

疲劳裂纹在奥氏体/铁素体 异种钢焊接接头中的扩展行为

The Behavior of the Fatigue Crack Propagation
in Austenitic/Ferritic Dissimilar Metal Joints

王智慧, 贺定勇 (北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100022)

WANG Zhi-hui, HE Ding-yong (Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China)

摘要: 采用三点弯曲试样研究了疲劳裂纹在奥氏体/铁素体异种钢焊接接头中的扩展行为与显微组织的关系, 测得疲劳裂纹在 Cr25Ni13/13CrMo44 异种钢焊接接头中的扩展速率 da/dN , 并且讨论了疲劳裂纹扩展与显微组织之间的关系。实验结果表明, 疲劳裂纹在异种钢焊接接头熔合区中扩展的路径, 是接头中韧性最低的热影响区过热区, 裂纹在铁素体材料侧, 跟随熔合线并平行于熔合线 $5 \sim 25 \mu\text{m}$ 扩展, 而马氏体层对疲劳裂纹有较大的抗力, 疲劳裂纹的扩展路径主要受组织韧性的控制。疲劳裂纹在 Cr25Ni13/13CrMo44 异种钢接头的扩展速率为: $da/dN = 7.07 \times 10^{-13} (K)^{3.863}$ 。

关键词: 疲劳裂纹; 扩展; 异种钢焊接接头

中图分类号: O346.2; TG457.11 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2001) 01-0036-04

Abstract: The E309 type austenitic electrodes was used in welding of 13CrMo44 heat resisting steel to form a dissimilar metal joint. The notched three-point bend specimens ($S/W = 4$) were prepared for the fatigue crack propagation (FCP) test. The relationship between the fatigue crack propagation and the microstructures in the joint was studied. The results show that the path that the fatigue crack propagation takes is in the overheated zone of HAZ, which may be attributed to the low toughness values in the zone. The fatigue crack propagates along the fusion zone at the region $5 \sim 25 \mu\text{m}$ to the fusion line. The martensite layer has ability to resist the fatigue crack propagation, which indicates that the trace of FCP is mainly controlled by toughness of the structures. The expression for fatigue crack propagation rate in the fusion zone of the Cr25Ni13/13CrMo44 dissimilar metal joint by Paris equation is as follows: $da/dN = 7.07 \times 10^{-13} (K)^{3.863}$

Key words: fatigue crack; propagation; dissimilar metal joints

奥氏体/铁素体异种钢焊接接头根据其连接的材料有三种主要形式: 一种是铁素体材料与奥氏体材料之间的连接, 这种接头在电站、石油化工工业中的中温设备上应用较多; 第二种是用奥氏体焊条焊接高强度钢, 由于奥氏体焊缝有较强的抗冷裂能力, 所以这种接头在生产和修复中也常采用; 第三种形式是在低碳钢和低合金钢表面熔敷不锈钢防腐层, 这种接头属于防腐堆焊。由于奥氏体不锈钢与低合金钢的线膨胀系数相差 30% 左右, 所以无论哪种形式的接头, 在焊态, 两种材料的连接界面就存在剪切应力, 在工作中, 也会由于温度的变化而在两种材料的连接界面造成剪切应力。

在焊接结构中, 疲劳失效的比例很大, 对于异种钢焊接接头, 除了交变的外载荷会引起疲劳断裂外, 当结构所处的介质发生周期性温度变化时, 同样会促

使疲劳裂纹扩展。

在非均匀组织中 (铁素体+珠光体, 铁素体+马氏体) 疲劳裂纹的扩展行为较为复杂, 有些实验结果还不一致^[1,2]。而对于奥氏体/铁素体异种钢焊接接头, 情况则更复杂, 由于母材与焊缝金属化学成分的差异, 使得熔合区存在着组织梯度, 当焊缝金属中镍含量小于 30% 时, 在焊缝与热影响区之间还有一条马氏体带^[3], 在这种情况下, 各种组织尤其是马氏体层, 对疲劳裂纹扩展所起的作用, 无疑是人们最关心的问题。本工作正是针对这些问题展开研究的。

1 实验方法

1.1 实验材料

采用 13CrMo44 珠光体耐热钢, 板厚 16mm, 焊条采用奥 307, 化学成分列于表 1。

表1 母材及熔敷金属的化学成分

Table 1 The chemical compositions of
base metal and filler metal

牌号	成分/ wt%							
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	S	P
13CrMo44	0.12	0.73	0.30	1.10	0.43	—	0.021	0.031
奥 307	0.057	1.75	0.54	23.70	—	12.8	0.007	0.022

1.2 试样

用奥氏体焊条奥 307 焊接 13CrMo44 珠光体耐热钢试板, 对接接头。试样尺寸如图 1 所示, (试样共九件, $S/W = 4$)。为了便于疲劳裂纹有机会与熔合区相遇, 并在其中扩展, 将一侧试板开成 10 坡口 (见图 1), 线切割的切口开在邻近熔合线的焊缝上, 以便做完预制疲劳裂纹后, 使裂纹尖端正好停在熔合区上。实验中用 30 倍显微镜观察预制的疲劳裂纹, 当其与熔合线相遇时, 即停止预制疲劳裂纹。

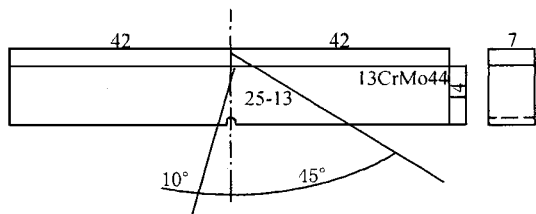


图 1 试样示意图

Fig. 1 Dimensions of specimen

1.3 试验设备及条件

采用瑞士阿姆斯勒公司的 ZHFP421 疲劳试验机; 试验温度 $25 \sim 27^\circ\text{C}$, 试验频率 6000 次/分钟, 正弦波, 裂纹长度用 30 倍显微镜测量。预制疲劳裂纹后, 测试裂纹扩展速率 da/dN , 所得数据列于表 2。其中 ΔK 按下式计算^[4]:

$$\Delta K = \frac{\Delta PY}{B \frac{W}{W}}$$

$$Y = [7.51 + 3.0(\frac{a}{W} - 0.5)^2] \sec(\frac{\pi a}{2W})$$

$$\tan \frac{\pi a}{2W}$$

2 实验结果分析

疲劳裂纹在奥氏体/铁素体异种钢焊接接头中的扩展路径能够反映出组织对裂纹的抗力。实验中发现:大多数疲劳裂纹走向都平行于熔合线,并在热影响区的粗晶区扩展,如果熔合线方向改变,疲劳裂纹也跟着转向(在9个试样中,8个是这种情况)。如图

2 所示,可以看出,当疲劳裂纹与熔合线相遇后,就在热影响区侧平行于熔合线 $5 \sim 25 \mu\text{m}$ 处扩展。

表2 疲劳裂纹扩展速率实验参数及结果

Table 2 Data and the results of fatigue crack propagation test

试样 编号	\bar{a}_i/mm	a_i/mm	$\Delta N \times 10^3/\text{cycle}$	$da/dN \times 10^{-5}/\text{mm}$	R	$\Delta P/N$	$\Delta K/(N \cdot \text{mm}^{-3/2})$
02-1	4.105	4.355	67	0.746	0.1	2250	515.43
	4.605	4.980	115	0.652			607.35
	5.355	6.055	19	7.368			747.38
	6.755	6.903	15	2.333			898.57
	7.105	7.065	20	5.000			1050.60
02-2	4.605	4.355	28	1.786	0.1	3150	744.51
	4.605	4.967	36	2.306			817.72
	5.330	5.468	5	5.500			936.88
02-3	4.105	4.355	41	1.220	0.1	2700	618.52
	4.605	4.793	51	0.735			679.34
02-5	4.105	4.355	140	0.357	0.1	2250	515.43
	4.605	4.855	150	0.333			592.74
	5.105	5.355	70	0.667			652.04
	5.605	6.105	60	1.667			754.22
1	4.105	4.355	148	0.338	0.1	2250	515.43
	4.605	4.980	140	0.536			607.35
	5.355	5.730	40	1.875			699.27
	6.105	6.605	47	2.182			837.57
2	4.105	4.355	389	0.129	0.1	2250	515.43
	4.605	4.855	293	0.171			592.74
	5.105	5.355	88	0.568			652.04
	5.605	5.855	52	0.962			717.31
	6.105	6.355	16	3.125			793.76
	6.605	6.855	18	2.778			884.82

注: $a_i = a_i + \frac{\Delta a_i}{2}$

疲劳裂纹在奥氏体/铁素体异种钢焊接接头中扩展与在均匀组织中的扩展行为有很大差异,在均匀显微组织中,疲劳裂纹一般在垂直于主应力方向扩展,这样所消耗的能量最小。而在奥氏体/铁素体接头过渡区的非均匀组织中,裂纹的扩展还要受到组织的非均匀性影响。显然,如果单从应力方向考虑,裂纹在图2中的右侧平行于熔合线方向扩展是不利的,因为这时裂纹已经不与外加应力方向垂直,热影响区过热区粗大铁素体+奥氏体组织似乎对疲劳裂纹扩展有“诱导”作用。图3是图2a中“A”处的高倍组织,裂纹源位于该图的上方,显然在“A”点裂纹曾发生过停顿,而这一点正是马氏体层所处的位置(在熔合区中马氏体层确实存在,但用一般方法不容易显示出其形貌^[3]),这表明马氏体有足够的阻止裂纹向其内部扩展,因而,裂纹只好转向热影响区。在“A”点形

成一个折点。

裂纹扩展速率 da/dN 的测试结果见图4。按 Paris 表达式 $da/dN = C(\Delta K)^m$, 用回归方法进行直线拟合, 得到 $da/dN = 7.07 \times 10^{-13} (\Delta K)^{3.863}$ 。对于

一般低合金钢, $m = 2 \sim 4$, $C = 10^{-9} \sim 10^{-10}$ 。本实验得到的数据 $m = 3.863$, $C = 10^{-13}$, m 值偏于上限, 但 C 值较小, da/dN 没有明显偏大的倾向。

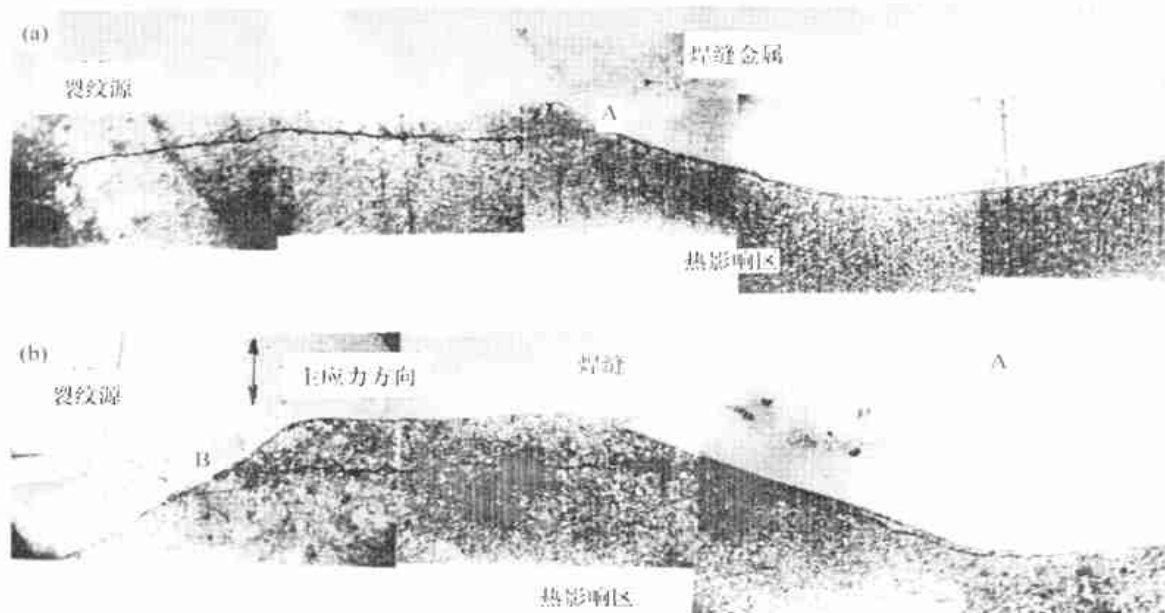


图2 疲劳裂纹在奥氏体/铁素体异种钢焊接接头中的扩展路径 (100×)

Fig. 2 Path of fatigue cracks propagation in austenitic/ferritic dissimilar metal joint

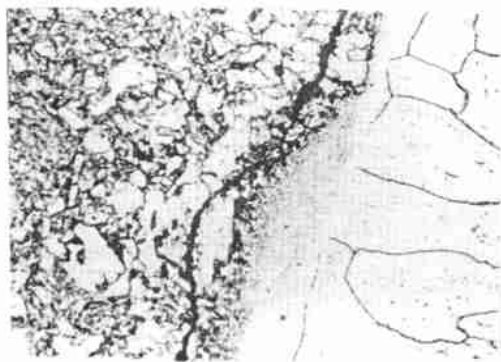


图3 在图2(a)中“A”处的高倍组织

Fig. 3 The enlarged microstructures of point "A" in Fig. 2

3 讨论

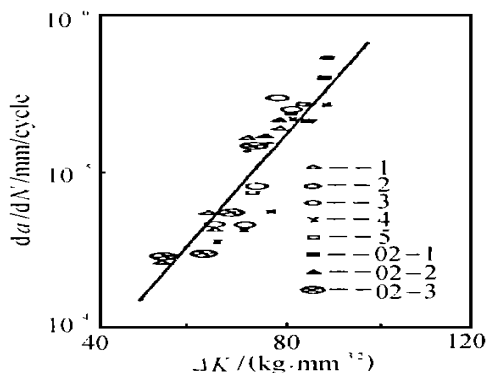
在非均匀显微组织中, 疲劳裂纹的扩展路径应该是裂纹扩展过程中消耗能量较低的路径, 但控制疲劳裂纹走向的主要因素是组织的强度、塑性还是韧性, 目前还不十分清楚。从本实验得知:

(1) 在疲劳裂纹扩展初期, 当裂纹与熔合线以较大交角相遇时(图2b中B点), 裂纹从奥氏体焊缝穿过熔合线, 在热影响区中垂直于主应力扩展。

(2) 当裂纹距熔合线较远时, 它沿垂直于主应力方向前进。这时无论裂纹是在完全重结晶区(图2b), 还是在部分重结晶区(图2a), 它都沿着垂直于主应力方向扩展。

(3) 当裂纹最终与熔合线相遇后, 便在热影响区的粗晶区平行于熔合线扩展。

强度与韧性实验表明^[5]: 在整个接头中, 热影响



标准差 $S = 1.58$, 相关系数 $r = 0.78$

图4 $da/dN \sim \Delta K$ 关系曲线

Fig. 4 $da/dN \sim \Delta K$ curve

区中的过热区韧性最差(见图5),强度则是马氏体层最高,部分重结晶区最低。而疲劳裂纹扩展实验表明,裂纹扩展正是选择了韧性最差的热影响中的过热区,这说明组织对裂纹的抗力取决于组织的韧性;从另一方面看,如果组织的强度是控制裂纹的主要因素,则实验中的裂纹应该在部分重结晶区扩展。

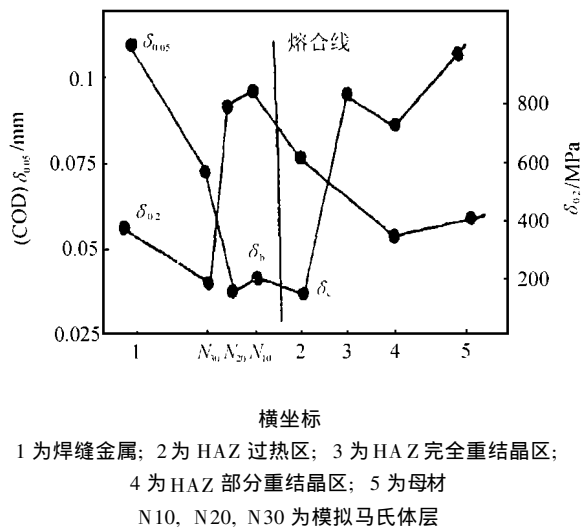


图5 25Cr13Ni/13CrMo44 接头强度与断裂韧性分布

Fig. 5 The distribution of the strength and fracture toughness in the 25Cr13Ni/13CrMo44 dissimilar metal joint

在线弹性范围内,疲劳裂纹的扩展是循环应力作用下裂纹尖端钝化、锐化的交替过程,每次循环裂纹的扩展量 da/dN 和裂纹张开位移 δ 有关。即 $da/dN = f(\delta)$ 。在线弹性条件下,裂纹尖端张开位移(即 COD)和应力强度因子 \bar{K}_I 有关,即 $\delta = K_I^2/E\sigma_s$,这样疲劳裂纹扩展过程就受到裂纹尖端的应力场影响。

Francis 和 Hall^[6]在研究表面裂纹疲劳扩展时得出循环寿命主要是 K 比值的函数,其中 K 是循环应力变化一周的最大应力强度因子, K_{IC} 是材料的断裂韧度,在实验中 K 是不变的,这样疲劳寿命就是由材料的韧度 K_{IC} 决定的,也就是说疲劳裂纹的扩展量以及扩展方式与材料的有关,这一点与本文中的实验结果一致。从图5可以看出,马氏体层的断裂韧性值高于 HAZ 过热区,而且其强度也高于 HAZ 过热区,因而疲劳裂纹以一定的角度与熔合线相遇后,便在 HAZ 过热区扩展。

4 结论

(1) 疲劳裂纹在 Cr25Ni13/13CrMo44 异种钢焊接接头熔合区中扩展的路径,是接头中韧性最低的热影响区过热区,裂纹在铁素体材料侧,跟随熔合线并

平行于熔合线 $5 \sim 25 \mu\text{m}$ 扩展。而马氏体层对疲劳裂纹有较大的抗力,在异种钢接头熔合区的非均匀组织中,裂纹的扩展主要受组织韧性控制。

(2) 疲劳裂纹在 Cr25Ni13/13CrMo44 异种钢接头的扩展速率: $da/dN = 7.07 \times 10^{-13} (\Delta K)^{3.863}$

参考文献

- [1] 罗尔夫 ST, 巴逊姆 JM. 结构中的断裂与疲劳控制——断裂力学的应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1985. 263
- [2] 愈德刚, 谈育熙. 钢的组织强度学 [M]. 上海: 上海科技出版社, 1983. 394
- [3] 王智慧, 徐碧宇, 叶赐麒等. 奥氏体/铁素体异种钢焊接接头熔合区组织的研究 [J]. 北京工业大学学报, 1988, 14 (4): 9
- [4] 陈旒. 三点弯曲断裂韧度的应力强度因子 K_I [J]. 力学, 1974, (3): 124
- [5] 戈康达 S. 金属的疲劳与断裂 [M]. 上海: 上海科技出版社, 1983. 151
- [6] 王智慧, 徐碧宇, 叶赐麒. 异种钢焊接接头熔合区马氏体断裂韧性的模拟研究 [J]. 焊接学报, 1989, 10 (2): 95
- [7] Broek D. Elementary Engineering Fracture Mechanics. Noordhoff International Publishing, Leyden, 1974. 70

收稿日期: 2000-01-31; 修订日期: 2000-10-17

作者简介: 王智慧 (1956-), 男, 北京工业大学材料科学与工程学院副教授。主要从事异种钢焊接接头的研究和金属表面强化研究。联系地址: 北京朝阳区平乐园 100 号, 北京工业大学材料科学与工程学院 (100022)。

本文编辑: 李海霞

* * * * *

(上接第 44 页)

角过渡,可有效防止铸件底部过热,创造良好的顺序凝固条件。

2 结论

立式浇注位置设计,可保证挂架整体性能、成分均匀合理;贴面冷铁式半金属型激冷,配以合理冒口补缩,保证铸件组织致,性能优良;直浇道、横浇道和内浇道截面比为 1:3:5,并配合带缓冲结构的合理缝隙,可保证型腔内液面上升平稳,减少铸件内部二次氧化夹杂和混入性气体;砂芯整体设计,可保证挂架尺寸的稳定。经过多件的试制和生产,合格率可达 85% 以上,说明该铸造工艺合理、可靠。

收稿日期: 2000-08-15

作者简介: 于桂林 (1941-), 男, 高级工程师。联系地址: 北京 81 信箱 71 分箱 (100095)

本文编辑: 孙常青