

焊接钢接头的海水腐蚀疲劳试验研究

薛以年 徐纪林
李 禾 李延革

(中国科学院力学研究所)

提 要

本工作进行了板状焊接钢接头在空气中的常幅疲劳试验;和在海水中的常幅腐蚀疲劳试验(加载频率为0.2Hz,应力比 $R=-1$,海水温度 $\sim 20^{\circ}\text{C}$,阴极保护负电位 $\sim 850\text{mV}$, SCE)。将两者试验结果比较,初步表明,钢接头海水腐蚀疲劳的平均寿命约为空气中的1/2到1/3。本工作还进行了焊缝经过TIG熔修的试件的试验,初步结果表明,TIG熔修处理明显地增加了焊接接头的海水腐蚀疲劳(有阴极保护)寿命。

一、引 言

导管架海上平台长期在海水环境中工作,它主要的强度破坏形式是波浪载荷下的疲劳破坏。由于海水腐蚀与疲劳载荷的共同作用,钢结构在海水中的腐蚀疲劳破坏机理(主要是电化学作用)和空气中的疲劳破坏机理是明显不同的,因而寿命也就不一样。因此用空气中的疲劳设计规范来对导管架海上平台进行疲劳强度设计是不能令人满意的,必须进行海水腐蚀疲劳试验研究。导管架海上平台的腐蚀疲劳裂缝通常发生在管节点热点应力集中的焊趾处,所以一般要进行管节点的疲劳持久强度试验,但是要进行管节点大模型的海水腐蚀疲劳试验,不仅试验难度大,更主要的是必须模拟海浪载荷的低频率循环加载(0.2 Hz以下),试验时间长,需要相当大的试验费用。板状焊接钢接头试件的海水腐蚀疲劳试验是一个行之有效的途径,用它模拟管节点热点焊趾处的受力状态,研究海水环境对管节点疲劳性能的影响;得到的疲劳寿命曲线亦可为平台的疲劳设计提供依据。

国外已进行了不少焊接钢接头的海水腐蚀疲劳试验^[1,2],但是他们的结论不一致,有些影响因素还没有研究结果。因此我们还需要研究国内焊接工艺技术以至国产钢材所制造的管节点的腐蚀疲劳性能。要进行这种试验,首先必须建立低频加载的多试件海水腐蚀疲劳试验装置。因为要得到大量试验数据,而试验周期又很长,不可能用常规的试验机。作为试验计划的一个主要组成部分,我们已经建成可以同时进行30个左右试件的海水腐蚀疲劳试验装置^[3]。

本试验工作先做了19个焊接钢接头试件在空气中的疲劳持久强度试验,得到了疲劳寿命曲线,以此为基础,可与海水中的试验结果进行比较。对于焊接钢接头试件在海水中

(有阴极保护)的腐蚀疲劳持久强度试验,到目前为止已得到了17个试验数据和初步的疲劳寿命曲线,并与空气中的试验结果初步进行了比较,海水中的试验仍在继续进行。我们还进行了对焊缝经过TIG(钨极氩弧)熔修处理的试件的海水腐蚀疲劳(有阴极保护)试验,来考察TIG熔修措施对焊接构件的海水腐蚀疲劳(有阴极保护)性能的有利影响。TIG熔修是由郑州机械所焊接研究室进行的。

二、试件的材料、几何形状和制作过程

1. 材料

试件的钢材是进口的海上平台用钢A537和A131钢板,它的化学成份和机械性能见表1和表2。

表1 钢材的化学成份(%)

	C	S	Si	Mn	P	Ni	Cr	Cu	Mo	V	Nb	Al
母 材	0.17	0.003	0.49	1.35	0.011	0.17	0.022	0.15	0.035	0.050	0.024	0.024
焊 缝	0.15	0.007	0.26	0.15	0.009	0.41						0.009

表2 钢材的机械性能

厚度(mm)	σ_s (Nmm^{-2})	σ_b (Nmm^{-2})	δ (%)	ψ (%)	E (Nmm^{-2})	μ	
A 537	254	375	531	37.0	72.0	2.16×10^5	0.27
A 131	19.1	294	443	42.6	77.4	2.16×10^5	0.27
焊 缝		492	578	30.0	75.0		

2. 几何形状

本试验采用十字型和对接型的板状焊接接头试件,在试验中承受弯曲应力,其中一类是四点弯曲加载形式,一类是悬臂梁加载形式,见图1。

3. 试件制作过程

先将钢板按几何形状要求,用自动切割机气割下料及剖口,剖口表面用电动砂轮人工打磨,焊接成大的十字型接头或对接型接头,然后机械切割成条状试件坯,最后再机械加工得到所要求的几何尺寸和形状。焊接采用手工电弧焊,焊缝是45°剖口焊透板的厚

