

文章编号:1005-0523(2018)01-0097-06

冷轧退火不锈钢焊接接头的组织及性能研究

魏康¹,李康²,李建生¹,高波¹,毛庆忠¹,王帅卓¹

(1.南京理工大学材料科学与工程学院纳米异构材料中心,江苏南京 210094;

2.中车南京浦镇车辆有限公司设计开发部,江苏南京 210031)

摘要:采用冷轧和退火处理工艺制备了异质层状结构的316L不锈钢,然后采用GTAW焊接工艺对处理后的钢板实施单、双面焊接成型,研究了处理前后试样以及单、双面焊接接头的微观组织与力学性能。试验结果表明:处理后的316L不锈钢内部形成明显的超细晶层状组织结构,其抗拉强度高达1058.9 MPa,比原始母材试样提高了70.6%;而韧性和塑性明显降低,断裂延伸率仅为16.9%。焊接接头的焊缝组织均表现为等轴状、树枝状的奥氏体和少量 δ 铁素体,热影响区形成较为粗大的奥氏体晶粒;单面焊接接头的抗拉强度为608.1 MPa,延伸率为15.3%,而双面焊接接头的力学性能稍有下降。拉伸断口均呈现等轴窝形貌。

关键词:冷轧处理;316L不锈钢;焊接接头;微观组织;力学性能

中图分类号: TG407

文献标志码: A

奥氏体不锈钢由于其无磁性、高的韧性和塑性、良好的耐蚀性和焊接性能等优点,在核电、压力容器、沿海设施、化学染料等工业领域获得了广泛应用^[1-3]。然而粗晶态的奥氏体不锈钢强度较低,无法通过相变使之强化,可以通过冷塑性变形加工进行强化。金属材料的剧烈塑性变形(severe plastic deformation,SPD)方法通过给材料引入很大的应变量,内部微观组织发生位错滑移运动,从而有效细化晶粒至亚微米或纳米级。常见的SPD手段有大变形冷轧、等径角挤压、高压扭转、表面机械研磨、超声冲击、高能喷丸等^[4-7]。卢柯等^[8]通过动态塑性变形技术和退火工艺,制备了具有纳米晶、纳米孪晶和微米级再结晶的316L不锈钢,这种材料具有很好的强度-塑性匹配,但缺点是加工样品的尺寸受到限制,无法应用在工业领域。武晓雷等^[9]通过冷轧和退火相结合的工艺制备了具有异质层状结构的钛板,钛板在获得超细晶高强度的同时具备粗晶的良好延展性。

目前,金属材料的剧烈塑性变形行为研究主要集中在材料力学性能、微观组织演化和晶粒细化机制,其成型工艺研究较少。焊接技术是制备大尺寸或复杂零部件的快速成型工艺,能有效扩大金属材料的工业应用范围^[10]。本文采用冷轧变形与退火处理工艺来制备具有异质层状结构的316L不锈钢,然后采用钨极氩弧焊对冷轧后的钢板实施单、双面焊接成型,并且详细研究了冷轧前后试样以及单、双面焊接接头的微观组织与力学性能。

1 试验材料与试验方法

试验材料为316L低碳不锈钢板,该钢塑性很好,具有优良的耐蚀性和高温强度,其基本化学成分(质量分数,%)如表1所示。图1为316L不锈钢母材的显微组织,主要为等轴状奥氏体,同时含有少量的退火孪晶,晶粒较为细小且分布均匀,平均尺寸约为30 μm 。

收稿日期:2017-10-31

作者简介:魏康(1992—),男,博士研究生,主要研究方向为金属材料及焊接结构的组织与性能。

通讯作者:李建生(1990—),男,博士研究生,主要研究方向为异质层状结构金属板材的制备及其力学性能、腐蚀性能、摩擦学性能。

冷轧处理之前用丙酮清洗钢板表面,然后用砂纸打磨,确保其表面平整干净。冷轧采用的钢板试样尺寸为 100 mm×50 mm×10 mm,在国产 Φ400×350 两辊可逆温轧机上进行室温轧制,试样厚度从 10 mm 最终被压缩到 1.5 mm,总变形量为 85%。然后将轧制后的钢板置于贝意克管式滑轨炉内进行退火处理,退火温度为 750 ℃,保温时间为 10 min,最后经空冷至室温再取出试样。

