

双相不锈钢焊接接头疲劳强度

贾法勇, 霍立兴, 吴冰, 张玉凤

(天津大学材料科学与工程学院, 天津 300072)

摘 要: 试验对 SAF2205 双相不锈钢纵向角接板焊接接头的疲劳强度进行了研究, 用有限元计算热点应力集中系数, 分别得出了名义应力和热点应力疲劳 $S-N$ 曲线; 用国际焊接学会推荐的方法进行统计处理, 并和相同接头形式结构钢的疲劳强度进行了比较。试验表明, 双相不锈钢纵向角接板焊接接头名义应力疲劳强度试验结果为 $FAT136$, 热点应力疲劳强度试验结果为 $FAT163$, 高于相同接头形式结构钢的疲劳级别; 双相不锈钢的静载强度级别对其疲劳强度设计级别没有明显的影响。

关键词: 双相不锈钢; 名义应力; 热点应力; 有限元

中图分类号: TG405 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2004)02-31-04



贾法勇

0 序 言

双相不锈钢, 主要指金相组织中铁素体和奥氏体大约各占50%的不锈钢^[1]。它兼有铁素体不锈钢和奥氏体不锈钢的优点, 屈服强度很高, 可达400~550 MPa, 是普通结构钢的2倍; 在介质环境比较恶劣的条件下, 其抗点蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀以及腐蚀疲劳性能明显优于通常的不锈钢; 同时, 双相不锈钢具有良好的焊接性^[1-3]。近年来双相不锈钢作为强度高、韧性好、耐蚀性好、焊接性好的结构材料发展十分迅速, 特别在近海工程、石油化工、船舶建造等领域获得了越来越广泛的应用。由于这些结构中往往承受疲劳载荷且其主要失效形式为疲劳破坏, 因此研究双相不锈钢的疲劳性能, 具有十分重要的工程意义。

目前国际焊接学会对结构钢焊接接头的疲劳级别 FAT (在 2×10^6 次循环下的疲劳强度) 已经有了统一的设计规范^[4,5]。但双相不锈钢焊接接头的疲劳强度和普通结构钢有没有差别, 在焊接结构设计中疲

劳强度如何选取, 这也是人们普遍关注的问题。文中对 SAF2205 双相不锈钢焊接接头的疲劳强度在试验数据的基础上进行了研究, 对名义应力和热点应力 $S-N$ 曲线的拟合, 并和相同焊接接头形式结构钢的疲劳 $S-N$ 曲线进行了比较, 为双相不锈钢在工程中的应用提供理论指导。

1 材料成分及性能

SAF2205 属 Cr22 型铁素体—奥氏体双相不锈钢。其化学成分及力学性能分别见表1和表2。焊接采用专用双相不锈钢焊条 E2209, 属于 Cr22-Ni9-Mo3 型超低碳焊条, 生产标准 ANSI/AWS A5.4-92, 其化学成分见表3。

表1 SAF2205 双相不锈钢化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of SAF2205 duplex stainless steel

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N
0.03	1.0	2.0	22	5	3.2	0.18

表2 SAF2205 双相不锈钢力学性能

Table 2 Mechanical properties of SAF 2205 duplex stainless steel

屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 $\delta_s(\%)$	冲击韧度 A_k/J	硬度 HV	点蚀指数 PREN
450	680~880	25	100	≤ 260	~35

表3 E2209 双相不锈钢焊条化学成分(质量分数, %)

Table 3 Chemical composition of E2209 duplex stainless steel electrode

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	Cu
0.04	0.90	0.5~2.0	21.5~23.5	8.5~10.5	2.5~3.5	0.08~0.20	0.75

