

1Cr18Ni9Ti 不锈钢超窄间隙焊接接头组织与性能分析

郑韶先, 杜宝峰, 韩峰, 时哲

(兰州交通大学, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 采用超细颗粒焊剂约束电弧超窄间隙焊接方法进行了 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢的超窄间隙焊接试验, 并对所得超窄间隙焊接接头的组织及性能进行了测试和分析。结果表明, 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢超窄间隙焊接接头的根焊焊缝区晶粒为等轴晶, 而填充焊和盖面焊的焊缝区晶粒则为粗大的柱状晶。等轴晶和柱状晶的基体均为奥氏体, 晶粒内部均分布有少量板条状铁素体。超窄间隙焊接接头的填充焊缝和根焊焊缝具有与母材相当的硬度, 而盖面焊缝的硬度则略低于母材。超窄间隙焊接接头除了收缩率和冲击功比母材的略低外, 抗拉强度、屈服强度及伸长率明显高于母材所对应性能的最低值。此外, 试验还测得超窄间隙焊接接头的腐蚀速率为 $0.417 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ h})$, 该值明显低于母材的腐蚀速率。

关键词: 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢; 超窄间隙焊接; 接头组织与性能

中图分类号: TG444.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)10-2454-05

奥氏体不锈钢由于具有极好的抗腐蚀性和优良的力学性能, 因而在石化等领域得到了广泛的应用。然而, 奥氏体不锈钢焊接后所形成的焊接接头极易因晶界贫铬而发生晶间腐蚀, 以致焊接接头耐蚀性明显低于母材。奥氏体不锈钢焊接接头焊缝区的晶间腐蚀主要取决于焊接材料, 根据贫铬理论, 防止焊缝区发生晶间腐蚀可采取以下两种措施。一是通过焊接材料, 使焊缝金属成为超低碳情况或含有足够的稳定化元素 Nb; 二是调整焊缝成分以获得一定数量的铁素体。奥氏体不锈钢焊接接头 HAZ 敏化区晶间腐蚀的防止措施, 目前只能是在焊接工艺上采取小热输入和快速焊过程, 以减少 HAZ 处于敏化加热的时间。显然, 常规电弧焊接方法在降低热输入方面是非常有限的, 因此采用常规电弧焊接方法所得奥氏体不锈钢焊接接头的 HAZ 敏化区晶间腐蚀问题依然不能得到有效解决。

G. Engelhard 采用优化的窄间隙 TIG 焊工艺对壁厚为 12 mm 的奥氏体不锈钢管进行对接焊接, 结果表明随着坡口间隙宽度的减小, 焊接线能量可被显著降低, 以致焊缝 HAZ 处于敏化加热的时间显著减少且焊缝及热影响区晶粒得到细化, 特别是当坡口间隙宽度减小到 4.4 mm 时, 管道内侧接头区的焊接残余应力变为压应力, 从而使应力腐蚀的问题得到根本解决^[1]。

另外, W. Luo 采用埋弧焊和微束等离子弧焊方法研究 0Cr19Ni9 不锈钢焊缝耐蚀性发现, 埋弧焊焊缝及其 HAZ 的耐蚀性比母材的要低, 但微束等离子弧焊焊缝及其 HAZ 的耐蚀性比母材的要高, 并认为产生这一结果的原因在于微束等离子弧焊具有比埋弧焊更小的热输入, 以致前者的熔池凝固速度较后者快, 这不仅有利于细化焊缝及其 HAZ 的晶粒并降低显微偏析, 而且还有利于抑制晶界处铬的碳化物的析出^[2]。作为近年来新兴的超窄间隙焊接 (ultra-narrow gap welding, UNGW) 技术, 它在采用 “I” 型坡口对接焊接的情况下, 所用间隙宽度比常规窄间隙焊接 (narrow gap welding, NGW) 更小, 一般都在 6 mm 以下, 且为多层单道焊接; 当利用电弧作为热源焊接时所采用的最小线能量只有 $0.5 \text{ kJ}/\text{mm}$, 因而具有比常规 NGW 更小的焊接变形量和残余应力, 以及更加优良的焊接接头性能和更高的焊接效率^[3-7]。可见, UNGW 所具备的众多优点对于改善奥氏体不锈钢厚壁工件接头的耐蚀性和力学性能具有独特的优势。

