

随机变幅载荷下焊接接头的 海水腐蚀疲劳研究

薛以年 徐纪林 李延革 李 禾

(中国科学院力学研究所)

提 要

海上平台经受的波浪力作用是随机变幅循环载荷, 本工作采用板状焊接接头模拟管节点热点焊趾处的受力状态, 并模拟实际海洋环境与加载条件, 海水温度为 20°C 循环流动, 阴极保护电位为 -850mV (SCF), 加载频率为 0.2Hz , 应力比为 -1 , 进行随机变幅载荷下的海水腐蚀疲劳试验, 试验结果与常幅载荷下的腐蚀疲劳寿命作了比较。本文利用线性累积损伤Miner法则, 以随机变幅加载下的腐蚀疲劳寿命进行了估算, 结果表明, 估算的寿命与试验数据很接近, 效果令人满意。

一、引 言

导管架海上平台的主要强度破坏形式是波浪载荷长期作用下的腐蚀疲劳破坏, 腐蚀疲劳裂缝通常产生在管节点热点焊趾处, 而后扩展, 直至破断。我们曾用板状焊接接头试件模拟管节点热点处的受力状态, 进行常幅循环载荷下的海水腐蚀疲劳试验^[1~3], 这是研究海水环境对管节点疲劳强度影响行之有效的方法。但是海上平台经受的波浪力作用并非是常幅循环载荷, 而是随机变幅的循环载荷, 同时, 平台结构的本身的响应也产生较高频率的振动, 因此, 实际上平台结构经受的是具有宽带性质的随机载荷, 对于不同的平台, 载荷谱是不同的。为了进行随机载荷下的腐蚀疲劳试验, 一般只考虑波浪力作用的随机变幅循环载荷, 忽略结构的影响, 也就是在窄带随机载荷下进行试验。

本工作采用板状焊接接头试件, 在随机变幅循环载荷下, 进行有阴极保护的海水腐蚀疲劳试验, 模拟海上平台在服役过程中的实际情况, 从试验结果来研究分析焊接接头在随机变幅环境载荷下的海水腐蚀疲劳性能。关于这方面的试验数据还很少, Holmes^[4]仅得到过三个有阴极保护的海水腐蚀疲劳试验数据, 很难作可靠的分析和结论。本工作依据我们已得到的焊接接头常幅循环载荷下有阴极保护的海水腐蚀疲劳 $S-N$ 曲线, 对随机变幅循环加载进行线性累积损伤的寿命估算, 得到了满意的结果, 从而为研究随机载荷下的海水腐蚀疲劳问题提供了有效的途径。

二、载 荷 谱

波浪力作用的循环载荷基本上是窄带随机过程,从短期来看,过程是平稳的,波高分布接近于瑞利(Rayleigh)分布;从长期来看,由于海况有时平和,有时恶劣,甚至出现暴风雨,因此过程是非平稳的。虽然海况波高的长期分布有许多记录,但是波高与载荷之间的关系并非线性,需要通过分析计算才能从波高分布得到载荷过程。本试验选用C/12/20随机变幅载荷谱^[5],它是由欧洲北海收集的海况波高记录,经过理论分析得到的,具体是针对导管架中直径为3.66m的圆柱构件,在水深6.1m处经受的波浪载荷,C/12/20载荷的应力峰值超越概率曲线见图1所示,其表达式可由经验公式给出:

$$P\left(\frac{S}{\sigma_{LT}}\right) = \exp\left\{-0.8594\left(\frac{S}{\sigma_{LT}}\right)^{1.2715}\right\} \quad (1)$$