2 焊接接头形式

2.1 试样形式

试验采用纵向角接板拉伸焊接接头 ,其试样形式和尺寸如图1所示。焊接电流控制在100~105 A ,焊接热输入控制在16~20 kJ/cm。

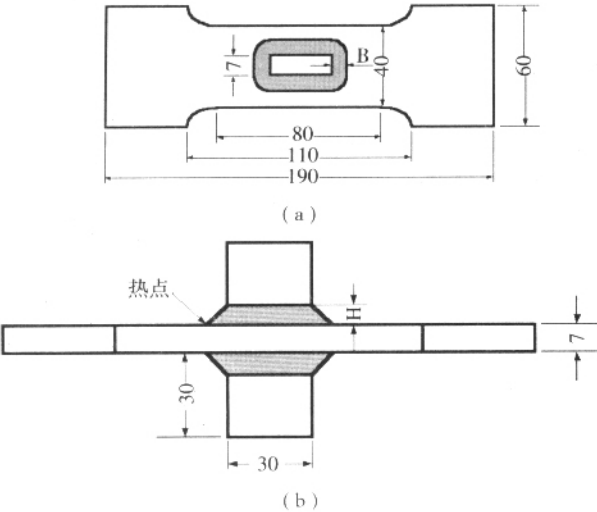


图1 焊接接头形式
Fig.1 Type of welded joint

2.2 角焊缝的尺寸

试验有效试样为10个。试验中对试样角焊缝的宽度*b*和高度*h*实际尺寸进行了测量 ,测量结果的平均值见表4。

表 4 焊缝尺寸平均值
Table 4 Mean dimensions of weld

	宽度 <i>b</i> /mm	高度 <i>h</i> /mm
1	7.58	6.26
2	7.17	6.04
3	7.62	6.74
4	7.13	6.33
5	7.63	6.88
6	7.10	5.32
7	8.15	5.17
8	7.06	5.13
9	7.14	5.53
10	7.90	6.91

3 试验结果及分析

试验在 10 t 高频疲劳试验机上进行 ,应力比 *R*=0.1 ,加载频率 *f*=130 Hz。

3.1 热点应力的有限元计算

热点应力指结构中焊缝危险截面上危险点应力。焊接结构中热点一般在焊趾处 (见图1) ,是疲劳裂纹的起源部位^[4,6]。

试验中用名义应力和热点应力集中系数根据式 (1)求热点应力值。

$$k_s = \frac{\sigma_{hs}}{\sigma_{nom}} \quad (1)$$

式中 *k_s*表示热点应力集中系数 ;*σ_{hs}*表示热点应力 ;*σ_{nom}*表示断裂截面的名义应力。

热点应力集中系数利用有限元分析得出。有限元分析按照国际焊接学会 (IIW)有关文献 [5,7] :选用20节点有限单元 ,在主板厚度方向划分一层单元 ,焊趾处单元的长度与外推点的距离相适应。在主板两端加1 MPa的拉伸应力 ,根据式 (2)外推出热点应力集中系数。

