
Fig. 1 Configurations of the K-joint specimen

为了消除主管端部条件对于试验结果的影响,取主管的长度大于其直径的 6 倍。

3 静力测试

节点上疲劳裂纹通常是沿着焊缝应力最大点处产生的。因此,疲劳试验前,先进行静力测试观察 K 型管节点承受基本载荷或复合载荷情况下沿焊缝的应力分布,从而确定节点上最大应力点的位置。实验用的主管直径与厚度之比较小($2 = D/T = 12.8$)。这个比例稍微偏离正常范围($15 < 2 < 64$),但这样的工程比例($2 = 10.16 \sim 14.12$)也已被采用^[5]。

为了测量沿焊缝的应力分布,在整个主管和支管上沿着焊缝每隔 15° 贴上应变片,如图 3 所示,每一个点处都有一对应变片用来测量垂直于焊缝的

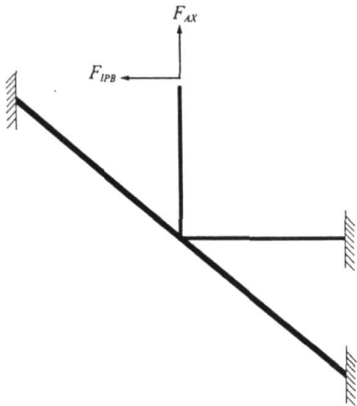


图 4 K 节点受力示意图
Fig. 4 Loading conditions of the K-joint specimen

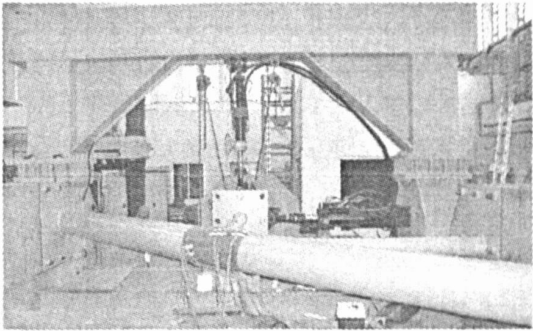


图 2 试验装置
Fig. 2 Test rig

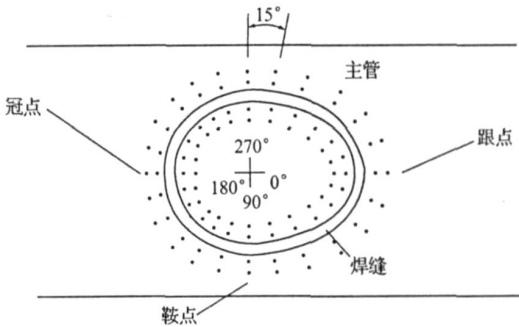


图 3 应变片粘贴位置
Fig. 3 Locations of the strain gauges

应变分量。这两片应变片的分配遵循 CIDECT^[2] 的线性外推插值区。焊缝处的应变通过测量的应变线性外推而得。实验发现裂纹在以下几个主要位置处产生和扩展。冠点 (crown), 鞍点 (saddle) 和跟点 (heel)。

静力测试中 K 节点试件的受力情况如图 4 所示,支管端部所加轴向力 $F_{AX} = 150 \text{ kN}$,平面内弯曲力 $F_{IPB} = 13.5 \text{ kN}$ (受力支管长度为 2580 mm)。沿着焊缝的应力分布如图 5 所示。从图 5 中可以看出,最大应力点位于冠点,最大应力值是 258 MPa。

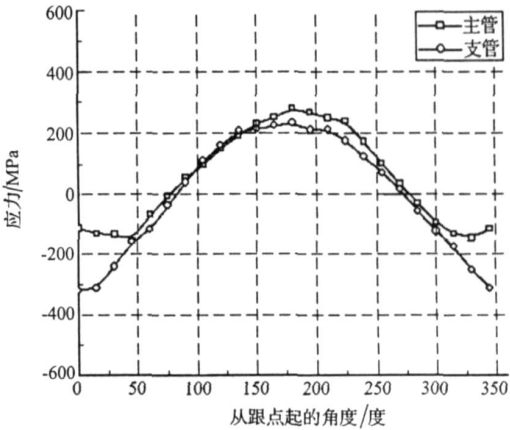


图 5 沿着焊缝的应力分布
Fig. 5 Stress distribution along the weld

4 疲劳测试

疲劳试验试件承受的是等幅值正弦载荷,频率 0.25 Hz,轴向力的最大和最小值分别是 150 kN 和 0 N,平面内弯曲力的最大和最小值分别是 13.5 kN 和 0 N。ACPD 技术是一种理想的检测管节点疲劳裂纹形状发展过程的技术^[3,6~8]。检测试件节点的疲劳裂纹发展过程时,用 5 kHz 的高频交流电,当交流电通过导体时,电流在表面内很浅的层内流动,高渗透性和导电性的材料具有较小的表层深度,如在 5 kHz 的频率下,电磁性钢仅有 0.1 mm 量级的表层深度。图 6 所示 V_R 是参考电势差, V_C 是穿越裂纹电势差, R 是参考的探针间距, c 是穿越裂纹的探针间距, d_1 是某一探针处的裂纹深度,是表层深度。假设表面有一个如图 6 所示裂纹,交流电将沿着该裂纹面流下并沿着另外一个裂纹面流上。假设金属表面和裂纹表面的电势梯度是线性的,穿越裂纹的电势差和裂纹深度有如下关系:

$$V_R = R, \quad V_C = (c + 2d_1) \quad (1,2)$$

从式(1)和式(2)中,可以得到裂纹深度:

$$d_1 = (R/2)(V_C/V_R - c/R) \quad (3)$$

如果图 6 所示的 R 与 c 相同,那么裂纹深度可由下式提供:

$$d_1 = (R/2)(V_C/V_R - 1.0) \quad (4)$$

式中 R 是探针间距。

因而,只有参考探针间距 R 是需要用来确定裂纹深度 d_1 的。在实验中 R 是比较容易精确测量得到的,因为参考探针间距之间是个光滑的平面,它不含有焊缝。

由于式(4)只是适用于一个无限大平板内的一个无限长的裂纹。对于管节点中的半椭圆型裂纹,采用一个修正因子去修正裂纹深度。假设这个修正因子是 M_x ,那么管节点中真正裂纹深度 d_2 ,可以表示为

$$d_2 = M_x d_1 \quad (5)$$

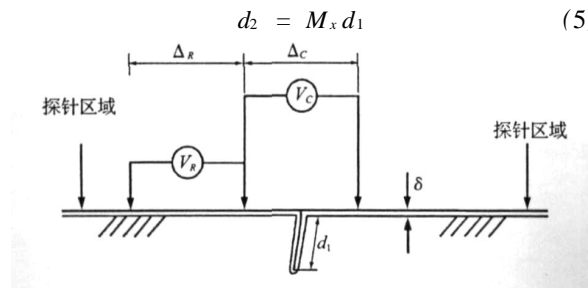


图 6 ACPD 符号
Fig. 6 ACPD notations

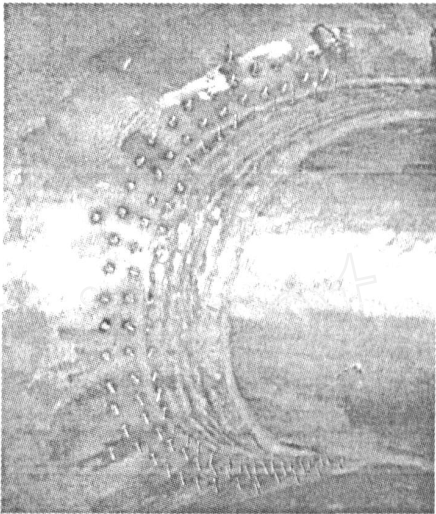


图 7 探针布置图
Fig. 7 View of probe sitting

修正因子通常是一个复杂的函数,但是管节点中的疲劳裂纹保持一个比较低的深度/长度比例,通常 $d_1/2c \approx 0.1$ 。文献[9]研究表明这种裂纹的修正因子小于 1.05。式(5)可以直接应用于管节点的裂纹计算。

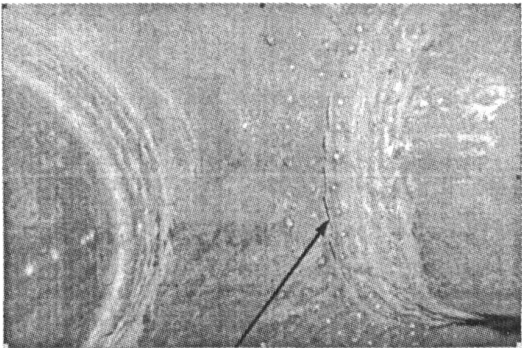
ACPD 测量裂纹增长过程的探针布置如图 7 所示,用一个带有 128 个信道的多路器,称为 U10 的裂纹微测量计与这些探针相连。一个 ACPD 点需要两个信道,一个记录穿越裂纹间距的读数,另外一个记录参考间距的读数。共有 64 个固定点,等间距分布在热应力区。在疲劳测试中,一次最多有四个域可以同时使用,本次测试中,每个域有 8 个 ACPD 点,共使用 32 个 ACPD 点,裂纹形状的增长过程用 Flair 软件记录。当裂纹恰好穿透主管的厚度时,测试自动停止。

