

铁素体不锈钢 TIG 焊接头组织与性能研究

国旭明¹, 柳春恕¹, 袁进伟²

(1. 沈阳航空航天大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110136; 2. 沈阳哈维尔表面工程技术有限公司, 沈阳 110041)

摘要: 研究了焊接热输入和微合金元素铌对铁素体不锈钢 TIG 焊接头组织及性能的影响。实验结果表明, 随着焊接热输入的增加, 焊接热影响区的粗晶区和焊缝区中铁素体晶粒明显粗化, 降低了焊接接头的强度和塑性。铁素体不锈钢中加入少量的铌元素, 通过钉扎晶界和拖曳晶界移动的双重作用, 阻碍了粗晶区和焊缝区中铁素体晶粒的长大, 提高了焊接接头的强度和塑性。

关键词: 铁素体不锈钢; 焊接接头; 热输入; 铌元素

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5053.2011.3.011

中图分类号: TG406; TG142.71

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2011)03-0056-04

近年来, 由于稀有金属镍、钼等价格的上涨, 导致了以镍为主要添加合金元素的铬镍奥氏体不锈钢成本的上升。因此, 发展成本低廉、性能优良的不含镍或少含镍的铁素体不锈钢具有重要的意义^[1]。铁素体不锈钢的含铬量一般在 11% ~ 30% 之间, 具有体心立方晶体结构, 除了具有良好的强度、磁性和耐磨性能外, 还具有中等的耐腐蚀性能, 特别是耐氯化物应力腐蚀和点蚀的性能优异^[2,3], 是车辆、家用电器、厨房设备以及建筑装饰等行业常用的金属材料。然而与奥氏体不锈钢相比, 铁素体不锈钢焊接时, 焊接热影响区和焊缝区金属的铁素体晶粒的长大倾向受焊接热输入的影响较为明显。王宝森等人^[4]研究了 12% Cr 铁素体不锈钢的焊接热影响区组织特征, 实验发现, 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。Rakesh Kaul 等人^[5]对比研究了激光焊和 TIG 焊工艺对 17% Cr 铁素体不锈钢焊接接头组织及性能的影响, 结果表明, 与激光焊相比, 热输入大的 TIG 焊使热影响区和焊缝区的晶粒粗化严重, 降低了铁素体不锈钢焊接接头的塑性。针对铁素体不锈钢焊接时由于晶粒粗化而导致的性能下降问题, 通过减小焊接热输入的途径只能在一定的范围内得以改善。而要从根本上解决问题, 则要通过调整母材的成分才能达到改善性能的目的。因此,

本研究采用 TIG 焊对含 Nb 元素和不含 Nb 元素的两种铁素体不锈钢进行了焊接实验, 以研究焊接热输入和微合金元素铌对铁素体不锈钢 TIG 焊接头组织和性能的影响。

1 实验材料及方法

实验采用自制的含 Nb 元素和不含 Nb 元素的两种 Cr16 铁素体不锈钢, 厚度为 1mm, 其化学成分示于表 1。焊接设备采用美国生产的 Miller 氩弧焊机, 进行不填丝平板对接焊, 保护气体为纯度 99.9% 的氩气, 流量为 20L/min, 焊接工艺参数示于表 2。焊接后从焊接试件上截取焊接接头的拉伸和金相试样。拉伸试验在 AG-250KNE 电子拉伸试验机上进行, 拉伸速率为 2mm/min。金相试样经过研磨和抛光后, 用 10% 的草酸溶液电解腐蚀, 然后用 OLYMPUS-GX71 光学金相显微镜对焊接接头的显微组织进行观察和分析。

2 实验结果与讨论

2.1 焊接热输入对 TIG 焊接头显微组织的影响

图 1 为不含 Nb 元素的铁素体钢采用 65A 电流焊接后, 焊接接头的显微组织形貌。可见, 铁素体不锈钢 TIG 焊接后, 焊接接头由母材、热影响区和焊缝区三部分组成。母材的铁素体晶粒呈拉长的扁平状沿轧制方向分布, 晶粒较粗大。热影响区包括细小的等轴晶区和粗晶区(图 1a)。等轴晶区的形成是由于焊接过程中远离热源的焊接热影响区受到电弧

收稿日期: 2010-10-15; 修订日期: 2011-04-19

作者简介: 国旭明(1965—), 男, 教授, 主要从事焊接材料及焊接冶金研究, (E-mail) guoxuming@sohu.com。

表 1 铁素体不锈钢化学成分(质量分数/%)

