随机变幅载荷下海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率的断裂力学参量选择

薛以年　徐纪林

(中国科学院力学研究所)

提要　本文就随机变幅载荷下疲劳裂纹扩展速率的断裂力学参量的选择进行了分析，并与随机变幅载荷下焊接接头海水腐蚀疲劳裂纹扩展试验数据进行了比较。由此认为采用 ΔK_{rms} 作为断裂力学控制参量是可取的；并且认为用常幅循环加载下的焊接接头海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率曲线代替以 ΔK_{rms} 为参量的随机变幅加载下的裂纹扩展速率曲线，以此来估算其海水腐蚀疲劳裂纹扩展寿命，在工程应用上不仅方便可行，而且是安全保守的。

关键词　随机变幅载荷　海水腐蚀疲劳　焊接接头　裂纹扩展速率　断裂力学参量

1. 引言

导管架海上平台是大型焊接结构，裂纹扩展寿命占总寿命的大部分，因此基于疲劳裂纹扩展数据的断裂力学分析方法是估算导管架平台管节点疲劳寿命的有效途径。海上平台经受的波浪载荷是随机变幅循环载荷，在不考虑平台结构本身响应的情况下，需要对窄带随机载荷下的裂纹扩展进行分析研究。通常认为常幅循环载荷下的裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}$ 与断裂力学参数应力强度因子范围 ΔK 的关系遵从 Paris 公式

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^{m} \tag{1}$$

其中 $\Delta K = \Delta S\sqrt{\pi a}\cdot Y(a)$, ΔS 为应力范围， a 为裂纹深度， Y(a) 为几何修正系数。对于随机变幅载荷下，人们也设想建立类似于上式的关系式，左端采用裂纹扩展平均速率 $\overline{\frac{da}{dN}}$ ；右端 ΔK 采用某一种统计平均值。传统的工作一般采用 ΔK 的均方根值作为断裂力学参量，因为一方面峰值为瑞利 (Rayleigh) 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的随机疲劳问题表明，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，于是关系式为

$$\overline{\frac{da}{dN}} = C\Delta K_{rms}^{m} \tag{2}$$

其中 ΔK_{rms} 即 ΔK 的均方根值。

我们曾开展了随机变幅载荷下焊接接头的海水腐蚀疲劳裂纹扩展试验[1]，并采用公式 (2) 对试验数据进行分析。此外，也有人采用 ΔK 的均立方根值或更高阶的统计平均值作为断裂力学参量来建立类似于公式 (2) 的关系式。本文就随机变幅载荷下疲劳裂纹扩展速率的断裂力学参量的选择进行分析比较。

2. 等效应力强度因子范围

随机变幅循环加载过程中每一次循环加载都可以与常幅循环加载过程联系起来，也就是说每次循环加载的裂纹扩展量服从于应力强度因子范围相同的 Paris 公式

$$\Delta a_i = C\Delta K_i^m \tag{3}$$

其中 Δa_i 是第 i 次循环加载的裂纹扩展量，ΔK_i 是相对应的应力强度因子范围。与线性累积损伤法则一样，假定各次载荷的次序和大小对裂纹扩展没有影响，即不考虑载荷的交互作用，从而得到

$$\sum_i \Delta a_i = C\sum_i (\Delta K_i)^m \tag{4}$$

对一定循环次数 n 的裂纹扩展量取平均，则有

$$\overline{\frac{da}{dN}} = C\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta K_i)^m}{n} \tag{5}$$

将上式写成

$$\overline{\frac{da}{dN}} = C(\Delta K_{rmm})^m \tag{6}$$

则

$$\Delta K_{rmm} = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta K_i)^m}{n}\right]^{1/m} \tag{7}$$

ΔK_{rmm} 就可看作为随机变幅加载下相应于 Paris 公式中的等效应力强度因子范围，实际上是 ΔK 的 m 次幂平均的 m 次方根值，这里的 m 值和常幅循环加载 Paris 公式 (1) 中的 m 值是相同的。由此可见，在遵从线性累积损伤法则的意义下，关系式 (6) 具有明显的力学意义。

3. 数裂力学参量的比较

等效应力强度因子范围 ΔK_{rmm} 可看作是随机变幅载荷下疲劳裂纹扩展速率的断裂力学控制参量，当 m=2 时，公式 (7) 是 ΔK 的均方根值 ΔK_{rms} 。在常幅循环载荷下海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率公式 (1) 中，m 值一般在 2 到 5 之间，但不一定是整数，下面我们分析比较一下 m 取值不同，对用断裂力学参量 ΔK_{rmm} 表达的结果有什么差别。

