

12%Cr 铁素体不锈钢的焊接热影响区组织特征

王宝森¹, 马 立¹, 叶晓宁², 田劲松²

(1. 宝钢研究院, 上海 201900; 2. 不锈钢分公司, 上海 200431)

摘要: 针对 12%Cr 铁素体不锈钢, 利用光学显微镜、扫描电镜, 对在不同焊接热输入条件下的显微组织种类进行观察, 得出热影响粗晶区的组织变化规律; 应用 Thermal-cal 软件, 确定了 12%Cr 铁素体不锈钢在焊接热循环条件下发生相变的温度区间, 以及微合金元素 Ti 和 Nb 的析出相图。给出在焊接热循环作用下, 改善铁素体不锈钢焊接接头热影响区韧性的建议, 即焊接热影响粗晶区存在适量的马氏体; 钢中添加微量元素 Ti 可抑制粗晶区晶粒长大, 其作用优于 Nb。

关键词: 铁素体不锈钢; HAZ; 微合金化

中图分类号: TG457.11 **文献标识码:** B **文章编号:** 1008-0716(2007)03-0070-04

Microstructures of 12%Cr Ferritic Stainless Steel in Welding Heat-affected Zone

Wang Baosen¹, Ma Li¹, Ye Xiaoning², Tian Jinsong²

(1. Baosteel Research Institute, Shanghai 201900, China;

2. Stainless Steel Branch, Shanghai 200431, China)

Abstract: Microstructures of 12%Cr ferritic stainless steel under different welding heat input conditions were observed by optical microscope and scanning electron microscope (SEM). The change rules of the steel in coarse grained heat-affected zone (CGHAZ) were obtained. The temperature range where phase changes took place was determined by Software Thermal-cal, together with precipitate phase diagrams of microalloys Ti and Nb. Suggestions of improving ferritic stainless steel's toughness in welded joint HAZ were given. The suggestions include that there is a moderate amount of martensite in welded joint HAZ; if adding a small amount of element Ti in the steel, it can restrain grain growth in the coarse grain zone. The restraint effect of Ti on the grain growth is better than that of Nb.

Keywords: ferritic stainless steel; heat affected zone; microalloying

0 前言

11%~12%Cr 铁素体不锈钢是哥伦布公司 20 世纪 80 年代开发出来的经济型不锈钢, 主要目的是代替碳钢和镀锌钢板, 应用在具有大气腐蚀的场合, 如铁路运煤和矿石的货车车体。该不锈钢具有更加优良的耐腐蚀性能和抗磨损性能, 大大延长了货车车体的使用寿命, 减少了使用维护成本。此类铁素体不锈钢焊接的最主要特点是在焊接热循环的作用下导致的焊接热影响粗晶区晶粒长大, 从而带来焊接接头粗晶区韧性和腐蚀性能的降低。本文利用微观分析手段观察了 12%Cr 铁素体不锈钢焊接接头组织的组成, 提出了改善 12%Cr 铁素体不锈钢焊接接头性能的措施和建议。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

选取宝钢不锈钢分公司生产的 12%Cr 不锈钢板, 经过热轧、退火、酸洗后 6 mm 的 No.1 板, 其成分见表 1。

表 1 12%Cr 不锈钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of

| 12%Cr stainless steel | | | | | | % |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|---------------|------|
| C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni |
| ≤0.03 | ≤1.00 | ≤1.50 | ≤0.03 | ≤0.01 | 10.50 ~ 12.50 | ≤1.0 |

注: 含有微量的 Ti, Nb 合金元素。

1.2 焊接方法

采用的焊接工艺参数见表 2。选取在车辆制造厂制造过程中使用的 MAG 自动焊方法, 富氩气体保护 (Ar + 2.5% ~ 3% CO₂), 气体流量为 16 ~ 18 L/min, “V”型坡口, 坡口角度为 45°。焊接