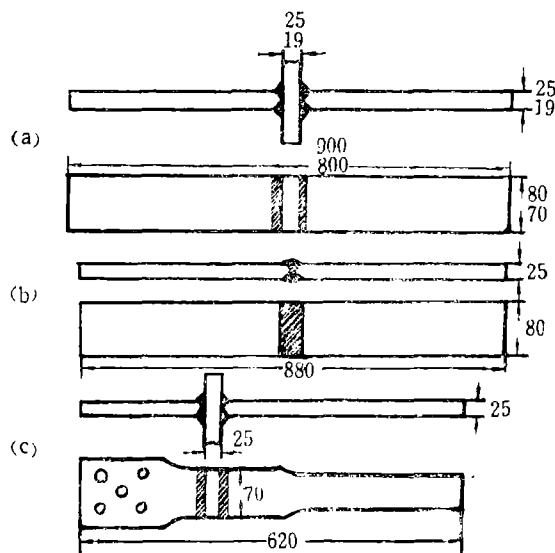


图 1 (单位:毫米)

度,焊接完全按管节点的焊接工艺要求进行。钢板焊接时对其压延方向是有要求的,对四点弯曲加载形式的试件,左右两边钢板的压延方向相互垂直,这是为了比较钢板的不同压延方向对疲劳性能的影响。

三、试验方法

本试验采用的板状焊接接头试件(见图1)承受四点弯曲形式和悬臂梁形式的弯曲载荷^[3],由此模拟管节点热点处的弯曲应力状态。接头焊趾处由于几何形状和焊接引起的高度应力集中,疲劳裂缝通常在焊趾处产生。本试验是以恒载荷进行控制的。四点弯曲加载形式的十字型和对接型试件在横向隔板或对接焊缝的左右两边,距离焊趾约25mm处的钢板上下两面的中心线上,各贴有一对应变片,每对应变片联成半桥来测量弯曲形状的表面最大应变。悬臂梁加载形式的试件是在横向隔板的夹持端一边,在中心线左右两侧距离焊趾约15mm处的钢板上下两面,贴有两对应变片来测量弯曲应变。四点弯曲加载的内跨距是固定的,为200mm,外跨距可以在430mm和850mm之间调节,以此可调节外加弯曲载荷的大小。

四、试验条件

人们根据过去的工作,认为影响焊接接头海水腐蚀疲劳性能的主要因素是^[3]:加载频率,应力比,海水温度和电化学势(阴极保护负电位),当然海水成分也是重要的。一般认为循环加载频率对空气中的疲劳强度影响不大,这里对空气中试验取频率为1~3Hz。对海水中试验,我们取加载频率为0.2Hz应力比 $R=-1$,海水温度为19~20℃,并且都采用外加电流方法对焊缝附近施加阴极保护,阳极采用铂丝绕在试件焊缝周围的有机玻璃架上,阴极负电位保持在-820mV到-880mV(参比电极为饱和甘汞电极SCE)之间。本试验采用人工配制的海水(按ASTM, D 1141-75配方)循环流过包围试件焊缝的塑料海水槽,使焊缝局剖表面不断有海水流过,大约2分钟至5分钟在试件海水槽中更换一次,平均流速约为1l/min。海水成份和参数范围见表3和表4。

表3 海水成分(g/l) (ASTM, D1141-75配方)

NaCl	MgCl ₂	Na ₂ SO ₄	CaCl ₂	KCl	NaHCO ₃	KBr	N ₃ 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

表4 海水参数范围

pH值	盐度(g/l)	氯度(g/l)	含氧量	温度
7.5~8.5	32~36	18~20	92~99%饱和 (11~12mg/l)	19~20℃

五、试验结果和讨论

本试验结果以焊趾处弯曲应力状态的表面最大应力范围，和疲劳破坏的载荷循环次数关系给出，应力范围 ΔS 由焊趾附近的应变片测量的应变范围乘以钢材的弹性模量($E \times 2.16 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$)得到；载荷循环次数 N_f 是裂缝扩展到板厚一半以上时读数，它与破坏寿命已很接近。应力范围 ΔS 和疲劳寿命 N 在直角对数坐标系里一般呈线性关系，即 $\log \Delta S = a + b \log N$ 。由于影响疲劳寿命的因素很多，试验数据通常比较分散，我们把 ΔS 和 N 的试验数据在直角对数坐标系中进行线性回归分析，得到 $\Delta S-N$ 关系作为平均寿命的疲劳强度曲线；由平均寿命曲线加减二倍标准偏差 σ ，可得到存活率为95%的疲劳寿命区域。

1. 空气中的试验结果

焊接钢接头试件在空气中常幅疲劳载荷下的试验数据在图2中给出；经过线性回归分析得到的平均寿命曲线；和加减二倍标准偏差 σ 的存活率为95%的疲劳寿命区域，也在图2中给出；回归系数(斜率) b 为 -0.1968 ，相关系数 r 为 -0.9273 。一般 $r^2 > 0.8$ 就表明试验数据分散性不大而结果很好，所以这里的空气中的试验结果是令人满意的。本试验工作中有四个试件在加载过程中有超载情况，结果表明超载增加了疲劳寿命，但试验数据未在图中给出，也没有一齐作线性回归分析。

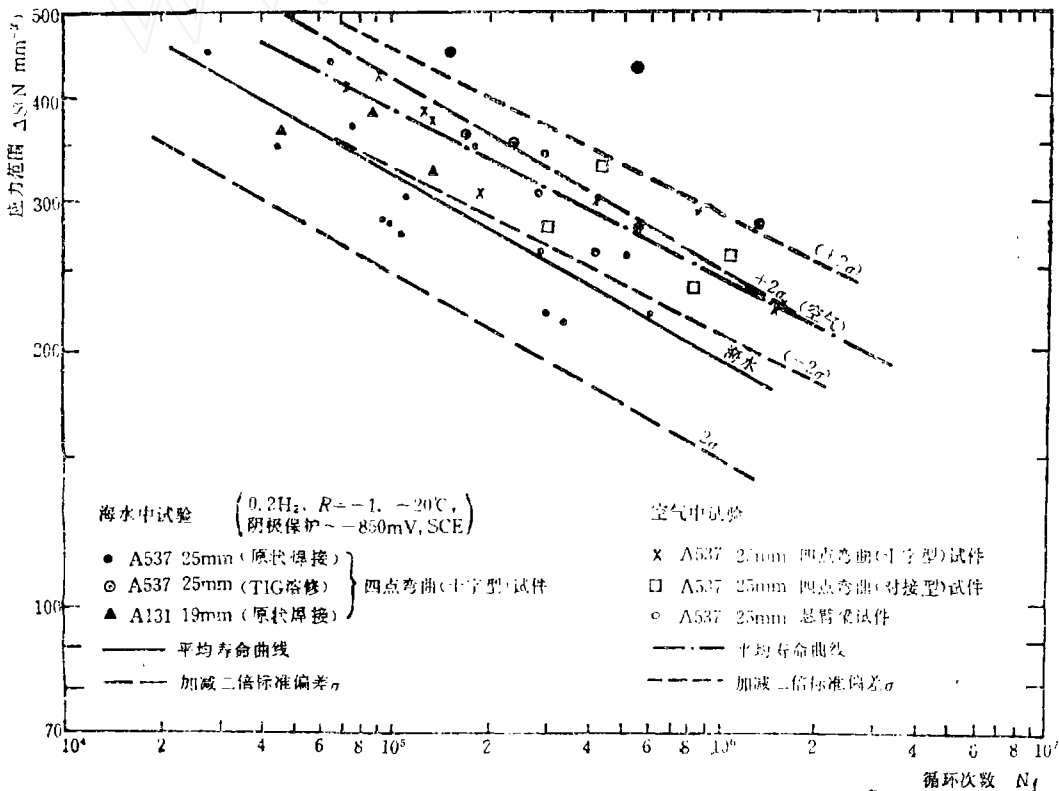


图 2

本试验的数据是由十字型和对接型板状焊接接头两种试件；以及四点弯曲型和悬臂梁型两种加载方式的弯曲受力状态下得到的，如上所述，它们在线性回归分析中相关系数值很理想，因此可以看出焊接钢接头在空气中的疲劳寿命不受试件类型和受载方式的影响。

由试验结果可以看到，对于四点弯曲型试件，有五个试件焊趾处产生的裂缝是在平行于钢板压延方向的一边，有六个试件焊趾处产生的裂缝是在垂直于钢板压延方向的一边，有一个试件两边均在焊趾处产生裂缝，由此可见，对于原始焊接状态的焊缝，钢板压延方向与焊缝的方向是平行或垂直对焊接接头在空气中的疲劳寿命没有什么影响。疲劳裂缝大多在焊趾处产生，有个别试件的裂缝在焊肉上产生，这可能是由于焊接质量的原因造成的。

