

焊接接头疲劳裂纹扩展速率试验方法

Test method for fatigue crack growth
rates of welded joints

1 主题内容及适用范围

本标准规定了测定焊接接头疲劳裂纹扩展速率的试验方法。

本标准适用于室温(15~35℃)及大气环境下测定金属材料熔化焊焊接接头(焊缝金属及热影响区)大于 10^{-5} mm/周的恒幅循环载荷下的疲劳裂纹扩展速率。在非室温、非大气环境下的焊接接头裂纹扩展速率试验,亦可参照本方法。

2 引用标准

GB 2651焊接接头拉伸试验方法。

3 术语及定义

3.1 循环

周期性载荷或应力的一个完整过程。

3.2 循环数(周)

载荷循环的次数。

3.3 疲劳裂纹扩展速率 da/dN (mm/周)

载荷循环一次的疲劳裂纹扩展量。

3.4 应力强度因子 K ($MN/m^{3/2}$)

裂纹尖端附近区域弹性应力场强度的度量,在本方法中系指 I 型受载情况(I 型即为张开型)。

3.5 计算裂纹长度 a (mm)

与实际裂纹相当的前缘裂纹长度。对于 CT 试样, a 从加载线开始计量(图1),对于 CCT 试样, a 从试样中心线开始计量(图2)。

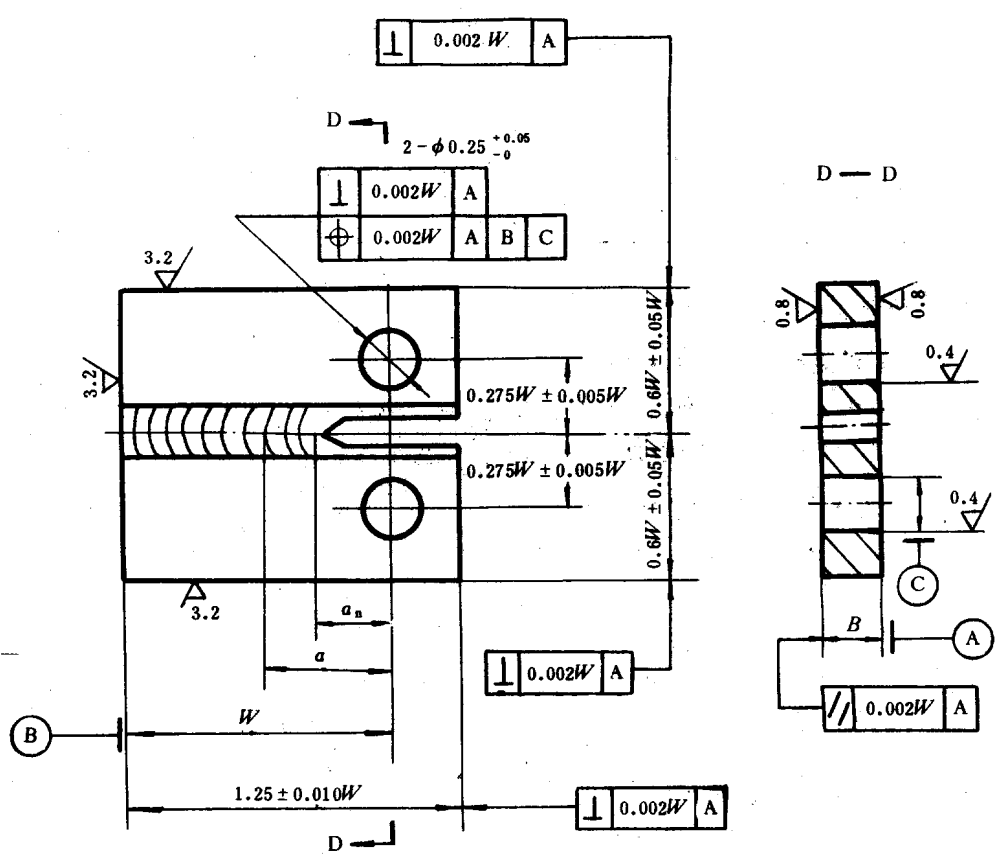


图 1 da/dN 标准 CT 试样图

注：① 加工切口(a_n)顶端交线与试样表面应当距离相等，交线到试样上下边缘的误差应在 $0.005W$ 以内。
② 焊接接头其他区域可参照。

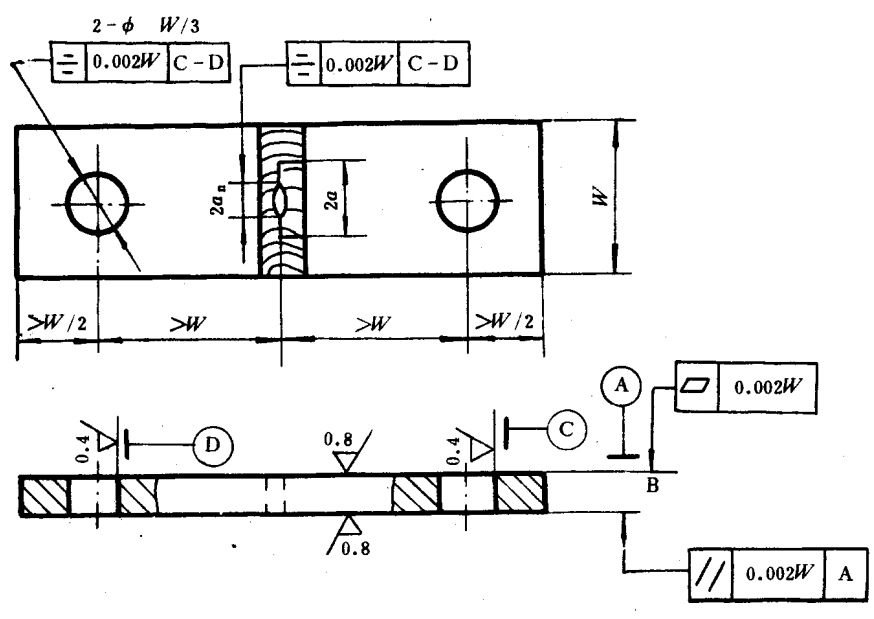


图 2 $W < 75$ mm 的标准 CCT 试样图

注：切口与接头相对位置按试验要求确定。

3.6 最大载荷 p_{\max} (MN)