试验选择了一组匹配合理的焊接参数, 采用超细颗粒焊剂约束电弧超窄间隙焊接方法^[3,5], 进行 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢的超窄间隙焊接, 以获得成形良好的焊接接头, 并对所得焊接接头的组织和性能进行测试和分析。从而为超窄间隙焊接方法用于改善

收稿日期: 2015-10-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51105185)

作者简介: 郑韶先, 男, 1978 年生, 博士, 副教授, 兰州交通大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730070, 电话: 0931-4956651, E-mail: zhengsx2008@mail.lzjtu.cn

1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢的耐蚀性和力学性能提供试验和理论依据。

1 实 验

试验中将厚度为 16 mm 的 2 块 160 mm×120 mm 焊接试板水平对接夹持在焊接夹具上, 焊接试板对接处所预留的“1”型坡口宽度为 5.5 mm, 长度为 160 mm。焊接试板“1”型坡口下方放置厚度为 4 mm, 尺寸为 260 mm×30 mm 的垫板, 以便于进行根焊。焊接试板及垫板材质均为 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢, 力学性能见表 1。所用焊剂是将 SJ601 经研磨并筛分而获得, 焊剂颗粒度为 550~830 μm , 焊丝为 $\Phi 1.6$ mm 的 GMS-347L。试验所用焊接参数见表 2。此外, 试验还采用了金属丝网衬垫焊剂颗粒的工艺, 见文献[3]。焊接电源为平特性, 电源的输出电压范围为 18~36 V, 输出电流范围为 160~350 A。

板式拉伸试样尺寸为: 板厚 10 mm, 平行部分的长度和宽度分别为 20 和 25 mm, 其余尺寸符合国标 GB2651-89。弯曲试样尺寸为 240 mm×26 mm×10 mm。冲击试样尺寸为 10 mm×10 mm×55 mm, 且带有 V 型缺口。拉伸与弯曲试验所用设备为 WE-60 液压式万能材料试验机, 冲击试验所用设备为 ZBC2602N-3 冲击试验机。采用 HAL100 型光学显微镜观察接头显微组织, 采用 FM-700 型显微硬度计测量接头的显微硬度。

2 结果及分析

2.1 UNGW 接头横截面形貌

图 1 为 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢超窄间隙焊接接头横截面形貌, 其采用质量分数为 65% 的浓 HNO_3 浸泡并加热的腐蚀方法而获得。整个接头由三道焊缝组成, 从下到上依次为根焊焊缝、填充焊缝及盖面焊缝。可以看出, 工件的两侧壁熔合良好, 焊缝内部未观察到气孔和夹渣, 焊缝熔合线清晰, 热影响区宽度不超过 2 mm。盖面焊缝和填充焊缝均为沿散热方向呈八字形分布的柱状晶, 而根焊焊缝却观察不到柱状晶。

2.2 UNGW 接头显微组织特征

图 2 即为 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢超窄间隙焊接接头的根焊、填充焊及盖面焊的显微组织, 其为采用 10% 草酸水溶液电解侵蚀的方法而获得。图 2a 为根焊的熔合线两侧组织, 其左上方为热影响区, 右下方为焊缝区, 而热影响区向焊缝区过渡处为熔合区。可以看出, 根焊的热影响区基体为奥氏体, 并且在奥氏体基体上分布着少量带状 δ 铁素体, 该显微组织形态与母材完全一致。图 2b 为根焊的焊缝区组织, 晶粒呈明显的等轴状, 等轴晶粒的基体为奥氏体, 晶粒内部则

表 1 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的力学性能

Tensile strength, σ_b /MPa	Yield strength, σ_s /MPa	Elongation δ /%	Reduction of area, ψ /%	Impact energy, α_k /J cm^{-2}
≥ 550	≥ 200	≥ 40	≥ 55	> 200

表 2 焊接参数

Arc voltage, U/V	Welding current, I/A	Welding speed, V_h /mm s^{-1}	Elongation length of wire, L_s /mm
30.6	297	7.3	24

