

# 起重机焊接箱形梁的 疲劳分析与寿命估算\*

游 凯 张安哥

(工程力学研究室)

## 摘 要

随机载荷作用下的疲劳破坏是起重机焊接箱形梁的主要失效形式之一。本文研究和讨论了国内外在随机疲劳寿命估算方法和起重机焊接箱形梁的疲劳分析等方面取得的一些主要研究成果,对起重机焊接箱形梁的随机疲劳寿命估算中的有关问题及估算方法进行了分析和探讨。

关键词: 疲劳寿命; 焊接结构; 起重机

## 0 引 言

焊接箱形梁是目前起重机、桥梁和机车车辆底梁等结构中广泛采用的一种承重构件,其主要失效形式之一就是在随机载荷作用下的疲劳破坏。疲劳是材料在交变载荷作用下损伤逐渐累积的过程,由于疲劳破坏前不会出现明显的宏观塑性变形,其破坏十分突然,往往造成灾难性事故。因此,开展对这类结构,尤其是三服役结构的疲劳累积损伤规律的研究,估算其疲劳或剩余疲劳寿命,对于预防疲劳断裂事故的发生,指导产品的设计、制造、检验和管理具有重要意义。

随机载荷作用下的疲劳寿命估算一般包括以下三个环节:(1)确定疲劳载荷谱;(2)选定合适的疲劳损伤法则;(3)利用材料或构件的疲劳试验数据估算寿命。

疲劳寿命估算是一个非常复杂的问题,特别是焊接结构自身的复杂性和其所受载荷的随机性更增加了这一问题的难度。为了寻求一个更切合工程实际又便于工程应用的焊接结构疲劳寿命估算模型,本文研究了现有的一般构件的随机疲劳寿命估算方法并结合起重机焊接箱形梁的疲劳分析,讨论了它们对焊接结构的适用性,以及有待进一步完善的工作。

本文于1993年6月22日收到

\* 铁路高校青年教师基金资助项目: 铁路工程结构疲劳损伤研究及应用

## 1 一般构件的随机疲劳寿命估算方法

### 1.1 名义应力法<sup>①</sup>

作为一种传统的安全寿命估算方法, 名义应力法以构件危险点的名义应力作为出发点。计算名义应力时, 将材料或构件看做是理想的连续体, 且所受载荷较小, 应力与应变成线性关系。在构件危险部位及其疲劳载荷谱已经确定的情况下, 用名义应力法估算一般构件的疲劳寿命时, 需要得到构件的应力~寿命(即S-N)曲线。如果是进行可靠性寿命估计, 则要用构件的P-S-N曲线(P为可靠度)。S-N曲线在双对数坐标系中为一条由两直线段组成的折线, 其斜线部分的方程式为:

$$\sigma^m N = C \quad (1)$$

式中  $m$ 、 $C$  均为材料常数。S-N曲线是经光滑标准试样做对称循环疲劳试验得到的, 故需对实际构件进行应力集中、尺寸效应、表面加工状态、载荷形式及循环特征等方面的修正。

平均应力的修正方法很多, 较常用的有 Goodman 修正:

$$\Delta\sigma/2 = \sigma_{-1}(1 - \sigma_m/\sigma_s) \quad (2)$$

式中  $\sigma_s$  和  $\sigma_{-1}$  分别为强度极限和疲劳极限,  $\Delta\sigma$  为应力变程,  $\sigma_m$  为平均应力。

构件与试件差异的影响则反映在对  $\sigma_{-1}$  的修正上, 即将  $\sigma_{-1}$  乘上有效应力集中系数、尺寸系数、表面系数等。

对于材料的 P-S-N 曲线也需要进行类似的修正。但还要考虑各修正系数的分散性, 给出其均值和标准差。有了构件的 P-S-N 曲线后, 便可求得在给定可靠度 P 下的 S-N 曲线。在给定阶梯程序载荷谱的情况下, 由 S-N 曲线可求得各级应力水平  $\sigma_i$  ( $i=1, 2, \dots, k$ ) 下的疲劳寿命值  $N_i$ 。若设  $\sigma_i$  对应的工作循环数为  $n_i$ , 则由 Miner 公式:

$$\sum_i n_i/N_i = 1 \quad (3)$$

可得寿命估算公式:

$$N = N_1 / \sum_i \alpha_i \left[ \frac{\sigma_i}{\sigma_1} \right]^m \quad (4)$$

其中  $N$  为构件的总寿命,  $\alpha_i = n_i/N$ ,  $N_1$  为最大一级应力  $\sigma_1$  所对应的破坏循环寿命。

### 1.2 疲劳累积损伤理论<sup>②-④</sup>

疲劳破坏是一个累积损伤的过程, 累积损伤理论则是在疲劳试验和理论分析的基础上寻找出材料的累积损伤规律, 亦即揭示每一次载荷循环与该循环造成的材料损伤之间的相互关系。近年来比较流行用一个损伤变量(状态变量)来描述材料的疲劳损伤过程。疲劳累积损伤理论对估算变幅载荷下疲劳寿命比较有效。

累积损伤理论大致可以分为两类, 一类是线性累积损伤理论及修正线性损伤理论, 另一类是建立在热力学基础上的内变量损伤理论<sup>③</sup>。

线性累积损伤理论认为每个应力循环下的疲劳损伤是独立的, 总损伤等于每个循环下的损伤之和, 当总损伤达到某一数值时, 材料即发生破坏。如工程中常用的 Miner 线性累积损伤理论认为, 损伤与应力循环数成线性关系, 当  $\sum_i n_i/N_i = 1$  时, 材料即发生疲劳破坏。Groover 和 Manson 则将疲劳过程用两个阶段描述, 即先按 Miner 理论求一个阶段求损伤, 并用两条直线