循环载荷的最大值。

3.7 最小载荷 p_{\min} (MN)

循环载荷的最小值。

3.8 载荷变化范围 Δp (MN)

最大载荷与最小载荷差值, 即 $\Delta p = p_{\max} - p_{\min}$ 。

3.9 载荷比 R

最小载荷与最大载荷之比, 即 $R = p_{\min} / p_{\max}$ 。

3.10 最大应力强度因子 K_{\max} (MN/m^{3/2})

对应于最大载荷的应力强度因子; 并随裂纹长度的增加而变化。

3.11 最小应力强度因子 K_{\min} (MN/m^{3/2})

对应于最小载荷的应力强度因子; 当载荷比 R 小于零时取为零。

3.12 应力强度因子范围 ΔK (MN/m^{3/2})

最大与最小应力强度因子值之差。

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$$

4 试样

4.1 试样型式

4.1.1 标准 CT (紧凑拉伸) 试样, 如图1所示。

4.1.2 标准 CCT (中心裂纹拉伸) 试样, 如图2所示。

4.1.3 也可采用其他型式的试样, 但必须有对应的应力强度因子标定。

4.2 取样

4.2.1 在被检验的焊接试板或焊接构件上制取焊接接头 (包括焊缝金属、热影响区、母材等) 试样。如采用焊接试板, 应注意同构件保持条件一致。

4.2.2 取样时, 必须先用金相腐蚀剂显现出焊缝轮廓, 以确定缺口位置, 并有利于裂纹扩展过程的分析。

4.2.3 焊接接头的疲劳裂纹扩展速率与试样裂纹面所在部位、取向及扩展方向有关, 因此, 试样必须注明裂纹面位于哪个区域 [例如: 焊缝金属、热影响区、母材 (注明轧向)] 以及取向。