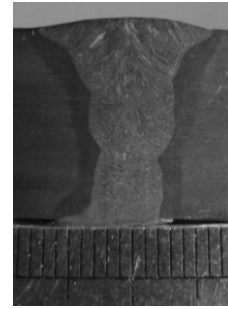


图 1 1Cr18Ni9Ti 不锈钢 UNGW 接头横截面形貌

Fig.1 Cross-sectional morphologies of UNGW joint of 1Cr18Ni9Ti stainless steel

分布有板条状铁素体。显然, 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢 UNGW 接头根焊焊缝等轴晶组织的形成, 一方面有利于改善整个接头的力学性能; 另一方面还可显著降低根焊焊缝内部产生宏观偏析的程度, 以致焊接接头的耐蚀性得以提高, 这在奥氏体不锈钢的焊接中具有重要的工程价值。图 2c 为填充焊的熔合线两侧组织, 其右上方为热影响区, 左下方为焊缝区, 填充焊的热影响区基体为奥氏体, 并且在奥氏体基体上分布着少量带状 δ 铁素体, 该显微组织形态与母材及根焊的热影响区组织完全一致。图 2d 为填充焊的焊缝区组织, 晶粒呈粗大的柱状晶, 柱状晶的基体为奥氏体, 奥氏体柱状晶内则分布有板条状铁素体。图 2e 和图 2f 分别为盖面焊的熔合线两侧组织和焊缝区组织, 其组织形态与填充焊所对应区域的组织形态大致相同。

实际上, 焊缝中 δ 铁素体的含量、形态及分布主要取决于奥氏体不锈钢焊缝的凝固模式, 同时焊缝冷却速度也有一定影响。含铁 70% 的 Fe-Cr-Ni 三元相图的垂直截面图表明, Cr-Ni 钢共有 A 型、AF 型、FA 型、F 型 4 种凝固模式, 并且当 $\text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}}$ 等于 1.55 时, 不锈钢的凝固模式将由 AF 型转变到 FA 型。经计算 GMS-347L 焊丝的 Cr_{eq} 与 Ni_{eq} 的比值 $\text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}}$ 等于 2.04, 考虑到熔合比的影响, 焊缝金属的实际 $\text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}}$

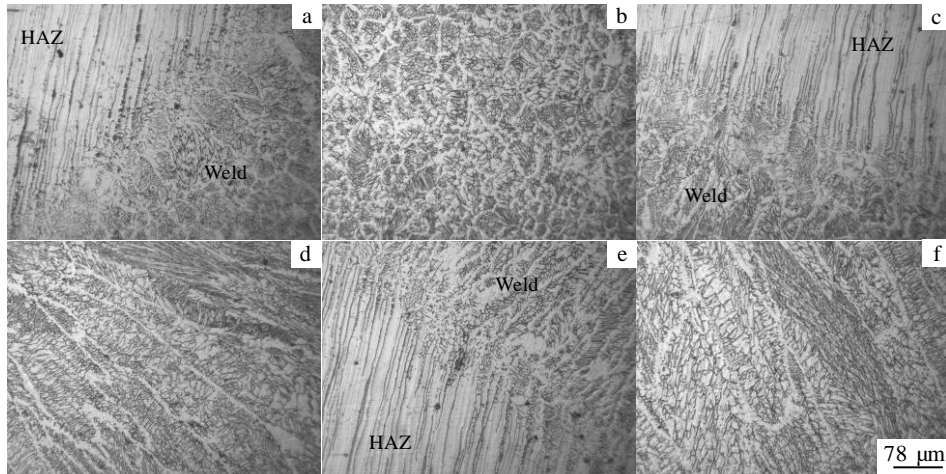


图 2 1Cr18Ni9Ti 不锈钢 UNGW 接头显微组织

Fig.2 Microstructures of UNGW joint of 1Cr18Ni9Ti stainless steel: (a) backing weld near the bond line, (b) backing weld in the weld zone, (c) filling bead near the bond line, (d) filling bead in the weld zone, (e) cover pass near the bond line, and (f) cover pass in the weld zone

应在 1.55~2.04, 故焊缝金属的凝固模式应为 FA 模式。因此, 由含铁 70% 的 Fe-Cr-Ni 三元相图的垂直截面图可知, 熔池凝固时, 初始析出相应为 δ 铁素体, 而在凝固终了时组织则由初始铁素体枝晶和枝晶间的奥氏体组成。当焊缝冷却并经过“ δ 铁素体+奥氏体”两相区时, 铁素体变得越来越不稳定, 将通过由扩散控制的反应转变为奥氏体。加之, UNGW 所用焊接线能量只有 1.12 kJ/mm (取热效率 $\eta=0.9$ 的情况下), 比常规弧焊方法要小得多, 因而焊缝的冷却速度很快, 使得先从液相中析出的铁素体向奥氏体转变时扩散受到限制。当扩散距离减小时, 以紧密排列的板条形态进行相变就更为有效, 结果使得残留铁素体成为横切过原始枝状晶或胞状晶生长方向的板条形状。这就是 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢超窄间隙焊缝组织基体为奥氏体, 而少量残留铁素体呈板条状的原因。