未分别表示这两个阶段,建立了一个双线性疲劳累积损伤理论。

修正线性损伤理论则认为材料在各个应力循环下的损伤不能简单地相加,应考虑载荷间的相互作用,据此对线性累积损伤理论进行修正,其中最有代表性的是 *Corten - Dolan* 理论。该理论认为在构件的表面的许多地方可能出现损伤,损伤核的数目由材料所承受的应力水平决定,由此导出的多级应力循环情况下的疲劳寿命公式为:

$$N_f = \frac{N_0}{\sum [\alpha_i (S_i/S_0)^d]} \quad (5)$$

式中  $N_0$ 、 $\alpha_i$  分别为最高应力  $S_0$  下的常幅疲劳寿命和  $n_i$  在总循环数中所占的比例,材料常数  $d$  由两级载荷的疲劳试验确定。

建立在不可逆热力学框架下的损伤理论目前已有不少,其基本思路是:从材料损伤的微观机理出发,通过不可逆热力学分析,定义一个损伤变量或状态变量  $D$ ,再推导出  $D$  与广义力(应力、应变、温度等)的关系,即材料的本构关系,当  $D$  达到某一定值时,即发生疲劳失效<sup>⑥</sup>。

除上述两类理论外,还有一些从实验或分析中得出的疲劳累积损伤理论,它们多半属于经验或半经验公式,如 *Valluri* 根据位错理论和裂纹尖端塑性变形提出了一个经验损伤表达式;*Manson* 在半经验半解析的基础上建立了一个所谓应变变程分割法的损伤理论等。

### 1.3 局部应力 ~ 应变法<sup>⑦、⑧</sup>

局部应力 ~ 应变法是七十年代中期发展起来的一种估算疲劳裂纹形成寿命的方法。该方法认为:构件的疲劳破坏总是发生在应力集中的局部危险区域,其疲劳性能取决于该局部的应力应变状态。故在估算裂纹的形成寿命时,首先要确定构件的应力集中部位,并进行局部应力应变分析。应力应变分析较精确的方法有弹塑性有限元法或实验应力分析方法,但工程上常采用比较简便实用的近似方法,如 *Neuber* 法、修正 *Neuber* 法或修正 *Stowell* 法等,其中应用较广的是修正 *Neuber* 法。在应力应变分析中需要用到材料的循环应力应变曲线。

在局部应力应变分析后,便可利用雨流法或其他循环计数法把复杂的载荷时间历程分解为一系列的载荷循环,以便用等幅疲劳试验得到的  $S - N$  曲线进行疲劳损伤计算。为了求出每一循环所造成的损伤量  $D_i$ ,需要采用一定的损伤公式。由于定义损伤的方法不同,计算损伤的公式有十几种之多,工程中常用的有 *Landgraf* 公式、*Dowling* 公式和 *Smith* 公式等。累积损伤的计算一般采用 *Miner* 公式,每载荷块的总损伤为:

$$D = \sum D_i \quad (6)$$

而疲劳破坏时的载荷循环块数为

$$B = 1/D = 1/\sum D_i$$

### 1.4 断裂力学方法<sup>⑨-⑪</sup>

#### 1.4.1 裂纹扩展寿命的估算

(1) 对于等幅加载情况,常用的裂纹扩展速率方程有 *Paris* 公式(7a)和 *Forman* 公式(7b):

$$da/dN = C (\Delta K)^n \quad (7a)$$

$$da/dN = C (\Delta K)^m / [(1-R) K_c - \Delta K] \quad (7b)$$

式中  $C$ 、 $n$  为材料常数,  $K_c$  为断裂韧性,  $R$  为循环应力比,而

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} F \quad (8)$$

其中,  $\Delta\sigma$  为名义应力变程,  $F$  为应力强度因子系数, 它与裂纹的类型和构件的形状有关, 一般可通过计算或查表得到。等幅载荷下的裂纹扩展寿命可通过对(7)式积分得到。

(2) 随机载荷下的疲劳裂纹扩展寿命估算有两种不同的方法。一种是循环续循环方法, 它将每一个载荷循环所产生的裂纹长度的增量累加起来, 以估算出疲劳裂纹的扩展寿命。

对给定构件危险部位的应力时间历程, 后循环计数法可得到一系列的载荷循环  $\Delta\sigma_i$ 。假设用  $\Delta K$  和  $R$  描述的单个载荷循环在变幅情况下与在等幅载荷下产生的裂纹扩展量是一样的, 则根据等幅载荷时的裂纹扩展速率方程可求出第  $i$  个载荷循环所产生的裂纹扩展量  $\Delta a_i$ 。故至第  $i$  个载荷循环结束时的裂纹尺寸:

$$a_i = a_{i-1} + \Delta a_i = a_0 + \sum_{j=1}^i \Delta a_j \quad (9)$$

当裂纹由初始长度  $a_0$  扩展至临界裂纹长度  $a_f$  时, 构件便失效破坏, 此时的载荷循环总次数即为构件的疲劳裂纹扩展寿命。若经过一个载荷块后, 裂纹尚未达到临界长度, 则重新开始一个载荷块循环, 直至破坏。临界裂纹长度的确定是以构件断裂为依据的, 通常有两种判据, 即构件净截面应力应小于等于拉伸强度极限或构件的应力强度因子应小于等于材料的  $K_{Ic}$  值。

