

海洋平台用钢的焊接疲劳性能分析* FATIGUE ANALYSIS OF WELDED JOINTS IN OFFSHORE STRUCTURE

黎之奇** 柳春图 崔民子 阚常珍

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

LI Zhiqi LIU Chuntu CUI Mingzi KAN Changzhen

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

摘要 对平台用钢的焊接疲劳性能进行了研究, 采用威布尔分布对试验数据进行了分析。给出各种可靠度下的 $R-S-N$ 曲线估算式, 并与对数正态分布处理的结果进行了比较, 对海上石油钻井平台的安全性评估具有一定的意义。

关键词 焊接接头 疲劳寿命

中图分类号 TG405 TC407

Abstract The experimental investigation of fatigue behaviour of welded joints in offshore structure are described. Life estimate formulas for $R-S-N$ curve are derived based on the Weibull distribution, and the results are compared with the result based on logarithmic normal distribution. It is possible to predict the safety and reliability of offshore structure.

Key words welded joints, fatigue life

1 引言

海上石油钻井平台在设计和制造中大量采用焊接连接, 由于在结构上的特殊性, 焊接结构在交变应力的作用下易发生疲劳断裂而导致失效, 因此, 焊接接头的疲劳性能研究对平台的安全性评估具有重要的意义。目前对钻井平台焊接接头的疲劳强度设计及寿命估算仍是基于由试验得到的 $S-N$ 曲线, 并已形成了一些规范, 如美国焊接学会提出的 AWS-X 曲线和美国石油研究所提出的 API-X 曲线。许多研究者对这方面的工作做了努力, 考虑了板的厚度及焊缝形状的影响^[1,2], 对焊缝热点应力的计算进行修正^[5] 以及环境和加载历史的影响等^[3,4]。焊接结构的疲劳寿命受工艺、连接方式及工作环境等方面的影响较大, 由于实验周期长, 考虑了可靠度的 $R-S-N$ 曲线并未真正建立, 目前这方面的工作仍在进一步完善中。

试样形式为 T 型, 其尺寸如图 1 所示。中间部分为 A514 高强度钢, 两侧为 EH36 中强度钢, 采用 LB-52 型焊条进行焊接, 焊缝形式为 V 形, 表 1 为这三种材料的化学成份。

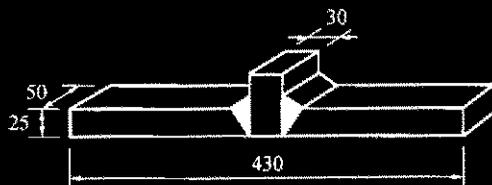


图 1 试样形状及尺寸

Fig.1 Shape and size of specimen

EH36、A514 钢及焊缝金属的力学性能如下

EH36	$\sigma_b \geq 490$ MPa	$\sigma_s \geq 357$ MPa	$EL \geq 22\%$
A514	$\sigma_b \geq 770$ MPa	$\sigma_s \geq 700$ MPa	$EL \geq 13\%$
焊缝金属	$\sigma_b = 560$ MPa	$\sigma_s = 490$ MPa	$EL = 32\%$

试样在制备过程中先用较大的钢板进行焊接, 然后在远离焊缝两端的位置按所需尺寸切割出试样, 以消除焊缝的起始端和结束端可能带来的边缘效应。

2 试样及加载方式

2.1 试样形式及尺寸

表 1 EH36 中强度钢、A514 高强度钢及 LB-52 焊条的化学成分

Tab.1 Chemical composition of EH36, A514 steels and LB-52 welding rod

	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	B	No	Ni	Cu	V
EH36 钢	≥ 0.10	≥ 0.60	≤ 0.035	≤ 0.04	≥ 0.15	≥ 0.40	≥ 0.40	≥ 0.0012	0.00	0.00	0.00	0.00
A514 钢	≤ 0.16	≥ 0.96	≤ 0.04	≤ 0.04	≥ 0.10	≤ 0.25	0.00	0.00	≤ 0.08	≤ 0.40	≤ 0.35	≤ 0.10
LB-52 焊条	0.08	0.96	0.011	0.007	0.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