王宝森 博士 1972 年生 2003 年毕业于天津大学 现从事材料加工专业 电话 26649542

材料选用 ER308L, 直径为 1.2 mm。

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Parameters of welding process

| 序号 | 焊接参数 | | 焊接速度/ (mm · min ⁻¹) | 输入热量/ (kJ · mm ⁻¹) |
|-----|------|------|------------------------------------|-----------------------------------|
| | 电流/A | 电压/V | | |
| 1-1 | 220 | 26 | 440 | 0.78 |
| 1-2 | 210 | 24 | 510 | 0.60 |

2 试验结果

2.1 焊接接头的拉伸性能

焊接接头的拉伸性能结果显示, 两个试样的焊接接头抗拉强度相当, 分别为 575, 550 MPa, 均断于母材。

2.2 焊接接头的冲击性能

焊接接头冲击性能的测定采用半试样(5 mm × 10 mm × 55 mm), 按照 GB2650—1989(焊接接头冲击试验方法)进行, 结果见图 1。从图 1 中可以看出, 随着热输入的增大, 熔合线粗晶区(F. L.)和 HAZ 部位(F. L. + 1 mm)的韧性均明显下降, 这与焊接热输入加大造成粗晶区铁素体晶粒粗化以及粗晶区宽度增大密切相关。同时, 焊接接头熔合线部位的冲击性能也要低于同接头的 HAZ 部位。

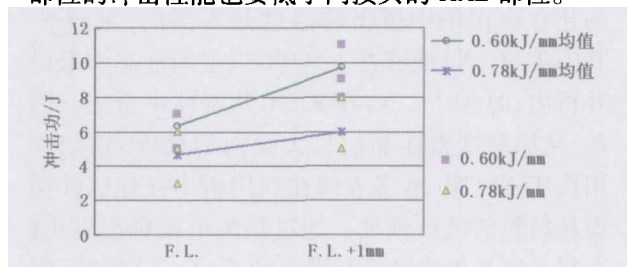


图 1 不同热输入条件下的 HAZ 不同缺口位置的冲击功

Fig. 1 Impact values of different notch and heat inputs in samples

3 讨论

3.1 焊接接头热影响区组织

焊接接头主要由焊缝、焊接热影响区(熔合线、粗晶区、细晶区)组成, 作为焊接接头最为薄弱的焊接热影响粗晶区, 其组织种类为分布在晶界上由奥氏体相变而来的黑色的马氏体和白色的铁素体, 见图 2。可见随着热输入从 0.60 kJ/mm 增加到 0.78 kJ/mm, 首先是粗晶区的宽度增加, 平均宽度由 0.30 mm 增加到 0.45 mm; 其次是粗晶区铁素体平均晶粒度大小也会由 3 级到 1.5

级; 第三, 分布在晶界上马氏体的量也会发生一定程度的变化。综合作用条件下, 表现在热输入较低的焊接热影响区的冲击性能优于热输入较高的, 如图 1 所示。

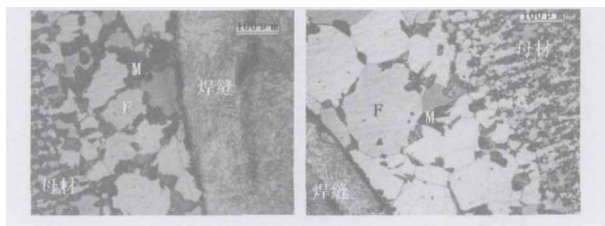


图 2 12% Cr 不锈钢焊接接头的组织组成

Fig. 2 Microstructures of 12% Cr stainless steel's weld joint

高倍下观察的晶界马氏体照片见图 3, 可见均为板条状马氏体, 这和该类不锈钢的 C 和 N 含量($200 \times 10^{-4}\%$ ~ $400 \times 10^{-4}\%$) 密切相关性较低, 显微硬度测试结果表明, 该马氏体的显微组织硬度为 280 ~ 300 HV5。

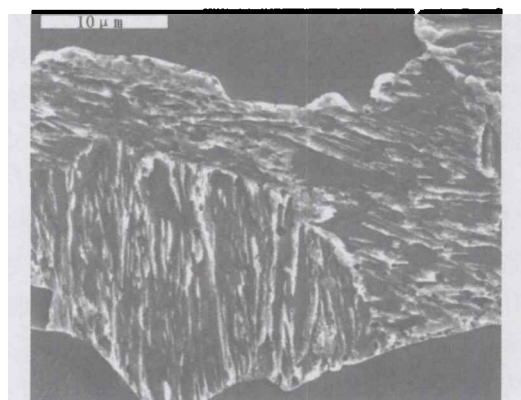


图 3 粗晶区晶界处形成的马氏体形貌

Fig. 3 Morphology of martensite in intergranular CGHAZ

通过 Thermal-cal 软件的计算得到该类钢种的温度—相组织图, 见图 4。该类不锈钢在 1 100 ~ 1 300℃ 是由 $\delta(\alpha) + \gamma$ 两相组织组成的, 在焊接快速加热及冷却的条件下, 高温下形成的奥氏体最终会转变成马氏体, 即在焊接热影响粗晶区晶界上会出现黑色的低碳板条马氏体。在焊接热影响区峰值温度条件下, 奥氏体的出现无疑将在一定程度上限制了 δ 铁素体的快速长大。因为随着温度的降低, 奥氏体在冷却过程中将转变为马氏体时, 也将带来一定程度的相变膨胀, 对被其分割的铁素体晶粒长大具有一定的阻碍作用, 一定程度上抑制了高温铁素体晶粒的长大。这与文献[1]阐述的铁素

体不锈钢焊接接头韧性改善的措施也是吻合的。但是,不是粗晶区马氏体含量越多越好,含量到底和什么影响因素相关,尚需进一步研究。

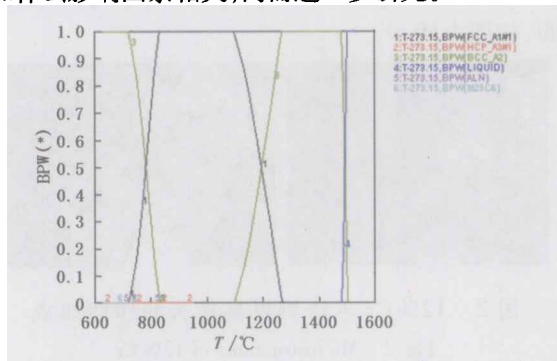


图 4 12% Cr 铁素体不锈钢计算相图

Fig. 4 Calculated phase diagram of 12% Cr ferritic stainless steel

粗晶区马氏体的含量和母材成分体系中的 C, N, Ni 等奥氏体形成元素的含量以及 Cr, Ni 比密切相关。铁素体形成元素含量相同时,奥氏体形成元素的含量越高,即 Cr/Ni 比越高,则焊接热影响区粗晶区域形成的马氏体含量越高。但理论分析认为,低碳马氏体的形成,对于粗晶区裂纹扩展能量的需求也将提高。裂纹在粗晶区扩展过程中一方面需要穿越 M 和 F 两相的晶界,另一方面在 M 晶界中扩展时也将不定的改变方向,这些因素都将增加裂纹扩展所需要的能量,宏观表现即冲击吸收功的提高。过高的奥氏体虽然在抑制铁素体晶粒长大具有一定的作用,但是其冷却形成的马氏体仍是脆性相,尤其当其固溶 C 含量较多时,脆性倾向更为明显。因此,采用 C 来提高粗晶区马氏体的含量不是最佳选择。既是奥氏体形成元素,同时又对韧性具有突出贡献的 Ni 的增加也能使马氏体含量增多,但是由于 Ni 的价格原因以及 12% 铁素体不锈钢的市场定位,提高 Ni 含