上述算法比较冗繁, 为此可将应力变程按大小分成若干组, 得到与原应力历程对应的程序块谱。对于特定载荷序列的变幅载荷, 可先给出裂纹每小时的扩展长度:

$$da/dt = \sum_{i=1}^k [n_i (da/dN)_i] \quad (10)$$

式中  $n_i$  是每小时第  $i$  种交变载荷出现的数目,  $k$  是给定载荷谱中各种交变载荷出现的总数。然后根据载荷谱下的  $da/dt \sim k$  关系, 利用数值积分法可求得裂纹扩展寿命:

$$t = \int_{a_0}^{a_f} da / \sum_{i=1}^k [n_i (da/dN)_i] \quad (11)$$

另一种方法是考虑到疲劳裂纹扩展数据具有明显的统计特征, 因此用概率统计方法来处理疲劳问题, 这便是概率断裂力学方法(PFM)。在 PFM 中被视为随机参数的有以下几类: 初始裂纹尺寸(深度、长度、部位等); 裂纹检出概率; 材料或构件特性( $da/dN \sim \Delta K$  关系式、断裂韧性等); 使用条件(应力水平、温度、环境等)。

当结构出现裂纹后, 可应用 PFM 方法来估计其剩余强度和寿命。将式(8)代入 Paris 公式(7a)积分得到:

$$N = \frac{2}{(n-2) c \times F^c \Delta \sigma^c \pi^{c/2}} \left\{ \left[ \frac{1}{a_0} \right]^{\frac{n-2}{2}} - \left[ \frac{1}{a} \right]^{\frac{n-2}{2}} \right\} \quad (12)$$

当式中的  $a$  取临界值时, 可得到结构的剩余寿命  $N_r$ 。

实验表明, 公式(7a)中的  $\lg(da/dN)$  是  $\lg(\Delta K)$  的线性随机函数, 其标准差为常数。由于  $da/dN$  的变异系数较大, 且  $da/dN \geq 0$ , 故用正态分布误差较大, 通常是采用对数正态分布和威布尔分布。 $\Delta K$  的分布可由(8)式求得, 一般采用正态或对数正态分布能得到较满意的结果。 $C$ 、 $n$  则分别假定服从对数正态分布和正态分布。初始裂纹尺寸经大量统计也符合对数正态分布。各参数分布的特征值通常是根椐试验结果并用蒙特卡罗法进行随机抽样统计来确定。

知道了各参数的分布函数和特征值后, 按式(12), 可用蒙特卡罗抽样统计方法进行仿真计算, 求出  $N_r$  的分布函数(如 Weibull 分布)。然后便可求得给定可靠度下的疲劳寿命值。

此外,近年来国内外发展了许多裂纹增长的概率模型,以表征观察到的裂纹扩展中的变异性。B模型[8]便是其中较有希望的模型之一,该模型将裂纹扩展过程描述为一个基于马尔可夫链理论的单位跳跃状态依存过程,在每一步都要考虑以前的裂纹扩展历程的影响,因而在物理上是吸引人的。但是该模型要求用不同裂纹尺寸时间的一阶矩和二阶矩统计量作为输入参数,故工程实用性较差。

#### 1.4.2 载荷间的相互影响<sup>⑧,⑨,⑩</sup>

变幅载荷下疲劳裂纹扩展速率还要考虑不同幅值载荷循环之间的交互影响,其中超载迟滞效应对疲劳寿命影响较大,对一些韧性较好的金属材料,在等幅循环载荷中加入一个超载幅值后,裂纹的扩展存在明显的迟滞效应。一般用残余塑性区或裂纹闭合的概念来解释迟滞效应,Wheeler和Willonborg等人认为由于超载的作用,裂尖前缘存在一残余压缩塑性变形区,即超载塑性区,当裂纹进入超载塑性区时,裂纹的扩展就受到阻碍,导致了迟滞效应;而Maarse等则采用了后一种论点,笔者曾从裂纹闭合概念出发,考虑了超载塑性区对裂纹张开应力的影响,建立了相应的疲劳裂纹扩展模型[9,10]。

裂纹闭合概念是六十年代末由Elber提出的,他指出:疲劳裂纹在其扩展过程中留下了一个连续的残余塑性区,这一塑性区象钳子一样对裂纹表面产生压缩作用,使得在零~拉伸荷循环中,只有当载荷大于某一值(裂纹张开载荷)时裂纹才张开,因而对裂纹扩展真正起作用的仅仅是大于裂纹张开载荷的那一部分循环,Elber将这部分载荷在裂尖引起的应力强度因子幅值称为有效应力强度因子幅值 $\Delta K_{eff}$ ,于是,Paris公式变成:

$$da/dN = C(\Delta K_{eff})^n \quad (13)$$

式中, C、n为等幅加载时按 $\Delta K_{eff}$ 处理得到的材料常数。

#### 1.5 功率谱密度方法<sup>⑪</sup>

按随机过程理论,任何随机过程的基本特征均可用四种统计函数来描述,即均方值、幅值域上的概率密度函数、时间域上的相关函数和频率域上的功率谱密度函数。假定实测的应力~时间历程是真实应力过程的一个样本,由此可给出载荷幅值的均方值随频率的分布,即功率谱密度函数。功率谱方法是利用功率谱密度函数进行随机疲劳寿命估算的一种较精确的统计方法,但是只有在载荷历程是一种平稳高斯随机过程的条件下,才有可能用功率谱密度函数把该过程完全确定下来。