* 19980518 收到初稿, 19980719 收到修改稿。

** 黎之奇, 男, 1963 年 2 月生, 汉族。力学研究所助理研究员, 硕士。从事疲劳强度的实验研究。

2.2 加载方式

大量的试验已表明,焊接构件的疲劳破坏开始于焊趾处,即母材与焊缝金属的结合部。为保证两侧焊缝的受力状态相同,加载方式采用四点弯曲方式,以使试样在焊缝附近的一段区域内保持为纯弯曲,保证了两侧焊缝在焊趾处的最大应力完全相同。

试样在焊接后的冷却过程中,由于两侧焊缝收缩的不均匀性,将导致两侧的 EH36 钢板不再在同一平面上。为避免在加载过程中因载荷分配不均而引起的附加弯曲及扭曲,在实验过程中采用了特制的自适应式夹具,使载荷能够均匀地分布在一条直线上(图 2)。

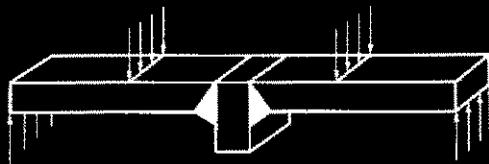


图 2 试样的加载方式

Fig. 2 Loading method of specimen

2.3 应力比的影响

钻井平台在实际工作中各个接头的静载和动载互不相同,因此其应力比也各不相同。目前的研究结果已表明,当应力幅 σ_a 不变时,应力比的增加将加快材料的损伤,使结构疲劳寿命降低。因此,在试验中将应力比取为平台实际工作应力比的上限,得出的结果对寿命估算将偏于安全。

3 试验数据的处理

可靠性分析在疲劳设计中具有重要的意义,目前使用较多的为对数正态分布和威布尔分布。对数正态分布由于较为方便而得到广泛应用,但也存在着一些不足,一是试验数据并非完全是正态分布,采用对数正态分布时得到的结果将是近似的;二是对数正态分布密度函数以水平轴为渐近线,在可靠性取得较高时对寿命的估算结果将偏于保守。威布尔分布由于有三个参数,得出的分布函数与试验结果符合得更好一些,同时威布尔分布存在一个起始寿命,因此在要求高可靠性时对寿命的估算更接近实际情况。

威布尔分布密度函数为

$$f(N) = \frac{b}{N_a - N_0} \left(\frac{N - N_0}{N_a - N_0} \right)^{b-1} \exp \left[- \left(\frac{N - N_0}{N_a - N_0} \right)^b \right] \quad (1)$$

式中 N, N_0 ——试样寿命,起始寿命

N_a ——特征寿命,其对应的寿命分布函数值为 63.2%

b ——形状参数或威布尔斜率

威布尔分布函数为

$$F(N) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{N - N_0}{N_a - N_0} \right)^b \right] \quad (2)$$

对式(2)进行适当变换后可得 $y = -2.303bx + c$ (3)

其中 $y = -\ln \ln [1 - F(N)]^{-1}$ $x = \lg(N - N_0)$

$$c = 2.303b \lg(N_a - N_0)$$

式(3)表明,在威布尔坐标纸上,威布尔分布曲线成为直线,其斜率为 b 。试样的存活率按下式计算

$$p = 1 - F(N) = 1 - [i/(n+1)] \quad (4)$$

式中 i 为将试验结果依小到大排列的序数, n 为子样容量。如果适当选择 N_0 的值,在威布尔坐标纸上可使试验数据落在一条直线的近旁,则试验结果服从威布尔分布。

威布尔分布的可靠度函数为^[6]

$$R = \exp \left[- \left(\frac{N - N_0}{N_a - N_0} \right)^{1/b} \right] \quad (5)$$