$$\sigma_{hs} = 1.67\sigma_{0.4t} - 0.67\sigma_{1.0t} \quad (2)$$

式中 *σ_{0.4t}*和*σ_{1.0t}*是距离焊趾0.4 *t*和1.0 *t*处的应力。

图2是焊趾处热点以及热点应力外推示意图。

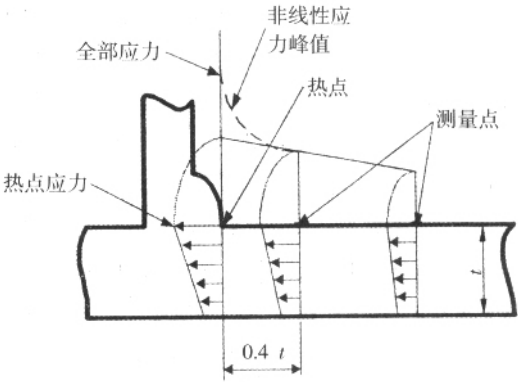


图2 热点应力的外推示意图

Fig.2 Extrapolation of hot spot stress

计算得到纵向角接板拉伸焊接接头热点应力集中系数为1.2。名义应力和热点应力疲劳试验结果见表5。

表5 疲劳试验结果
Table 5 Results of fatigue test

	名义应力范围 $\Delta\sigma_{nom}/\text{MPa}$	热点应力范围 $\Delta\sigma_{hs}/\text{MPa}$	循环次数 <i>N</i> /周波
1	198.0	237.6	0.384×10 ⁶
2	189.0	226.8	0.526×10 ⁶
3	180.0	216.0	0.510×10 ⁶
4	175.5	210.6	0.478×10 ⁶
5	166.5	199.8	1.023×10 ⁶
6	162.0	194.4	0.868×10 ⁶
7	157.5	189.0	1.205×10 ⁶
8	153.0	183.6	2.010×10 ⁶
9	144.0	172.8	2.128×10 ⁶
10	135.0	162.0	4.020×10 ⁶

3.2 疲劳试验数据的统计处理

统计处理按国际焊接学会(IIW)推荐的方法进行^[4,5]。

疲劳S-N曲线的表达式为

$$N = \frac{C}{\Delta \sigma^m} \quad (3)$$

国际焊接学会(IIW)推荐的S-N曲线以应力范围 $\Delta \sigma$ 和循环次数 N 用以10为底的双对数坐标表示。

试验结果包括特征值(k 指标)。该数值是95%存活率、75%置信度下的标称值。统计处理的具体步骤如下。

(1) 计算所有疲劳试验数据点的应力范围 $\Delta \sigma$ 和循环次数 N 以10为底的对数值。

(2) 采用幂函数模型回归指数 m 和常数 $\log C$ 的值。

$$m \log \Delta \sigma + \log N = \log C \quad (4)$$

国际焊接学会(IIW)有关文件规定,如果试验数据 $n < 10$,或者试验数据不足,不能精确确定 m ,对于焊接接头采用固定值 $m=3$ 。

(3) 利用得到的 m 值,计算 $\log C$ 的平均值 X_m 和标准差 $stdv$ 。

(4) 假如 X_i 是疲劳试验数据的对数值,则根据式(5)~式(7)计算特征值 X_k ,即

$$X_m = \frac{\sum X_i}{n} \quad (5)$$

$$stdv = \sqrt{\frac{\sum (X_m - X_i)^2}{n-1}} \quad (6)$$

$$X_k = X_m - k \times stdv \quad (7)$$

试验数据 $n = 10$ 相应的 $k = 2.7$ 。

然后根据 X_k 计算出相应的 C_k ,绘出特征S-N曲线进行分析。

3.3 疲劳S-N曲线

将试验数据进行统计处理,得出了双相不锈钢名义应力和热点应力疲劳S-N曲线,分别示于图3和图4中。图中曲线1表示对试验数据直接拟合得到的试验S-N曲线,曲线2表示按国际焊接学会(IIW)推荐的 $m=3$ 处理得到的S-N曲线,曲线3表示国际焊接学会(IIW)推荐的相同焊接接头形式结构钢的设计S-N曲线。名义应力S-N曲线和热点应力S-N曲线参数 m 、 C_m 和 C_k 以及相应的疲劳级别FAT分别见表6、表7和图3、图4。

双相不锈钢纵向角接板拉伸焊接接头名义应力试验S-N曲线表达式为

$$\log N = 20.54 - 6.67 \times \log \Delta \sigma \quad (8)$$

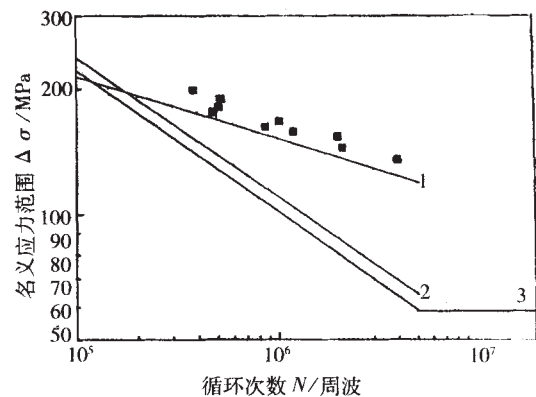


图3 名义应力S-N曲线

Fig.3 Nominal stress S-N curve

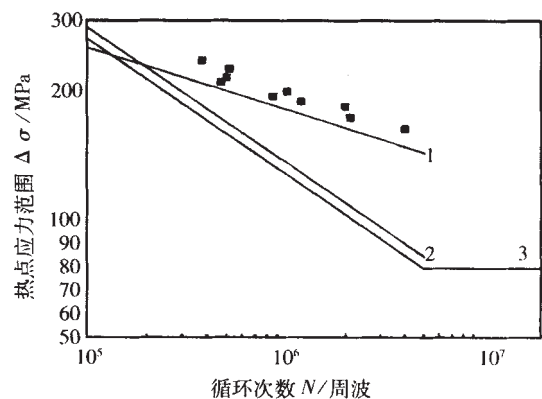


图4 热点应力S-N曲线

Fig.4 Hot spot stress S-N curve

表6 名义应力S-N曲线参数

Table 6 Parameters of nominal stress S-N curve

m	C_m	C_k	FAT
6.67	6.17×10^{20}	3.44×10^{20}	136
3.00	4.45×10^{12}	1.37×10^{12}	88

表7 热点应力S-N曲线参数

Table 7 Parameters of hot spot stress S-N curve

m	C_m	C_k	FAT
6.67	2.08×10^{21}	1.16×10^{21}	163
3.00	7.68×10^{12}	2.37×10^{12}	106

用国际焊接学会(IIW)推荐 $m=3$ 处理得到S-N曲线的表达式为

$$\log N = 12.14 - 3 \times \log \Delta \sigma \quad (9)$$

双相不锈钢纵向角接板拉伸焊接接头热点应力试验S-N曲线表达式为

$$\log N = 21.06 - 6.67 \times \log \Delta \sigma \quad (10)$$

用国际焊接学会(IIW)推荐 $m=3$ 处理得到的S-N曲线表达式为

$$\log N = 12.37 - 3 \times \log \Delta \sigma \quad (11)$$

按国际焊接学会(IIW)有关文件推荐,如果试验数据超过10个,可根据试验数据自行回归确定 m

和 C , 如果试验数据少于 10 个, 则应取 $m=3$ 。文中试验数据为 10 个, 回归 $S-N$ 曲线斜率为 $m=6.67$, 与 $m=3$ 有所不同; 名义应力和热点应力试验结果分别为 $FAT136$ 和 $FAT163$, 这与用国际焊接学会 (IIW) 推荐的焊接接头 $m=3$ 处理得到的疲劳级别 $FAT88$ 和 $FAT106$ 也有一定的差别。国际焊接学会 (IIW) 是在总结了大量试验数据 (包括不同斜率值) 的基础上, 并具有一定的安全系数而推荐的 $m=3$ 的疲劳强度 FAT , 因此安全裕度是很大的。换句话说, 它并不表征各种试验结果的情况。由于试验数据都在曲线 2 ($m=3$) 之上 (见图 3、4), 表明选取 $m=3$ 具有较高的安全系数。

将试验数据用国际焊接学会 (IIW) 推荐的 $m=3$ 处理, 得到双相不锈钢纵向角接板拉伸焊接接头名义应力和热点应力试验结果为 $FAT88$ 和 $FAT106$ 。分别与相同焊接接头形式结构钢的疲劳强度设计级别 $FAT80$ 和 $FAT100$ 基本相同, 这说明双相不锈钢焊接接头的静载强度级别对疲劳强度设计级别没有明显的影响。

4 结 论

(1) 双相不锈钢纵向角接板拉伸焊接接头名义应力试验 $S-N$ 曲线表达式为 $\log N=20.54-6.67 \times \log \Delta \sigma$, 2×10^6 次循环下的疲劳强度为 $FAT136$; 热点应力试验 $S-N$ 曲线表达式为 $\log N=21.06-6.67 \times \log \Delta \sigma$, 2×10^6 次循环下的疲劳强度为 $FAT163$ 。