假设 $G(\omega)$ 为零均值平稳高斯随机过程 $Y(t)$ 的功率谱密度函数,定义b阶功率谱矩为:

$$\lambda_b = \int_0^{\infty} \omega^b G(\omega) d\omega \quad (14)$$

二阶功率谱矩 $\lambda_2$ 即为随机过程的方差:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} \omega^2 G(\omega) d\omega \quad (15)$$

单位时间内以正斜率穿越零均值的平均次数称为零穿越期望值:

$$\nu = (\lambda_1/\lambda_2)^{1/2}/(2\pi) \quad (16)$$

单位时间内二峰值出现的平均次数称为峰值期望值,记为:

$$\nu_p = (\lambda_3/\lambda_2)^{1/2}/(2\pi) \quad (17)$$

随机过程的带宽可用下面形式的参数来表示:

$$\alpha_b = \lambda_b / (\lambda_0 \lambda_{2b}) \quad (b > 0) \quad (18)$$

对于高斯过程,  $\alpha_2 = v/n_0$  为不规则系数,  $\bar{\epsilon} = \sqrt{1 - \alpha_2}$  为带宽系数, 它们分别表征了随机波形的不规则程度和频带宽窄程度。当  $\bar{\epsilon} = 0$  时为窄带,  $\bar{\epsilon} = 1$  时为白噪声。在工程上一般认为当  $\bar{\epsilon} \leq 0.3$  时可按窄带处理。

平稳高斯随机过程峰值的概率密度函数为:

$$h(y) = \frac{\bar{\epsilon}}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2\bar{\epsilon}}\right) + \frac{y\alpha}{2\sigma^2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{y}{\sigma} \sqrt{\frac{\alpha^2}{2\bar{\epsilon}}}\right)\right] \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (19)$$

式中  $\operatorname{erf}(x)$  为误差函数, 定义为:

$$\operatorname{erf}(x) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (20)$$

在窄带情况下,  $\alpha = 1, \bar{\epsilon} = 0$ , 则有:

$$p(y) = \frac{y}{\alpha^2} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (21)$$

即在窄带情况下的峰值服从瑞利分布。而在白噪声情况下,  $\bar{\epsilon} = 1, \alpha = 0$ 。此时

$$p(y) = \frac{1}{\sqrt{\alpha^2}\sigma} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (22)$$

峰值从高斯分布。工程中的宽带过程的峰值, 实际上是高斯分布和瑞利分布的不同组合, 不规则系数就是这两种分布所占比例的度量。

功率谱方法估计疲劳寿命的主要控制因素就是峰值的概率密度分布形式。在估计随机应力作用下结构疲劳损伤的各种谱方法中, 瑞利估计是应用较广泛的一种方法。该法假定应力变程 (峰值的二倍) 服从瑞利分布。假设应力峰值为  $S$  时的损伤为:

$$D_i = n_i / N_i \quad (23)$$

其中,  $n_i$  表示应力峰值为  $S$  时的实际循环数;  $N_i$  表示峰值为  $S$  时的材料直至破坏的循环数。根据 Miner 线性累积损伤法则, 当

$$\int_0^{\infty} (n_i / D_i) ds = 1 \quad (24)$$

时破坏发生。设  $N_f$  为构件破坏时的总循环数, 则有  $p(s) = n_i / N_i$ , 因而式 (23) 可写成:

$$D_i = p(s) N_i / M_i$$

利用材料的  $S-N$  曲线:

$$N_i = C S^{-m} \quad (25)$$

式中,  $C$  和  $m$  为材料常数。将上式和  $D_i$  的表达式代入 (24) 式中得:

$$N_f = 1 / \left( \int_0^{\infty} \frac{p(s) s^m}{C} ds \right) \quad (26)$$

对于窄带过程, 将式 (21) 代入上式可求得:

$$N_f = C / \left[ (\sqrt{2\sigma})^m \Gamma\left(\frac{2+m}{2}\right) \right] \quad (27)$$

式中,  $\Gamma(x)$  为伽玛函数。对于宽带过程, 可在上式添上一个修正因子  $\lambda$ ,  $\lambda$  与材料性能  $m$  和带宽系数  $\bar{\epsilon}$  有关, 估计  $\lambda$  的经验公式如下

$$\lambda - a = (1 - a)(1 - \epsilon)^b \quad (28)$$

当  $\epsilon=0$  时,  $\lambda=1$  (窄带); 当  $\epsilon=1$  时,  $d\lambda/d\epsilon=0$  (白噪声), 据此用最小二乘法可求得  $a$  和  $b$  如下:

$$a(m)=0.926-0.033m, \quad b(m)=1.587m-2.3323$$

于是有宽带随机过程的寿命估算公式为:

$$N_f = C / [\lambda(\sqrt{2}\sigma)^m \Gamma(\frac{2+m}{2})] \quad (29)$$

## 2 起重机焊接箱形梁的疲劳分析

### 2.1 起重机主梁的载荷分析

起重机箱形主梁是较为典型的焊接钢结构构件,其疲劳强度除了与构件的构造细节有关外,主要取决于主梁危险截面危险点的应力幅值。其载荷谱通常表示为载荷随时间变化的历程。起重机设计规范根据载荷的动载情况和频繁程度,把起重机载荷按名义载荷谱系数  $K_p$  划分为四个等级(1, 0.5, 0.25 和 0.125)。  $K_p$  的定义如下:

$$K_p = \sum \left[ \frac{n_i}{N_i} \left( \frac{P_i}{P_{max}} \right)^m \right] \quad (30)$$

