

应力比 R 对 09CuPCrNi 钢焊接接头疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 的影响 *

邱 海 李广锋

(大连铁道学院)

摘要 本文根据国标 GB6398—86, 采用降 K 法分别求出在不同应力比 R 条件下, 09CuPCrNi 钢母材、焊缝和热影响区 (HAZ) 的疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 的表达式。发现当应力比 R 达到某一值 R_{cr} 之前, 母材、焊缝和热影响区的门槛值 ΔK_{th} 随着应力比 R 的增大而减小; 当 R 超过 R_{cr} 之后, 其门槛值均匀保持不变。同时还重点叙述了裂纹闭合应力强度因子 K_{cl} 的计算方法, 证实焊接接头的闭合效应高于母材金属。并对上述规律做了分析和解释。

关键词 应力比; 疲劳裂纹扩展; 门槛值

0 序 言

金属材料的疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 是工程断裂分析中的一个重要指标。由于工程材料中存在各种形式的缺陷, 因而对于那些要求无限寿命的部件, 如大型发电机、汽轮机、原子能设备等, 就需要根据材料的门槛值 ΔK_{th} 来确定其允许缺陷尺寸或其所能承受的最大交变载荷^[1]。

应力比 R 是影响门槛值的重要因素, 国内外对它的研究也较多^[2, 3]。但是在焊接领域, 对焊接接头疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 的研究则较少, 有待于进一步深入。

本文测定了 09CuPCrNi 钢焊接接头各区在 $R = 0.1, 0.3, 0.5, 0.8$ 时的门槛值及其近门槛值区的疲劳裂纹扩展速率, 从中得出了应力比 R 对接头各区 ΔK_{th} 的影响, 并用裂纹闭合理论解释了其影响机理^[4]。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本文采用的材料为耐候钢 09CuPCrNi 热轧钢板, 其板厚为 6 mm。焊接方法采用 CO₂ 气体保护焊, 所用焊丝为耐大气腐蚀焊丝 TY-01(铁科 1 号), 规格为 $\varphi 1.0\text{mm}$ 。焊接规

* 国家自然科学基金资助项目

范为:电流120A,电压21V,焊接速度3.3 mm/s,CO₂气体流量10L/min。坡口为半V型。钢板及焊丝的化学成分如表1所示。焊接接头的机械性能如表2所示。

表1 钢板及焊丝的化学成分(%)

Table 1 Chemical analyses of steel plate and welding wire(%)

| Element | C | Mn | Si | S | P | Cr | Ni | Cu |
|-----------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| 09CuPCrNi | 0.05 | 0.37 | 0.27 | 0.017 | 0.084 | 0.35 | 0.33 | 0.34 |
| TY-01 | 0.08 | 1.47 | 0.65 | 0.014 | 0.017 | 0.18 | 0.38 | 0.35 |

表2 焊接接头的机械性能

Table 2 Mechanical properties of welded joint

| Mechanical properties | σ_b (MPa) | σ_s (MPa) | δ_s (%) | ψ (%) |
|-----------------------|------------------|------------------|----------------|------------|
| Base metal | 419.44 | 330.75 | 27.75 | 38.23 |
| Weld metal | 556.15 | 440.02 | 8.10 | 44.70 |
| Welded joint | 436.98 | 345.35 | 25.40 | 57.50 |

1.2 试样的制备

疲劳试验采用标准的紧凑拉伸试样(CT试样),参照国标GB6398-86^[5]确定CT试样的尺寸,如图1所示。分别从母材、对接试板上截取母材、焊缝以及热影响区(HAZ)的CT试样。母材CT试样的缺口与轧制方向垂直;焊缝CT试样的缺口与焊缝长度方向平行,并处于焊缝之中;热影响区CT试样的缺口处在热影响区。

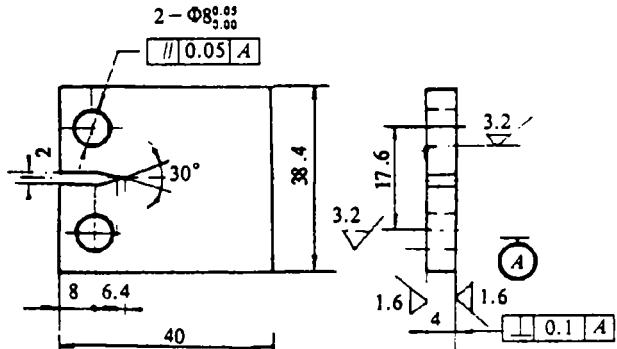


图1 紧凑拉伸试样(CT试样)