(2) 用国际焊接学会 (IIW) 推荐的 $m=3$ 处理

[上接第 30 页]

3 结 论

(1) 焊接接头主要由三个区域组成: 钢侧的珠光体区和魏氏体区、球墨铸铁侧的珠光体+铁素体+石墨球区, 在球墨铸铁侧的接合界面处有一断续的石墨聚集层。

(2) 当通电时间一定, 次级电压从 4 级→6 级→8 级增大时, 钢侧珠光体区宽度增大, 球墨铸铁侧珠光体比例增加, 接头的抗拉强度先降后升。

(3) 当次级电压一定, 通电时间从 3 s→4 s→5 s 增加时, 钢侧珠光体区宽度增大, 球墨铸铁侧珠光体比例增加, 接头的抗拉强度呈上升趋势, 在次级电压为 8 级、通电时间为 5 s 时, 抗拉强度达最大值, 为 370.8 MPa。

(4) 接头拉伸断口形貌主要为准解理, 表现出一定的脆性断裂特征。

得到双相不锈钢纵向角接板拉伸焊接接头名义应力 $S-N$ 曲线为 $\log N=12.14-3 \times \log \Delta \sigma$, 2×10^6 次循环下的疲劳强度为 $FAT88$; 热点应力 $S-N$ 曲线为 $\log N=12.37-3 \times \log \Delta \sigma$, 2×10^6 次循环下的疲劳强度为 $FAT106$ 。

(3) 双相不锈钢纵向角接板拉伸焊接接头 2×10^6 次循环下的疲劳强度试验结果高于用 $m=3$ 处理得到的结果, 说明选取 $m=3$ 进行设计是安全的。

(4) 双相不锈钢焊接接头的静载强度级别对疲劳强度设计级别没有明显影响。

参考文献:

- [1] 吴 玫. 双相不锈钢 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [2] 王正樵, 吴幼林. 不锈钢 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991.
- [3] 索科尔 HR. 双相不锈钢 [M]. 北京: 原子能出版社, 1979.
- [4] 霍立兴. 焊接结构的断裂行为及评定 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [5] Hobbacher A. Recommendations for fatigue design of welded joints and component [C]. IIW document XIII-1539-96/XV-845-96, Update June, 2002. 23~31.
- [6] 拉达伊 D. 焊接结构疲劳强度 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [7] Niemi E. Structural stress approach to fatigue analysis of welded component [C]. IIW document XIII-1819-00/XV-1090-01/XIII-WG3-06-99, Last Modified August 11 2001. 4~10.

作者简介: 贾法勇, 男, 1968 年 8 月出生, 博士研究生。主要从事焊接结构断裂与强度及结构完整性方面的研究, 发表论文 8 篇。

Email: jfyong@163.com

参考文献:

- [1] 黄文植, 堀江皓, 中村满. 球状黑铅铸铁と軟鋼との摩擦圧接における黒鉛変形層の生成 [J]. 铸造工学, 2000, 72(8): 535~540.
- [2] 周振丰. 金属焊接性 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [3] 齐 霄. 2002 年我国汽车产量达 325 万辆 [J]. 汽车工艺与材料, 2003, (2): 6.
- [4] 大城桂作. 铸造材料の結合 [J]. 铸造工学, 1998, 70(12): 915~919.
- [5] 黄文植, 堀江皓, 中村满, 等. 球状黑铅铸铁と軟鋼との摩擦圧接 [J]. 铸造工学, 2000, 72(2): 96~101.
- [6] 熊腊森. 焊接工程基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [7] 陆文华. 铸铁及其熔炼 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.

作者简介: 夏 青, 女, 1947 年 2 月出生, 副教授。研究方向为金属材料及性能, 发表论文 20 余篇。

Email: niu-xia@Sohu.com