

高应力比下 HQ-60 钢焊缝的疲劳 裂纹扩展速率

高季明 黄雨华 刘蓉蓉 陈家权

(沈阳 东北大学)

摘 要 通过对 HQ-60 新钢种的试板和试样焊缝的残余应力实测得到, 试样焊缝中的残余应力很小, 在研究高应力比下焊缝的疲劳裂纹扩展时可忽略其影响。根据焊缝的裂纹扩展试验结果, 得到了在线弹性范围内扩展速率公式, 在小范围屈服区提出了一个应力强度因子修正方法, 扩大该公式的应用范围, 为焊接结构寿命分析提供了方便。

关键词 残余应力; 疲劳裂纹扩展; 应力比; 应力强度因子

0 序 言

HQ-60 钢是我国根据日本 WEL-TEN60 钢研制生产的一个新钢种。它具有高强度、高韧性和优良的焊接性等特点, 是应用于工程机械、矿山机械等重型机械设备的优良焊接用结构钢。焊接结构的抗疲劳和抗断裂能力常常取决于焊缝区域的力学性能, 因此对 HQ-60 钢焊缝的焊接残余应力分布进行了测试与分析, 并对焊缝区域在高应力比下裂纹扩展规律进行了深入的研究, 提出了一个当裂纹长度达到小范围屈服时, 适于工程应用的裂纹扩展计算方法。

1 试验材料

母材为 HQ-60 钢, 用 E6015H 焊条进行手工电弧焊。母材及焊条熔敷金属的化学成分见表 1, 力学性能见表 2。母材经 920℃ 淬火及 680℃ 回火的热处理, 试验板厚为 20mm, 采用 V 型坡口对接接头, 焊接线能量为 18 ~ 22kJ/cm。

表 1 HQ-60 钢和 E6015H 熔敷金属的化学成分(%)

Table 1 Chmical composition of HQ-60 steel and E6015H electrode deposited metal (%)

Element	C	Si	Mn	Cu	Ni	Mo	V	S	P
HQ-60 steel	0.15	0.24	1.41	0.01	0.31	0.18	0.05	0.013	0.029
E6015H deposited metal	0.04	0.54	1.31	1.37	0.18	0.20		0.20	0.014

表2 HQ-60钢和E6015H熔敷金属的力学性能

Table 2 Mechanical properties of HQ-60 steel and E6015H electrode deposited metal

Mechanical properties	σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	δ_5 (%)
HQ-60 steel	552	648	21
E6015H deposited metal	530	665	24

2 焊缝残余应力分析

2.1 焊缝残余应力测试方法

焊缝残余应力的测试是为了分清焊接后的试板与由试板加工成的CT试样在焊缝处残余应力的分布情况,探索残余应力对焊缝裂纹扩展的影响。试验采用一块试板加工成4个试样,残余应力的测试采用盲孔法。

2.2 残余应力测试结果及分析

根据测试得到的主应力 σ_1 、 σ_2 和方向角 θ 值可按式计算出 x 、 y 方向的应力。

$$\sigma_x = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\theta$$
 (1)

$$\sigma_y = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\theta$$
 (2)

$$\tau_{xy} = -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\sin 2\theta$$
 (3)