其中 $\frac{S}{\sigma_{LT}}$ 是应力峰值与长期均方根应力之比。

在试验中,实现随机变幅循环加载需要在一定的加载周次后重复,即以伪随机载荷谱进行试验。C/12/20载荷谱的谱块长度为 10^5 ,这一选取是照顾到两方面原因,一方面,谱块若太短,则不能包含低超越概率的较大载荷;另一方面,谱块太长,则不能精确地确定试件寿命。这个谱块长度意味着超越概率小于 10^{-5} 的峰值应力被排除在外,通过线性累积损伤计算表明,此截断水平不影响疲劳寿命的结果。本试验加载频率为0.2Hz,接近波浪频率,进行一个谱块的试验时间不到六天。

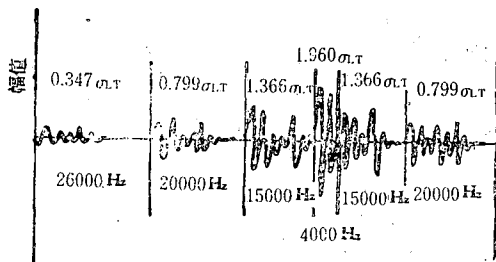


图2 C/12/20应力谱由六段不同均方根应力幅的瑞利分布组成

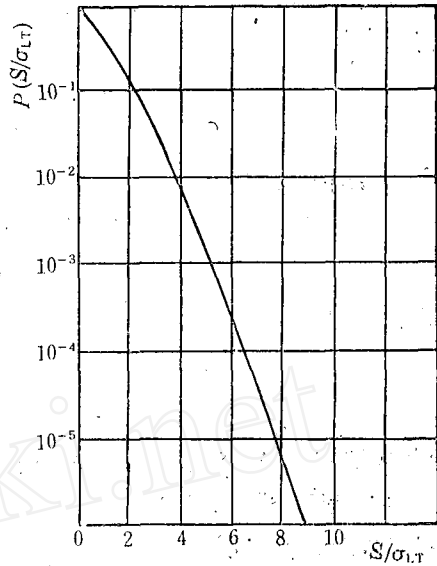


图1 C/12/20谱超越概率分布

峰值应力的长期分布可以方便地由几个不同幅值水平的瑞利分布来组成,而瑞利分布的随机变幅循环加载在试验室中是比较容易实现的。C/12/20谱由六个瑞利分布来组成,其中有四个不同的均方根应力幅值水平: $0.347\sigma_{LT}$, $0.799\sigma_{LT}$, $1.366\sigma_{LT}$, $1.960\sigma_{LT}$, σ_{LT} 为C/12/20谱的长期均方根应力幅值,见图2。这六个瑞利分布的次序排法反映天气平和、恶劣和出现暴风雨的海

况。

三、随机变幅循环加载的微机控制

如上所述, C/12/20谱的谱块由六个峰值为瑞利分布的小程序块组成, 瑞利分布的概率密度函数为

$$p\left(\frac{S}{\sigma}\right) = \frac{S}{\sigma} \exp\left(\frac{-S^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

概率分布函数为

$$P\left(\frac{S}{\sigma}\right) = \exp\left(\frac{-S^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

由(3)式可得到

$$S = \left\{ 2\sigma^2 \ln \frac{1}{P} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

(4)式即应力峰值 S 为瑞利分布的函数表达式, 其中 P 是在0和1之间的均匀分布随机数。

本试验用IBM-PC/XT微机产生加载谱信号, 对作动筒进行载荷控制, 并且进行数据采集和处理。首先用微机中的随机数源RND(X)产生0—1之间的均匀分布随机数, 随机数选取不能太少, 否则占内存太大, 又耗费计算时间; 但也不能太多, 否则分布不均匀。根据计算, 当随机数取10000个时, 均匀分布的误差 $e < 3\%$, 这里取20000个随机数, 由公式(4)计算得到瑞利分布的峰值 S , 再使之正弦化, 通过数模(D/A)变换以模拟量电压输送到电液伺服控制系统, 控制作动筒加载动作, 载荷水平由公式(4)中的参数 σ 进行调节。此外, 又通过模数(A/D)变换采集力传感器的反馈信号, 再求峰谷值进行数据处理。

四、应力控制参数

目前对于窄带随机疲劳还没有一个统一公认的应力控制参数, 本文选取均方根应力幅值 S_{rms} 来分析本试验结果, 因为, 一方面, 瑞利分布的载荷谱本身是以过程的均方根值表征的, 另一方面, 过去许多工作包括航空领域中随机疲劳问题表明, 均方根应力幅值很适合作为窄带随机加载过程的疲劳应力参数。必须指出, 均方根应力幅值是对过程而言, 而不是峰值的均方根值。对于正弦波形的瑞利分布载荷谱的峰值均方根值是过程均方根幅值的 $\sqrt{2}$ 倍; 这是应该注意的。

五、试 验

试件材料为国产海上平台Z向钢E36-Z35, 该钢板具有抗Z向撕裂的性能特点, 其化

化学成分和机械性能见表1和表2。

表1 E36-Z35钢板的化学成份(%)

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

试件为十字型板状焊接接头,几何形状和尺寸见图3所示。焊后不作任何处理,保持原始焊接状态。试件受悬臂弯曲的随机变幅循环载荷,以模拟管节点热点处的弯曲应力状态,试验是在自行设计建成的专用设备电液伺服腐蚀疲劳试验装置上进行的,加载装置见示意图图4。由微机产生瑞利分布的载荷谱信号输入电液伺服控制系统,控制作动筒加载动作;与作动筒联接有载荷传感器,产生的反馈信号一方面输回到控制系统,同时又用来进行数据处理,计算试件热点处的应力幅值。本试验系统可以同时进行三个试件在不同载荷水平下的试验,试验方法详见文献〔1〕。

表2 E36-Z35钢板的机械性能

σ_s (N/mm ²)	σ_b (N/mm ²)	δ_5 (%)	Ψ_2 (%)	$C_v-40^\circ\text{C}$ (kg·m)	$C_v-40^\circ\text{C}$ (时效) (kg·m)
403	548	33	72	19.4	10.3

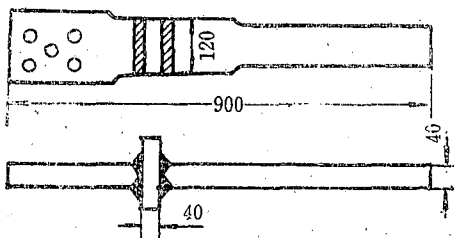


图3 试件几何尺寸(单位: mm)

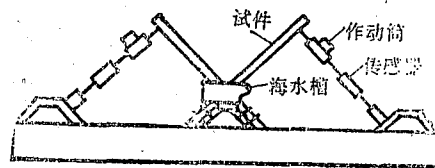


图4 加载系统

本试验加载频率为0.2Hz,接近波浪频率;应力比 $R=-1$ 。为模拟海洋环境,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,使焊缝表面不断有海水流过,海水温度控制在 $20^\circ\text{C}\pm 1^\circ\text{C}$ 的范围。根据导管架平台在关键部位进行阴极保护的实际情况,在试件焊缝处采用外加电流方法进行阴极保护,阴极保护电位保持在 $-850\text{mV}\pm 30\text{mV}$ (参比电极为饱和甘汞电极SCE)的范围。

六、试验结果与讨论

本工作共进行了六个焊接接头试件的随机变幅循环加载有阴极保护的海水腐蚀疲劳试验, 由于低频(0.2Hz)加载, 试验周期长, 寿命最长的试件连续做了两个多月才得到结果。试验结果表明, 腐蚀疲劳裂缝都产生在热点焊趾处, 而后扩展断开。试验数据仍以 $S-N$ 方式在直角对数坐标系中给出, 纵坐标为长期均方根应力范围 ΔS_{rms} ($\Delta S_{rms} = 2S_{rms}$), 横坐标为破断循环次数 N_f , 见图5。图5中同时给出了以均方根应力范围为应力参数的常幅循环加载焊接接头, 有阴极保护的海水腐蚀疲劳寿命 $S-N$ 曲线, 这是由常幅循环加载的 $S-N$ 曲线^[3] 利用 $\Delta S_{rms} = \Delta S/\sqrt{2}$ 关系式得到的。可以看到, 随机变幅载荷谱(C/12/20)加载下的海水腐蚀疲劳寿命, 在用均方根幅值应力参数表达时, 明显地低于常幅循环加载下的寿命。图5中还给出了Holmes的试验数据^[4], 该试验的寿命比本试验稍长一些, 主要是由于该海水温度(5°C)比本试验海水温度(20°C)低的原因, 其次, 该试件厚度(38mm)也略比本试验的试件(40mm)稍薄,