通过线切割机从冷轧后的试样上制备焊接所用的钢板试样,焊前应完全清除焊接区域的油污和杂质,焊接试验选用对接接头形式,对接钢板的尺寸为 60 mm×80 mm×1.5 mm。采用手工钨极氩弧焊(GTAW)工艺,氩气作为保护气体,焊丝选用与母材同质直径 1.2 mm 的 ER316L,焊机型号为 WS-300,焊接电流为 110 A,电弧电压 20 V,分别对钢板实施单面焊和双面焊成型,焊后的试验钢板如图 2 所示。

冷轧及焊接接头试样经过粗、精磨及抛光处理后,用盐酸与硝酸体积配比为 3:1 的王水溶液进行腐蚀,采用光学显微镜(OM)观察分析其组织;采用 HMV-G 型显微硬度计分别测试冷轧前后试样的硬度值,以及焊接接头焊缝区、热影响区和母材区的硬度分布,试验选用维氏压头,加载载荷为 0.2 kgf,保载 10 s;参照 GB/T 2651-2008 制备标准的拉伸试样(包括冷轧前后的试样,单双面焊接接头试样),在 LTM-20KN 电子拉伸试验机上进行室温拉伸试验,应变速率为 3×10^{-3} s,每组拉伸试验重复 3 次;同时借助 Quanta-250F 场发射扫描电镜(SEM)观察拉伸试样的断口形貌。

表 1 316L 不锈钢的化学成分(质量分数)

Tab.1 Chemical composition of 316L stainless steel (mass fraction)

| C | Cr | Mn | Ni | Mo | Co | Si | S | P | Fe |
|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 0.030 | 16.470 | 1.420 | 10.100 | 1.970 | 0.244 | 0.530 | 0.005 | 0.030 | Balance |



图 1 316L 不锈钢的显微组织

Fig.1 Microstructure of 316L stainless steel



(a) 单面焊

(b) 双面焊

图 2 焊接钢板的实物图

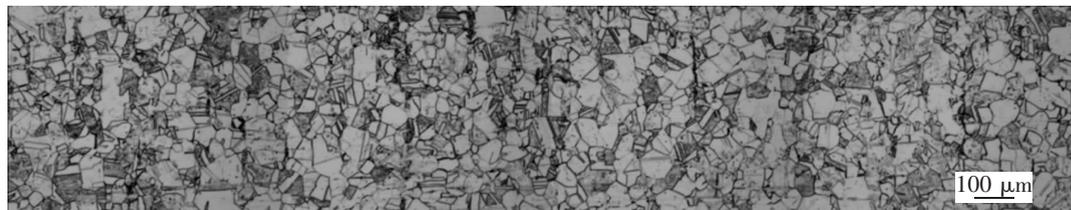
Fig.2 Physical map of welded steel plates

2 结果与讨论

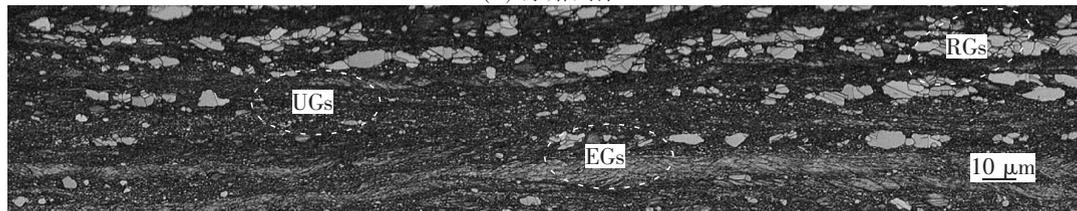
2.1 显微组织分析

图 3 为处理前后 316L 不锈钢的显微组织,相比于均匀细小的母材晶粒,不锈钢试样经轧制变形和退火处理后,出现明显的层状组织结构。片层之间存在一定量的静态再结晶晶粒(recrystallization grains, RGs),呈条带聚集分布;同时,再结晶晶粒周围存在大量的超细晶(ultra-fined grains, UGs),组织得到显著细化,晶界模糊不清;局部区域存在流线型的被拉长晶粒(elongated grains, EGs)。从图 3(b)还可以明显看出,处理后的不锈钢组织结构存在不均匀现象,这是由于晶粒的塑性变形过程会受层错能、晶界、晶粒取向等因素影响,一些特殊晶粒往往优先发生形变,经过一系列的位错滑移运动,从而呈现出异质层状结构。