式中:  $P_i$  为第  $i$  个起升载荷;  $P_{max}$  为最大起升载荷(额定载荷);  $n_i$  为  $P_i$  的作用次数;  $N = \sum n_i$  为总的工作循环次数;  $m$  为与疲劳设计有关的指数(规范取  $m=3$ )。

按载荷谱系数的定义,可以证明在正态分布的情况下,  $K_p$  与分布参数之间的关系为:

$$K_p = (\mu)^3 + 3\mu(\sigma)^2 \quad (31)$$

式中:均值系数  $\mu = \text{均值} / \text{标准值} (\mu + 3\sigma)$ ;

标准差系数  $\sigma_s = \text{标准差} / \text{标准值} (\mu + 3\sigma)$ 。

作用于结构上的载荷可分为永久载荷和可变载荷,永久载荷可用随机变量来描述,而可变载荷一般来说是一个随机过程,但目前较常用的做法是把随机过程转变为随机变量,将一定期限(如设计基准期)内出现的载荷最大值  $Q$  作为随机变量来代替随机过程,进行统计分析。 $Q$  的分布通常采用极值统计方法来确定<sup>③</sup>。

此外,结构通常受多个载荷作用,在结构分析时,要从统计角度考虑其综合效应。由于问题难度较大,一般是寻求设计基准期内载荷效应组合最大值的概率分布<sup>④</sup>。

文献[14]对机械与建筑行业使用的多台桥式起重机进行了实测,并收集了部分吊重的变异情况通过统计分析得到了起重机主梁的自重与不同载荷谱系数下的载荷分布情况。文献[15]以机加工车间的桥吊为测试样机,采用电测法得到实测的主梁应力时间历程,经统计分析表明,主梁应力幅最大值服从正态分布。文献[16]则通过对铁路现场的调查,也采用了正态分布的应力谱来模拟门式起重机主梁工作状态下的载荷谱。

另一方面,计算仿真技术已开始被用于结构应力历程的研究中。起重机结构件应力的随机性主要决定于起重量的大小、作位位置和起重机自重的随机性等。自重和起重量的分布规律已有一些统计结果可供参考,位置随机变量则可以根据使用条件决定,如可假定在起重机服务区域内的每一个点都具有相同的加载和卸载的概率,甚至假定服务区域内具有最适宜的装载

和卸索点, 这些点具有比其它点更高的被造概率。如对铁路货场使用的门吊, 可认为其运动的起始位置平均值是火车的纵向中心线, 有了起重重量分布和力作用位置分布, 便可建立相应的弹性动力学模型, 用计算机仿真得到构件任意计算截面的应力时间历程, 必要时也可得到应力幅值的分布规律。每一工作循环的起重重量和力作用位置可采用蒙特卡罗法模拟, 即通过取伪随机数的方法得到。

## 2.2 焊接箱形梁的疲劳破坏特征<sup>③</sup>

焊接结构的裂纹源一般产生于焊缝处, 即焊趾、焊缝交叉点、焊缝起弧等处, 这一点已为国内外进行的大量的焊接接头和焊接结构的疲劳试验所证实。

对带筋板焊接工字梁的疲劳试验表明, 疲劳裂纹主要起源于横向加筋板与腹板焊缝的焊趾上。此后一般以半椭圆表面裂纹的形式向内扩展。当裂纹穿透试件厚度后便快速扩展, 最后发生失稳断裂。穿透裂纹扩展寿命占总寿命的比例通常不大于 15%。另外一些疲劳试验则表明, 疲劳破坏主要发生在拉应力最大的跨中腹板与下盖板的纵向连续贴角焊缝上, 此时裂纹从焊缝内圆形缺陷的圆心开始向外扩展, 直至穿透下盖板外表面纤维之后变为三端穿透裂纹, 其中两个裂纹尖端横贯下盖板, 一个裂纹尖端向腹板上端延伸。试验还发现, 在跨中附近腹板与横向隔板的焊缝焊趾(焊缝与腹板的熔合线)上也有多个表面半椭圆裂纹源, 并从其中一个源点扩展穿透腹板厚度, 再以穿透裂纹形式继续扩展。

关于半椭圆表面裂纹的应力强度因子的计算方法可参见文献[18]。

## 2.3 材料与构件的疲劳特性<sup>④</sup>

起重机金属结构一般选用 A3 钢和 16Mn 钢。文献[19]提供了包含上述两种材料在内的 12 种常用国产钢的静强度、疲劳强度等可供设计用的统计参数。文献[1]给出了 A3 钢、16Mn 钢等材料的静强度指标和不同应力比下的疲劳极限均值、标准离差和变异系数等。文献[20]则公布了一批焊接结构的疲劳强度数据。

由于影响疲劳强度的因素较多, 且各种影响因素之间还存在交互影响, 为了更真实地反映结构的疲劳性能, 可选实际结构或模拟件进行疲劳试验。就带筋板的焊接钢梁来说, 国内外都做了不少疲劳寿命试验。对带筋板的焊接钢桥结构做的大规模的疲劳寿命试验表明, 影响其疲劳强度的主要因素不是钢材的种类、试件尺寸、最小应力和有无横向支撑等, 而是应力幅值和初始裂纹。