对任意可靠度下的疲劳寿命估算可由下式给出

$$N_R = N_0 + (N_a - N_0) [\ln(1/R)]^{1/b} \quad (6)$$

4 试验结果

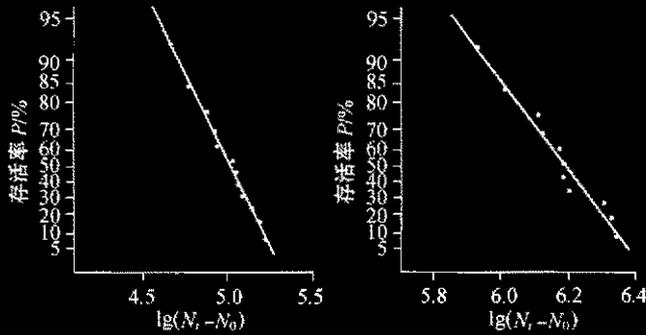
在 $\sigma_a - N$ 双对数坐标系中,钢材的 $S-N$ 曲线在中等寿命区基本上是一条直线,因此试验中采用两个应力水平。低周疲劳的循环数控制在 2×10^5 左右,高周疲劳的循环数控制在 $2 \times 10^6 \sim 3 \times 10^6$ 左右,低周疲劳的应力幅取 $\sigma_a = 161.28$ MPa,高周疲劳的应力幅取 $\sigma_a = 73.92$ MPa,应力比均为 0.3。

表 2 为低周疲劳的 12 个试件和高周疲劳的 11 个试件的试验结果,按疲劳寿命由小到大排列,存活率按式(4)计算,其结果也列在表 2 中,起始寿命 N_0 的值经调整在低周疲劳取 $N_0 = 0.93 \times 10^5$,高周疲劳取 $N_0 = 0.9 \times 10^6$ 。图 3 为低周疲劳和高周疲劳的试验值在威布尔坐标纸上的位置,其分布已很靠近一直线,直线的方程采用最小二乘法拟合后得出的威布尔分布参数及按式(6)得出的可靠度 $R = 0.5$ 的中值寿命如表 3。

表 2 疲劳试验结果

Tab. 2 Data of fatigue experiment

序数	低周疲劳			高周疲劳		
	存活率 P/%	疲劳寿命 $N \times 10^{-5}$ /cycle	$\lg(N_i - N_0)$	存活率 P/%	疲劳寿命 $N \times 10^{-6}$ /cycle	$\lg(N_i - N_0)$
1	92.31	1.400	4.672	91.67	1.760	5.934
2	84.62	1.527	4.776	83.33	1.930	6.013
3	76.92	1.695	4.884	75.00	2.180	6.107
4	69.23	1.791	4.935	66.67	2.230	6.124
5	61.54	1.810	4.944	58.33	2.390	6.173
6	53.85	2.012	5.034	50.00	2.430	6.185
7	46.15	2.071	5.057	41.67	2.430	6.185
8	38.46	2.088	5.064	33.33	2.500	6.204
9	30.77	2.152	5.087	25.00	2.920	6.305
10	23.08	2.330	5.146	16.67	3.020	6.326
11	15.38	2.502	5.196	8.330	3.100	6.342
12	7.69	2.556	5.211			



(a)低周疲劳 (b)高周疲劳
(a)Low-cycle fatigue performance (b)High-cycle fatigue performance

图3 疲劳数据的概率分析

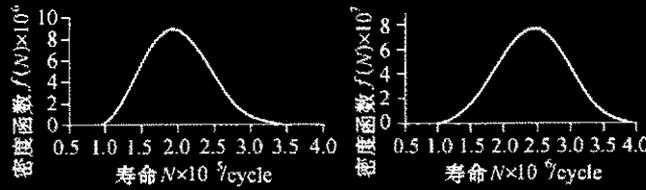
Fig.3 Statistical analysis of fatigue data

表3 威布尔参数及中值寿命

Tab.3 Parameters of Weibull distribution and median life

低周疲劳			高周疲劳		
威布尔斜率	特征寿命 $N_s/cycle$	中值寿命 $N_{50}/cycle$	威布尔斜率	特征寿命 $N_s/cycle$	中值寿命 $N_{50}/cycle$
2.689	2.139×10^5	1.985×10^5	3.426	2.615×10^6	2.441×10^6