图 4,图 5 分别是处理后的 316L 不锈钢单、双面焊接接头的显微组织。由于焊丝 316L 中存在较多的 Cr、Ni 元素,焊缝的结晶模式均为先 δ 铁素体模式,即初始结晶形成的 δ 铁素体在冷却过程中,大部分会转



(a) 原始试样



(b) 冷轧试样

图 3 316L 不锈钢冷轧前后的显微组织

Fig.3 Microstructures of 316L stainless steel before and after being treated by cold rolling

变为奥氏体,但仍有少量残余,同时焊缝中心区域较大的温度梯度和较快的晶粒生长速度,也有利于等轴晶的形成,焊缝金属(weld metal, WM)表现为等轴状、树枝状的奥氏体和少量 δ 铁素体,见图 4(c)。双面焊接头的焊缝区域由于受到两面焊道的热处理作用,晶粒组织更加细小,见图 5(c)。从图 4(b)、图 4(d)、图 5(d)中可以看出,熔合区(fusion zone, FZ)界线明显,熔合线附近温度梯度很大,焊缝一侧为柱状、树枝状的奥氏体组织;另一侧的热影响区(heat affected zone, HAZ)加热温度高、速度快,冷轧处理形成的细小晶粒发生明显长大,形成较为粗大的奥氏体组织。