[21]比较了起重机常用的正轨、半偏轨和全偏轨三种形式主梁的疲劳寿命, 研究表明轨道偏心距对正轨梁和半偏轨梁的疲劳强度不起作用, 而对全偏轨梁有一定影响。该研究得到了 14 根梁的疲劳寿命数据, 并由此提出了起重机焊接箱形梁的中值 S-N 曲线, 并根据实际的应力幅~临界裂纹长度曲线, 分别按不同裂纹形状, 得到了梁的疲劳裂纹扩展速率。文献[22]为验证横向加筋板与下盖板的连接方式对主梁疲劳强度的影响也进行了类似的疲劳寿命试验。文献[23]建立了一个关于寿命 N 和应力水平 S 的二维概率模型, 并直接利用上述两次试验得到的中值 S-N 曲线的数据来求出整簇 P-S-N 曲线, 其表达式为

$$F = \Phi\left(\frac{\lg N - 12.4882 + 3.00131g\Delta S}{1.7896 - 0.74271g\Delta S}\right) \quad (32)$$

式中:  $\Phi(x)$  为标准正态分布函数; F 为失效率。

文献[24]采用成组试验法于 1989 年又进行了一次起重机主梁的疲劳试验, 试验的基本情况与

上一次相同,结果表明:在等幅载荷下,起重机主梁的疲劳寿命服从对数正态分布,焊接主梁 P-S-N 曲线方程的一般形式为:

$$\lg N = 12.0 + 1.40 \times u_p - (2.8206 + 0.5743 \times u_p) \times \lg \Delta S \quad (33)$$

式中,  $u_p$  为标准正态分布的第 100F 的分位数,  $u_p = \Phi^{-1}(F)$ 。

若令  $m=3$ , 得到简化的 P-S-N 曲线:

$$\lg N = 12.151 + 0.1612 \times u_p - 3 \times \lg \Delta S \quad (34)$$

## 2.4 焊接对结构疲劳强度的影响<sup>①,②</sup>

焊接不同程度地降低了疲劳强度,焊接过程、焊条种类、焊接水平、焊后热处理和焊缝的最后形状都影响着结构的疲劳强度,由此而导致的焊接残余应力、应力集中、焊接缺陷和近缝区材料性能的改变等因素对疲劳寿命影响较大。

### 2.4.1 应力集中的影响

各种焊接接头处都有不同程度的应力集中现象,对接焊缝由于形状变化不大,其应力集中系数比其它形式接头要小,在丁字与十字形接头中,由于在焊缝向基本金属过渡处有明显的截面变化,其应力集中系数要比其它接头的应力集中系数高,因而其疲劳强度一般低于对接接头。提高其疲劳强度的根本措施是开坡口焊接和加工焊缝过渡区使之圆滑过渡。

### 2.4.2 近缝区金属性能变化的影响

疲劳裂纹通常起源于焊趾处,而焊趾处的显微组织不同于钢的基材,因而两者的疲劳性能存在差异,应用焊接热模拟技术可使钢具有与焊趾相近的显微组织,然后做成试件测定钢的疲劳性能。测出的疲劳性能可以代表焊趾处材料的疲劳性能。[25]曾采用热模拟技术测定了 QMn 钢的拉伸机械性能和疲劳性能。对低碳钢焊接接头来说,低碳钢的近缝区金属机械性能的变化对焊接接头的疲劳强度影响较小。在实际结构中,如果焊接热影响区的尺寸不大,可认为近缝区性能的改变不会降低焊接接头处的疲劳强度。

### 2.4.3 焊接缺陷的影响

焊接缺陷对疲劳强度的影响取决于缺陷的种类、尺寸、方向和位置等。一般地说,片状缺陷(如裂纹、未熔合、未焊透等)比带圆角的缺陷(气孔、夹杂等)影响大;表面缺陷比内部缺陷影响大;与力作用方向垂直的片状缺陷的影响比其他方向大;位于残余拉应力区的缺陷的影响比残余压应力区内的大;位于应力集中区的缺陷(如焊缝趾部裂纹)的影响比在均匀应力场中同样缺陷的影响大。对平板表面裂纹和焊趾裂纹来说,在相同的应力循环下,焊趾裂纹的扩展速率远高于平板表面裂纹,因此应力集中区的焊趾裂纹具有更大的危险性。

### 2.4.4 焊接残余应力的影响

残余应力对结构疲劳强度的影响取决于残余应力的分布状态。在应力集中处等工作应力较高的区域,若残余应力为拉伸应力,则疲劳强度要降低;反之,若该处存在压缩残余应力,则疲劳强度有所提高。

关于焊接构件中残余应力的分布情况,一般地说, T 型焊接构件在焊缝附近的腹板和翼缘板都存在高达屈服点的拉伸残余应力,而在腹板中间和翼板两侧存在压缩残余应力,对于焊接箱形结构情况类似,焊缝及其附近受拉,四块板的中间受压。文献[26]采用 X 射线法和盲孔法测定了起重机箱形主梁焊接后的残余应力,证实了前述的焊接残余应力分布规律。