对于相同焊接参数下 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢超窄间隙焊接接头根焊焊缝组织为等轴晶, 而填充焊缝与盖面焊缝为柱状晶的形成原因可做如下解释和说明。根焊时, 电弧下方的金属层厚度即为垫板厚度, 其值等于 4 mm, 这使得电弧下方靠近熔池的固体母材温度快速升高, 从而抑制了熔池向其底部的快速散热, 以致凝固结晶前沿液相一侧的温度梯度降得很低, 并在整个熔池中形成很宽的成分过冷区, 该成分过冷区的液相内部随即形核并长大。由于该成分过冷区液相内所形成的晶核在各个方向的生长速度都相当, 故熔池凝固后形成了细小的等轴晶。填充焊和盖面焊时, 随着之前所焊焊道层数的增加, 电弧下方的金属层厚

度也逐渐增大, 这使得熔池向其底部的散热量加大, 因而加快了熔池的冷却速度, 以致凝固结晶前沿液相一侧的温度梯度明显比根焊时的大, 从而为柱状晶的生长提供了有利条件, 故熔池凝固后形成了粗大的柱状晶。

2.3 UNGW 接头的显微硬度分布

图 3 为 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢超窄间隙焊接接头的硬度分布曲线。图中共有 3 条曲线, 其分别为盖面焊、填充焊和根焊的硬度分布曲线。可以看出, 根焊和填充焊的焊缝区硬度相当, 且二者与母材的硬度也相当, 而盖面焊的焊缝区硬度则略低于根焊和填充

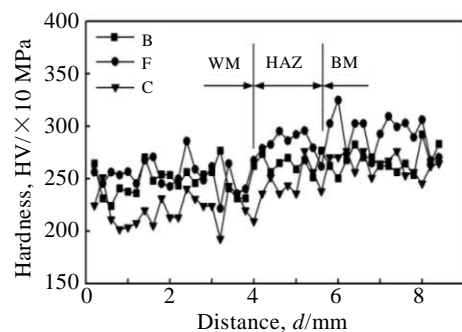


图 3 1Cr18Ni9Ti 不锈钢 UNGW 接头的硬度分布

Fig.3 Hardness variation of UNGW joint of 1Cr18Ni9Ti stainless steel (WM-weld metal; BM-base metal; HAZ-heat affected zone; B-backing weld; F-filling bead; C-cover pass)

焊的焊缝区硬度。填充焊的 HAZ 硬度略高于根焊的 HAZ 硬度, 而根焊的 HAZ 硬度则略高于盖面焊的 HAZ 硬度。就总体而言, 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢超窄间隙焊接接头的填充焊缝和根焊焊缝具有与母材相当的硬度, 而盖面焊缝的硬度则略低于母材。

2.4 UNGW 接头的力学性能

图 4a 为拉伸试验后的试样, 3 个拉伸试样均在焊缝处被拉断, 拉伸性能见表 3。经计算, UNGW 接头抗拉强度、屈服强度及断面收缩率的平均值依次为 664 MPa、432 MPa、40.2%, 拉伸试样伸长率的平均值为 48.9%。拉伸试样断口形貌如图 5a 所示, 断面由大小不同的等轴韧窝构成, 且韧窝内存在有颗粒状夹杂物。图 4b 为弯曲试验后的试样, 3 个弯曲试样表面均未观察到有裂纹存在。UNGW 接头的冲击性能见表 4, 其冲击功平均值为 152 J/cm², 冲击试样断口表面由大小不同的韧窝构成, 且韧窝内也存在有颗粒状夹杂物, 见图 5b。焊缝中颗粒状夹杂物的存在主要与所采用的超细颗粒焊剂约束电弧超窄间隙焊接方法^[3]有关。一方面该超窄间隙焊接方法将焊剂引入熔池; 另一方面该超窄间隙焊接方法的热输入极低, 使得熔池冷却速度很快, 不利于熔渣浮出熔池。上述两方面原因的共同作用, 导致了焊缝夹渣的形成机率增加。