量,虽然可以提高焊接接头组织中马氏体的含量,从而一定程度上改善接头的韧性,但这不是一条最佳的途径。因此,主要研究目标可以考虑其他奥氏体形成元素如 Mn, N 等的含量。同时注意,随着粗晶区马氏体含量的增加,降低材料的韧脆转变温度,即韧性性能有所提高,但当达到 90% 时,将达到一个最高值;进一步增加马氏体含量,韧性将随之下降^[2]。因此,为了改善 12% Cr 铁素体不锈钢焊接接头粗晶区韧性性能,在焊接接头形成一定数量的马氏体是必须的条件之一。

为了更好地控制焊接热影响粗晶区的韧性性能,一方面控制母材成分体系中铬镍当量比,在不影响材料腐蚀性能基础上,尽可能降低材料的铬当量,从而提高焊接热循环条件下的马氏体含量;其次利用碳氮化物析出颗粒的钉扎作用,也能在一定程度上抑制 CGHAZ 铁素体晶粒的长大。

3.2 微量元素的作用分析

Ti 和 Nb 都是强烈的碳氮化物形成元素,通常作为稳定化元素加入铁素体不锈钢,通过与 C, N 结合形成 Ti(C, N) 或者 Nb(C, N), 利用稳定形成的碳氮化物,提高钢种本身抗晶间腐蚀的能力。通过 Thermol - cal 相图计算分析,发现 Ti 和 Nb 的化合物在钢中析出的温度是不同的,见图 5。其中 Ti(C, N) 能够在 1 500℃ 以上的液态中形成并析出,而 Nb(C, N) 在 930℃ 从基体中析出。因此,从抑制铁素体晶粒长大倾向的角度, Ti 的作用优于 Nb, Nb 更多表现在利用析出强化的作用提高材料的抗拉强度。通过扫描电镜观察发现,在粗晶区晶界边缘处有很多的 Ti(C, N) 颗粒(图 6),对于高温条件下铁素体晶粒的长大具有很好的抑制作用,能有利于铁素体不锈钢焊接热影响粗晶区韧性的改善。