2. 海水中的试验结果

焊接钢接头试件在海水中的常幅疲劳载荷下的试验数据在图2中给出，也给出了由线性回归分析得到的平均寿命曲线和加减二倍标准偏差 σ 的存活率为95%的疲劳寿命区域，回归系数 b 为 -0.218 ，相关系数 r 为 -0.837 。一般认为 $r^2 > 0.8$ 时很好， $r^2 < 0.36$ 时不可取，可见这里海水中的试验数据的分散性较小。

从图2中可以看到，由已得到的17个试件的海水腐蚀疲劳（阴极保护负电位约 -850mV SCE ）试验数据和初步的疲劳寿命曲线，就平均寿命而言比空气中的疲劳寿命低，约为 $1/2$ 到 $1/3$ ；但是就95%存活率的海水腐蚀疲劳寿命区域来说，几乎所有的空气中试验数据都在分散带内，因此差别也不算太大，待以后有更多的试验数据再给予恰当的结论。

由试验结果看到，疲劳裂缝大多在焊趾处产生，有个别试件断在焊肉上，可能由于焊接质量造成的。试件焊缝的方向与钢板压延方向平行或垂直时，均有在焊趾处断裂的情况。初步看来，钢板的压延方向对焊接接头在海水中的疲劳寿命（有阴极保护）影响不大。

本试验数据是由两种不同厚度和品种的钢板试件（A537，25.4mm和A131，19.1mm）得到的，它们在线性回归分析中相关较好，这表明两者的海水腐蚀疲劳强度差别不大。

本文选取了一些试件材料和试验条件与本试验接近的国外试验数据进行了比较，见图3。总的来说，本试验的海水腐蚀疲劳试验数据与国外试验数据是接近的，有些差别是由于试验的条件不同产生的。由此可见，我们试件的焊接工艺和质量与国外水平是相当的。Booth^[1]的试验数据略低于本试验的结果，这可能是由于他的试件厚度（38mm）比我们大，而焊接接头厚度大而疲劳寿命低，这是被许多试验证实的；他试验的海水温度（5—8℃）也比我们的低，一般认为海水温度低对于自由腐蚀情况将使寿命增加，但是对于有阴极保护情况是否有些影响还不清楚。Solli^[2]的试验数据高于本试验的结果，我们认为这是由于他的加载频率（1Hz）比本试验频率高而引起的。

图3中还画出了设计规范曲线AWS-X modified（在寿命 $10^4 \sim 10^7$ 范围内与API-X规范曲线相同），本试验数据与国外试验数据（包括一些自由腐蚀的试验数据）均在此规范曲线以上，所以用它来对管节点进行疲劳强度设计是安全的，且偏于保守。

3. TIG熔修处理的影响

近年来，在改善焊接构件抗疲劳性能的焊后处理方面，TIG熔修受到人们的重视，因为它价格低廉，使用方便，而且噪音低，劳动条件好，很受工人们欢迎。TIG熔修过的焊接接头在空气中的疲劳强度有明显的提高，已被许多试验所证实，然而对于海水中的腐蚀

疲劳强度是否也有好处呢? Leeuwen等^[2]认为TIG熔修措施在海水腐蚀疲劳情况下不起多大作用,因为他们认为熔修主要是消除焊缝区的表面缺陷,即表面裂纹和夹杂物这些疲劳源,但是熔修过的焊接接头浸入海水中,很快就形成许多腐蚀坑,这就相当于一些表面缺陷的疲劳源。实际上这个观点以及有关的试验结果是在自然腐蚀条件下得到的,如果对焊缝进行阴极保护,使腐蚀坑不易产生,则TIG熔修的有利因素就有可能起作用。此外TIG熔修处理还有改善焊趾外形,降低应力集中;以及改善材质,使脆性转变温度降低,韧性提高等有利因素。有阴极保护的TIG熔修焊接接头试件的海水腐蚀疲劳试验数据尚未见到,我们进行了这样的试验,从已得到的六个试件的试验结果表明,熔修处理过的试件,它的海水腐蚀疲劳寿命明显地增加。这六个试件是材料为A537,厚度为25.4mm的十字型焊接接头,承受四点弯曲加载;试验条件是:循环加载频率为0.2Hz,应力比 $R = -1$,海水温度为19~20℃,阴极保护负电位为-820~-880mV (SCE)。