此外, 与表 1 所示 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢的力学性能相比, 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢 UNGW 接头除了断面收缩率和冲击功比母材的略低外, 抗拉强度、屈服强度及伸长率明显高于母材所对应性能的最低值。显然, 导致 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢 UNGW 接头冲击功低于母材的原因, 主要在于 UNGW 接头焊缝区存在有一定数量的颗粒状夹杂物, 颗粒状夹杂物的存在可明显降低焊缝区的韧性。至于 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢 UNGW 接头试样的延伸率比母材的最低值大, 而断面收缩率比母材的最低值小的原因, 可做如下解释和说明。在对 3 个拉伸试样的载荷-位移曲线分析后发现, 在颈缩开始至试样断裂的时间段内, 3 个试样的位移量均在 0.6~0.8 mm 的范围内, 而在屈服

表 3 1Cr18Ni9Ti 不锈钢 UNGW 接头的拉伸性能

Table 3 Tensile properties of UNGW joint of 1Cr18Ni9Ti stainless steel

Sample	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ /%	ψ /%
No.1	636	412	43.6	36.5
No.2	675	447	47	39.9
No.3	682	439	56	44.2

表 4 1Cr18Ni9Ti 不锈钢 UNGW 接头的冲击功

Table 4 Impact energy of UNGW joint of 1Cr18Ni9Ti stainless steel

Sample	No.1	No.2	No.3
Impact energy, α_k /J cm ⁻²	148	163	145

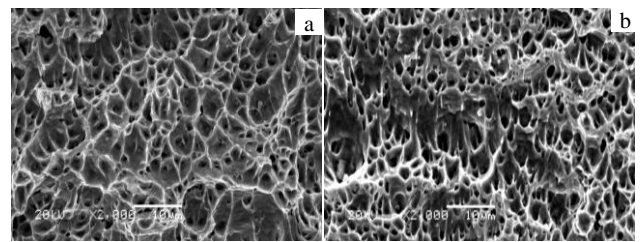


图 5 拉伸试样与冲击试样断口形貌

Fig.5 Fracture morphologies of the tensile sample (a) and impact sample (b)

点至载荷最大点之间的时间段内, 3 个试样的位移量均在 12~16.5 mm 的范围内。这表明, 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢 UNGW 接头具有接近于母材的力学性能, 以致试样在屈服后的均匀变形阶段未过早地在 UNGW 接头处形成颈缩, 使得试样的伸长量较大, 故 UNGW 接头的延伸率不低于母材最低值。随着屈服后的均匀变形的进行, 一方面试样在整个工作长度上的加工硬化程度在不断增加, 强度升高; 另一方面焊缝中颗粒状夹杂物的数量较母材多, 不仅使得在颈缩发生时颈缩处形成了数量较多的微孔洞, 而且在颈缩过程中加速了颈缩处微孔洞的长大和合并, 使得颈缩过程的用时较短, 以致颈缩处的收缩量较小。这就是 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢 UNGW 接头试样的断面收缩率比母材的最低值小的原因。

2.5 UNGW 接头的腐蚀速率

晶间腐蚀是奥氏体不锈钢焊接接头的主要腐蚀形式, 依据不锈钢晶间腐蚀试验方法国家标准 GB/T 4334-2008, 选取一总表面积约为 20.48 cm²且质量为 39.482 g 的 UNGW 接头试样, 采用 65%硝酸腐蚀试验方法进行了腐蚀试验, 试验共进行了 3 个周期, 每个腐蚀周期后的试样质量见表 5。经计算, 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢 UNGW 接头试样的腐蚀速率为 0.417

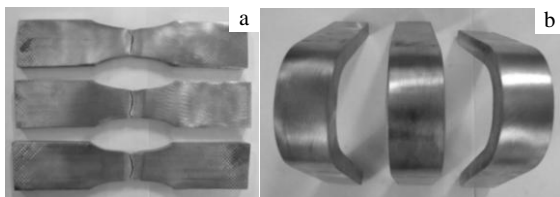


图 4 拉伸与弯曲后的试样

Fig.4 Tensile samples (a) and bend specimens (b)

表 5 UNGW 接头各周期腐蚀后的质量

Mass of 1 cycle, m_1/g	Mass of 2 cycle, m_2/g	Mass of 3 cycle, m_3/g
39.438	39.394	39.359