根据以上参数按式(1)分别作出低周疲劳和高周疲劳的威布尔分布密度函数如图4所示。可以看出,在低周疲劳时的分布密度函数是偏态的,如采用正态分布处理在分布带的两端将引起误差,而在高周疲劳时的分布密度函数形状与正态分布很近似,两种处理方法将得出相近的结果。



(a)低周疲劳 (b)高周疲劳
(a)Low-cycle fatigue performance (b)High-cycle fatigue performance

图4 威布尔分布密度函数

Fig.4 Density function of Weibull distribution

对焊接接头的安全性评估,取可靠度为 $R = 0.999$ 是可以接受的,在这个可靠度下的疲劳寿命由式(6)确定为,低周疲劳 $N_{999} = 1.023 \times 10^5$ 及高周疲劳 $N_{999} = 1.136 \times 10^6$ 。

按威布尔分布处理得到的焊接接头的 $R-S-N$ 曲线如图5所示,图中分别作出了可靠度 $R = 0.5$ 和 $R = 0.999$ 的两条 $S-N$ 线,其方程分别为

$$R = 0.5 \quad \lg N = -3.2166 \lg \sigma_s + 12.3989$$

$$\text{或} \quad N = 2.5055 \times 10^{12} \sigma_s^{-3.2166} \quad (7)$$

$$R = 0.999 \quad \lg N = -3.0859 \lg \sigma_s + 11.8223$$

$$\text{或} \quad N = 6.6420 \times 10^{11} \sigma_s^{-3.0859} \quad (8)$$

图5中AB线为按对数正态分布处理得到的可靠度 $R = 0.999$ 的 $S-N$ 曲线。可以看出,在低周疲劳时正态分布处理得到的寿命估算偏于保守,这是因为试验数据的分布是偏态的原因,而在高周疲劳时两者得

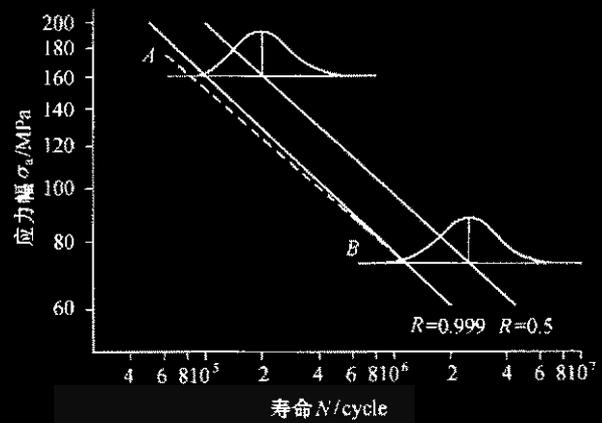


图5 焊接接头的 $R-S-N$ 曲线

Fig.5 $R-S-N$ curves of welded joints

出了相近的结果。

图5表明,不同可靠度的 $S-N$ 曲线的斜率变化不大,在工程应用中可以近似地认为它们是相互平行的。对任意可靠度可以由式(6)确定高周疲劳寿命,然后作中值 $S-N$ 曲线的平行线,即得到这个可靠度下的 $S-N$ 曲线,这样做对低周疲劳寿命的估算会偏于保守,但引起的误差在可以接受的范围内。

5 结论和讨论

1) 本文对海洋平台用钢焊接接头的疲劳性能进行了分析,给出各可靠度下疲劳寿命的估算式。

2) 试验结果表明,焊接接头在低周疲劳时的寿命分布是偏态的,而在高周疲劳时的寿命分布接近于正态分布。

3) 焊接接头试验结果的可靠性分析表明,不同可靠度的 $S-N$ 曲线斜率与中值 $S-N$ 曲线斜率相近。作为工程应用,建议可以近似采用中值 $S-N$ 曲线的斜率作为其他可靠度 $S-N$ 曲线的斜率,以简化计算。