4.2.4 因试样中焊道沿厚度方向并不全部均匀。所以为达到 4.2.3 条要求, 必须用沿厚度方向的两表面焊道位置数据一起考虑。

4.3 试样尺寸

4.3.1 试样厚度 B

对于 CT 试样, 推荐试样厚度 B 的范围如下:

$$W/20 \leq B \leq W/4$$

厚试件也允许使用 (例如 $B = \frac{W}{2}$), 但试样所得数据需要对裂纹走向作出曲率修正, 修正规定见 7.1 条。

对于 CCT 试样, 推荐的试样厚度上限为 $W/8$ 。CCT 试样的最小厚度的要求, 是为了避免横向屈曲。

4.3.2 试样的宽度 W

按无裂纹韧带最小值要求, 即根据焊接接头屈服强度, 最大应力强度因子的极限值 K_{\max} 和 CT 试样的 a/W 或 CCT 试样的 $2a/W$ 的极限值的关系曲线确定试样的最小宽度 W (见图 3)。

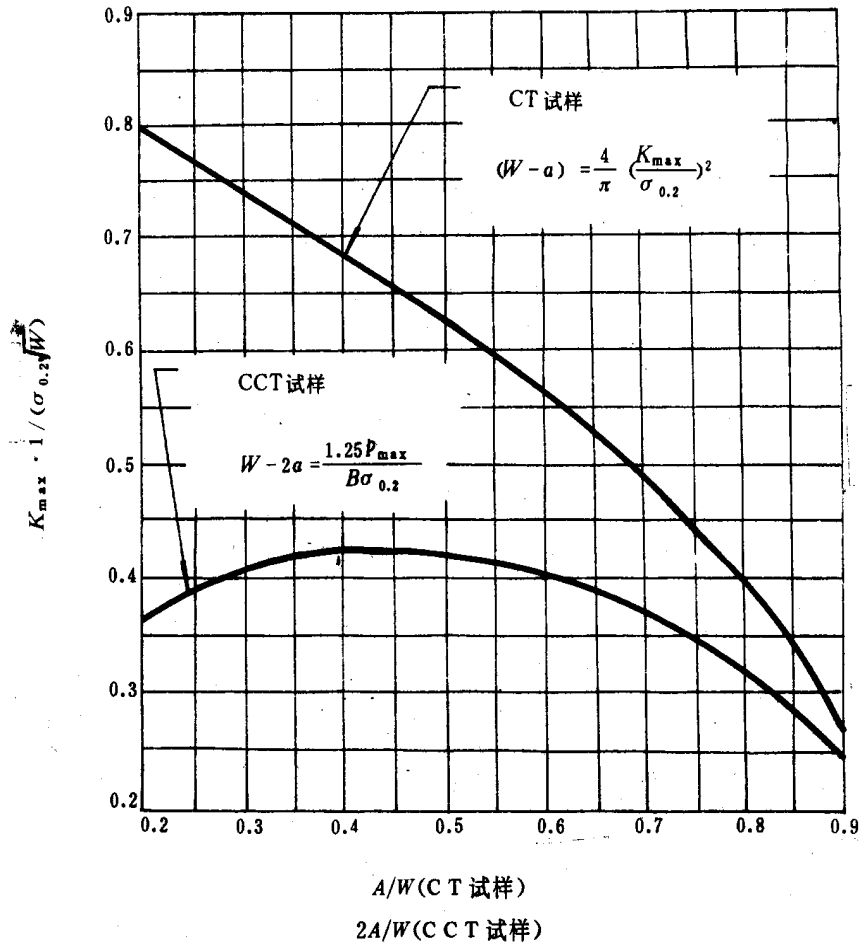


图 3 标准 da/dN 试样尺寸标准化曲线图

4.3.3 CCT 试样的工作长度 L

4.3.3.1 拉-拉加载

试样宽度 W 不大于 75 mm 时, L 为销钉孔心之间的距离, $L \geq 2W$; 试样宽度 W 大于 75 mm 时, L 为销钉两端内侧一排螺栓孔间的距离, $L \geq 1.5W$ 。

4.3.3.2 拉-压加载

L 为压板内边缘之间的距离, $L \geq 1.2W$ 。

4.4 试样切口及制备

4.4.1 试样切口

CT 试样的切口长度 a_0 应不小于 $0.2W$; CCT 试样, 中心切口长度 $2a_0$ 应不小于 1.5 倍的中心孔径。

4.4.2 切口制备

试样切口可通过铣切、线切割和其它方法加工而成。图4中给出了各种不同的切口几何形状。电火花加工的切口根部曲率半径 ρ 不大于 0.1 mm。铣切的人字形切口及其它加工的切口的根部曲率半径 ρ 不大于 0.25 mm。