有两种定量描述残余应力对疲劳性能影响的处理方法。一种是将残余应力作为平均应力

来处理,通过 Goodman 关系等来估算残余应力的贡献。需要指出的是,残余应力与平均应力至少有两点不同,一是残余应力在构件截面上具有一定的分布规律,二是残余应力在应力循环过程中会发生松弛。尽管如此,把残余应力近似地看作平均应力仍不失为定量化地估计残余应力作用的一种实用方法。另一种方法是按断口<sup>[27]</sup> 的观点,认为残余应力的存在改变了构件应力强度因子的有效值,因此,必须用  $\Delta K_{eff}$  来估算残余应力对  $da/dN$  的影响。按裂纹闭合的概念,可将残余应力叠加到裂纹张开应力上来计算  $\Delta K_{eff}$ 。也有将残余应力视作裂纹表面应力的,然后将其与外加应力叠加以求得在外加应力和残余应力综合作用下的应力强度因子,由此得到的  $da/dN$  如下:

$$da/dN = C(\Delta K)^n (1 + K_r/\Delta K)^b \quad (35)$$

式中  $n, b, c$  为材料常数,  $K_r$  为残余应力下的应力强度因子。

文献[27]进一步采用假设的弹塑性裂纹扩展关系来计算由焊接引起的裂纹扩展。其主要步骤为:采用增量法热塑性有限元分析来计算在焊接过程中产生的残余应力场;用沿着裂纹面顺序释放节点载荷的方法来模拟裂纹扩展,并求得裂纹尖端张开位移  $\delta$ ;根据  $\delta$  与所假定的裂纹扩展关系式来推断裂纹长度。结果表明,该方法的计算精度要优于一般的线弹性方法。

### 3 起重机焊接箱形梁的寿命估算分析

起重机焊接箱形梁的随机疲劳寿命的估算需要解决以下几个主要问题:确定材料或构件的疲劳特性、梁的载荷历程(载荷谱);选择合适的损伤法则和寿命估算方法,并考虑焊接结构的特点作某些必要的修正。

载荷谱的确定有两种基本的方法。一种是实测的方法,即针对不同类型起重机,在不同使用条件下测量各主要受力件危险截面的应力历程,然后进行数据的统计分析,得出应力分布类型和分布参数和相应的载荷谱。这种方法较为可靠,但实测工作量非常大,且得到的数据只适用于特定类型、结构参数和使用条件下的起重机构件。另一种方法是用计算机进行仿真,它是在一定的统计资料的基础上,应用蒙特卡罗模拟方法得出主梁的模拟应力历程。该方法免去了大量复杂的实验和人工统计分析工作,在计算机广泛应用的今天,这种方法具有良好的发展前景。

国内一些单位通过疲劳试验已获得了起重机金属材料的疲劳性能数据。更为宝贵的是,在焊接箱形梁的疲劳破坏特征和构件疲劳性能的综合数据方面也已通过焊接梁的疲劳试验积累了一些重要资料。今后在条件许可的情况下,除了应进一步进行模拟不同结构型式的焊接梁和焊接接头的等幅疲劳寿命试验外,还应开展焊接构件的变幅和随机疲劳寿命试验,为焊接结构的疲劳分析和评价寿命估算方法的精确性提供参考依据。

前面介绍的几种寿命估算方法同样适用于焊接结构。在这些方法中,名义应力法和功率谱密度方法要用到  $S-N$  或  $P-S-N$  曲线,若采用材料疲劳试验的结果,则由于焊接结构的影响因素很复杂,即使进行各种修正也难以保证与实际构件相符。因此,更为客观的办法是采用相同类别的焊接构件的疲劳试验数据,即采用焊接件的综合数据来进行疲劳寿命估算。这也使得这两种方法不可能直接计算各种类型和规格的焊接缺陷的影响,不可能直接计算各种不同残余应力和局部平均应力的影响。此外,这两种方法一般不能计及载荷之间的相互作用。对名

义应力方法来说,改进的方向之一是如何根据载荷顺序的影响去修正 S-N 曲线。

前两种方法估算出的寿命实际上是构件的总寿命,但实际上构件的疲劳寿命应分为裂纹形成和裂纹扩展寿命两部分。裂纹形成寿命是指实际构件在出现某一指定工程裂纹以前的寿命,裂纹扩展寿命是指从工程裂纹扩展至临界裂纹(断裂)的寿命。而在疲劳裂纹分析方法中,一般采用局部应力~应变法估算裂纹形成寿命,用断裂力学方法估算裂纹扩展寿命。裂纹形成阶段和扩展阶段的界限,目前尚无统一的标准,在实用上,一般将宏观可见的或可检测出的裂纹作为工程裂纹,其尺寸约在 0.5mm-1mm 之间。在焊接结构中,由于各种原因造成材料缺陷常常是不可避免的,因而焊接结构形成裂纹这一阶段可能很短,总疲劳寿命则主要取决于疲劳裂纹的稳定扩展阶段。采用疲劳裂纹扩展理论或概率断裂力学方法可以预测结构出现初始裂纹后的剩余寿命。同时,载荷间相互作用及焊接残余应力等因素对疲劳裂纹扩展的影响也均能在裂纹扩展模型中得到一定程度的反映。但是,目前对疲劳裂纹扩展寿命的估算多半是以线弹性断裂力学为基础的,而焊接结构中的疲劳裂纹一般起源于焊缝的近缝区,由于应力集中和焊接引起的残余应力场的作用,该区域实际上是处于弹塑性变形状态,因而更为精确的方法是探讨用弹塑性裂纹扩展关系来计算焊接区的裂纹扩展。另外,用断裂力学方法估算疲劳寿命要用到不同类型裂纹的扩展速率方程,尤其是概率断裂力学方法,还要求出有关参数的分布规律,这就需要进行大量的试验以获得足够的参数。而目前这方面现成的资料较少,还有待今后不断收集和补充。

