

· 试验研究 ·

国产海上平台钢E36-Z35焊接 接头腐蚀疲劳的试验研究*

中国科学院力学研究所

薛以年(研究员) 徐纪林(副研究员)

李禾(高工) 李延革(高工)**

提 要 本文对国产海上平台钢E36-Z35板状焊接接头试件进行了常幅疲劳弯曲试验,结果表明在海水中自由腐蚀的平均疲劳寿命,约为空气中的1/2~1/3,只要寿命不很短,在阴极保护下,其寿命将大于海水中的自由腐蚀疲劳寿命,而且在低应力长寿命范围内,可以达到甚至超过空气中的疲劳寿命。

试验表明,板厚增加,其疲劳强度将明显降低,根据试验数据,本文提出了厚度对疲劳强度和寿命的修正公式。试验得到的初步结论是,国产海上平台钢E36-Z35,按我国焊接工艺规程制作的焊接接头,要比国外平台钢BS 4360、Grade 50D的焊接接头好。此外,本文还讨论了应力比和加载频率对接头疲劳寿命的影响。

关键词 平台钢 板状焊接接头 腐蚀疲劳寿命 阴极保护

一、前言

海上导管架平台是由管状钢构件焊接组成的,它长期在海水环境中工作,受到海水腐蚀与海浪交变荷载的作用,因此海水腐蚀疲劳破坏是其主要的强度破坏形式。从国外海上平台多次发生倒塌事故的分析中来看,均发现在管节点热点应力集中处产生腐蚀疲劳裂缝而导致断裂,所以国际上很重视管节点的疲劳持久强度试验。但是大量的管节点试验是在空气中进行的,对管节点进行海水腐蚀疲劳试验不仅难度增加,更主要的是模拟海浪交变荷载作用的低频循环加载(0.2 Hz以下)试验时间很长,需要昂贵的试验费用。采用板状焊接接头试件进行海水腐蚀疲劳试验,是研究海水腐蚀对管节点疲劳性能影响的一个行之有效的方法。

欧洲共同体国家的海洋结构研究计划^[1,2,3]就是把上述试验分为两类,一类是空气中的管节点持久疲劳强度试验;一类是

所谓基本疲劳试验,即板状焊接接头的海水腐蚀疲劳试验。我国管节点研究委员会针对海上平台用钢E36-Z35(抗Z向撕裂钢)的开发,特制订了管节点疲劳试验的研究计划,其中国产平台钢焊接接头的海水腐蚀疲劳试验是其研究项目之一,目的是通过板状焊接接头试件,用以研究根据我国焊接工艺规程制造的国产平台钢管节点的海水腐蚀疲劳性能。

要研究分析海水腐蚀对疲劳性能的影响,必须有焊接接头在空气中的疲劳试验数据作对比,所以本工作先进行了一系列焊接接头在空气中的常幅疲劳试验,从而得到了空气中的疲劳寿命曲线;同时,考虑到导管架海上平台在服役过程中,一般都采用阴极保护措施,即采用牺牲阳极或外加电流的方

* 本试验得到管节点研究委员会、国家自然科学基金和中国科学院资助。

** 参加本试验工作的还有石茂、王亚立、于桂清和唐驰。

法，以防止海水对平台结构腐蚀，因此，除在海水中进行自由腐蚀试验以外，同时，还进行了在海水中具有阴极保护条件下的疲劳试验，并得到了相应的疲劳寿命曲线。通过比较，进一步弄清了阴极保护对海水腐蚀疲劳性能的影响。

本文根据得到的试验数据，还分析了板厚对疲劳强度和寿命的影响。板厚增加使焊接接头的疲劳强度明显降低，为此，本文分别提出了：焊接接头在空气中、海水中自由腐蚀和海水中具有阴极保护条件下的疲劳强度和疲劳寿命厚度修正公式。此外，还通过与国外相近试验所得的数据相比较，对国产平台钢焊接接头疲劳性能和海水腐蚀疲劳性能进行了检验对比。

二、试件制作

试件材料为国产海上平台Z向钢E36—Z35，该钢板具有抗Z向撕裂的特点，化学成分和机械性能见表1和表2。

E36-Z35钢板的化学成分 表1

C	S	Si	Mn	P	Cu	Nb	Al
0.16	0.0012	0.33	1.35	0.009	0.04	0.027	0.04

E36-Z35钢板的机械性能 表2

σ_y (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	δ_5 (%)	ψ_2 (%)	$C_v-40^\circ\text{C}$ (J)	$C_v-40^\circ\text{C}$ (时效) (J)
403	548	33	72	194	103

试件均为十字型板状焊接接头，一类是悬臂弯曲加载形式的试件（图1(a)），厚度有16mm和40mm两种，一类是四点弯曲加载形式的试件（图1(b)），厚度有16mm和32mm两种。为了比较钢板的不同压延方向对疲劳强度的影响，四点弯曲加载形式的试件，其横向隔板左右两边钢板的压延方向是相互垂直的。

试件是由上海江南造船厂和中华造船

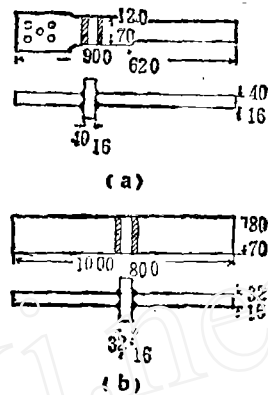


图1 十字形板状接头试件

厂沪东分厂制作的。钢板采用气割下料和剖口，剖口表面用电动砂轮打磨，角度为 45° ，焊接成大块的十字型接头，再气割成条状试件胚，最后机械加工成试件所要求的几何尺寸和形状。在机械加工过程中，切除掉气割的热影响区（ $>5\text{mm}$ ）。焊接是按照管节点的焊接工艺规程采用手工电弧焊进行的，焊后不作任何处理，保持原始焊接状态。试件的焊接工艺由中国船舶工业总公司第十一研究所负责把关，对焊缝进行超声波探伤和表面磁粉探伤检查，最后由国家船舶检验局进行了合格检验。

三、试验加载装置

作为试验计划的一个重要组成部分，我们建立了可以同时进行30个左右焊接接头试件的海水腐蚀疲劳试验装置（见图2）^[4]。因为低频（0.2Hz以下）循环加载要做到 10^6 次以上的试验至少需要两个多月，因此要得到大量试验数据采用常规的疲劳试验机是很难

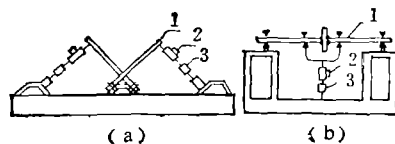


图2 自行设计的加载装置系统示意图

(a) 一悬臂弯曲加载系统；

(b) 一四点弯曲加载系统；

1—试件；2—伺服阀；3—传感器

完成的。

本试验采用的十字型板状焊接接头试件的加载形式,是悬臂弯曲和四点弯曲的循环荷载,由此模拟管节点热点的弯曲应力状态。悬臂弯曲加载系统可同时做20个试件的试验,四点弯曲加载系统可同时做12个试件的试验。

各试件分别由容量为正负20kN的作动筒(伺服阀)加载,由信号发生器向电液伺服阀输入信号控制加载动作。电液伺服阀和作动筒是连成一体的,它本身带有位移传感器,用它的信号反馈可以作恒位移控制的循环加载。此外,和作动筒连接的有荷载传感器,产生的反馈信号可做恒荷载控制的循环加载,本试验正是以恒荷载进行控制的。

在此之前,我们还完成了进口平台钢焊接接头试件的海水腐蚀疲劳试验工作^[5],已得到了一系列试验数据和研究结果。

四、试验方法和条件

悬臂弯曲式试件的横向隔板夹持端一边距焊趾15mm处,在钢板上下两面中心线两侧,各贴有两对应变片,可测量弯曲状态下表面最大应变;四点弯曲式试件的横向隔板左右两边距焊趾约25mm处,在钢板上下两面中心线上,各贴有一对应变片,可测量弯曲状态下表面最大应变。由应变读数值确定外加荷载值,然后进行荷载控制的常幅循环

加载试验。在循环加载下,应变片测量的应变范围 $\Delta\varepsilon$ 乘以钢材的弹性模量($E=2.16 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$)即可得到应力范围 $\Delta\sigma$ 。

本试验是在应力范围相应于疲劳寿命为 2×10^4 和 2×10^6 循环次数之间进行的。

1. 应力比 ρ

为探讨空气中应力比对疲劳寿命的影响,除少部分试件在应力比 $\rho=0.05$ 下进行疲劳试验外,所有试验都是在应力比 $\rho=-1$ 情况下进行的。 $\rho=-1$ 是常幅疲劳试验中常用的应力比,但实现起来比较困难,从最大荷载到最小荷载中间荷载要通过零值,不仅夹具要受到撞击,而且对四点弯曲试验的试件,将有可能因此而滑动,所以有人为此做 $\rho>0$ 的试验,以避免这个困难。我们对夹具的加工,提出了较精密的要求,并在加载装置上仔细考虑了试件安装的措施,以保证试验能在 $\rho=-1$ 的条件下顺利进行。

2. 加载频率

由于一般认为循环加载频率对空气中的疲劳寿命影响很小,因此,我们在空气试验中的加载频率稍快一些,约为1Hz左右;在海水中自由腐蚀和有阴极保护情况下均取循环加载频率为0.2Hz,以接近海浪荷载频率,在此频率加载到 10^6 循环次数,一般需要两个月的时间。为探讨加载频率对焊接接头海水腐蚀疲劳寿命的影响,还进行了少部分试件在较高频率(1Hz)循环加载下的海水

海水成分(g/L)

表 3

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

(按ASTM、D1141-75配制)

海水参数范围

表 4

温 度	pH值	盐度(g/l)	氯度(g/l)	含 氧 量
19℃~21℃	7.5~8.5	32~36	18~20	92%~99%饱和 (11~12mg/L)

腐蚀疲劳试验。

3. 海水腐蚀环境

本试验采用人工配制的海水(按ASTM、D1141-75配方),循环流过包围试件焊缝的塑料海水槽中,使焊缝局部表面不断有海水流过。海水成分和参数范围见表3和表4,海水的含量和性质定期作化验检查,一般3~6个月全部更换一次海水,海水循环系统见图3所示。采用不锈钢板焊成海水池(容积约为1.4m³)置于地平面下,海水由水泵从水池中抽到较高位置的可以制冷和加热的(容积约为0.7m³)恒温水箱中,再由高水位恒温水箱流向较低水位的各个试件的海水槽中,使海水流过试件表面,最后流回地平面下的海水池内。循环流动的海水约2分钟左右在试件的海水槽中更换一次,流速平均约1L/min。海水温度控制在20℃±1℃的范围内。

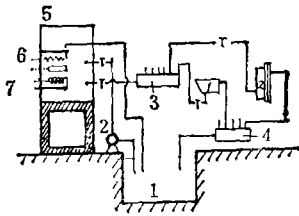


图3 海水腐蚀循环系统装置

1—海水池; 2—泵; 3—分液管; 4—回液管;
5—恒温水箱; 6—制冷器; 7—加热器

4. 阴极保护

有阴极保护条件的海水腐蚀疲劳试验,是采用外加电流方法实现的。外加电流由恒电位仪供给,辅助阳极采用铂丝绕在试件焊缝周围的有机玻璃架上,试件的阴极负电位保持在-850mV(±30mV)范围内,用饱和甘汞电极(SCE)作参比电极,一般认为此电位值,在阴极保护中防腐效果最佳。

五、试验结果

所有试验的焊接接头试件,其疲劳破坏都是从焊趾处产生裂缝而断裂的。焊接接头

的疲劳寿命是取决于焊趾处的应力水平,这里粘贴的应变片距焊趾有一定距离,由应变测量得到的应力值实际上是名义应力,没有反映焊缝的局部应力集中,这和管节点只考虑热点处的几何应力集中,而不考虑焊缝形状影响是相一致的。

试验结果给出了以焊趾附近弯曲应力状态的表面最大应力范围 $\Delta\sigma$ 和疲劳破坏的荷载循环次数 N_f 关系,荷载循环次数 N_f 是外荷载加不上去时的循环次数,这和以前认为裂缝扩展到板厚一半以上时的循环次数是很接近的。

用直角对数坐标系表达应力范围 $\Delta\sigma$ 和疲劳寿命 N_f 的通常线性关系为

$$\log \Delta\sigma = a + b \log N_f \quad (1)$$

由于疲劳试验数据一般比较分散,这里将试验数据在对数坐标系中进行线性回归分析,得到 $\Delta\sigma-N_f$ 关系为疲劳平均寿命曲线,由疲劳平均寿命曲线加减二倍标准偏差,可得到存活率为95%的疲劳寿命曲线分散带。

下面分别对本试验中三种不同试验条件下的试验结果作一归述:

1. 空气中的疲劳

在空气中我们共进行了46个焊接接头试件的疲劳试验,其中有34个试件在应力比 $\rho = -1$ 下进行,有12个试件在 $\rho = 0.05$ 下进行。图4给出了应力比为 $\rho = -1$ 情况下的三种厚度(40mm、32mm、16mm)的试验结果,图中 $\Delta\sigma-N_f$ 曲线的截距和斜率即回归系数依次分别为 $a_{40} = 3.778$, $a_{32} = 4.064$, $a_{16} = 3.843$ 和 $b_{40} = -0.251$, $b_{32} = -0.303$, $b_{16} = -0.240$;相关系数依次分别为 $\gamma_{40} = -0.941$, $\gamma_{32} = -0.969$, $\gamma_{16} = -0.846$,从相关系数值表明,试验分散性不大,相对来说来看厚度较薄的16mm试件相关系数较小,这说明较薄试件的分散性大。

本试验板厚为16mm试件是以悬臂弯曲和四点弯曲两种不同加载方式进行的,由相关系数值表明分散性不大,说明该疲劳寿

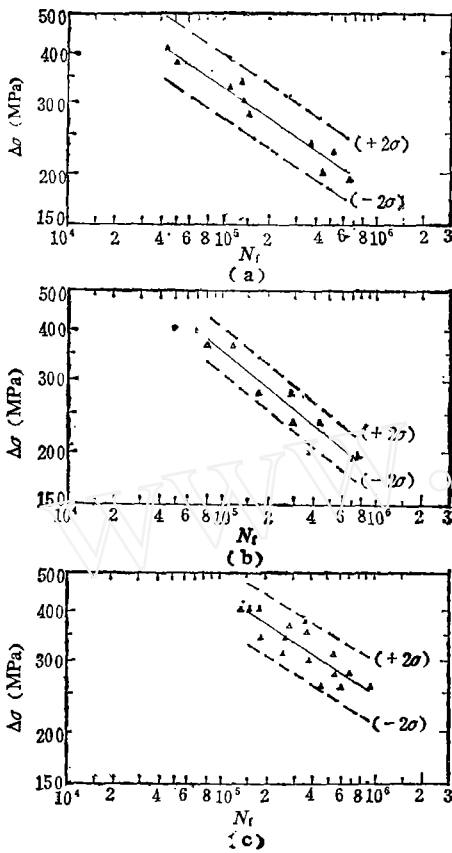


图4 空气中 $\Delta\sigma-N_f$ 试验结果 ($\rho=1$)
(a)—40mm, (b)—32mm, (c)—16mm,
▲—悬臂弯曲型; △—四点弯曲型

命不受加载方式不同的影响。从试验结果中可以看到, 四点弯曲型试件的疲劳断裂, 既有在平行于钢板压延方向一边发生, 也有在垂直于压延方向一边发生, 而且数目也差不多, 可见, 对于原始焊接状态的焊接接头, 其疲劳寿命不会因钢板压延方向的不同而有影响。

为便于分析板厚对焊接接头疲劳寿命的影响, 将各板厚的试验数据在给定斜率 $b = -0.25$ 下, 重新作了线性回归分析, 得到了相互平行的平均寿命曲线, 见图5 (图中还给出了进口平台钢A537板厚为25mm焊接接头试件在空气中的平均寿命曲线)^[5]。

从图5中可以看到, 板厚增加, 疲劳强

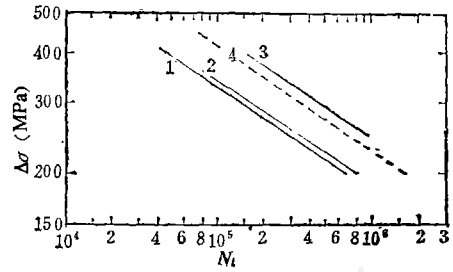


图5 板厚对焊接接头疲劳寿命的影响
($\rho = -1$; $b = -0.25$)
1—40mm厚; 2—32mm厚; 3—16mm厚;
4—25mm厚^[5]

度明显降低, 因此, 本文建议, 在空气中按下列公式(2)对疲劳强度进行厚度修正:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

式中, t 为板厚, $\Delta\sigma$ 为对应于板厚 t 的疲劳强度; t_0 为16mm板厚, $\Delta\sigma_0$ 为对应于16mm板厚试件的疲劳强度。

由于分析中取 $b = -0.25$, 即 $N\Delta\sigma^m = c$ 中的 $m = 4$, 则由公式(2)可得到板厚对疲劳寿命的修正公式为

$$N = N_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (3)$$

式中, N 为对应于板厚 t 的疲劳寿命, N_0 为板厚 (t_0) 为16mm试件的疲劳寿命。可见厚度为40mm的焊接接头疲劳寿命, 只是厚度为16mm的30%左右。上述修正公式与1981年Gurney^[6]提出的焊接接头疲劳强度和疲劳寿命厚度修正公式稍有差别。Gurney公式为

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{1}{4}},$$

$$N = N_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{3}{4}} \quad (m=3).$$

从本试验数据来看, 若采用Gurney公式进行厚度修正则是不安全的 (详见文献[7])。

图6中给出了应力比为 $\rho = 0.05$ 情况下板厚为16mm的试验结果。可以看出, 在应力范围 $\Delta\sigma$ 较高时, 其疲劳寿命比在 $\rho = -1$ 情

况下的疲劳寿命要短得多,随着 $\Delta\sigma$ 降低,两者接近,当应力范围 $\Delta\sigma < 280\text{N/mm}^2$ 时, $\rho = 0.05$ 和 $\rho = -1$ 两种情况下的试验值趋于一致。

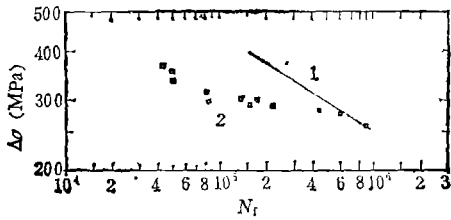


图6 不同应力比试验结果比较(板厚16mm)
1— $\rho = -1$ 时; 2— $\rho = 0.05$ 时

从以上试验结果来看,由于焊接残余应力的存在,原始焊接状态下的焊接接头在 $\rho = 0.05$ 情况下应力范围较高时,最大弯曲拉应力与焊接残余应力之和将超过材料的屈服应力,产生较严重的损伤,并缩短其疲劳寿命;而当应力范围较低时,则两者之和仍可能处于弹性范围以内,因此应力比不同不会对疲劳寿命产生影响。

图7中给出了板厚为40mm试件的试验结果,与国外有关试验结果比较可以看出,本试验的疲劳寿命比国外Booth^[8]和Leeuwen^[9]的试验结果都长。这表明,以国产平台Z向钢E36—Z35根据我国焊接工艺规程制作的焊接接头,在空气中的疲劳性能,比国外采用BS 4360和Grade 50D钢的焊接接头疲劳性能好。

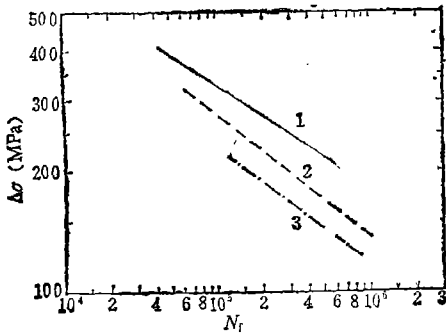


图7 本试验与国外试验结果比较
1—本试验(40mm, $\rho = -1$);
2—Booth(38mm, $\rho = -1$);
3—Leeuwen(40mm, $\rho = 0.1$)

2. 海水中的自由腐蚀疲劳

在海水中我们一共进行了43个焊接接头试件的自由腐蚀疲劳试验,其中31个试件是在加载频率为0.2Hz下进行的;12个试件是在加载频率为1Hz下进行的,以探讨加载频率对海水腐蚀疲劳寿命的影响。

图8给出了加载频率为0.2Hz下三种板厚(40mm、32mm、16mm)的试验结果,图8中 $\Delta\sigma-N_f$ 曲线的截距和斜率即回归系数依次分别为 $a_{40} = 3.766$, $a_{32} = 3.820$, $a_{16} = 3.803$ 和 $b_{40} = -0.264$, $b_{32} = -0.277$, $b_{16} = -0.255$;相关系数为 $\gamma_{40} = -0.934$, $\gamma_{32} =$

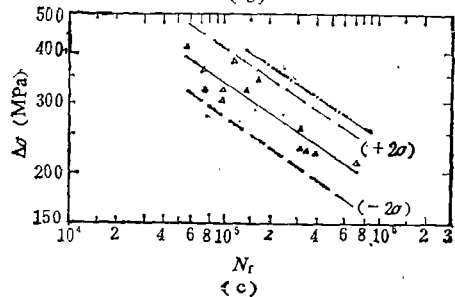
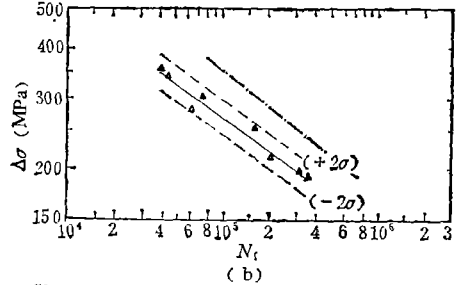
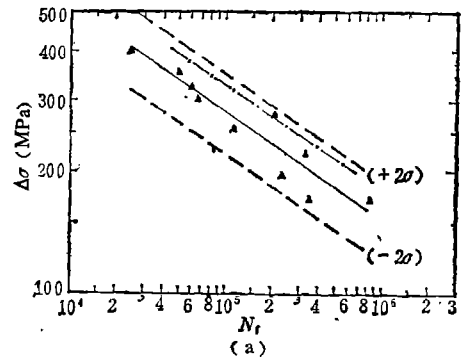


图8 海水中 $\Delta\sigma-N_f$ 试验结果(0.2Hz)
—·— 空气中的平均寿命曲线
(a)—40mm厚; (b)—32mm厚; (c)—16mm厚;
▲—悬臂弯曲型; △—四点弯曲型

-0.981, $r_{16} = -0.903$ 。这表明试验的结果分散性不大, 相对来看厚度较薄的16mm试件的相关系数较小, 分散性较大些。

图8同时还给出了相同厚度焊接接头在空气中的疲劳平均寿命曲线。与海水中自由腐蚀比较表明, 就平均寿命而言, 自由腐蚀疲劳寿命明显低于空气中的疲劳寿命。对于40mm, 32mm和16mm不同板厚的试件, 自由腐蚀约依次为空气中的57%, 43%和36%。可以看出, 随板厚的增加海水自由腐蚀疲劳寿命比空气中疲劳寿命的差距要少一些。总的看来海水自由腐蚀疲劳寿命约是空气中疲劳寿命的1/2~1/3。

从16mm板厚试件不同加载形式的试验数据来看, 由相关系数表明分散性不大, 这说明海水自由腐蚀疲劳寿命不受加载形式不同的影响。试验结果还表明, 与空气中试验结果一样, 对于原始焊接状态下的焊接接头, 在海水中的自由腐蚀疲劳寿命也不受钢板压延方向不同的影响。

图9给出了板厚为40mm, 32mm和16mm焊接接头试件在海水中自由腐蚀疲劳的平均寿命曲线, 它们的斜率是相近的, 40mm和32mm板厚试件的曲线几乎重合, 这是由于试验数据分散性所致。

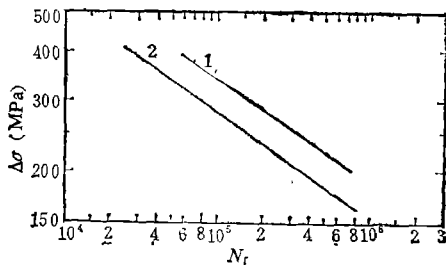


图9 海水中不同板厚平均寿命曲线
($b = -0.25$)
1—16mm厚板; 2—40mm、32mm厚板

从图9中可以看出板厚增加使焊接接头的海水自由腐蚀疲劳强度明显降低, 我们建议海水自由腐蚀疲劳强度的厚度修正公式为

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

上述三种不同厚度试件的自由腐蚀疲劳曲线的斜率 b 均接近等于-0.25, 因此由 $N\Delta\sigma^m = c$ 中的 $m = 4$, 则可得厚度对海水自由腐蚀疲劳寿命的修正公式为

$$N = N_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^4 \quad (5)$$

式中的符号定义同空气中的公式符号。

可见在海水自由腐蚀情况下, 40mm板厚的焊接接头疲劳寿命只是16mm板厚的40%, 这里的厚度影响比空气中稍小一些。这与1981年Gurney^[6]提出的修正公式也基本相同, 只是这里 $m = 4$ 与文献[6]中 $m = 3$ 不同(参见文献[7])。

图10给出了板厚为40mm试件的海水自由腐蚀疲劳试验结果。从与国外有关试验结果比较中可以看到, 本试验的疲劳平均寿命比国外Booth^[10]试验的结果长。何况后者的海水温度为5℃~8℃, 比本试验海水温度19℃~21℃低。海水温度低, 自由腐蚀疲劳寿命是增加的。可见, 国产平台Z向钢E36-Z35, 按我国焊接工艺规程制造的焊接接头, 在海水中的自由腐蚀疲劳性能要比Booth采用的BS 4360和Grade 50D钢的焊接接头好。

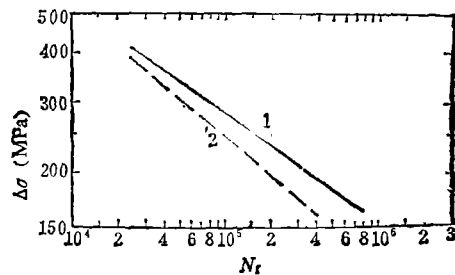


图10 海水中疲劳试验与国外的结果比较
1—40mm ($\rho = -1$, 19℃~21℃);
2—Booth^[10]38mm ($\rho = -1$, 5℃~8℃)

图11给出了加载频率为1Hz情况下, 板厚为16mm试件在海水中自由腐蚀疲劳的试验结果。它的平均疲劳寿命比加载频率为0.2Hz稍有增加, 但差别不大, 约增加20%。

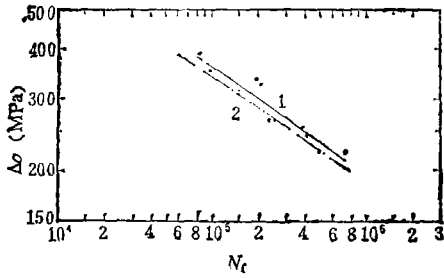


图 11 加载频率对海水腐蚀疲劳寿命影响
(板厚16mm)
1—1Hz, 2—0.2Hz

关于加载频率对焊接接头在海水中自由腐蚀疲劳寿命的影响如何,目前仍存在争议,过去大都认为加载频率的减小,疲劳寿命会降低,只有西德Oliver等人的工作^[11]认为,加载频率影响不大;近年来挪威Berge等人的试验结果^[12]表明,加载频率在0.1Hz到1Hz之间,对有阴极保护的腐蚀疲劳寿命无明显影响;日本的试验结果^[13]也表明,加载频率在0.1Hz与0.5Hz之间影响很小。究竟影响怎样,还需要有更多的试验结果,才能得到确切的结论。

3. 阴极保护条件下的海水腐蚀疲劳

焊接接头在阴极保护条件下(-850mV, ±30mV、SCE)的海水腐蚀疲劳,共进行了36个试件试验。图12给出了三种厚度(40mm、32mm、16mm)的试验结果。图中 $\Delta\sigma-N_f$ 曲线的截距和斜率即回归系数依次分别为 $a_{40}=3.536$, $a_{32}=3.447$, $a_{16}=3.416$ 和 $b_{40}=-0.221$, $b_{32}=-0.202$, $b_{16}=-0.163$;相关系数依次分别为 $\gamma_{40}=-0.961$, $\gamma_{32}=-0.929$, $\gamma_{16}=-0.870$, 相关系数表明试验数据分散性不大,相对来说,厚度较薄的16mm试件的分散性大一些。

和前面两种试验情况一样,焊接接头在阴极保护条件下,海水腐蚀疲劳寿命不受加载方式不同的影响;也不受钢板压延方向不同的影响。

图12同时绘出了相同厚度焊接接头在空气中和海水中自由腐蚀的疲劳平均寿命曲

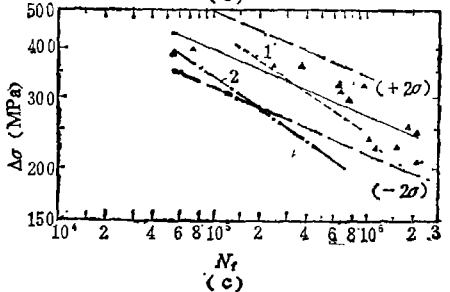
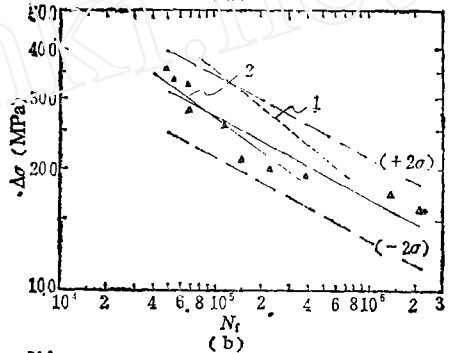
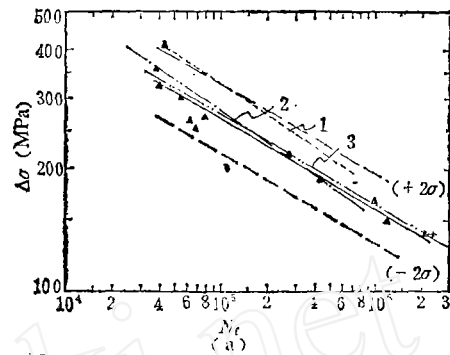


图 12 阴极保护下 $\Delta\sigma-N_f$ 试验结果
(a)—40mm板厚; (b)—32mm板厚;
(c)16mm板厚; ▲—悬臂弯曲型;
△—四点弯曲型; 1—空气中;
2—海水自由腐蚀; 3—Booth试验曲线

线,及有阴极保护(-850mV、±30mV、SCE)的腐蚀疲劳寿命曲线,其斜率(绝对值)后者比前两种小;在 N_f 较大的情况下,后者的疲劳寿命大于海水中自由腐蚀疲劳寿命,甚至可以达到或超过空气中的疲劳寿命。

上述结果和近年来国外许多工作^[9,10,13,14,15,16]的试验结果是一致的,也就是说适当电位的阴极保护,在低应力长寿命的范围内,可以使焊接接头的海水腐蚀疲

寿命提高到甚至超过空气中的疲劳寿命。通常海上平台在服役期间所受海浪载荷的周次,都在 $10^7 \sim 10^8$ 次以上,因此阴极保护在如此长寿命范围产生的效果是十分明显和肯定的。

图13给出了板厚为40mm、32mm和16mm国产平台Z向钢E36—Z35的焊接接头在阴极保护条件下(−850mV、±30mV、SCE)的海水腐蚀疲劳平均寿命曲线(给定 $b = -0.2$);同时也给出了在相同阴极保护条件下进口平台钢板厚为25mm(A537)和板厚为19mm(A131)的焊接接头试件在海水中的腐蚀疲劳平均寿命曲线^[5](给定 $b = -0.2$)。

需要指出, A537和A131平台钢板的化学成分与机械性能与国产平台钢E36—Z35差别不大。从图13中可以看到,板厚增加,使焊接接头试件在有阴极保护下的海水腐蚀疲劳强度明显降低。

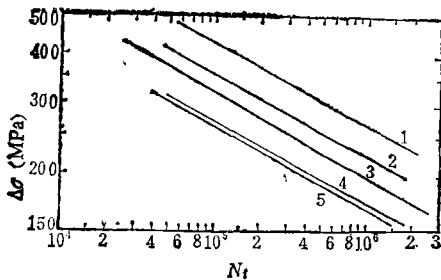


图13. 阴极保护下不同厚度的海水腐蚀疲劳寿命曲线 ($b = 0.2$)

1—16mm厚; 2—19mm厚^[5]; 3—25mm厚^[5]
4—32mm厚; 5—40mm厚

由本试验结果,建议采用下式表述:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

对焊接接头在阴极保护(−850mV、±30mV、SCE)条件下海水腐蚀疲劳强度进行厚度修正。由于分析比较中 $b = -0.2$,因此 $N\Delta\sigma^m = c$ 中取 $m = 5$,则由公式(6)得到疲劳寿命厚度修正公式为

$$N = N_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (7)$$

可见在有阴极保护条件下40mm板厚的焊接接头,其海水腐蚀疲劳寿命只是16mm板厚焊接接头的10%,这比空气中和海水自由腐蚀条件下的厚度修正要大得多。显然1981年Gurney^[6]对焊接接头在有阴极保护条件下的海水腐蚀疲劳寿命提出的厚度修正公式是不合适的,该公式为

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{1}{4}};$$

$$N = N_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{3}{4}}, \quad (m = 3)$$

(见文献[7])。

在图12中还给出了Booth^[10]试验结果的平均寿命曲线,其试件与试验条件与本工程很相近(板厚38mm,加载频率 $\frac{1}{6}$ Hz。

应力比 $\rho = -1$,海水温度 $5^\circ\text{C} \sim 8^\circ\text{C}$,阴极保护电位−830mV、SCE),其试验平均寿命曲线也非常接近。不过,Booth试验的海水温度较低(海水温度低腐蚀疲劳寿命一般是要增加的),而且试件也稍薄一些。由此可见,国产平台钢E36—Z35根据我国焊接工艺规程制作的焊接接头,在有阴极保护条件下的海水腐蚀疲劳性能,比Booth采用的平台钢BS 4360和Grade 50D的焊接接头也要好一些。

六、结论

1. 在空气中、海水中自由腐蚀和有阴极保护(−850mV、±30mV、SCE)等三种不同的试验条件下,焊接接头试件的疲劳破坏都是从焊趾处产生裂缝而断裂的;

2. 上述三种试验条件下的疲劳寿命数据分散性不大,相对来看,厚度较薄试件的试验数据分散性大一些;

3. 上述三种试验条件下的疲劳寿命,

不受弯曲加载形式不同的影响,也不受钢板压延方向不同的影响;

4. 由于原始焊接状态下焊接残余应力的存在,导致当空气中应力范围较高时,应力比 $\rho=0.05$ 情况下的焊接接头疲劳寿命,比 $\rho=-1$ 情况下的疲劳寿命短得多;随应力范围的降低,两者趋于一致;

5. 16mm板厚在海水自由腐蚀情况下,加载频率为1Hz时的焊接接头疲劳平均寿命,比0.2Hz的疲劳平均寿命稍有增加(约增加20%);

6. 就平均寿命而言,焊接接头在海水自由腐蚀的疲劳寿命约为空气中疲劳寿命的 $1/2\sim 1/3$,随板厚增加,两者差别减小;

7. 在寿命不很短的范围,焊接接头在阴极保护(-850mV 、 $\pm 30\text{mV}$ 、SCE)条件下的海水腐蚀疲劳寿命,大于海水中自由腐蚀条件下的疲劳寿命;

8. 在低应力长寿命范围中,焊接接头在阴极保护(-850mV 、 $\pm 30\text{mV}$ 、SCE)条件下的海水腐蚀疲劳寿命,可以达到甚至超过空气中的疲劳寿命,通常海上平台服役期都相当长,因此阴极保护的效果是很明显的;

9. 板厚增加使焊接接头疲劳强度明显降低,为此,本文分别建议在上述三种试验条件下的疲劳强度和疲劳寿命的厚度修正公式;

10. 从本试验结果与国外试验条件相近的试验结果比较,初步表明,用国产海上平台钢E36—Z35根据我国焊接工艺规范制作的焊接接头,在上述三种试验条件下,其疲劳性能都比国外平台钢BS 4360和Grade 50D的焊接接头疲劳性能要好(最后结论有待管节点试验结果,再进一步证实)。

参 考 文 献

[1] European Offshore Steels Research Seminar., Proceedings, Cambridge, UK. 27—29, November 1978

[2] Steel in Marine Structures, International Conference, Paris, France, 5—8 October 1981

[3] Steel in Marine Structures, Proceedings of the 3rd International ECSC Offshore Conference on Steel in Marine Structures (SIMS'87), Delft, the Netherlands, June 15—18, 1987

[4] 薛以年,李禾、李延莘,焊接钢接头的水腐蚀疲劳及其试验装置,中国钢结构协会海洋钢结构专业委员会第一次学术交流会议论文集,1985, p. 224

[5] 薛以年、徐纪林、李禾、李延莘,焊接钢接头的水腐蚀疲劳试验研究,《海洋工程》第五卷,1987

[6] T. R. Gurney, Some comments on fatigue design rules for offshore structures, Proceedings and International Symposium on Integrity of Offshore Structures, 219—234, 1981

[7] 薛以年、徐纪林、李禾、李延莘,板厚对焊接接头在空气中和海水中疲劳性能的影响,《海洋工程》第七卷,1989

[8] G. S. Booth, Constant amplitude fatigue tests on welded steel joints performed in air, 同[1]中III/p4, 1978

[9] J. L. Van Leeuwen, J. De Back, G. H. G. Vaessen, Constant amplitude fatigue tests on welded steel joints performed in air and seawater, 同[2]中 paper 2. 1, 1981

[10] G. S. Booth, Constant amplitude fatigue tests on welded steel joints performed in sea water, 同[1]中IV/p9, 1978

[11] R. Oliver, Corrosion fatigue behaviour of offshore steel structures under constant amplitude loading, 同[2]中, Paper 2. 4, 1981

[12] S. Berge, O. C. Astrup, T. Simonsen and B. Lian, Effect of sea water and cathodic protection in fatigue of welded low carbon micro-alloyed steel, 同[3]中TS39, 1987

[13] K. Iida, State of the art in Japan, 同[3]中 PS 3, 1987

[14] O. Solli, Corrosion fatigue of weldments of C-Mn steel and the effect of cathodic protection, stress relieving treatment and saline atmosphere, 同[2]中Paper 2. 2, 1981

[15] A. Bignonnet, Corrosion fatigue of steel in marine structures, A decade of progress, 同[3]中 PS5, 1987

[16] O. Vosikovsky, R. Bell, D. J. Burns, U. H. Mohaupt, Effect of cathodic protection and thickness on corrosion fatigue life of welded plate T-joints, 同[3]中TS44, 1987

更正: 本刊1991年第2期(总第12期)第64页表3“压接铝套参数”最右一栏数字185、170、155应分别为1815、1667、1521。