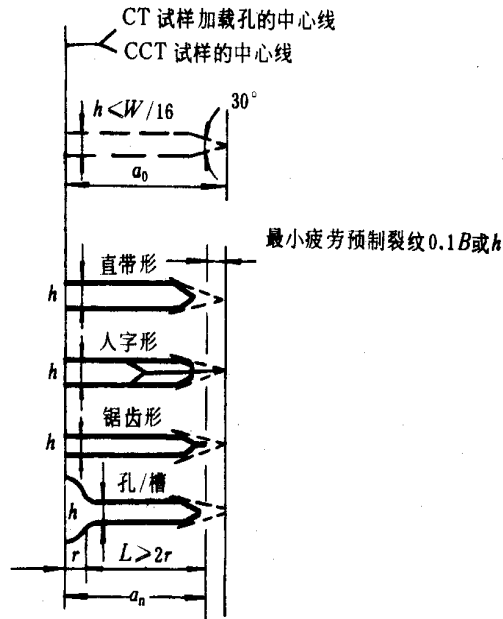


图 4 切口形状和最小的疲劳预裂要求

4.5 试样的残余应力

4.5.1 试样设计应考虑尽量减小残余应力影响。残余应力的影响在容限分析和寿命估算中考虑。

4.5.2 为减少残余应力的影响,可选择 B/W 小和沿宽度方向对称的试件(即 CCT 试样)。

5 疲劳试验机及夹具

5.1 疲劳试验机

试验允许在不同类型的疲劳试验机上进行,但必须满足以下要求:

- a. 使推荐的试样加载点在一条作用线上;
- b. 在静态下校正载荷,其误差不超过 $\pm 1\%$,示值变动度不超过 1% ;在动载下校正载荷,其误差不超过 $\pm 3\%$;
- c. 带有准确的计数装置,计数器上可加计时器用以校正计数器。如计数器需放大,应注意误差(误差值取决于设计要求)。