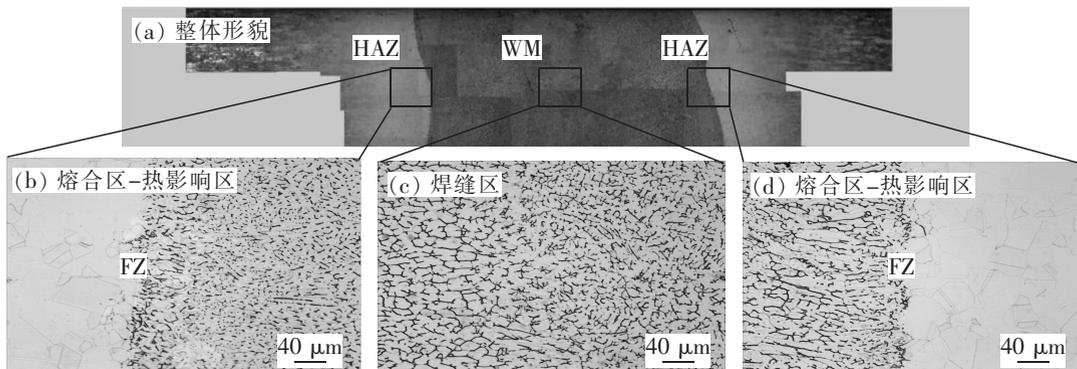


图 4 单面焊接头的显微组织

Fig.4 Microstructures of single-side welded joint

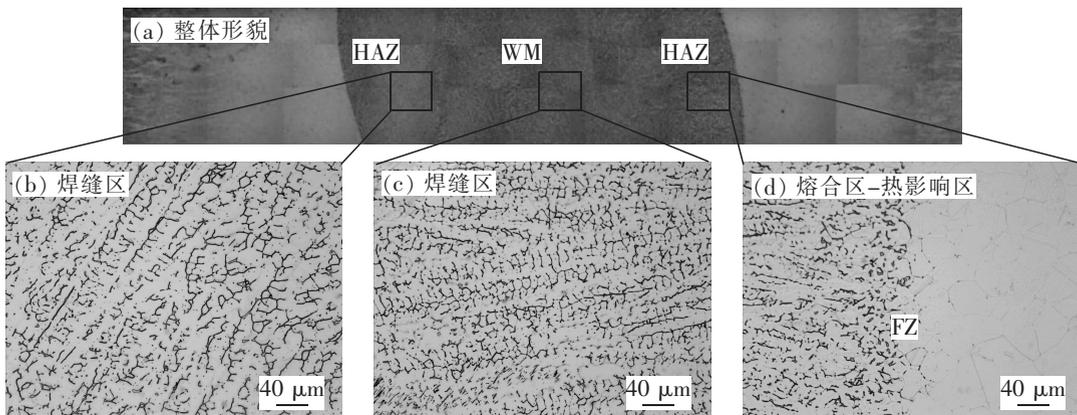


图 5 双面焊接头的显微组织

Fig.5 Microstructures of double-side welded joint

2.2 硬度试验结果及分析

图6表示各组试样(包括处理前后的不锈钢试样,单双面焊接接头试样)的硬度分布情况,由图可以看出:冷轧前母材试样的晶粒均匀有序分布,硬度值基本不变,大约为180 HV;经过冷轧及退火处理后,晶粒组织得到明显的细化,硬度值显著提高,分布在380~400 HV,相比母材试样提高了110%左右。单、双面焊接接头的硬度分布与其金相组织有较好的对应关系,焊缝区的硬度与母材试样相当;随着焊缝区域过渡到热影响区,硬度值呈逐渐增大的趋势,最高可达360 HV,这是因为一方面 δ 铁素体的细化晶粒作用,另一方面Si、Mn等合金元素富集在树枝状晶内。

2.3 拉伸试验结果及分析

图7为拉伸试验得到的各组试样工程应力-应变曲线,具体的力学性能指标见表2。处理前不锈钢拉伸试样的屈服强度和抗拉强度分别为369.5 MPa和620.7 MPa,断裂延伸率高达60.2%,这说明316L不锈钢具有良好的强度和优异的塑性。经过85%的冷轧变形和退火处理后,不锈钢的强度显著提高,抗拉强度可达1058.9 MPa,比原始母材试样提高了70.6%,这主要是因为不锈钢中形成了大量的超细晶组织;但是这种超细晶结构材料的加工硬化能力较低,屈服后很快发生颈缩断裂,韧性和塑性明显降低,断裂延伸率仅为16.9%。单面焊接头的抗拉强度为608.1 MPa,延伸率为15.3%;而双面焊接头的力学性能稍有下降,由于焊接接头熔合区的组织大小及力学性能不均匀,拉伸试样均在该区发生断裂。图8为4组试样的拉伸断口形貌,断口表面均布满了许多大小不一的等轴韧窝,它们是微孔形核长大聚集形成的;处理后的试样断口韧窝很小,见图8(b)。同时,图8(c),图8(d)中接头断口的韧窝边缘较为锐利,局部大韧窝的内壁上存在“蛇形”的滑移线痕迹(黑色方框所示),表明试样在韧性断裂时发生了显著的塑性变形。

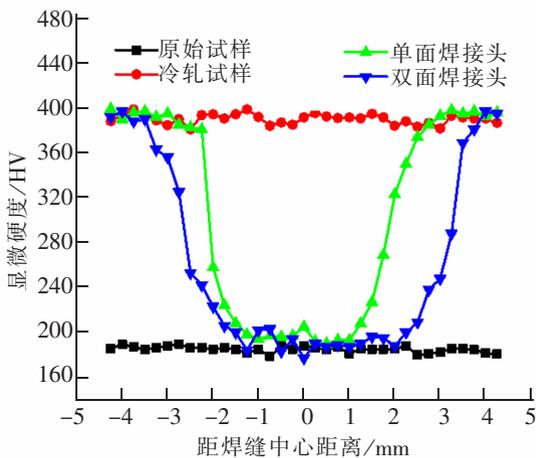


图6 显微硬度分布曲线

Fig.6 Microhardness distribution curves

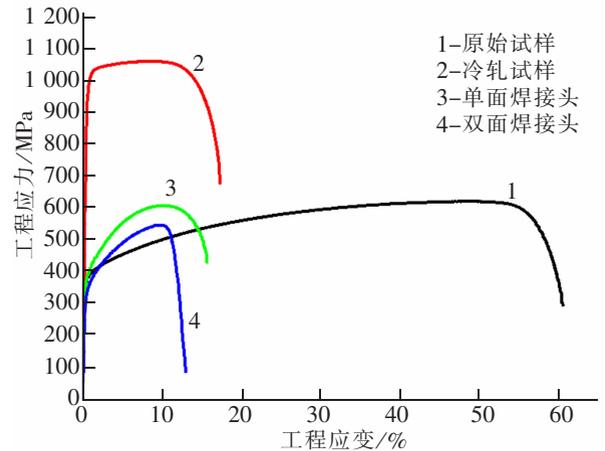


图7 工程应力-应变曲线

Fig.7 Engineering stress-strain curves

表2 试样的力学性能指标
Tab.2 Mechanical properties index of specimens

| 试样 | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 断裂延伸率/% |
|-------|----------|----------|---------|
| 原始试样 | 369.5 | 620.7 | 60.2 |
| 冷轧试样 | 980.6 | 1058.9 | 16.9 |
| 单面焊接头 | 364.5 | 608.1 | 15.3 |
| 双面焊接头 | 335.4 | 547.5 | 12.9 |