$g/(m^2 \cdot h)$ 。由文献[8]查得, 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢采用 65%硝酸腐蚀试验方法所得腐蚀速率为 0.9~1.82 $g/(m^2 \cdot h)$ 。显然, 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢 UNGW 接头的腐蚀速率明显低于母材, 因而 UNGW 接头的耐晶间腐蚀性能优于母材。

综上所述, 与常规弧焊方法相比, 超细颗粒焊剂约束电弧 UNGW 方法的热输入很低, 因而用于 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢焊接, 可得到晶粒更加细小且奥氏体基体上分布有板条状铁素体的焊缝组织, 故 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢 UNGW 接头具有接近于母材的力学性能。此外, 该 UNGW 方法低热输入的特点, 还显著减小了接头 HAZ 处于敏化加热的时间, 加快了熔池的凝固速度, 从而有效抑制了晶界处铬的碳化物的析出。加之, 奥氏体基体上存在有一定数量的板条状铁素体, 敏化加热时, 晶粒内奥氏体与铁素体两相界面处 Cr 易实现均匀化, 故可减少奥氏体晶粒内形成贫 Cr 层。这是导致 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢 UNGW 接头耐蚀性优于母材的主要原因。

3 结 论

1) 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢超窄间隙焊接接头

Microstructure and Mechanical Property of Ultra-narrow-gap Welding Joint of 1Cr18Ni9Ti Stainless Steel

Zheng Shaoxian, Du Baofeng, Han Feng, Shi Zhe
(Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Ultra-narrow-gap welding experiment of 1Cr18Ni9Ti austenitic stainless steel has been carried out by the method of constricting arc with ultra-fine granular flux, and microstructures and mechanical property of ultra-narrow-gap welding joint have been measured and analyzed. The results indicate that ultra-narrow-gap welding joint of 1Cr18Ni9Ti austenitic stainless steel takes on equiaxed grains in the backing weld zone and coarse columnar grains in the weld zone of filling bead and cover pass. Equiaxed grain and columnar grain mainly are made of austenite, but there is a small quantity of lath ferrite in the equiaxed grain and columnar grain. Backing weld and filling bead of ultra-narrow-gap welding joint have the similar hardness as base metal, but the hardness of cover pass is lower than that of base metal. The properties of ultra-narrow-gap welding joint are higher than the minimum of corresponding properties of base metal including the tensile strength, yield strength and elongation ratio except reduction of area and impact energy. Besides, corrosion rate of ultra-narrow-gap welding joint is 0.417 $g/(m^2 \cdot h)$, which is obviously lower than that of base metal.

Key words: 1Cr18Ni9Ti austenitic stainless steel; ultra-narrow-gap welding; microstructure and mechanical property of joint

Corresponding author: Zheng Shaoxian, Ph. D., Associate Professor, School of Mech-Electronic Technology, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, P. R. China, Tel: 0086-931-4956651, E-mail: zhengsx2008@mail.lzjtu.cn

的根焊焊缝区晶粒为等轴晶, 而填充焊和盖面焊的焊缝区晶粒则为粗大的柱状晶。等轴晶和柱状晶的基体均为奥氏体, 晶粒内部均分布有少量板条状铁素体。

2) 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢 UNGW 接头具有接近于母材的力学性能, 以及优于母材的耐晶间腐蚀性能。

参考文献 References

- [1] Engelhard G, Habip L M, Pellkofer *et al.* *Nuclear Engineering and Design* [J], 2000, 198: 141
- [2] Luo W. *Materials Letters*[J], 2002, 55: 290
- [3] Zheng Shaoxian(郑韶先), Li Defu(李德福), Zhu Liang(朱亮) *et al.* *Journal of Mechanical Engineering(机械工程学报)*[J], 2011, 47(8): 83
- [4] Nakamura T, Hiraoka K. *Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2001, 6(6): 355
- [5] Zheng Shaoxian, Li Xiaolei, Che Jun *et al.* *China Welding* [J], 2012, 21(1): 39
- [6] Zheng Shaoxian(郑韶先), Zhu Liang(朱亮), Chen Jianhong(陈剑虹). *Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)* [J], 2011, 32(1): 13
- [7] Zhu Liang, Zheng Shaoxian, Chen Jianhong. *China Welding* [J], 2006, 15(2): 44
- [8] Gu Jiqing (顾纪清). *Stainless Steel Application Manual(不锈钢应用手册)*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007:372