5 测试结果分析

从 ACPD 读数中发现,疲劳裂纹是从冠点开始产生且裂纹的扩展基本上是对称的,图 8 显示了试验后在冠点处的疲劳裂纹。

图 9 所示是疲劳试验后表面裂纹的形状。从中可以看出,裂纹已经穿透管道壁,且裂纹的形状基本是一个对称的半椭圆形的。

ACPD 记录的疲劳裂纹增长过程如图 10 所示,0 mm 处是冠点,裂纹基本上对称于冠点。且最深点位置基本上也位于冠点处。需要提出的是,在表面裂纹萌生阶段,在冠点附近产生了几条表面裂纹,随着表面裂纹的扩展,它们汇合成一整条表面裂纹。图 10



冠点处的表面裂纹

图 8 试件中的裂纹位置图
Fig. 8 View of surface crack in the specimen

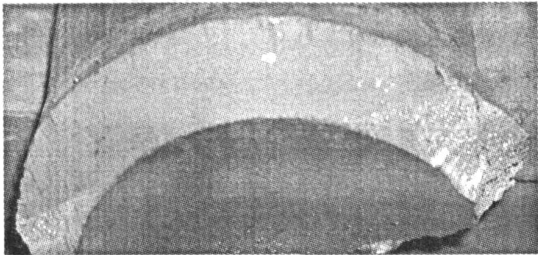


图 9 裂纹形状试图
Fig. 9 View of surface crack

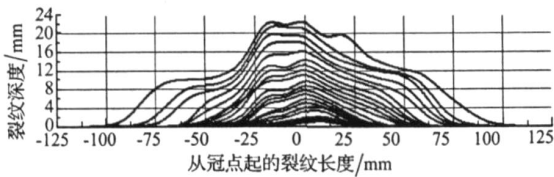


图 10 用 ACPD 测量得到的裂纹形状增长图
Fig. 10 Development of crack shape measured by ACPD

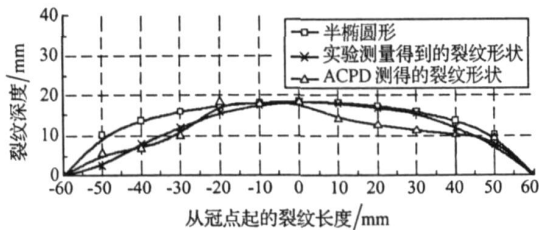


图 11 不同裂纹形状的比较
Fig. 11 Comparison of different crack shapes

记录的是汇合后的这条表面裂纹的扩展过程。

图 11 所示是对不同的裂纹形状进行的比较。从中可以看出,ACPD 在测量裂纹形状上有较高的精确度,尤其是在测量最深点的深度时比较准确。但在某些点,ACPD 所测量的数据有偏差;实际测量的裂纹形状与半椭圆形相比较,在裂纹的两个尖端处差别较大。这导致用半椭圆裂纹模拟 K 型管节点裂纹的数值分析中,在两个端部的数值解精度低一些。

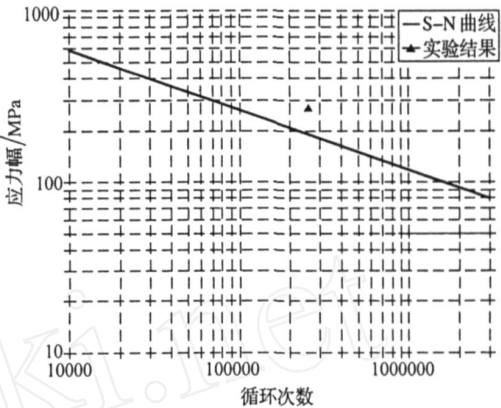


图 12 试验数据与 S-N 曲线的比较
Fig. 12 Comparison between experimental data and result from S-N curve

图 12 显示了试验测试的 K 节点试件的疲劳寿命与 S-N 曲线结果的比较。从中可以看出,S-N 曲线可以提供安全的寿命估计,但结果偏于保守。

6 应力强度因子的实验结果

应力强度因子的试验结果可以由如下的 Paris 式得到:

$$\frac{da}{dN} = C(K)^m \tag{6}$$

式中 da/dN 是裂纹增长速率,可以通过图 10 的实验数据得到。 a 是裂纹深度, N 是循环次数, K 是应力强度因子幅, C 和 m 是材料常数, $C = 1.45 \times 10^{-11} \text{ (m/cycle) (MPa} \cdot \text{m}^{1/2})^{-2.75}$, $m = 2.75$ 。

通过式(6)得到的裂纹增长过程裂纹最深点的应力强度因子如图 13 所示,图中横坐标 a/T 为无量纲化裂纹深度, T 为主管壁厚度。从中可以看出,随着裂纹深度的增大,应力强度因子的数值也逐渐增大,裂纹发展的也就越快。

