

# 平台钢焊接接头在海洋中的腐蚀疲劳研究\*

李言涛 侯保荣  
(中国科学院海洋研究所)

薛以年  
(中国科学院力学研究所)

随着近海石油开采事业的迅猛发展,我国已自行设计和建造了许多固定式导管架钢结构海上平台,它们在海洋环境中承受着波浪引起的交变载荷作用,与惰性环境中承受交变载荷条件下得到的疲劳结果相比,交变载荷与侵蚀性环境的联合作用往往导致疲劳性能显著下降。这种损伤可能是疲劳开裂和侵蚀性破坏的简单叠加,也可能是这两者之间某些更为复杂的协同交互作用的结果(贾斯克,1989)。钢结构海上平台是由钢构件(如钢管、钢板、角钢等)焊接而成,海水腐蚀疲劳裂缝大都产生于焊缝区的焊趾处,该部位存在焊接残余应力,以及焊接缺陷和几何缺陷,形成应力集中。本文通过对海上平台用钢板在空气中、海水中和海水中有阴极保护三种条件下腐蚀疲劳性能的研究,探讨了钢材在海上平台不同部位、不同保护状况下的腐蚀疲劳寿命,为海上采油平台设计与选择提供了理论依据。

## 一、材料与试验方法

1. 材料 试件材料是由荣成市第一造船厂提供的厚 18mm 的船用钢板(烟台产),该钢板即为胜利油田海上平台用钢板,其化学成分与机械性能见表 1 和表 2。

表 1 试验钢板的化学成分

元素	C	Si	Mn	S
含量(%)	0.19	0.27	0.86	0.021

表 2 试验钢板的机械性能

$\sigma_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\delta$ (%)	$AK_{oc}$ (J)
360	520	31	33

注:1.  $\sigma_s$ : 钢板屈服点; 2.  $\sigma_b$ : 抗拉强度; 3.  $\delta$ : 伸长率; 4.  $AK_{oc}$ : V 缺口(10×10mm)冲击功。

试件采用对焊接平板试件,以模拟实际单腿平台结构,其厚度为 18mm,宽度为

\* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 2893 号。  
收稿日期:1996 年 1 月 29 日。

72.5mm。如图1所示,试件焊接好经检测合格后未作任何处理,保持焊接原始状态。本实验中对照试样 A<sub>537</sub> 和 A<sub>131</sub> 钢也采用对接型板状焊接接头试件。

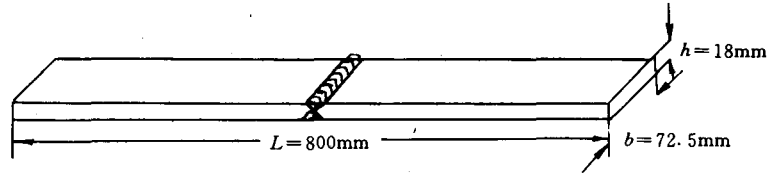


图1 试件示意图

**2. 方法** 试验加载形式采用四点弯曲循环载荷,可以较小的外加载荷得到较高的应力状态,并模拟平台管节点热点处的弯曲应力状态。为模拟海浪的低频循环载荷,试验中循环加载频率为 0.5Hz,应力比  $R = -1$ 。

分别在空气中、海水中和拟海水中进行阴极保护的腐蚀疲劳试验,以分析海水腐蚀对疲劳性能的影响。

试验的海水循环系统使用人工海水(按 ASTM D1141-75 配方)<sup>①</sup>,海水循环经过包围试件焊缝的塑料海水槽,使焊缝局部表面不断有海水流过。海水成分和参数见表3和表4。

表3 海水成分(g/L)

NaCl	MgCl	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaCl <sub>2</sub>	KCl <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	KBr	H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub>	SrCl <sub>2</sub>	NaF
24.53	5.20	4.09	1.16	0.695	0.201	0.101	0.027	0.025	0.003

注:按 ASTM, D1141-75 配制。

表4 海水参数范围

温度(°C)	pH	盐度	氯度	含氧量(mg/L)
19—21	7.5—8.5	32—36	18.20	11—12

阴极保护采用外加电流法,外加电流由恒电位仪供给,按海上平台常规要求,试件阴极负电位设定为  $-850\text{mV(SCE)}$ ,阴极采用铂丝绕在试件焊缝周围的有机玻璃上。

## 二、结果与讨论

所有试验的焊接接头试件疲劳破坏都是从焊趾处(即焊肉与母材交接处)产生裂缝而断裂的。在焊接构件中,几何形状起着决定性作用,腐蚀疲劳开裂往往在有残余应力或缺口的焊缝边缘处引发。除了纯粹的缺口效应外,焊接操作也会使这个区域中材料的冶金组织变得与基体材料不同(Booth, 1978; 1979)。焊接接头的腐蚀疲劳强度取决于焊趾处的应力水平,试验以焊趾处弯曲应力状态的表面最大应力范围  $\Delta S$  和疲劳破坏的载荷循环