参 考 文 献

- Gurney T R. The basis of the revised fatigue design rules in the department of energy offshore guidance notes. Second International Conference on Offshore Structure, London, 1982.55.
- Gurney T R. The influence of thickness on the fatigue strength of welded joints. BOSS Conference, London, August 1979.41.
- Holmes R. The fatigue strength of welded connections subjected to north sea environmental and random loading conditions. Proceeding of Third International Conference of Behaviour of Offshore Structure, Cambridge, Massachusetts, 1982.2.26~36.
- Booth G S. The influence of simulated north sea environmental conditions on the constant amplitude fatigue strength of welded joints. Eleventh Annual Offshore Conference, Houston, 1979. OTC-3420.
- Irvine N M. The concept and definition of hot stress as used in the revised guidance for fatigue assessment of welded tubular joints. Second International Conference on Offshore Welded Structure, London, 1982.54.
- 程育仁. 疲劳强度. 北京: 中国铁道出版社, 1990.

海洋平台用钢的焊接疲劳性能分析

作者: 黎之奇, 柳春图, 崔民子, 阚常珍, LI Zhiqi, LIU Chuntu, CUI Mingzi, KAN Changzhen
作者单位: 中国科学院力学研究所, 北京, 100080
刊名: 机械强度 **ISTIC PKU**
英文刊名: JOURNAL OF MECHANICAL STRENGTH
年, 卷(期): 2000, 22(4)
被引用次数: 1次

参考文献(6条)

1. Gurney T R [The basis of the revised fatigue design rules in the department of energy offshore guidance notes](#) 1982
2. Gurney T R [The influence of thickness on the fatigue strength of welded joints](#) 1979
3. Holmes R [The fatigue strength of welded connections subjected to north sea environmental and, random loading conditions](#) 1982
4. Booth G S [The influence of simulated north sea environmental conditions on the constant amplitude fatigue strength of welded joints](#) 1979
5. Irvine N M [The concept and definition of hot stress as used in the revised guidance for fatigue assessment of welded tubular joints](#) 1982
6. 程育仁 [疲劳强度](#) 1990

相似文献(10条)