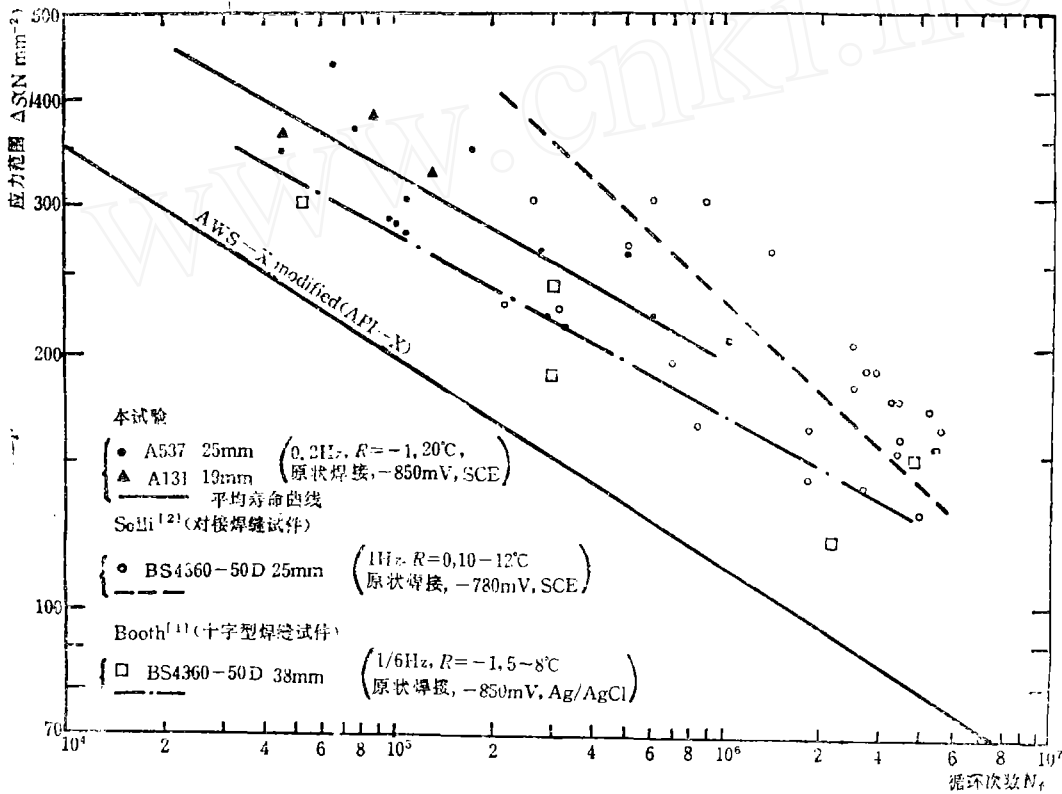


图 3

这里的试验结果也在图2中给出,它们的寿命是未经熔修的试件平均寿命的3倍以上,个别达到20倍,而且几乎都在未经熔修试件的海水腐蚀疲劳(有阴极保护)寿命曲线的95%存活率的分散带以外。它们的疲劳裂缝多数不产生在焊趾处,三个断在母材上,一个断在焊肉上,一个断在焊肉根部,只有一个断在焊趾处,但断口不平整。显然,熔修改善

了焊趾处的材料和几何形状,从而提高了海水腐蚀疲劳强度。如果将TIG熔修应用于管节点的交焊处,也有希望延长其海水腐蚀疲劳(有阴极保护)寿命。但是,它主要在于延迟焊缝疲劳裂缝的起裂,而起裂寿命只占管节点总寿命的一部分。究竟TIG熔修对管节点在海水中的腐蚀疲劳(有阴极保护)总寿命能增加多少,还要由进一步的试验来回答。

参加本工作的还有邓蓉英、张文华、王亚立、于桂清、秦嘉亮和唐驰。

参 考 文 献

- [1] European Offshore Steels Research Seminar, Cambridge, UK, 27—29 Nov. 1, 1978.
- [2] International Conference, Steel in marine structures, Paris, France, 5—8 Oct., 1981.
- [3] 薛以年,李禾,李延莘,“焊接钢接头的海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年。

EXPERIMENTAL STUDY ON SEAWATER CORROSION FATIGUE OF WELDED STEEL JOINTS

Xue Yinian Xu Jilin Li He Li Yanping

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

Constant amplitude fatigue tests have been carried out on welded steel joints in air and in sea water. The seawater corrosion fatigue tests have been conducted at loading frequency of 0.2 Hz, stress ratio of -1, seawater temperature of about 20°C and cathodic protection with the potential about -850 mV, SCE. The preliminary results obtained show that the fatigue life of welded steel joints in sea water appeared to be a factor of 2-3 times shorter than in air. The seawater corrosion fatigue tests have also been conducted to assess the improvement in fatigue strength after TIG dressing of welded steel joints. The preliminary results obtained indicate that the seawater corrosion fatigue life under cathodic protection appeared to be significantly increased after the welded steel joints were subjected to TIG dressing.