<sup>①</sup> 中国科学院力学研究所腐蚀疲劳组,1986,进口钢材板状焊接接头海水腐蚀疲劳试验研究(技术文件 OTR-03-01),10-30(内部资料)。

数  $N_f$  关系给出。在直角对数坐标系中  $\Delta S$  与  $N_f$  通常呈线性关系, 即  $\lg \Delta S = a + b \lg N_f$ 。由于疲劳试验数据一般较为分散, 需将试验数据在直角对数坐标系中进行线性回归分析, 以得到反映平均疲劳寿命的  $\Delta S-N_f$  关系曲线。图 2—4 分别表示在空气中、海水中和海水中  
有阴极保护的试验条件下的  $\Delta S-N_f$  曲线, 其相关系数分别为  $r_{\text{air}}^2$  (无意义),  $r_{\text{sw}}^2 = 0.957$  和  $r_{\text{cp}}^2 = 0.876$ 。在空气中进行的 5 个焊接试件的疲劳试验中有两个低应力水平试验一直做到断裂循环  $2 \times 10^6$  次仍未破断, 便中止了实验, 所以只有 3 个实验数据, 其相关系数  $r_{\text{air}}$  没有实际意义, 但数据点的线性较好, 由此表明该试验结果的分散性不大。

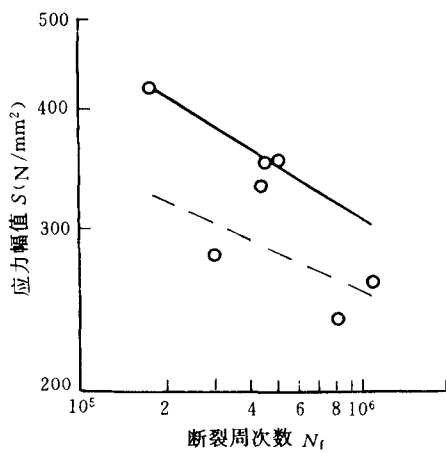


图 2 空气中平台钢焊接试样的腐蚀疲劳性能  
(——试验用钢 ———— A<sub>587</sub> 钢)(下同)

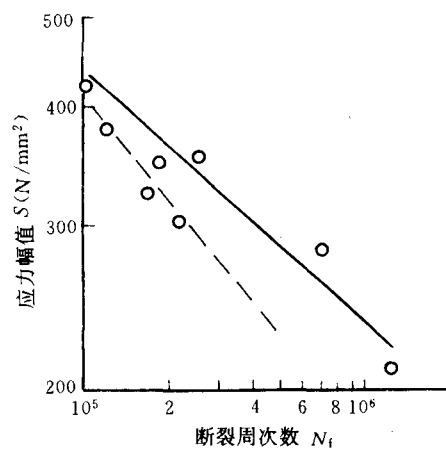


图 3 海水中平台钢焊接试样的腐蚀疲劳性能

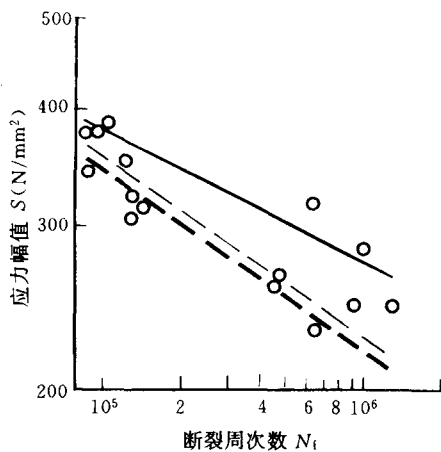


图 4 海水中(有阴极保护)平台钢焊接  
试样的腐蚀疲劳性能  
(——— A<sub>131</sub> 钢)

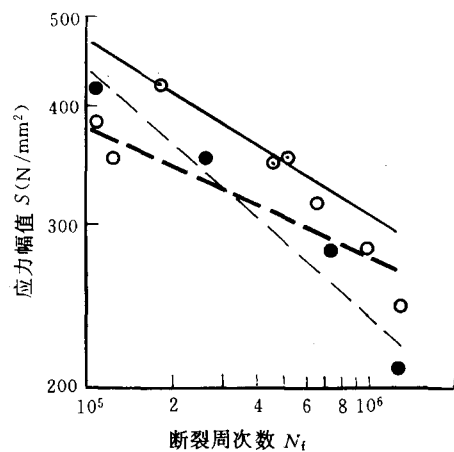


图 5 三种试验条件下平台钢焊接  
试件的疲劳性能比较

(○空气中; ●海水中; ○海水中阴极保护)