图1为试板和试样在焊缝处残余应力 σ_x 、 σ_y 的分布。

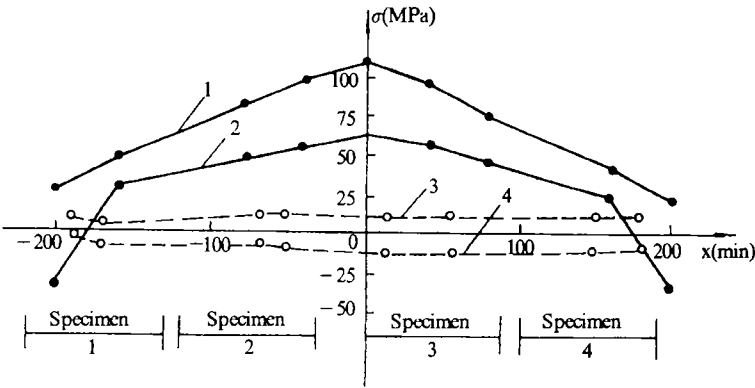


图1 试板和试样的残余应力分布

Fig.1 Residual stress distribution in test plate and specimen

图1中的线1和线2分别为试板的 σ_x 和 σ_y 值,线3和线4为试样的 σ_x 和 σ_y 值。试板焊缝中的最大残余应力 $\sigma_x=104.02\text{MPa}$, $\sigma_y=60.84\text{MPa}$,分别为材料屈服极限的19.3%和11.84%;试样中残余应力变化比较平缓,最大值为 $\sigma_x=10\text{MPa}$, $\sigma_y=18\text{MPa}$,低于材料屈服极限的3.5%,

对比试板和试样焊缝残余应力的测试结果,试板经切削加工后大部分残余应力已释放,对试样的裂纹扩展测试,特别对高应力比情况完全可忽略其影响。

3 高应力比下 HQ-60 钢焊缝的裂纹扩展速率

3.1 试样及试验方法

试验按照 GB6398-86 进行,采用 CT 试样,在中间焊缝处预制裂纹,裂纹前缘的应力强度因子 K 可用式 (4) 计算

$$K=\frac{P}{B\sqrt{W}}f(\alpha)$$

(4)

$$\alpha=\frac{a}{W}$$

式中

P 为载荷, N; 试样厚度 $B=13\text{mm}$; 试样宽度 $W=72\text{mm}$; a 为裂纹长度, mm

试验分别在两个应力比 $R_1=0.244$ 和 $R_2=0.267$ 下进行。

3.2 试验结果

图 2 给出了 HQ-60 钢在两个应力比下裂纹扩展速率 da/dN 和 ΔK 在双对数坐标系中绘制出的试验曲线。由图 2 看出,试验点在一定的区间内呈直线关系,而在某一临界值后就成曲线。形成这种情况的原因是在高应力比下裂纹尖端的塑性区增大,使线弹性断裂力学理论已不再适于裂纹附近的应力-应变分析。经计算和实测分析对于 HQ-60 钢的焊缝裂纹这个临界值都在 $r_y/a=0.02$ 时发生。 r_y 为裂纹前缘塑性区尺寸。在线弹性范围内对于 HQ-60 钢焊缝的裂纹扩展速率是符合 Paris 公式

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

(5)

C 和 n 为材料常数。由试验数据进行线性回归获得

$$R_1=0.244\text{ 时 } da/dN=4.11657\times 10^{-21}(\Delta K)^{6.56161}$$

(6)

$$R_2=0.267\text{ 时 } da/dN=4.77485\times 10^{-18}(\Delta K)^{5.52965}$$

(7)

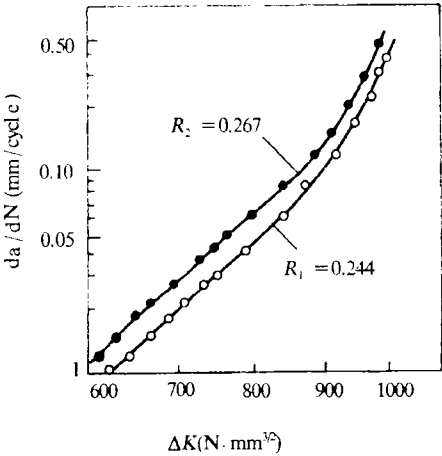


图 2 在两个高应力比下 HQ-60 钢焊缝的裂纹扩展速率曲线

Fig.2 Curves of crack growth rate in weld metal of steel HQ-60 under two high stress ratios

4 小范围屈服的裂纹扩展速率

4.1 常用的修正方法

由断裂力学分析表明,当裂纹顶端塑性区尺寸处于 $0.02a\leq r_y\leq 0.01a$ 时,裂纹扩展属于小

范围屈服情况,为使该区间线弹性断裂力学仍然适用,国内外研究者作了不少工作,至今仍在进行中,目前比较常用的是修正应力强度因子 K 的方法。对于无限大板 I 型穿透裂纹的修正公式为

$$K' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma}{\sigma_s} \right)^2}} K \quad (8)$$