Fig.1 Compact-type (CT) specimen

1.3 试验方法

根据国标GB6398-86,采用降K法测定焊接接头各区的门槛值。在试验过程中,应力比R保持不变,每次降载的降载率不超过10%。裂纹长度的测量采用目测法。

使用的设备为红山实验机厂生产的10吨程控高频疲劳试验机和JXD-2型读数显微镜。

2 试验结果

采用降K法,分别测定了母材、焊缝、热影响区在应力比R=0.1,0.3,0.5,0.8时的门槛值 ΔK_{th} ,具体数值如表3所示。表4列出母材、焊缝、热影响区在应力比R=0.1,0.3,0.5,0.8时近门槛值区的疲劳裂纹扩展速率da/dN的表达式。

表3 母材、焊缝和热影响区的门槛值 ΔK_{th} Table 3 Threshold values ΔK_{th} of base metal, weld metal and HAZ*

| Stress ratio R | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 0.8 |
|----------------|-------|------|------|------|
| Base metal | 8.84 | 7.34 | 5.84 | 4.68 |
| Weld metal | 11.37 | 9.59 | 8.16 | 5.28 |
| HAZ | 10.21 | 9.81 | 8.63 | 5.61 |

*Note: The unit of ΔK_{th} is MPa \sqrt{m}

表4 母材、焊缝和热影响区的疲劳裂纹扩展速率 da/dN 的表达式Table 4 Expressions of fatigue crack growth rate da/dN of base metal, weld metal and HAZ

| Materials | Stress ratio R | Expression between da/dN (mm/cycle) and ΔK (MPa \sqrt{m}) |
|------------|----------------|--|
| Base metal | 0.1 | $da/dN = 6.0 \times 10^{-7} (\Delta K - 8.84)^{1.52}$ |
| | 0.3 | $da/dN = 6.73 \times 10^{-7} (\Delta K - 7.34)^{1.07}$ |
| | 0.5 | $da/dN = 7.15 \times 10^{-7} (\Delta K - 5.84)^{0.91}$ |
| | 0.8 | $da/dN = 8.11 \times 10^{-7} (\Delta K - 4.68)^{0.67}$ |
| Weld metal | 0.1 | $da/dN = 3.79 \times 10^{-7} (\Delta K - 11.37)^{1.21}$ |
| | 0.3 | $da/dN = 5.05 \times 10^{-7} (\Delta K - 9.59)^{0.74}$ |
| | 0.5 | $da/dN = 8.54 \times 10^{-7} (\Delta K - 8.16)^{0.81}$ |
| | 0.8 | $da/dN = 8.56 \times 10^{-7} (\Delta K - 5.28)^{0.61}$ |
| HAZ | 0.1 | $da/dN = 6.10 \times 10^{-7} (\Delta K - 10.21)^{0.91}$ |
| | 0.3 | $da/dN = 6.82 \times 10^{-7} (\Delta K - 9.81)^{0.76}$ |
| | 0.5 | $da/dN = 7.45 \times 10^{-7} (\Delta K - 8.63)^{0.59}$ |
| | 0.8 | $da/dN = 7.17 \times 10^{-7} (\Delta K - 5.61)^{0.81}$ |

3 结果讨论与分析

3.1 裂纹闭合应力强度因子 K_{cl} 的计算

本文把裂纹开始闭合(或开始完全张开)时的应力强度因子 K 称作裂纹闭合应力强度因子, 记作 K_{cl} 。 K_{cl} 值能反映裂纹闭合情况, 是衡量裂纹闭合的一个量。

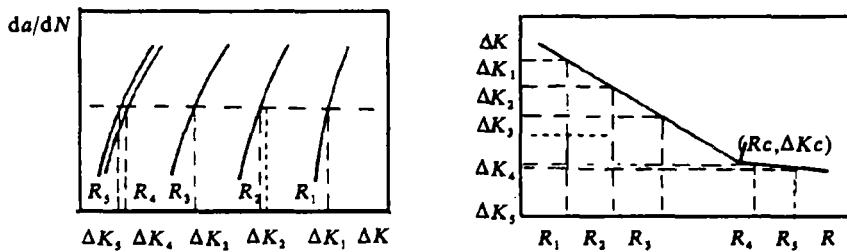
在应力强度因子幅 ΔK 的作用下, 裂纹开始闭合或开始完全张开时, $K_{min} = K_{cl}$, 则 $K_{max} = K_{cl}/Rc$, $\Delta K_c = K_{max} - K_{min} = K_{cl}(1 - Rc)/Rc$, 所以有

$$K_{cl} = \Delta K_c R c / (1 - R c) \quad (1)$$

式中 Rc 、 ΔK_c 分别为裂纹开始闭合(或开始完全张开)时的应力比和应力强度因子幅。

选择门槛值附近的几个疲劳裂纹扩展速率, 从不同应力比下的近门槛值区疲劳裂纹

扩展速率表达式,求出与选定的疲劳裂纹扩展速率相对应的 ΔK ,将此值绘在分别以 ΔK 和 R 为轴的坐标系中,曲线的拐点就是裂纹开始闭合(或开始完全张开)点,坐标为(R_c , ΔK_c),将此坐标值代入式(1)即可计算出 K_{cl} 值。图2只选择了一个疲劳裂纹扩展速率。选择几个 da/dN ,就会得到几条 $\Delta K-R$ 曲线,即几个拐点(R_c , ΔK_c),从而计算出几个 K_{cl} 值,取其平均值就为材料的 K_{cl} 。采用这种方法,并利用表4中的表达式,分别计算出母材、焊缝、热影响区裂纹闭合应力强度因子 K_{cl} ,其结果为:母材 $K_{cl}=9.06\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$,焊缝 $K_{cl}=21.40\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$,热影响区 $K_{cl}=23.20\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。

图2 K_{cl} 计算原理图Fig.2 Figure of calculating mechanism of K_{cl}

3.2 应力比 R 对门槛值 ΔK_{th} 的影响

通过处理表3中的试验数据,分别得到母材、焊缝以及热影响区门槛值 ΔK_{th} 的表达式:

$$\begin{aligned} \text{母材} \quad \Delta K_{th} &= 9.59 - 7.50R \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (R \leq 0.66) \\ \Delta K_{th} &= 4.68 \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (R > 0.66) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{焊缝} \quad \Delta K_{th} &= 12.22 - 8.54R \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (R \leq 0.8) \\ \Delta K_{th} &= 5.46 \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (R > 0.8) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{热影} \quad \Delta K_{th} &= 11.07(1-R)^{0.41} \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (R \leq 0.8) \\ \text{响区} \quad \Delta K_{th} &= 5.73 \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (R > 0.8) \end{aligned} \quad (4)$$

从式(2)、式(3)、式(4)得出,母材、焊缝、热影响区的门槛值 ΔK_{th} ,在应力比 R 小于某一值 $R_{c,th}$ 时(母材的 $R_{c,th}=0.66$,焊缝的 $R_{c,th}=0.8$,热影响区的 $R_{c,th}=0.8$),随着 R 增大而减小,当 R 超过此值后,其门槛值均保持不变。

应力比 R 对门槛值 ΔK_{th} 的影响可以用裂纹闭合理论来解释。首先分析裂纹闭合随应力比 R 变化的情况,不妨以母材为例。裂纹在 ΔK 的作用下,如果 $K_{min} < K_{cl}$,裂纹闭合, K_{min} 与 K_{cl} 相差越大,裂纹闭合越严重;如果 $K_{min} > K_{cl}$,裂纹完全张开。

$$\Delta K_{th} = K_{th,max} - K_{th,min} = K_{th,min}(1-R)/R \quad (5)$$

把式(5)代入式(2) $R \leq 0.66$ 阶段的表达式,得

$$K_{th,min} = (9.59R - 7.50R^2)/(1-R) = 9.59R + 2.09R^2/(1-R) \quad (6)$$

从式(6)可知,随着 R 增大, $K_{th,min}$ 也增大。从前面的计算可知,母材的 $K_{cl}=9.06\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$,

把 $K_{th,min} = K_{cl} = 9.06 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 代入式(6)即可求得 $K_{th,min}$ 达到 K_{cl} 时的应力比 $R_{c,th}$, 解得 $R_{c,th} = 0.66$ 。

当 $R \leq 0.66$ 时, 随着 R 增大, $K_{th,min}$ 与 K_{cl} 相差越来越小, 裂纹闭合亦即越来越轻。

对于 $R > 0.66$ 阶段, 把式(5)代入式(2) $R > 0.66$ 阶段的表达式, 得

$$K_{th,min} = 4.68R/(1-R) \quad (7)$$

从式(7)也可以得出: 随着 R 增大, $K_{th,min}$ 也增大。把 $K_{th,min} = K_{cl} = 9.06 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 代入式(7), 解得 $K_{th,min}$ 达到 K_{cl} 时的应力比 $R_{c,th} = 0.66$, 这说明在 $R > 0.66$ 阶段, $K_{th,min}$ 均大于 K_{cl} , 所以此阶段裂纹完全张开。

从上面的分析得到: 当 R 超过某一值 $R_{c,th}$ 之前, 随着应力比 R 增大, 裂纹闭合越来越轻; 当 R 超过 $R_{c,th}$ 之后, 裂纹完全张开。析焊缝和热影响区的裂纹闭合情况也可以得出上述结论。

一般认为门槛值分为两部分: 一部分为裂纹完全张开时的有效门槛值 $\Delta K_{th,eff}$, 另一部分为受裂纹闭合影响的门槛值 $\Delta K_{th,op}$, 即

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th,eff} + \Delta K_{th,op} \quad (8)$$

从前面的分析可知: 当 $R \leq R_{c,th}$ 时, 随着 R 增大, 裂纹闭合程度减轻, 所以 $\Delta K_{th,op}$ 减小。根据式(8), 门槛值 ΔK_{th} 也随之减小; 当 $R > R_{c,th}$ 时, 裂纹完全张开, 不存在裂纹闭合现象, $\Delta K_{th,op}$ 必然为零, 从式(8)得出 $\Delta K_{th} = \Delta K_{th,eff} = \text{常数}$ 。这与试验结果完全吻合。

4 结 论

(1) 母材、焊缝以及热影响区的裂纹闭合应力强度因子 K_{cl} 分别为 $9.06 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、 $21.40 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、 $23.20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。焊接接头的裂纹闭合程度远高于母材金属。

(2) 母材、焊缝以及热影响区门槛值 ΔK_{th} 的表达式分别为:

| | | | |
|----------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------|
| 母材 | $\Delta K_{th} = 9.59 - 7.50R$ | $(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ | $(R \leq 0.66)$ |
| | $\Delta K_{th} = 4.68$ | $(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ | $(R > 0.66)$ |
| 焊缝 | $\Delta K_{th} = 12.22 - 8.45R$ | $(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ | $(R \leq 0.8)$ |
| | $\Delta K_{th} = 5.46$ | $(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ | $(R > 0.8)$ |
| 热影 响区 | $\Delta K_{th} = 11.07(1-R)^{0.41}$ | $(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ | $(R \leq 0.8)$ |
| | $\Delta K_{th} = 5.73$ | $(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ | $(R > 0.8)$ |

(3) 当应力比 R 达到某一值 $R_{c,th}$ 之前, 母材、焊缝、热影响区的门槛值 ΔK_{th} 随着应力比 R 的增大而减小; 当 R 超过 $R_{c,th}$ 之后, 其门槛值 ΔK_{th} 均保持不变。母材、焊缝、热影响区的 $R_{c,th}$ 分别为 0.66、0.8、0.8。

(1992年11月17日收到修改稿)

参 考 文 献

- 林德深, 胡义详等. 钢铁材料疲劳裂纹扩展门槛值的试验研究. 金属学会Ⅱ疲劳学术会议论文, 1987
- Ritchie R O. Near-threshold fatigue-crack propagation in steels. International Metal Reviews, 1979, (5), (6)
- Musaiva J K, Radon J C. Threshold of fatigue crack growth in a low alloy steel. Advances in Fracture

Research, Vol.3. 5th International Conference on Fracture. Cannes, France, 29 March - 3 April 1981.

- 4 Romaniv O N. A. N. Tkach on Yu N. Lenet. Effect of fatigue crack close on near-threshold crack resistance of structure steels. Fatigue Fract. Engng Mater. Struct. 1987, 10(8)
- 5 GB6398-86. 金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法.

Influence of stress ratio R on threshold value ΔK_{th} of fatigue crack propagation for welded joints of 09CuPCrNi steel

Qiu Hai, Li Guangduo

(Dalian Railway Institute)

Abstract The expressions of threshold value ΔK_{th} of fatigue crack propagation in base metal, weld metal and heat affected zone (HAZ) for 09CuPCrNi steel under various values of stress ratio have been obtained respectively by using gradual down K technique according to Chiness Standard GB6398-86. It was found that threshold values in the three parts of a welded joint would decrease with increasing stress ratio R when $R \leq R_{c,th}$, whereas the values would remain constant when $R > R_{c,th}$. Meanwhile a calculating method for stress intensity factor K_{cl} of crack closure has been described in detail. It was also indicated that the closure effect of the welded joint is greater than that of the base metal. The analysis and explanation for this viewpoint have been made.

Key words stress ratio; fatigue crack propagation; threshold value