Experimental material	C	Si	Mn	Nb	Cr	O	N
Steel without Nb element	0.005	0.23	0.26	—	16.5	0.0053	0.008
Steel with Nb element	0.005	0.23	0.26	0.22	16.5	0.0022	0.007

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding parameters			
Number	Welding current I/A	Arc voltage U/V	Welding speed v/cm·min ⁻¹
1	65	9.8	16.6
2	75	9.8	16.6

热的影响较小,温度相对较低,母材的铁素体晶粒发生了恢复和再结晶,被拉长的晶粒通过重新形核、长

大形成了均匀、细小的等轴晶。靠近焊缝的热影响区由于加热温度高,母材的铁素体晶粒严重过热,而发生明显的长大,形成了粗晶区。焊缝区的金属由柱状晶和焊缝中心的多边形铁素体晶粒组成(图 1b,c)。柱状晶依附于熔池边界未熔的铁素体晶粒以联生结晶方式向焊缝中心生长,当接近焊缝中心时,温度梯度变小,散热方向趋于均匀,为多边形铁素体的形成提供了条件。

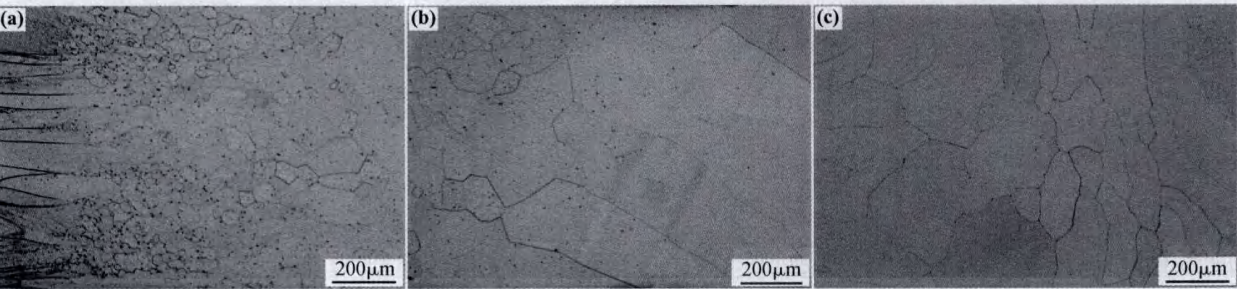


图 1 电流为 65A 时不含 Nb 铁素体钢焊接接头的显微组织 (a)母材金属和热影响区的等轴晶; (b)热影响区的粗晶和焊缝的柱状晶; (c)焊缝中心

Fig. 1 Microstructure of welded-joint of ferritic stainless steel without Nb at 65A welding current (a)base metal and fine grain in HAZ;(b)coarse grain in HAZ and columnar grain in weld;(c)weld centre

图 2 为不含 Nb 元素的铁素体钢采用 75A 电流焊接后,焊接接头的显微组织形貌。可见,随着焊接电流的增加,不仅焊接热影响区和焊缝区的宽度增加,而且热影响区的粗晶区以及焊缝区的铁素体晶粒也随着长大。这是由于随着焊接电流的增加,焊接热输入增大,焊接时的峰值温度和高温停留时间增加的结果。根据文献^[6]可知,铁素体钢焊接时,热影响区晶粒的大小与加热温度和高温停留时间存在如下关系:

$$D^{1.7} - D_0^{1.7} = \sum_{t_{900}}^{t'_{900}} 1.9 \times 10^4 \left[\exp \left(\frac{-2 \times 10^5}{RT(t)} \right) \right] \Delta t$$

(1)

式中,D 为经过加热后晶粒尺寸,D₀ 为原始晶粒尺寸,Δt 为从峰值温度降到 900℃时的时间,T(t)为加热过程的温度是时间 t 的函数。可见,随着加热温度的升高和高温停留时间的增加,热影响区的晶粒尺寸越大。而焊缝区柱状晶的长大归因于两

个因素,一是焊接电流的增加,导致热影响区的过热区晶粒粗化,从而使之与其联生结晶的柱状晶必然粗化;二是焊接电流的增加,熔池的温度升高,冷却速率降低,过冷度减小,也促进了焊缝柱状晶的粗化。

2.2 微合金元素 Nb 对 TIG 焊接头显微组织的影响

图 3 为含 Nb 元素的铁素体钢采用 75A 电流焊接后,焊接接头的显微组织形貌。对比图 2 可以看到,含有微合金元素 Nb 的铁素体钢,在相同的焊接热输入条件下,无论是热影响区粗晶区的晶粒尺寸,还是焊缝区的柱状晶和多边形铁素体都明显减小。这是因为铁素体钢中添加少量的 Nb 元素后,一方面 Nb 与钢中的 C,N 原子结合形成了稳定的碳、氮化合物,如 NbN,Nb(C,N)等,这些析出的第二相质点在焊接加热时具有钉扎晶界的作用,阻碍铁素体晶粒的长大;另一方面,Nb 的原子半径比铁大得多,

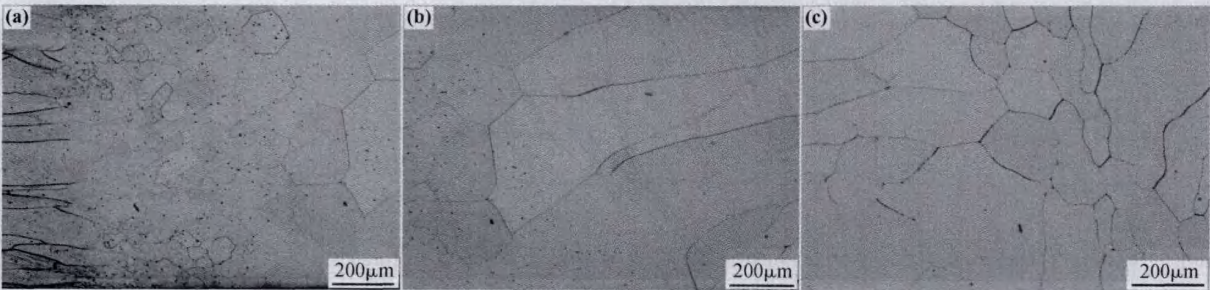


图 2 电流为 75A 时不含 Nb 铁素体钢焊接接头的显微组织 (a)母材金属和热影响区的等轴晶;
(b)热影响区的粗晶和焊缝的柱状晶;(c)焊缝中心

Fig. 2 Microstructure of welded-joint of ferritic stainless steel without Nb at 75A welding current (a) base metal and fine grain in HAZ; (b) coarse grain in HAZ and columnar grain in weld; (c) weld centre

固溶态 Nb 易在晶界富集,具有强烈的拖曳晶界移动的能力^[7,8]。因此 Nb 的这种双重作用,细化了焊接热影响区粗晶区的铁素体晶粒。与此同时,由于

粗晶区晶粒的细化,使之与其联生结晶的焊缝柱状晶的形核质点数量增加,也产生了明显的细化效果。

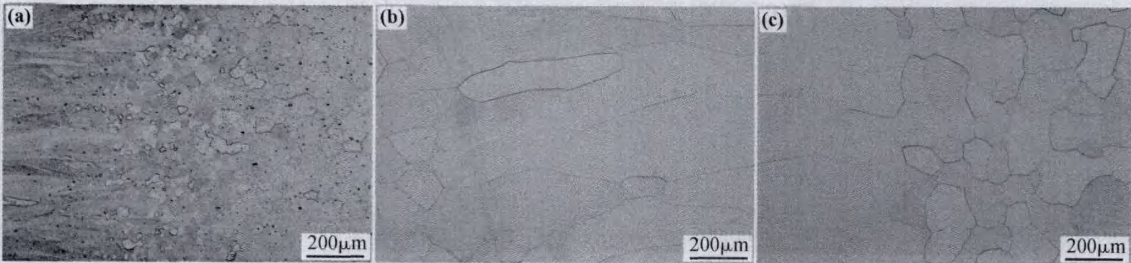


图 3 电流为 75A 时含 Nb 铁素体钢焊接接头的显微组织 (a)母材金属和热影响区的等轴晶;
(b)热影响区的粗晶和焊缝的柱状晶;(c)焊缝中心

Fig. 3 Microstructure of welded-joint of ferritic stainless steel with Nb at 75A welding current (a) base metal and fine grain in HAZ; (b) coarse grain in HAZ and columnar grain in weld; (c) weld centre

2.3 焊接接头的拉伸性能

表 3 为铁素体不锈钢 TIG 焊接头的拉伸实验结果。可以看出,对于不含 Nb 元素的铁素体钢当焊接电流由 65A 提高到 75A 时,焊接接头的抗拉强度由 397.9MPa 降低到 386.3MPa,同时伸长率也由 9.7% 减小到 9.0%。当铁素体钢中添加少量的 Nb 元素后,在相同的焊接热输入下,抗拉强度由 386.3MPa 提高到 408.7MPa,伸长率也由 9.0% 增加到 9.5%。上述实验结果是与它们焊接接头的显微组织变化密切相关的。根据 Hall-Petch 公式,金属的晶粒度越大,其强度和塑性、韧性越低。由于不