随机变幅波浪载荷幅值的长期分布通常可以方便地由几个不同幅值水平的瑞利 (Rayleigh) 分布来组成 [2]，因此我们只要对峰值应力 S 为瑞利分布的随机变幅循环载荷的情况进行分析比较。由微机对试验系统进行峰值应力为瑞利分布的随机变幅加载控制是这样实现的 [1]，首先利用随机数源 RND(P) 产生 0 到 1 之间的均匀分布随机数，再根据瑞利分布的函数表达式 [2]

$$S = \left\{2\sigma^2 ln\frac{1}{P}\right\}^{1/2} \tag{8}$$

计算得到瑞利分布的应力峰值 S，其中 σ 为应力水平参数。实际上随机数只取一定数目，比如在试验 [1] 中取 20000 个数为一个历程块，然后反复循环，即进行伪随机加载试验。这里不妨假定应力比 R=-1，则应力范围 $\Delta S = 2S$ ，于是

$$\Delta K = 2S\sqrt{\pi a}\cdot Y(a) \tag{9}$$

在一个历程块加载中，每 2000 次加载后测量一次裂纹深度，实际裂纹深度 a 变化不大 ($\Delta a \ll a$)；在试验数据具体处理时，我们对裂纹深度 a 是取其加载前后的测量平均值，于是当 a 被看作为常数的情况下，则由 (9) 式

$$\Delta K_{rmm} = 2S_{rmm}\sqrt{\pi a}\cdot Y(a) \tag{10}$$

由此只需要对 m 值不同的 S_{rmm} 进行比较即可。

本文计算了 m=2, 3, 4, 5 的 S_{rmm} 值，计算中任意取 $\sigma=8$，并且在随机数源中分别取 2000 个数和 20000 个数，以便检查它们之间的误差。S_{rmm} 的计算结果见下表 ($S_{rms}=S_{rm2}$)：

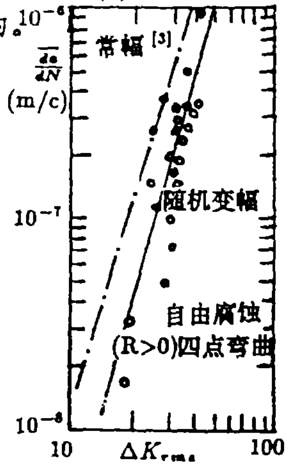
历程块大小	S_{rms}	S_{rm3}	$\frac{S_{rm3}-S_{rms}}{S_{rms}}$	S_{rm4}	$\frac{S_{rm4}-S_{rms}}{S_{rms}}$	S_{rm5}	$\frac{S_{rm5}-S_{rms}}{S_{rms}}$
2000 个数	113.5	125.1	10.2%	135.4	19.3%	144.9	27.7%
20000 个数	112.6	124.1	10.2%	134.4	19.4%	143.9	27.8%

可以看到，S_{rm3} 比 S_{rms} 约大 10%，S_{rm4} 比 S_{rms} 约大 19%，S_{rm5} 比 S_{rms} 约大 28%。

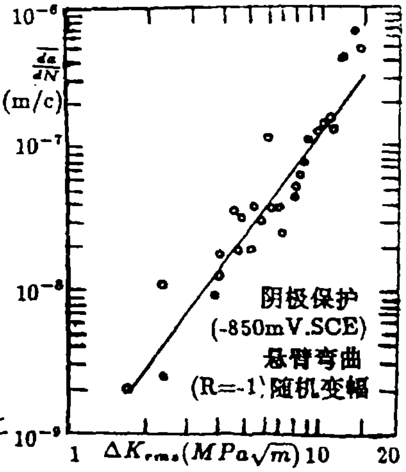
4. 讨论

从上面比较来看，对于峰值应力为瑞利分布的随机变幅加载情况，在假定不考虑载荷的交互作用前提下，由线性累积损伤法则求得的等效应力强度因子范围 ΔK_{rmm} 与均方根 ΔK_{rms} 相差并不大，m=3 时约大 10%，m=4 时约大 19%，m=5 时约大 28%，因此我们认为传统采用 ΔK_{rms} 作为随机变幅载荷下裂纹扩展速率的断裂力学控制参量是可取的。