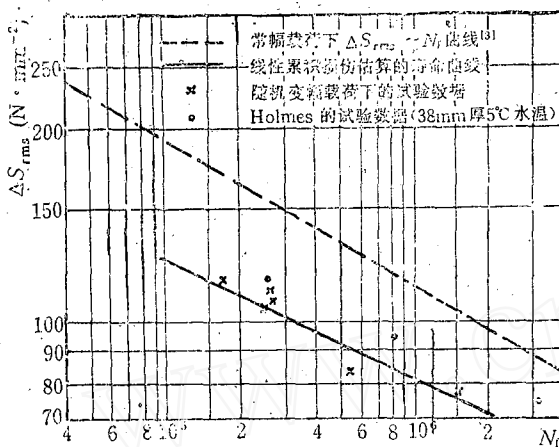


图5. 试验结果及线性累积损伤估算的寿命曲线

焊接接头的寿命是随板厚减小而增加的^[2]。因此两者试验结果应该说是相当符合的。

本试验用的是两吨作动筒, 由于作动筒容量的限制, 变幅加载的应力截断水平 $\frac{S}{\sigma_{LT}} = 4.2$, 此截断水平并不影响试验结果^[4]; 而且从我们下面进行的线性累积损伤计

算中也说明, $\frac{S}{\sigma_{LT}}$ 大于4.2的损伤累积已不重要。本试验加载的长期均方根应力 σ_{LT} 均小于 57N/mm^2 , 因此由截断水平为4.2来计算, 最大的峰值应力不超过 240N/mm^2 , 适当地叠加焊接残余应力和焊趾处的应力集中, 一般仍然处于弹性范围或超过不多 ($\sigma_c = 403\text{N/mm}^2$)。

七、线性累积损伤计算

线性累积损伤的Miner法则常用来估算变幅循环载荷下的疲劳寿命, 即

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (5)$$

其中 n_i 为对应于第 i 个应力水平的加载循环次数, N_i 为第 i 个应力水平下的常幅循环加载的破断循环次数。该方法假定每个应力循环是独立作用的, 不考虑前后循环应力的相互作用。

本工作线性累积损伤计算采用的 $S-N$ 曲线, 是与随机变幅循环加载试验条件完全相同的, 国产平台钢 E36-Z35 焊接接头常幅循环载荷有阴极保护海水腐蚀疲劳 $S-N$ 曲线^[3], 因此分析计算的结果最具有合理性。在低应力水平下的循环次数 N_f 值是由其 $S-N$ 曲线的延长线确定, 计算表明, 低应力水平的损伤累积比较小, 所以其对结果的影响不大。

本试验中, 每个瑞利分布小程序块中不同应力水平的加载循环次数 n_i 值, 由微机数据处理得到, 并由常幅循环加载的 $S-N$ 曲线^[3] 得到 N_{fi} , 再由公式 (5) 计算出总的 N_f 数, 通过不同长期均方根应力的 N_f 计算值连成曲线在图5中给出。可以看到, 本试验的疲劳寿命数据与线性累积计算曲线比较符合, 除了一个数据比曲线寿命较短外, 大部分试验数据都比曲线寿命稍长, 因此用线性累积损伤方法计算随机变幅循环载荷的海水腐蚀疲劳寿命的结果是令人满意的。