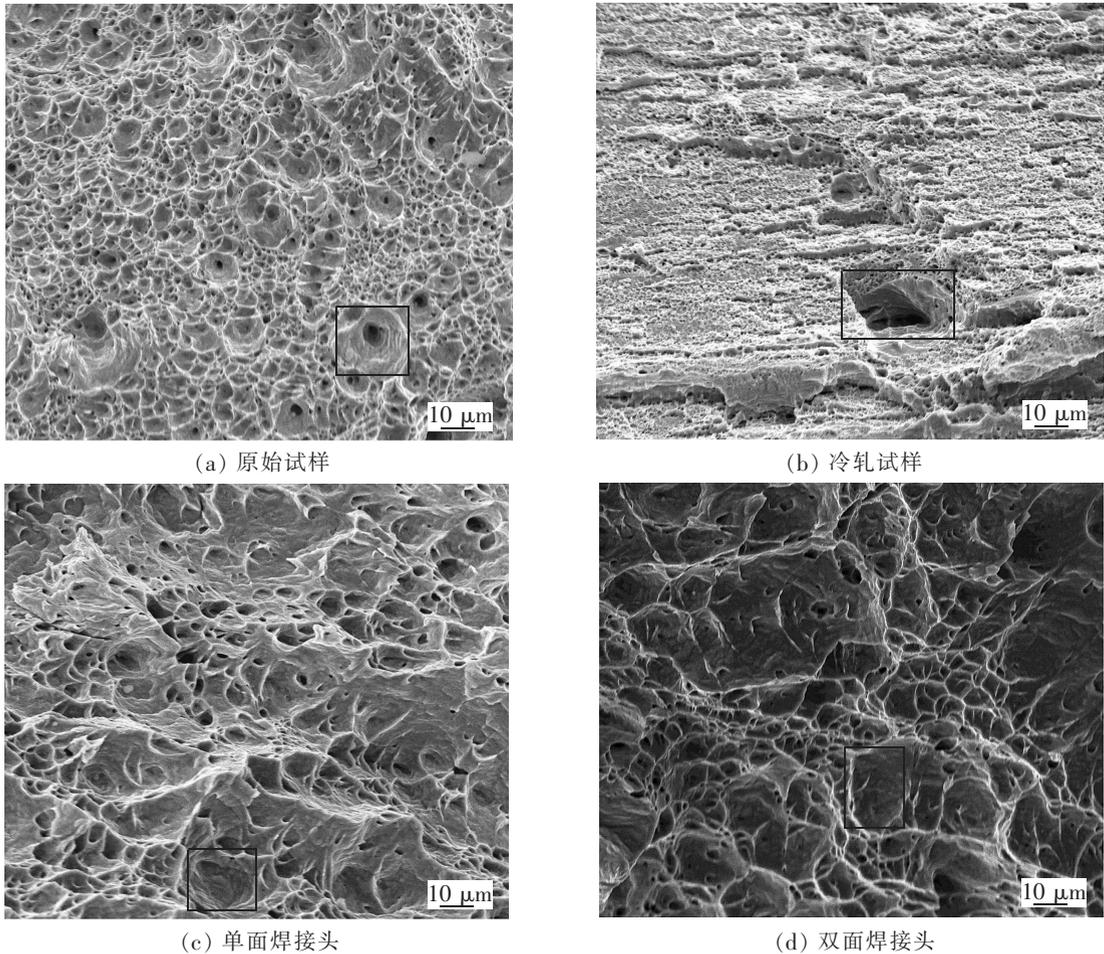


图 8 试样的拉伸断口形貌
Fig.8 Tensile fracture morphologies of specimens

3 结论

1) 316L 不锈钢经轧制变形和退火处理后,出现明显的层状组织结构,片层之间存在呈条带聚集分布的静态再结晶晶粒,大量晶界模糊不清的超细晶以及流线型的被拉长晶粒。单、双面焊接接头的焊缝金属表现为等轴状、树枝状的奥氏体和少量 δ 铁素体,熔合区为柱状、树枝状的奥氏体组织,热影响区形成较为粗大的奥氏体组织。

2) 处理前的试样晶粒均匀分布,硬度值大约为 180 HV;处理后的硬度值显著提高,分布在 380~400 HV,相比母材试样提高了 110%左右。单、双面焊接接头的硬度分布与其金相组织有较好的对应关系,热影响区的硬度值最高可达 360 HV。

3) 处理后不锈钢的强度显著提高,抗拉强度可达 1 058.9 MPa,比原始母材试样提高了 70.6%;而韧性和塑性明显降低,断裂延伸率仅为 16.9%。单面焊接头的抗拉强度为 608.1 MPa,延伸率为 15.3%,而双面焊接头的力学性能稍有下降。拉伸断口均呈现等轴韧窝形貌。

参考文献:

- [1] 何芬,屈金山,张德远,等. 不同焊接方法下 316L 不锈钢焊接接头组织性能研究[J]. 热加工工艺,2010,39(23):179-182.
- [2] 安子良,轩福贞,涂善东. 316L 不锈钢扩散焊接头的微观结构和力学性能[J]. 中国有色金属学报,2006,16(10):1765-1770.

- [3] 申文竹,李春福,王朋飞,等. 316L 不锈钢 25~350 °C 中的拉伸行为及流变应力计算[J]. 材料热处理学报,2012,33(9):49-54.
- [4] 何晓梅,朱晓雅,董洁,等. 剧烈塑性变形条件下工业纯钛晶粒细化机理研究[J]. 材料热处理技术,2009,38(22):56-63.
- [5] 魏康,何柏林,于影霞. 超声冲击对 MB8 镁合金焊接接头表层组织及力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报,2016,26(12):2479-2487.
- [6] ESTRIN Y, VINOGRADOV A. Extreme grain refinement by severe plastic deformation; a wealth of challenging science[J]. Acta Materialia,2013,61(3):782-817.
- [7] MANI B, PAYDAR M H. Application of forward extrusion-equal channel angular pressing (FE-ECAP) in fabrication of aluminum metal matrix composites[J]. Journal of Alloys and Compounds,2010,492(1/2):116-121.
- [8] YAN F K, LIU G Z, TAO N R, et al. Strength and ductility of 316L austenitic stainless steel strengthened by nano-scale twin bundles[J]. Acta Materialia,2012,60:1059-1071.
- [9] WU XIAOLEI, YANG MUXIN, YUAN FUPING, et al. Heterogeneous lamella structure unites ultrafine-grain strength with coarse-grain ductility[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2015,112(47):14501-14505.
- [10] 王东坡,龚宝明,吴世品,等. 焊接接头与结构疲劳延寿技术研究进展综述[J]. 华东交通大学学报,2016,33(6):1-14.

Study on Microstructure and Properties of Welded Joints of Stainless Steel Treated by Cold Rolling and Annealing

Wei Kang¹, Li Kang², Li Jiansheng¹, Gao Bo¹, Mao Qingzhong¹, Wang Shuaizhuo¹

(1. Nano and Heterogeneous Materials Center, School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Department of Design and Development, CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd, Nanjing 210031, China)

Abstract: 316L stainless steels with heterogeneous lamella structures were prepared by cold rolling and subsequent annealing treatment. Then cold rolled steel plates were single and double welded by using GTAW welding process. Finally, microstructure and mechanical properties of rolled specimens and the welded joints were investigated. The research results show that ultra-fined grains lamella structures are formed in the 316L stainless steels treated by cold rolling. The rolled samples exhibit a high tensile strength of 1058.9 MPa, an increase of 70.6% than that of original base metal samples. But the ductility reduces significantly, with a lower fracture elongation of 16.9%. Weld microstructure of welded joints are typical equiaxial dendritic austenite, and a small amount of δ -ferrite. Coarse austenite grains are formed in the heat affected zone. Tensile strength of single-side welded joints is 608.1 MPa, and the elongation reaches to 15.3%, while mechanical properties of double-side welded joints appear a slight reduction. Equiaxed dimples morphologies are observed on all the fracture surfaces.

Key words: cold rolling treatment; 316L stainless steel; welded joints; microstructure; mechanical properties