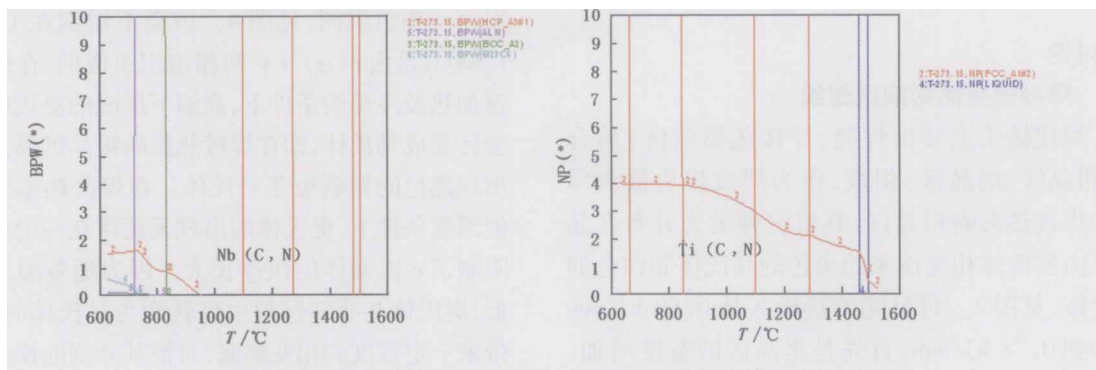


图 5 Ti 和 Nb 在 12% Cr 铁素体不锈钢中的析出相图

Fig. 5 Precipitated phase diagram of Ti/Nb in 12% Cr ferritic stainless steel

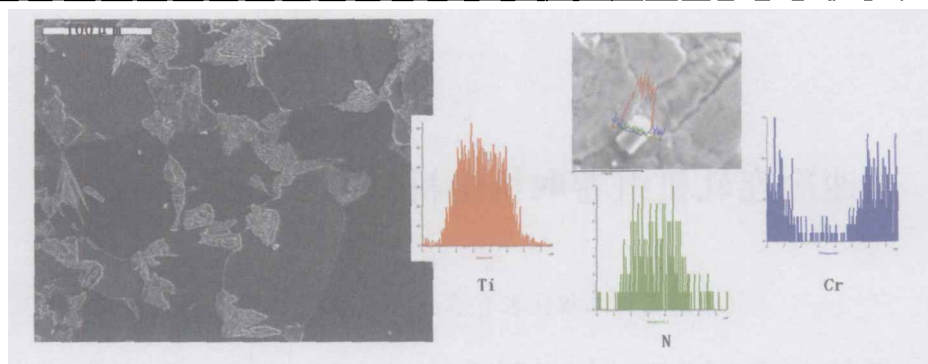


图6 分布在粗晶区中的 Ti(C + N) 颗粒

Fig. 6 Ti(C + N) precipitated phase distributed in the coarsen grain heat affected zone

4 结论

(1) 随着热输入的增加, 12% Cr 铁素体不锈钢热影响区粗晶区的晶粒度、宽度增加, 冲击韧性下降。为改善热影响区的韧性, 应采用适当小线能量输入的焊接方法。

(2) 超低碳、氮的 12% Cr 铁素体不锈钢在焊接热影响粗晶区将形成板条状的低碳马氏体, 一定量的马氏体含量可以抑制铁素体晶粒的长大; 采用合适的奥氏体化形成元素, 以降低母材成分体系中铬镍当量比值, 获得具有最佳性价比的组织组成。

(3) 微合金元素 Ti 和 Nb 在铁素体不锈钢中

析出温度不同, 从抑制晶粒长大作用而言, Ti 的作用优于 Nb; Nb 对提高 12% Cr 铁素体不锈钢强度有一定作用。

参 考 文 献

- [1] 肖纪美. 不锈钢的金属学问题[M]. 第二版, 北京: 冶金工业出版社, 2006: 234 - 235.
- [2] MEYER A M, TOIT M du. Interstitial Diffusion of Carbon and Nitrogen into Heat-Affected Zones of 11% ~ 12% Chromium Steel Welds[J]. Welding Journal, 2001, 80(12): 343 - 349.

(收稿日期: 2006 - 12 - 22)

(改稿日期: 2007 - 02 - 28)

(上接第 43 页)

位移量为 9.0 mm, 最小位移量为 3.8 mm, 其余测点的位移量均为 4.5 ~ 7.4 mm, 平均位移量为 5.4 mm。基础底板混凝土浇筑完成达到强度后, 基坑基本趋于稳定状态。

2.3.2 围护体位移

围护体位移是预先埋设在围护桩体内侧斜管的变形情况, 以了解基坑开挖施工过程中, 搅拌桩墙体因相应位置土体的挖除对其整体水平位移的影响程度, 分析围护桩体在各深度上的稳定情况。围护体位移测点的位移较小, 最大的位移是向坑内累计位移 8.81 mm; 最小的向坑内累计位移为 1.27 mm。至基础底板完成时, 围护体已处于稳定状态。

2.3.3 建(构)物的沉降和位移

从监测数据的统计结果看, 开挖施工期间所发生的沉降和位移占总的沉降和位移量的 60%

以上, 表明土体的位移主要发生在土压力被改变期间, 开挖后的位移主要是土体自身应力场动态平衡调整所产生蠕变的结果。采取的支持措施加大了挖土施工速度, 对于基坑的稳定与安全起着主要作用, 基坑附近的已有建筑物的沉降和位移得到了有效控制, 保证了安全使用。

3 保护措施对工程的影响

合理地采用预防措施, 有效地保护了生产设施, 提高了土建施工进度, 比计划节点提前 20 天。施工期间确保了建(构)物的安全和设备的正常运行, 没有造成厚板一次停产, 为热处理炉设备安装创造了条件, 使热处理线工程顺利投产。

(收稿日期: 2006 - 09 - 05)

(改稿日期: 2006 - 12 - 08)