含 Nb 的铁素体钢对焊接热输入非常敏感,随着焊接电流的增加,焊接接头的显微组织明显粗化,因此导致了焊接接头强度和塑性的降低。当铁素体钢中加入少量的 Nb 元素后,一方面阻碍了焊接热影响区粗晶区和焊缝区中铁素体晶粒的长大,使晶粒粗化的程度明显降低;另一方面 Nb 作为铁素体形成元素,富集于铁素体相中,可以强化铁素体基体,同时 Nb 与 C、N 原子形成的 NbN, Nb(C, N) 等弥散的第二相质点,可起到沉淀强化的作用。因此含 Nb 铁素体钢焊接接头的强度和塑性得到明显提高。

表 3 铁素体不锈钢母材及焊接接头的拉伸性能

Table 3 Tensile properties of base metal and welded-joint of ferrite stainless steel

Sample	Tensile strength R_m /MPa	Elongation rate A /%	Fracture location
Weld joint without Nb (65A)	397.9(399.4, 396.4)	9.7(9.2, 10.2)	Weld zone
Weld joint without Nb (75A)	386.3(384.4, 388.1)	9.0(8.7, 9.3)	Weld zone
Weld joint with Nb (75A)	408.7(408.8, 408.6)	9.5(9.1, 9.9)	Weld zone
Base metal without Nb	617.8(619.1, 616.5)	5.3(5.2, 5.4)	—
Base metal with Nb	646.2(644.6, 647.8)	6.8(6.8, 6.8)	—

3 结论

(1) 不含 Nb 元素的铁素体不锈钢随着焊接热输入的增加,热影响区的粗晶区和焊缝区的铁素体晶粒明显粗化,使焊接接头的强度和塑性降低。

(2) 向铁素体不锈钢中加入少量的 Nb 元素,通过钉扎晶界和拖曳晶界移动的双重作用,降低了粗晶区和焊缝区中铁素体晶粒的长大程度,提高了焊接接头的强度和塑性。

参考文献:

[1] 张心宝,王志斌,赵春林. 热输入对 TCS 铁素体不锈钢焊接 HAZ 组织的影响研究[J]. 金属加工(热加工), 2008 (8): 45 - 48.

[2] LEFEVRE J, TRICOT R, GUEUSSIER A, *et al.* Proper-

ties of a new family of stainless steels without nickel[J]. Metallurgical Transactions, 1974, 5 (9): 2277 - 2285.

[3] 罗永赞. 铁素体不锈钢的进展[J]. 材料开发与应用, 1996, 11(2): 41 - 48.

[4] 王宝森,马立,叶晓宁,等. 12% Cr 铁素体不锈钢的焊接热影响区组织特征[J]. 宝钢技术, 2007(3): 70 - 73.

[5] KAUL R, GANESH P, TRIPATHI P, *et al.* Comparison of laser and gas tungsten arc weldments of stabilized 17 wt% Cr ferritic stainless steel[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2003, 18 (4): 563 - 580.

[6] 莫春立,李殿中,钱百年,等. 铁素体不锈钢焊接热影响区晶粒长大过程模拟[J]. 金属学报, 2001, 37(3): 307 - 310.

[7] 胡心彬,李麟,吴晓春. 铌微合金化在特殊钢中的应用[J]. 金属热处理, 2003, 28 (6): 5 - 10.

[8] 齐俊杰,黄运华,张跃. 微合金化钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006. 5.

Microstructure and Mechanical Properties of TIG
Welded-joint of Ferritic Stainless Steel

GUO Xu-ming¹, LIU Chun-shu¹, YUAN Jin-wei²

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 2. Shenyang Hard Welding Surface Engineering Limited Company, Shenyang 110041, China)

Abstract: The effects of weld heat input and trace element niobium on the microstructure and mechanical properties of TIG welded-joint of ferritic stainless steel were investigated. The results showed that the ferrite grains were obviously coarsened in the coarse zone within HAZ and weld zone with weld heat input increasing. The strength and ductility of the welded-joint were decreased. The ferrite grain growth in coarse zone and weld zone was hindered through the double effects of pinning up the grain boundaries and dragging the movement of grain boundary when the small amount of niobium element was added into ferritic stainless steel. The strength and ductility of the welded-joint were improved.

Key words: ferritic stainless steel; welded-joint; heat input; niobium element