1. 会议论文 [赵淑慧 焊接热循环对焊接接头冲击疲劳寿命的影响](#) 1990
2. 学位论文 [武奇 基于结构应力的焊接接头疲劳分析及多轴高周疲劳寿命估算](#) 2009
焊接接头广泛应用于航空航天、车辆工程、工程机械和港口机械等许多工程领域, 对焊接接头的疲劳应力进行深入研究, 可以为这些重大机械装备的产品设计提供指导, 对于产品的可靠性和抗疲劳设计具有重大意义。本文以港口散货机械常用的焊接接头为应用背景, 基于结构应力分析理论和疲劳试验结果, 借助数值计算的方法对焊接接头焊趾处的疲劳应力行为进行了深入研究, 主要内容包括以下几个方面:
采用有限元方法研究了焊缝间隙的几何尺寸对非承载和承载十字接头的应力集中系数的影响; 采用有限元弹性求解, 给出T型焊接接头不同网格划分尺寸与接头焊趾处应力集中系数的关系; 考察了采用不同网格尺寸对T型焊接接头表面的应力分布的影响。
对常用的Q235B钢的三类角焊接接头, 分别为带纵立板焊接接头、承载十字接头和带加强板焊接接头, 进行了单轴拉伸疲劳试验; 这些接头在厚度、宽度和制造工艺上相同, 其焊趾处的标称应力相同; 对这些接头的疲劳强度曲线进行了分析, 获得了焊接试样疲劳强度曲线方程常数 m 和给定 $2e6$ 次循环时的疲劳强度(疲劳级别FAT)。
基于结构应力法计算了Q235B带纵立板焊接接头、焊透承载十字接头和带加强板焊接接头的结构应力集中系数; 计算了16Mn典型焊接接头的结构应力集中系数; 利用疲劳试验数据和已有的文献疲劳数据考察了结构应力疲劳设计曲线; 对比了采用结构应力和名义应力进行焊接接头疲劳评定的结果。
以结构力学平衡原理为基础建立了非承载十字接头的三维结构应力计算公式。考察了焊接接头三维结构应力的应力集中系数与二维结构应力集中系数的区别; 给出了非承载十字接头在拉伸荷载作用下三维结构应力集中系数; 三维的结构应力计算方法具有网格划分不敏感性。
根据板壳有限元法给出了焊接接头采用壳单元求解结构应力集中系数的理论基础, 推导了壳单元节点力与沿焊缝截面分布力的关系; 给出了采用壳单元求解结构应力的详细步骤; 首次给出了采用壳单元模拟焊缝时壳单元的厚度参考值, 采用该方法与基于平面实体单元求解得到的结构应力集中系数很接近; 证实了壳单元建模方法具有很好的网格划分不敏感性; 针对T型焊接接头、带加强板的焊接接头和非承载十字接头给出了基于壳单元的结构应力集中系数, 给出了非承载十字接头沿焊缝分布的结构应力集中系数的分布。
结合焊接接头结构应力和修改的W(o)hler曲线法给出了新的焊接接头多轴疲劳寿命评定法, 该方法适用于焊接接头比例载荷和非比例载荷加载, 同时具有网格划分不敏感性; 对管板接头进行有限元建模, 采用新的壳单元求解技术获得了管板焊接接头分别在弯矩和扭矩作用下的结构应力集中系数; 对该管板接头采用本文提出的多轴疲劳寿命估算式进行了疲劳评定, 并与文献中试验数据进行了对比; 与采用修改的W(o)hler曲线法和欧洲钢结构规范3及其它多轴疲劳评定法的计算结果进行比较, 该方法要明显优于已有的这些方法。
3. 会议论文 [郑修麟, 苏彬, 崔天燮 残留应力对16Mn钢对焊接接头疲劳寿命的影响](#) 1991
该文采用新方法研究了焊接残留应力对16Mn钢对焊接接头疲劳寿命的影响。实验结果表明, 焊接热过程既引起宏观残留应力, 也引起微观残留应力; 宏观残留应力对16Mn钢对焊接接头的疲劳寿命无显著的影响。去应力退火既消除了宏观残留应力, 也降低了微观残留应力。去应力退火后, 16Mn钢对焊接接头的疲劳寿命虽有所缩短, 但影响不显著。据此认为, 宏观焊接残留应力对16Mn钢对焊接接头的疲劳寿命无显著的影响。(本刊录)
4. 会议论文 [范引鹤, 罗刚 焊接接头裂纹修复后对疲劳寿命的影响分析](#) 2004
本文介绍了薄壳焊接结构的裂纹修复, 焊接试板的疲劳寿命试验, 并对焊接接头裂纹进行补焊修复后与正常焊接接头进行了疲劳寿命的对比试验。
5. 学位论文 [刘观日 TC4钛合金叶盘焊接接头疲劳寿命分析方法研究](#) 2000
该文采用损伤力学方法, 对某型航空发动机TC4钛合金叶盘结构的电子束焊接接头进行了低周损伤分析和寿命预测。针对焊接接头的特点, 在已有疲劳损伤演化方程中引入影响焊接接头疲劳特性的有关参量, 从而建立了一种适合于评估焊接接头疲劳损伤的损伤演化方程。通过实测得到了电子束焊接接头应变疲劳寿命曲线; 通过实测得到了给定焊接条件下电子束焊接接头的应力集中分布, 建立了电子束焊接接头应力集中分布的统计模型。论文还采用蒙特卡罗法对TC4钛合金焊接接头的低周疲劳寿命分布进行了计算, 得到了接头的寿命分布。最后, 采用有限元方法, 对中国某型航空发动机的压气机叶盘焊接接头进行了受力分析, 并以此为基础, 对其进行了疲劳损伤分析和寿命计算。
6. 会议论文 [尚永峰, 范引鹤, 郭海丁, 饶新阳 用威布尔分布和正态分布分析焊接接头疲劳寿命](#) 2004
本文分别用三参数威布尔分布和正态分布求出了一定置信度和可靠度下的焊接接头疲劳寿命和寿命分散系数, 并将威布尔分布和正态分布结果进行了比较。