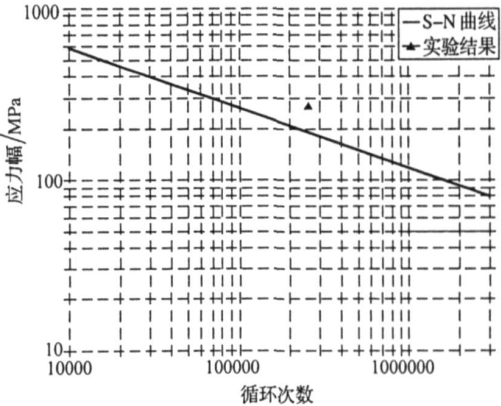


图 13 裂纹最深点处应力强度因子的试验结果
Fig. 13 Experimental SIF results at the deepest point of the crack

7 结 论

(1) 采用 ACPD 技术对一个大型的 K 形管节点承受循环载荷的疲劳行为进行了测试,得到了在不同阶段表面裂纹的形状,且裂纹形状与实际裂纹形状相吻合。

(2) 对于承受轴向和平面内弯曲的复合载荷作用 K 形管节点,裂纹在冠点处产生,并以对称形状向两边沿着焊缝扩展,在裂纹扩展过程中,最深点始终位于冠点处。

(3) S-N 曲线可以安全地估算 K 形管状节点的疲劳寿命,但结果偏于保守。试验得到的应力强度因子表明随着裂纹的增长,应力强度因子稳定地增加。

(4) 由于只提供了一个节点的试验结果,在与 S-N 曲线比较时存在很大的分散性,可通过更多的 K 节点疲劳试验,验证 S-N 曲线评价节点疲劳寿命的可靠性。

参考文献(References):

- [1] International Institute of Welding. *Recommended Fatigue Design Procedure for Hollow Section Joints: Part I- Hot Spot Stress Method for Nodal Joints. IIW Doc. XV-1035-99, XV-E-99-251 XIII-1804-99* [M]. Lisbon, Portugal: International Institute of Welding, 1999.
- [2] ZHAO X L, HERION S, PACKER J A, et al. *Design Guide for Circular and Rectangular Hollow Sections Joints Under Fatigue Loading* [M]. C. DECT, Köln: TUV-Verlag, 2000.
- [3] DOVER W D, DHARMAVASAN S, BRENNAN S P. *Fatigue Crack Growth in Offshore Structures* [M]. London, UK: EMAS (Engineering Materials Advisory Services) Ltd., Chameleon Press, 1995.
- [4] American Petroleum Institute, *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms* [S]. American Petroleum Institute, Washington, DC, API, 1993.
- [5] SCHUMACHER A, NUSSBAUMER A, HIRT M A. Fatigue behaviour of welded circular hollow section (CHS) joints in bridges[J]. *Tubular Structures IX. Swets and Zeitlinger, Lisse*, 2001:291-297.
- [6] Technical software consultant Ltd. (TSC). *ACFM crack microgauge model U10* [M]. Milton Keynes, UK, 1991.
- [7] Technical software consultant Ltd. (TSC). *Flair user's manual-software version 1.9* [M]. Milton Keynes, UK, 1998.
- [8] HUANG Z W. Stress intensity factors of cracked steel tubular T and Y-joints under complex loads[D]. School of civil and environmental engineering, Nanyang Technological University, Singapore, 2002.
- [9] KAM J C P, TOPP D A, DOVER W D. Fracture mechanics modelling and structural integrity of welded tubular joints in fatigue[A]. *Proceedings of 6th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium*[C]. ASME. 3, 1987:395-402.

Fatigue crack propagation analysis of tubular K-joints

I: experimental test

ZHANG Bao-feng¹, QU Shu-ying¹, SHAO Yong-bo¹, YANG Chun-qiu²

(1. School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China;

2. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: A large full-scale tubular K-joint specimen under cyclic load was tested in this study. Before fatigue test, static test was carried out to determine the hot spot stress (HSS) distribution along the weld toe of the K-joint specimen and locate the position of the peak HSS. Thus, the position of the surface crack initiation is determined. During the fatigue test, a specially designed test rig was used to provide constant amplitude cyclic load. The technique called Alternating current potential drop (ACPD) technique was used to monitor the crack initiation and development in the fatigue test. From the test results, the development of the deepest point of the surface crack can be obtained and shapes of the surface crack during different stages were obtained. In the prediction of the fatigue life of a tubular K-joint, S-N curve is frequently used. For cracked tubular K-joints, stress intensity factors (SIFs) are used to estimate the remaining life of such joints. In this study, through comparing with the S-N curves, the fatigue test results were used to verify the accuracy and reliability of S-N curve method. From the test results, the SIFs of the K-joint specimen are also obtained for using Paris' equation.

Key words: Tubular K-joint; ACPD technique; crack development; fatigue life; S-N curve; SIF (Stress Intensity Factor)