对于我们得到的随机变幅载荷下焊接接头海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}-\Delta K_{rms}$ 曲线[1](见图 1，2)，如果横坐标采用 ΔK_{rmm} 作为断裂力学参量，无非是把试验点及其拟合线向右平移一段距离，从上面比较来看，移动是比较少的；同时可以看到采用 ΔK_{rms} 作为断裂力学参量的 $\frac{da}{dN}-\Delta K_{rms}$ 曲线与常幅循环载荷下的海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}-\Delta K$ 曲线[3] 最接近(见图 1)。由此我们认为用常幅循环载荷下焊接接头的海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率曲线代替随机变幅载荷下裂纹扩展速率曲线，$\frac{da}{dN}-\Delta K_{rms}$，也就是说公式 (1) 和公式 (2) 中的 c, m 取值相同，在工程应用上是可行的，而且对估算寿命是安全保守的。



图一



图二

关于在随机变幅载荷下用等效应力强度因子方法研究疲劳裂纹扩展的工作一直受到人们的重视，起先是用应力强度因子范围的均方根值 ΔK_{rms} 作为等效应力强度因子[4,5]，并且与常幅循环加载的疲劳裂纹扩展建立联系；后来大多偏向于采用 ΔK_{rmm} 作为等效应力强度因子[6,7,8]认为比较合理。以上这些工作都是通过钢材的裂纹扩展试验进行研究的，而且有些只是在空气中的试验工作，本文是针对焊接接头在海水环境中的疲劳裂纹扩展试验工作[1]，进行了以上分析讨论。需要指出，之所以随机变幅加载的疲劳裂纹扩展速率与常幅循环加载情况比较接近，是由于应力范围以瑞利分布作随机变幅加载，并且受促动器容量的限制，存在应力截断水平 $\frac{\Delta S_{max}}{\Delta S_{rms}}$ 约等于 4，因此在加载过程中不会突然出现很大的峰值应力，致使载荷的交互作用影响不显著，然而却多少使裂纹扩展速率有所降低，实际上，海上平台所受的海浪载荷就是符合这样的随机变幅加载过程。

5. 结论

对于峰值应力为瑞利分布的随机变幅加载情况，等效应力强度因子范围 ΔK_{rmm}($m=3,4,5$) 与均方根值 ΔK_{rms} 相差不大，因此采用 ΔK_{rms} 作为断裂力学控制参量可取的；从随机变幅载荷下焊接接头海水腐蚀疲劳裂纹扩展试验来看，采用 ΔK_{rms} 作为断裂力学控制参量的 $\frac{da}{dN}-\Delta K_{rms}$ 曲线与常幅循环载荷下的 $\frac{da}{dN}-\Delta K$ 曲线更为接近。因此我们认为可以用常幅循环加载下的焊接接头海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率曲线代替以 ΔK_{rms} 为断裂力学参量的随机变幅载荷下的裂纹扩展速率曲线，以此来估算焊接接头的海水腐蚀疲劳裂纹扩展寿命，在工程应用上不仅方便可行，而且是安全保守的。

参 考 文 献

[1] 徐纪林、薛以年、李禾，“随机变幅载荷下焊接接头的海水腐蚀疲劳裂纹扩展试验”，本文集，1993 年。

[2] 薛以年、徐纪林、李延苹、李禾，“随机变幅载荷下焊接接头的海水腐蚀疲劳研究”，海洋工程，10 卷 2 期，16-22 页，1992 年 5 月。

[3] 薛以年、徐纪林、李禾，“焊接接头热影响区的海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率”，实验力学，5 卷 4 期，396-402 页，1990 年 12 月。

[4] J.M.Barsom, “Fatigue–Crack Growth under Varriable–Amplitude Loading in ASTM A514–B Steel”, Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing, ASTM STP536 ASTM, 1973, p.147.

[5] P.J.Haagensen, “Fatigue Crack Growth in Steel in Air and Sea Water under Constant Amplitude and Random Loading”, Advances in Research on the Strength and Fracture of Materials, Vol.2B, ICF4 Waterloo, Cannada 1977.

[6] Y.W.Cheng, “The Fatigue Crack Growth of a Ship Steel in Seawater under Spectrum Loading”, Int,J.Fatigue 7,No.2 (1985) pp.95-100.

[7] D.Ritchie, P.A.J. Van Der Veer and K.Smit, “Fatigue Crack Growth under Broad Band Stationary and Non–Stationary Randm Loading”, Steel in Marine Structures (SIMS’87), Delft, The Netherlands, 1987, TS47.

[8] A.Bignonnet, Y.Sixou and J.Verstavel, “Fatigue Crack Gtowth under Random Loading-the Equivalent Loading Approach”, Advances in Fracture Research, Vol.2, ICF7 Houston, Texas, USA 1989.