7. 会议论文 [贾安东, 张彦华, 叶建敏 海上平台导管架焊接接头海水腐蚀疲劳寿命的试验研究](#) 1989

8. 学位论文 [郭平 基于场强法的焊接接头疲劳寿命预测及机匣寿命研究](#) 2008

本文针对含有复杂焊缝分布的焊接机匣的疲劳寿命评估问题展开研究。论文对焊接接头疲劳评定研究的重要方法——“局部法”作了简要的回顾和讨论, 对不同的局部方法的基本原理、分析步骤及影响因素进行了探讨并对不同局部参量的局限性和缺陷进行了评述。在此基础上, 论文的研究工作主要围绕焊接接头疲劳评价的局部法、焊接接头疲劳评定的应力场强法研究和某模型机匣的寿命预测等方面展开。

考虑到焊接接头往往存在较大应力集中的特点, 本文引入了新的疲劳参量——应力场强来评估焊接接头疲劳寿命。论文对确定场径——这一场强计算中的重要参数的影响因素进行了探讨。针对模型平板试件, 采用不同权函数, 通过计算和试验相结合的办法确定了对焊接接头的场径。论文对场强法在复杂焊接结构件疲劳寿命估算应用中所面临的问题进行了分析, 对高应力梯度和高应变梯度区域采用了不同的权函数, 给出了较为合理的场强计算方法, 给出了用应力场强法估算焊接接头疲劳寿命的基本框架和分析计算步骤, 并利用ANSYS软件提供的APDL语言编制了求解应力场强的程序。

论文最后以某模型焊接机匣为例, 对其进行了弹塑性有限元分析, 并以此为基础, 采用场强法对其进行疲劳寿命估算。将基于场强法的模型焊接机匣疲劳寿命估算结果和基于局部应力应变法的预测结果以及试验结果进行比较表明: 应力场强法在预估焊接接头疲劳寿命时, 可以获得较好的预测精度。

9. 会议论文 [赵淑慧, 张云麟 16MnR、15MnVN及18MnMoNb钢焊接接头冲击疲劳寿命的试验研究](#) 1988

10. 期刊论文 [贾星兰, JIA Xing-lan A131钢焊接接头安全疲劳寿命的实验研究 -石油大学学报 \(自然科学版\)](#)

2005, 29 (5)

低温环境下焊接接头的安全疲劳寿命, 是冬季海洋平台构件抗疲劳设计与可靠性评定的基础。利用概率统计的方法, 得出了在小样本实验条件下, 当疲劳寿命服从对数正态分布时安全寿命与中值实验寿命之间的关系。在PLG-300 kN高频疲劳试验机上, 测定了在-25℃环境海洋用钢(A131)焊接接头试样在5种不同应力水平下的疲劳寿命, 并得出了其中值S-N曲线。利用对数疲劳寿命标准差的经验取值, 得出了焊接接头对应一定置信度下不同安全概率的低温疲劳寿命表达式。结果表明, 利用此关系式可以大大减少实验的样本数目。从低温疲劳实验的相关系数可以看出, 用线性拟合来回归中值S-N曲线是成功的, 而且根据不同的安全概率, 可以计算出不同的安全疲劳寿命。

引证文献(1条)

1. [杜之富, 邵永波, 胡维东 KK管节点中表面带裂纹应力强度因子的数值分析及参数研究\[期刊论文\]-机械强度](#) 2008(2)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_jxqd200004006.aspx

授权使用: 华中科技大学(wfhzkjd), 授权号: f87f85ae-1e7d-4447-b798-9e7a010ac126

下载时间: 2011年1月29日