顺便指出, C/12/20谱的谱块是由六个幅值水平不同的瑞利分布小程序块组成, 所以整个损伤的累积并非线性, 而是由六段折线组成, 见图6。该图是以一个载荷谱块的损伤值为1来表示的, 由图6可见, 第三、四、五小程序块的损伤积累比第一、二、六块大很多。因此图5中的累积损伤曲线实际上并不是光滑的, 而是在 $N_f = 1 \times 10^5$ 的间隔内, 由几个斜率改变的折线组成, 但是当 N_f 大于 3×10^5 后, 并不显重要, 只有短寿命情况时才有影响。

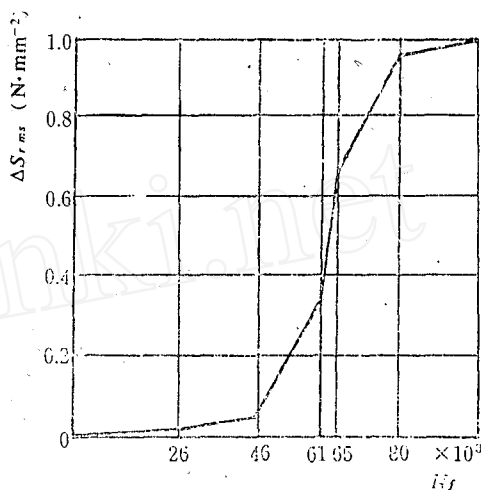


图6 C/12/20谱块的累积损伤

八、结 论

本文选取了C/12/20随机变幅载荷谱, 对国产海上平台钢 E36-Z35 焊接接头进行有阴极保护的海水腐蚀疲劳试验, 得到如下结论:

1. 均方根应力幅值作为窄带随机载荷谱加载的疲劳应力控制参数是合适的;
2. 利用均方根应力幅值作为应力参数的情况下, 随机变幅加载下有阴极保护海水腐蚀疲劳寿命比常幅加载情况的寿命短;
3. 本试验结果与国外同类试验数据相当符合;
4. 利用线性累积损伤Miner法则, 计算随机变幅加载的腐蚀疲劳寿命, 效果令人满意。

参加本工作的还有石茂、王亚立、于桂清和唐驰。

参 考 文 献

- [1] 薛以年、徐纪林、李禾、李延苹, 焊接钢接头的海水腐蚀疲劳试验研究, 海洋工程, 第五卷, 第2期, 1987.
- [2] 薛以年、徐纪林、李禾、李延苹, 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, 第2期, 1989.
- [3] 薛以年、徐纪林、李禾、李延苹, 阴极保护对焊接接头海水腐蚀疲劳性能的影响, 中国海上平台管节点研究委员会海洋平台管节点疲劳与断裂研究文集, p.145, 1991.
- [4] Holmes R. and Booth G.S., Fatigue and Corrosion Fatigue of Welded Joints under Narrow Band Random Loading, Steel in Marine Structures, International Conference, Paper 7.2, Paris, France, 5-8, October, 1981.
- [5] Pook L.P., An Approach to Practical Load Histories for Fatigue Testing Relevant to Offshore Structures, Journal of the Society of Environmental Engineers, March, 1978.

SEAWATER CORROSION FATIGUE OF WELDED JOINTS UNDER RANDOM VARIABLE AMPLITUDE LOADING

Xue Yinian, Xu Jilin, Li Yanping and Li He
(*Institute of Mechanics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

Offshore platforms are always subjected to wave action which is random variable amplitude cyclic loading. In order to simulate the stressing condition at the 'hot spot' of the tubular joints and the marine environment, random variable amplitude fatigue tests have been carried out on welded plate joints in sea water. The 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 test results have been compared with the seawater corrosion fatigue life under constant amplitude loading. The linear cumulative damage summation Miner's rule has been used to predict the corrosion fatigue life under variable amplitude loading. The predicted life is in good agreement with the test data.