5.2 夹具

5.2.1 CT 试样的加载装置-U 型夹具可参考图5设计。夹具材料的屈服强度应大于试样材料最高屈服强度的2倍。销钉与销孔间隙的设计应当使摩擦减至最小,加载销上应涂上润滑剂。

所推荐的 U 型夹具和销轴的比例、公差(图5)均依照试样宽度 W 或试样厚度 B 来确定。

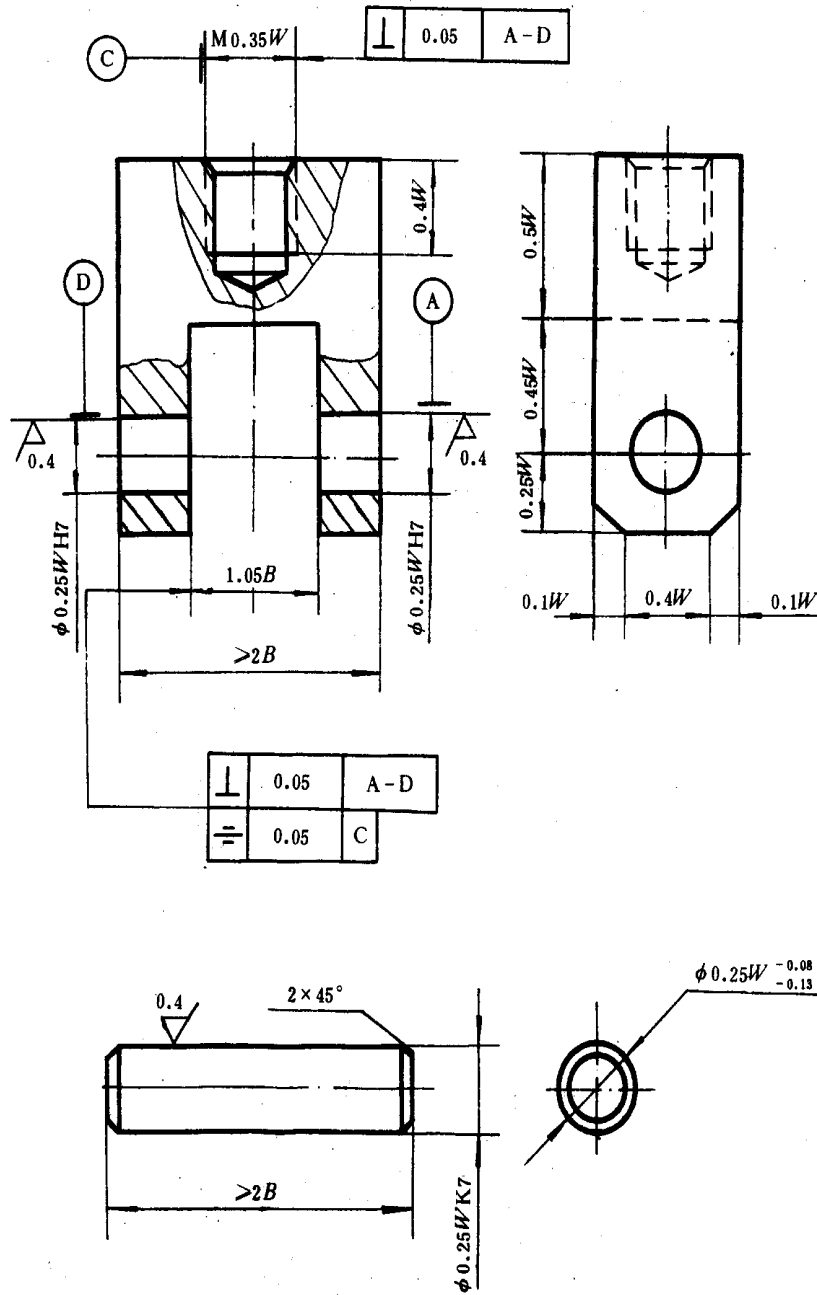


图 5 CT 试样的 U 型锁孔夹具

5.2.2 CCT 试样的加载装置—凹形夹具参考图6设计,为限制弯曲,薄板试验必须采用约束导板。夹具夹紧形式随试样宽度 W 和加载条件变化。

5.2.2.1 拉-拉加载,试样宽度 W 大于75 mm 时,采用多排螺栓夹紧;若试样宽度小于等于75 mm 时,可采用单个销子加载。也可以采用试验机的液压夹具加载。

5.2.2.2 拉-压加载时采用压板夹紧,夹紧力由液压和机械楔形系统提供。

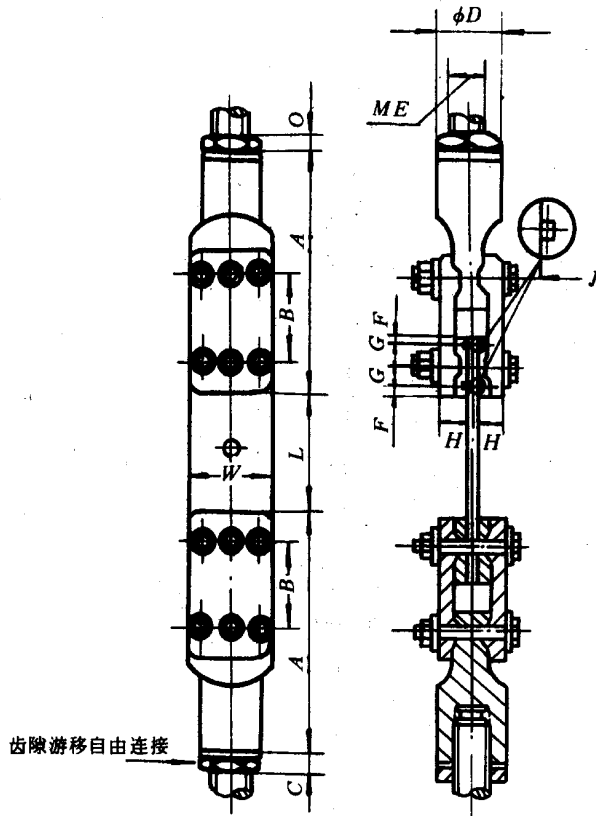


图 6 用于夹紧100 mm宽 CCT 试样的
的栓和凹箍夹具装配实践图

尺寸表

mm

A	B	C	D	ME	F	G	H	L	W	J
326	104	19	76	38	12	19	38	120	100	0.08

5.2.3 夹具校准,应保证加载系统有良好的同心度和足够的刚度。

6 试验程序

6.1 试验前的准备

6.1.1 试样测量

试验前应用精度为0.01 mm 的量具在试样的韧带区三点处测量厚度,取平均值。

用精度不低于0.001 W 的量具在试样裂纹所在截面附近测量宽度。

6.1.2 试验前应对切口进行清理。

6.2 预制疲劳裂纹

6.2.1 对预制疲劳裂纹使用载荷的要求

6.2.1.1 原则上采用试验载荷预制疲劳裂纹,考虑到焊接接头的组织不均匀性,难于给出切口尖端确切的屈服应力,并考虑到加速疲劳裂纹的形成,预制疲劳裂纹所使用的初级载荷可高于试验载荷,并逐级卸载至试验载荷,卸载率不得高于20%。

6.2.1.2 为防止试验中的瞬变效应,每一级加载范围应使裂纹长度扩展量不小于 $(3/\pi)(K_{max}/\sigma_{0.2})^2$,其中 K_{max} 为上一级载荷最后的最大应力强度因子 K_{max} 值, $\sigma_{0.2}$ 为焊接接头的屈服强度。

6.2.2 预制疲劳裂纹可使用任意频率。

6.2.3 对预制疲劳裂纹长度要求

6.2.3.1 疲劳预制裂纹长度均不得小于 $0.1B$ 和 h (图4)。

6.2.3.2 对预制疲劳裂纹长度测量中的要求见6.3.1及6.3.2条。

6.3 疲劳裂纹扩展试验

6.3.1 裂纹长度测量

裂纹长度测量可以采用目测或其他间接方法(柔度法等)测定。

裂纹长度用目测时:对于 B/W 小于等于0.15的试样,需要在试样的单面测量裂纹长度;对于 B/W 大于0.15的试样,则需在试样的前、后两面进行测量。随后计算时要用这些测量结果的平均值(C T 试样应取两个数的平均值;C C T 试样取四个数的平均值)。

6.3.2 裂纹长度测量精度

6.3.2.1 用目测测量裂纹长度时,应将试样磨光,为很好地分辨裂纹尖端可采用间接照明装置。可在试验之前,沿试样的开裂方向在预定的部位上设置参考标记。可采用读数显微镜(20~50倍)测量裂纹长度,并利用参考标记消除由于读数显微镜的偶然运动而引起的潜在误差。如果在试样上贴附精度照像格栅或聚脂层刻度,则可直接采用具有所要分辨能力的任何放大装置供裂纹长度测量。

6.3.2.2 试验中任何一点前后表面裂纹长度测量值之差超过 $0.25B$ 或左右两测裂纹长度测量值之差超过 $0.025W$ 时,则该数据无效。

6.3.2.3 试验中任何一点与试样对称平面的偏离大于 $\pm 5^\circ$,数据无效。

6.3.3 裂纹长度测量间距

6.3.3.1 裂纹长度测量间距 Δa 应使 da/dN 对 ΔK 数据接近均匀分布,根据试样类型,推荐如下测量间距。

C T 试样

对于 $0.25 \leq a/W \leq 0.40$ $\Delta a \leq 0.04 W$

$0.40 \leq a/W \leq 0.60$ $\Delta a \leq 0.02 W$

$a/W \geq 0.60$ $\Delta a \leq 0.01 W$

C C T 试样

对于 $2a/W < 0.60$ $\Delta a \leq 0.03 W$

$2a/W < 0.60$ $\Delta a \leq 0.02 W$

6.3.3.2 任何情况下,最小的 Δa 应为0.25 mm或10倍于裂纹长度测量精度中的较大者。

6.3.4 对试验中断的要求:

原则上不许中断,若中断必须注意以下几点:

- a. 中断时间应减至最小,一般不大于10 min;
- b. 如需停机观察,可加静载,静载值不应大于试验中最大载荷值;
- c. 试验中要注意避免超载迟滞效应和恒载蠕变现象。

6.3.5 试样数量

每组通常应保证有二块裂纹扩展区域相同的试样,但由于试验结果的置信度与试样的数量有关,因此,具体的试样数量取决于对试验结果的设计要求。

7 试验结果的处理和计算

7.1 断口检查和裂纹曲率修正

7.1.1 试验结束后进行金相检查,记录裂纹面所在区域。

7.1.2 在断口观察中,如果发现宏观可见的气孔、夹渣、未熔合、未焊透、裂纹等焊接缺陷时,在缺陷周围部分的裂纹扩展速率试验数据无效。

7.1.3 检查断口表面,最好检查两个位置(预制疲劳裂纹和极限裂纹),以确定裂纹前缘曲率范围。若裂纹前缘线条明显,则沿厚度方向等分,取五点平均值确定裂纹长度,该长度同试验记录的相应裂纹长度之差即为曲率修正量。

7.1.4 考虑与不考虑裂纹曲率修正量在任何裂纹长度上计算出的应力强度因子相差超过5%时,应采用修正量。

7.1.5 薄试件通常不需要作曲率修正。使用目测以外的裂纹扩展测量技术时(照像法仍属于目测法),裂纹曲率修正一般已包括在标定技术内,故不必考虑曲率修正。

7.1.6 裂纹曲率修正量不一定是一个恒量,当它随裂纹扩展而单调增加或减少,则采用线性内插法修正中间各点数据。

7.2 应力强度因子范围 ΔK 的计算

7.2.1 标准 C T 试样

$$\Delta K = \frac{\Delta p(2+a)}{B\sqrt{W}(1-a)^{3/2}}(0.886 + 4.64a - 13.32a^2 + 14.72a^3 - 5.6a^4) \dots\dots\dots(1)$$

式中 $a=a/W$

$a \geq 0.2$ 上述关系式有效。

7.2.2 标准 C C T 试样

$$\Delta K = (\Delta p/B) \sqrt{\frac{\pi a}{2W} \text{Sec} \frac{\pi a}{2}} \dots\dots\dots(2)$$

式中:

$$\Delta p = p_{\max} - p_{\min} (R \geq 0)$$

$$\Delta p = p_{\max} (R < 0)$$

$$a = 2a/W$$

注: ΔK 计算中未包括残余应力和裂纹的闭合效应,这些问题在容限计算和寿命分析中考虑。

7.3 数据的有效性检验

标准 C T 试件要求:

$$W - a \geq 4/\pi(K_{\max}/\sigma_{0.2})^2$$

标准 C C T 试件要求

$$W - 2a \geq 1.25p_{\max}/B\sigma_{0.2}$$

在试样尺寸标准化曲线中(图3),数据点应位于标准化曲线之下。

7.4 推荐的数据处理程序

推荐的数据处理程序见附录 A,在符合精度要求的条件下也可以采用其他方法。

8 试验报告

试验报告应包括下列内容:

8.1 试样在焊接接头中取出的方位,如焊接接头是从焊接结构中取出,需给出结构中的方位并给出取样图。

8.2 应按 GB 2651 标准给出熔敷金属和母材的常规机械性能。

8.3 接头的热处理制度和工艺参数。

8.4 试样的几何参数。试样中焊道的位置,包括焊道的宽度、厚度以及宏观形状,画出详图。

8.5 试验机型号,测量裂纹长度装置和精度,加载变量,包括载荷范围 Δp , 载荷比 R 、加载频率和波形。

8.6 环境影响参数,包括温度、环境介质、相对湿度以及整个试验期间各参数的最大偏差。

8.7 数据处理方法,包括疲劳裂纹曲率修正,确定 da/dN 和 ΔK 以及 da/dN 和 ΔK 关系的方法与所用计算程序。

为了使预测寿命的方法与本方法所给出的数据条件一致,必须注明所得的数据是接头哪个区域(例如焊缝、母材或均值)。对残余应力考虑到怎样程度。当载荷比小于零时,应说明计算最小应力强度因子 K_{min} 的方法。

8.8 采用CT、CCT以外的试样时应给出应力强度因子标定曲线或公式。

8.9 建议试验结果列成图表。在双对数坐标纸上给出 $da/dN-\Delta K$ 曲线数据点时,为更好的比较数据,可使横坐标($\log \Delta K$)尺寸为纵坐标($\log(da/dN)$)尺寸的2~3倍。如要应用考虑了残余应力的 ΔK_{eff} ,则必须在图表中予以说明。

8.10 任何引起反常数据现象均需说明。

附录 A
推荐的数据处理方法
(参考件)

A1 割线法

用于计算裂纹扩展速率的割线法, 仅仅包括 $a-N$ 曲线中两个相邻数据点直线斜率的计算法。它的计算公式可以表示为:

$$(da/dN) = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \dots\dots\dots (A1)$$

是增量 $(a_{i+1} - a_i)$ 的平均速率, 故平均裂纹长度

$$a_i = 1/2(a_{i+1} + a_i) \text{ 用来计算 } \Delta K_i.$$

A2 递增多项式法

用于计算 da/dN 的这种方法, 包括建立拟合一组 $(2n+1)$ 连续数据点的二次多项式(抛物线), 式中 n 一般为 1、2、3 或 4。(一般取 2、3) 局部拟合方程式如下:

$$\hat{a}_i = b_0 + b_1 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right) + b_2 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right)^2 \dots\dots\dots (A2)$$

式中 $-1 \leq \frac{N_i - C_1}{C_2} \leq +1$

b_0, b_1 和 b_2 是在 $a_{i-n} \leq a \leq a_{i+n}$ 区间按最小二乘法(即使裂纹长度观测值与拟合值之间的偏差平方最小)确定的回归参数。

\hat{a}_i 值是对应 N_i 的裂纹长度。

参数 $C_1 = \frac{1}{2}(N_{i-n} + N_{i+n}), C_2 = \frac{1}{2}(N_{i+n} - N_{i-n})$ 用于变换输入数据, 以避免在确定回归参数时的数值计算困难。

N_i 时的裂纹扩展速率由(A2)抛物线方程求导得出

即
$$(da/dN)\hat{a}_i = b_1/C_2 + 2b_2(N_i - C_1)/C_2^2 \dots\dots\dots (A3)$$

利用 N_i 的拟合裂纹长度 \hat{a}_i 计算与 da/dN 值对应的 ΔK 值。

上述递增多项式法的计算机程序允许使用各种语言程序。

推荐采用七点递增多项式。

附录 B
始于焊接缺陷裂纹扩展量的估算方法
(参考件)

对于一般钢材的焊接结构, 缺陷尺寸同所在构件断面的宽度 W 的比值很小, 可以假设成无穷大板, 在缺乏裂纹扩展速率试验值的情况下, 裂纹扩展使焊接缺陷的扩大, 推荐下列表达式进行估算。

B1 板厚贯通缺陷

$$a_N = \frac{a_0}{1 - 5.5 \times 10^{-12} (\Delta\sigma_{eff})^4 \pi^2 a_0 N} \dots\dots\dots (B1)$$

其中 $\Delta\sigma_{eff}$ 为有效应力范围, 可以写成

$$\Delta\sigma_{eff} = \Delta\sigma_t + 0.5\Delta\sigma_b \text{ (单位 kgf/mm}^2\text{);}$$

$\Delta\sigma_t$ 为拉伸应力范围；
 $\Delta\sigma_b$ 为弯曲应力范围；
 a_0 为 $N=0$ 时缺陷尺寸的半长；
 a_N 为 N 次循环扩大了缺陷尺寸的半长；
 N 为应力循环数。

B2 深埋缺陷

$$b_N = \frac{b_0}{1 - 5.5 \times 10^{-12} (\Delta\sigma_{eff})^4 \pi^2 b_0 N} \dots\dots\dots (B2)$$

其中 $\Delta\sigma_{eff}$ 为有效应力范围，可以写成

$$\Delta\sigma_{eff} = \Delta\sigma_t + 0.25\Delta\sigma_b$$

b_0 为 $N=0$ 时缺陷在板厚方向尺寸的半长

b_N 为 N 次循环后扩大了缺陷尺寸的半长

对应 $b = b_N$ 的板宽方向的缺陷尺寸的半长 $a = a_N$ 由下式给出

$$a_N = a_0 \left(1 + \frac{b_N^3 - b_0^3}{a_0^3} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (B3)$$

B3 表面缺陷

对于浅表面缺陷 b_N 用(B2)式，其中

$$\Delta\sigma_{eff} = \Delta\sigma_t + 0.75\Delta\sigma_b$$

对于深表面缺陷 a_N 的计算用(B1)式。

深浅表面缺陷的判别：当

$$b/a < (0.98 + 0.07R_b) - (0.06 + 0.94R_b) \cdot b/t \dots\dots\dots (B4)$$

时为浅表面缺陷，反之为深表面缺陷。

$$R_b = \Delta\sigma_b / (\Delta\sigma_t \Delta\sigma_b)$$

a 为表面裂纹长度， b 为表面裂纹厚度， t 为板材厚度。

附加说明：

本标准由国家机械工业委员会提出。

本标准由国家机械工业委员会哈尔滨焊接研究所负责归口并起草。

本标准负责起草人张宝昌。