式中 K' —考虑小范围屈服的修正应力强度因子

K —未经修正的应力强度因子

σ —应力

σ_s —屈服极限

K 值可由式 (4) 计算得到,根据修正后的强度因子 K' 值代入式 (6) 和式 (7) 得到的裂纹扩展速率 da/dN 与实测值相比如表 3 所示。当 $R_1=0.244$ 时最大误差达 41.9%, 当 $R_2=0.267$ 时为 45.8%, 可见常用的应力强度因子修正方法用于相应的 Paris 公式计算裂纹扩展速率具有相当大的误差。

4.2 小范围屈服应力强度因子修正的一个新方法

本文提出一个新的修正方法,主要根据以下假设:

(1) 尽量使修正后的应力强度因子 K' 值按直线部分获得的 Paris 公式计算小范围屈服下的裂纹扩展速率值能与实测值相等。

(2) 因小范围屈服情况是和屈服区尺寸与裂纹长度的比值 r_y/a 有关,因此在应力比 R 下应与 $\Delta r_y/a$ 有关。 Δr_y 为塑性区尺寸变化幅值。

根据上述假设,修正后的应力强度因子幅值 $\Delta K' = f(\Delta r_y/a) \Delta K$ 。 ΔK 为未经修正的应力强度因子幅值。根据假设 (1) 有

$$\begin{aligned} (da/dN)_{sz} &= C(\Delta K')^n \\ &= C[f(\Delta r_y/a)]^n \Delta K^n \\ &= [f(\Delta r_y/a)]^n (da/dN)_{fs} \end{aligned} \quad (9)$$

上式中 $(da/dN)_{sz}$ 为实测小范围屈服情况下的裂纹扩展速率, $(da/dN)_{fs}$ 是由未经修正的 ΔK 值按 Paris 公式计算得到的裂纹扩展速率。因此有

$$f(\Delta r_y/a) = \left[\frac{(da/dN)_{sz}}{(da/dN)_{fs}} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (10)$$

对于 I 型裂纹塑性区尺寸可按式计算

$$r_y = K^2 / 2\pi\sigma_s^2 \quad (11)$$

σ_s 为屈服极限,为与常用的修正方法作对比,计算中采用 $\sigma_s = \sigma_{s0}$ 。在应力比 R 下塑性区最大尺寸变化幅值为

$$\begin{aligned} \Delta r_y &= r_{y\max} - r_{y\min} \\ &= \frac{1}{2\pi\sigma_s^2} [K_{\max}^2 - K_{\min}^2] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2\pi\sigma_s^2} (1-R^2)K_{\max}^2 \\ &= (1-R^2)r_{y\max} \end{aligned} \tag{12}$$

以 $f(\Delta r_y/a)$ 为纵坐标, $(1-R^2)r_{y\max}/a$ 为横坐标根据计算值所绘制的曲线如图 3 所示, 该曲线近似满足二次函数关系, 因此有

$$f(\Delta y/a) = 1.0 + \overline{U}[(1-R^2)(r_{y\max}/a - 0.02)]^2 \tag{13}$$

式中 $\overline{U}$ 为二次函数的系数, 经二次回归程序计算得 $\overline{U} = 2.6 \times 10^3$, 则有

$$\Delta K' = \{1 + 2.6 \times 10^3 \times [(1-R^2)(\frac{r_{y\max}}{a} - 0.02)]^2\} \Delta K \tag{14}$$

对于 HQ-60 钢在小范围屈服, 经按上述方法对应力强度因子进行修正后, 仍按 Paris 公式计算获得的 da/dN 值与实测值相比, 误差就比较小。本文以此修正方法对另一新钢种 D36 钢的焊缝裂纹小范围屈服下的裂纹扩展速率也进行了计算, 其最大误差值也列于表 3 中。由表 3 中数据看出, 本文提出的 ΔK 修正方法误差可稳定在 10% 以内, 为工程计算提供了方便。

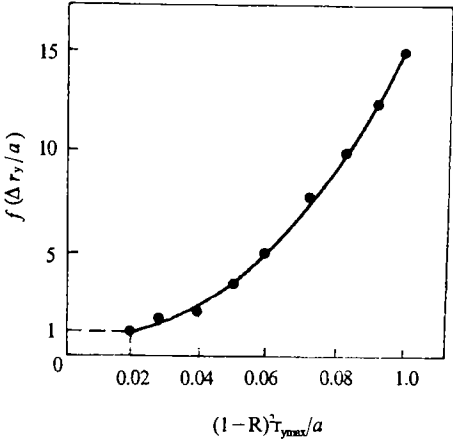


图 3 $f(\Delta r_y/a)$ 与 $(1-R^2)r_{y\max}/a$ 的关系曲线
Fig. 3 Ralational curve of $f(\Delta r_y/a)$ with $(1-R^2)r_{y\max}/a$

表 3 计算得到的 da/dN 值与实测值对比的最大误差 (%)

Table 3 Maximum miscarriage of comparison of calculatiry da/dN with measured da/dN (%)

Material	HQ-60		D36	
Stress ratio	0.267	0.244	0.091	0.297
By the formulas (6) (7)	51.42	48.30	18.47	32.10
By the formula (8)	45.80	41.97	14.52	21.61
By the formula (14)	7.94	9.83	3.29	7.60

5 结 论

(1)通过对 HQ-60 钢试板和试样的焊缝残余应力测试获得, 试板的最大残余应力约是试样的 4 ~ 10 倍, 而加工成试样后焊缝残余应力仅为屈服极限的 3.5%, 所以对于高应力比下的裂纹扩展速率可以忽略不计。

(2)对于 HQ-60 钢焊缝的裂纹扩展速率试验得到, 在 $r_y/a < 0.02$ 时, da/dN 的变化规律符合 Paris 公式, 在 $0.02 \leq r_y/a \leq 0.1$ 的小范围屈服时, 若采用本文提出的应力强度因子修正方法, 仍可使用 Paris 公式计算裂纹扩展速率 da/dN , 并能与实测数据很好地吻合, 这对焊接结构的寿命分析提供了方便。

(1995 年 6 月 10 日收到修改稿)

参 考 文 献

- 1 北京:冶金部钢铁研究总院, HQ-60 钢焊接基本数据手册, 1990
- 2 Sandifer J P, Bowie G E. *Experimental Mechanics*, 1978, 18(5): 173
- 3 唐慕尧. 焊接测试技术. 北京:机械工业出版社, 1988, 184 ~ 194
- 4 В.И. Труфаков Усталость сварных соединений, Наукова думка, 1973
- 5 Paris P C. *Trans ASTM*. 1963. 85. 528
- 6 Seeger T E. *Fracture Mech*, 1979. 11: 79 ~ 103
- 7 赵学仁. 平面应变 I 型裂纹弹塑性分析的一种方案. *应用数学和力学*. 1990, 11(4): 337 ~ 340
- 8 赵国华. D36 钢焊接接头疲劳裂纹扩展规律的研究, 东北工学院硕士论文, 1989.

Fatigue Crack Growth Rate in Weld Metal of Steel HQ-60 Under High Stress Ratio

Gao Jiming, Huang Yuhua, Liu Rongxuan, Chen Jiaquan

(Northeastern University, Shenyang)

Abstract It is concluded that the residual stress in specimen welds is quite little, through measuring the stress in the HQ-60 steel test plate and specimen. Therefore the residual stress affect on the crack growth rate can be neglected, when crack growth rate of the specimen under high stress ratio is investigated. According to the results of the crack growth tests in the weld metal, a crack growth formula in linear elastic range (LER) is obtained. In the paper a modificative method of stress intensity factor in small scale yielding range is provided, so the formula in LER can be also used. Using the method, life calculation of welded structures can become convenient.

Key words residual stress; fatigue crack growth; stress ratio; stress intensity factor