用疲劳累积损伤理论来估算结构的疲劳寿命是近年来发展较快的一项工作。经典的线性累积损伤理论或修正线性损伤理论由于简便易行,目前在工程上仍得到了较广泛的应用。但反之,在变幅载荷情况下误差较大。有实验表明,用 Miner 损伤理论计算某些受变幅载荷作用的焊接件是偏于危险的。Sarkani 等发现,对于受窄带荷载的一些焊接件,试验寿命仅为估计寿命的一半。他们后来采用十字型焊接接头进行疲劳试验,将用功率谱法和 Miner 理论估计的寿命与实测寿命进行比较后发现,Miner 理论对高均方根荷载是偏危险的,对中等均方根的荷载能得到很好的估计,而对于低均方根荷载,结果偏向保守。

近年来发展很快的连续损伤理论旨在建立一种更为精确的材料本构关系,并已提出了很多疲劳累积损伤模型。其中不少模型能较好的吻合试验数据,但由于公式过于繁杂或者只能适用于某些特定的问题,还没有发展到工程实用阶段。

前面介绍的累积损伤理论大多数是从宏观力学的角度出发用统计的方法进行研究,随着检测技术微观分析技术的发展,近代则以微观和宏观分析相结合,从疲劳机理入手,利用弹性力学、塑性力学和有限元分析方法,结合试验结果进行研究。

### 参 考 文 献

- 徐源. 疲劳强度. 北京:高等教育出版社,1988.
- [2] 曾春华,鄧十踐. 疲劳分析方法及应用. 北京:国防工业出版社,1991.
- [3] 张安哥. 应力控制条件下 Bui-Quoc 蠕变损伤演变方程的探讨. 华东交通大学学报, 1988;5(1):9~16
- [4] 张安哥. A Procedure for Low Cycle Fatigue Life Prediction for Various Temperatures

- and Strain Rates, J. of Engng. Mat. & Tech. Vol 112.No. 4:422—428,1990
- [5] 叶笃毅,王德俊. 随机疲劳寿命估算中的损伤模型. 机械强度. 1991;1
- [6] M. F. Kanninen 等. 高等断裂力学. 北京:北京航空学院出版社,1987
- [7] J. W. Provan. 概率断裂力学和可靠性. 北京:航空工业出版社,1989
- [8] J. L. Bogdanoff 等. Probabilistic Models of Culmulative Damage. John Wiley, New York. 1985
- [9] 张安哥. The Overload Retardation Effect in Fatigue Crack Propagation of WGCI, J. of Engng. Mat. & Tech. Vol. 113, No. 3:307—313. 1991
- [10] 谢敏等. 随机载荷下疲劳裂纹闭合和扩展估算模型. 固体力学学报, 1989; (4)
- [11] L. D. Lutes 等. Improved Spectral Method for Variable Amplitude Fatigue Prediction. J. Struct. Div. ASCE, Vol. 116, NO. 4. 1990
- [12] 凌树森, 可靠性在机械强度设计和寿命估计中的应用. 北京:宇航出版社, 1988
- [13] 林忠民. 工程结构可靠性设计与估计. 北京:人民交通出版社, 1990
- [14] 翟甲昌等. 桥式起重机钢结构可靠性分析. 起重运输机械, 1992; (4)
- [15] 李鹏. 桥式起重机主梁变幅疲劳试验载荷谱. 机械强度, 1991; (3)
- [16] 杨广里等. 龙门起重机结构断裂及使用寿命研究. 北方交通大学学报, 1991; (2)
- [17] T. R. 格尔内. 焊接结构的疲劳. 北京:机械工业出版社, 1988
- [18] P. M. Scott 等. Critical Review of Crack Tip Stress Intensity Factors for Semi-Elliptic Cracks, Fatigue of Engng, Mater. & Struct. Vol. 4, No. 4:291—309, 1981
- [19] 12种常用国产钢的疲劳性能数据. 上海材料研究所, 1984
- [20] Recommendation for the Fatigue Design of Steel Structures. ECCS—Technical Committee 6—Fatigue, No. 43, 1985
- [21] 潘长松. 桥式起重机箱形主梁的疲劳试验. 起重运输机械, 1984; (1)
- [22] 周学镛, 白桦. 起重机偏轨箱形梁横隔板与下盖板间焊缝疲劳强度的研究. 起重运输机械, 1986; (11)
- [23] 盛汉中等. 桥式起重机箱形主梁P—S—N曲线统计法. 起重运输机械, 1989; (7)
- [24] 李鹏. 桥式起重机主梁的疲劳寿命试验. 北京:起重运输机械研究所, 1989
- [25] 吕宝桐等. 对焊接头疲劳寿命的估算. 航空学会疲劳断裂工程应用讨论会, 1987
- [26] 付荣柏等. 起重机箱形主梁焊接应力及其影响. 起重运输机械, 1986
- [27] M. F. Kanninen 等, The Numerical Simulation of Crack Growth in Weld—Induced Residual Stress Fields. Residual Stress and Stress Relaxation, E. Kula and V. Wiess (eds.), Plenum, New York:227—247, 1982

# **Fatigue Analysis and Life Prediction for Welded Box Beam of Bridge Crane**

Xie Min Zhang Ange

## **ABSTRACT**

For most of the bridge cranes, the failure of the structures result from the fatigue damage in the welded box beam under the action of random fatigue loads. This paper discusses the factors related to the fatigue life of the welded box beam and the validity of life prediction methods developed in recent years.

**Key Words:** Fatigue; Welded beam; Crane