如图 2—4 所示, 由于作参照的 A<sub>587</sub> 钢和 A<sub>131</sub> 的化学成分和机械性能与试验试件的船

用钢板大致相同,且其对焊接接头试件的试验条件也与本实验基本相同,所以在空气中、海水中和海水中有阴极保护的三种条件下各自对应的腐蚀疲劳平均寿命曲线斜率是近似的。由于 A<sub>587</sub> 钢厚度为 25mm,大于本试验钢板的厚度(18mm)因而使其疲劳平均寿命大大缩短;而 A<sub>131</sub> 钢厚度为 19mm,略大于本试验钢板,其疲劳平均寿命却明显偏低。由此可见本试验结果是合理的,本试验试件的质量,尤其是焊接质量是比较好的。

图 5 给出了在空气中、海水中和海水中有阴极保护三种试验条件下本试件的疲劳寿命对比,由图中的  $\Delta S-N_f$  曲线可以看到:海水中自由腐蚀的试件疲劳寿命约为空气中的 1/2 到 1/3,随着应力水平的降低差别增大。海水中有阴极保护的试件与海水中自由腐蚀的试件相比,在高应力水平(短寿命)情况下,前者的疲劳寿命比后者长,而且随着应力水平降低,海水中有阴极保护对延长疲劳寿命的效果更好。另外,三条  $\Delta S-N_f$  曲线的斜率比较,海水中有阴极保护的腐蚀疲劳寿命曲线的斜率(绝对值)最小,实际上海上平台的服役期所受海浪载荷的周次都在  $10^7-10^8$  以上,因此阴极保护(-850mV, SCE)在如此长寿命范围内产生的效果是十分明显和肯定的,甚至可使疲劳寿命接近空气中的疲劳寿命。上述结果与近年来国内、外许多研究(Booth, 1978; 1979; Jaske, 1978)的结果一致。

阴极保护在低应力长时间情况下延长疲劳寿命的能力是通过降低稳定滑移带处局部腐蚀的破坏来实现的,而且抑制腐蚀疲劳的保护电位与抑制全面均匀腐蚀的保护电位基本相同(Duquette, 1979),另外产生石灰质水垢是减缓海水中腐蚀疲劳裂缝萌生的主要原因之一(Jaske, 1978)。对于焊接接头在长时间低应力情况下,裂纹起裂和浅裂纹扩展阶段的寿命较长,阴极保护大大延长了起裂和初始裂纹扩展寿命,使总寿命明显延长。而在高应力短寿命范围,由于阴极保护负电位导致氢泡产生,使裂纹扩展速率加快,从而缩短了整个寿命(Dequette, 1979)。

### 三、结 论

(1) 在空气中、海水自由腐蚀和有阴极保护三种试验条件下,焊接接头试件的疲劳破坏都是从焊趾处产生裂纹而断裂的。

(2) 上述三种试验条件下的疲劳寿命数据分散性都不大,因此对试验结果进行的分析是比较理想和可信的。

(3) 从本试验结果与其它试验结果比较中可以看出,本试验的焊接接头试件质量,尤其是焊接质量是比较好的。

(4) 就平均寿命而言,焊接接头的海水自由腐蚀疲劳寿命约为空气中疲劳寿命的 1/2—1/3,随应力水平的降低差异增大。

(5) 在低应力水平(长寿命)情况下,海水中有阴极保护(-850mV, SCE)的焊接接头疲劳寿命比海水自由腐蚀疲劳寿命长,随应力水平的降低,阴极保护对延长疲劳寿命的效果更好,甚至可使其接近空气中的疲劳寿命。由此可见,海上钢结构平台采用阴极保护的效果是十分明显的。

## 参 考 文 献

- 贾斯克, C. E. 著(吴荫顺等译), 1989, 海洋工程中的金属腐蚀疲劳, 冶金工业出版社, 1—3。  
Booth, G. S. , 1978, Proceedings of Offshore steels Conference, Welding Institute, England, 227—252.  
Booth, G. S. , 1979, Proceedings of 11th Annual Offshore Technology Conference, *Houston*, 1: 547—554.  
Duquette, D. J. , 1979, Fatigue and Microstructure, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 335—363.  
Jaske, C. E. , 1978, ASTM-STP-642, 19—47.

## CORROSION FATIGUE OF WELDED STEEL JOINTS IN SEAWATER\*

Li Yantao and Hou Baorong

*(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences)*

Xue Yinian

*(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)*

## ABSTRACT

Experiments on the corrosion fatigue of welded steel joints in air and seawater, and in seawater with cathodic protection, yielded data for linear regression to obtain fatigue-life curves ( $\Delta S-N_f$ ). The laws of corrosion fatigue in welded joints of test steel are discussed with reference to those of A<sub>587</sub> and A<sub>131</sub> steels there. In the experiments above, the fatigue damage occurring at all welded joints around the weld bead resulted in the cracking and fracture there. The fatigue life of the specimens in seawater was longer than that in air, almost reaching the length of the fatigue life in air.

---

\* Contribution No. 2893 from the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences.