

DOI: 10.11885/j.issn.1001-2303.2022.02.09

中低温热处理对SUS304不锈钢TIG焊接接头组织及力学性能的影响

鲍庆臣¹, 渠怀志¹, 史建强¹, 官明龙²

1. 中车青岛四方车辆研究所有限公司, 山东 青岛 266000

2. 东北大学, 辽宁 沈阳 110819

摘要: 轨道交通车辆在冲击振动试验后, 部分设备SUS304不锈钢焊接件出现断裂失效现象。为了提升SUS304不锈钢焊后机械性能, 采用金相显微镜、扫描电镜、硬度测试及拉伸试验等方法, 研究了中低温热处理工艺对2 mm厚SUS304不锈钢板TIG焊接接头的组织及力学性能的影响。研究发现, 经400 °C热处理30 min及焊接后未处理态焊缝组织均由 γ -奥氏体与 δ -铁素体组成, δ -铁素体主要分布于富Cr区呈蠕虫状, 热处理后 δ -铁素体含量有一定程度的减少。焊接接头热处理后硬度值整体较未处理态低, 焊后焊缝屈服强度为189.5 MPa, 应变为64.5%, 热处理后屈服强度为221 MPa, 应变为72.7%, 屈服强度提升了16.6%, 达到母材的屈服强度。断口呈现出韧性断裂特征且无显著焊接缺陷, 主要呈现出较深的韧窝, 韧窝分布着第二相粒子, 第二相粒子阻碍滑移造成应力集中而产生微坑, 成为裂纹的主要发源地之一。

关键词: SUS304; TIG焊; 中低温热处理; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2022)02-0063-06

Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of SUS304 Stainless Steel TIG Welded Joint

BAO Qingchen¹, QU Huaizhi¹, SHI Jianqiang¹, GONG Minglong²

1. CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266000, China

2. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China

Abstract: After the impact and vibration test of rail transit vehicles, some equipment 304 stainless steel welded parts appeared fracture failure. In order to improve the mechanical properties of 304 stainless steel after welding, in this paper, by means of metallographic microscope, scanning electron microscope, hardness and tensile test, the effects of medium and low temperature heat treatment process on the microstructure and mechanical properties of 2 mm thick 304 stainless steel plate TIG welded joints were studied. It is found that the microstructure of the untreated weld is composed of γ -austenite and δ -ferrite after heat treatment at 400 °C for 30 min, and δ -ferrite mainly distributes in the Cr-rich zone and appears as a worm, and the content of δ -ferrite decreases to some extent after heat treatment. After heat treatment, the hardness of welded joints is lower than that of untreated ones. The yield strength of welded joints after welding is 189.5 MPa, and the strain is 64.5%. After heat treatment, the yield strength is 221 MPa, the strain is 72.7%, and the yield strength is increased by 16.6%, reaching the yield strength of base metal. The fracture surface shows ductile fracture characteristics and no significant welding defects, mainly showing deep dimples, and the dimples are distributed with second phase particles, which hinder the slip and cause stress concentration and produce micro-pits, which become one of the main craters of cracks.

Keywords: SUS304; TIG welding; low temperature heat treatment; microstructure; mechanical properties

* 收稿日期: 2021-08-09 修回日期: 2021-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51771044)

作者简介: 鲍庆臣(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事材料焊接及轨道交通牵引系统结构设计研究。

通信作者: 渠怀志(1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事不锈钢、碳钢焊接及高熵合金组织和性能研究。E-mail: quhuaizhineu@163.com。

引用格式: 鲍庆臣, 渠怀志, 史建强, 等. 中低温热处理对 SUS304 不锈钢 TIG 焊接接头组织及力学性能的影响[J]. 电焊机, 2022, 52(2): 63-68.

Citation: BAO Qingchen, QU Huaizhi, SHI Jianqiang, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of SUS304 Stainless Steel TIG Welded Joint[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(2): 63-68.

0 前言

不锈钢因其良好的耐腐蚀性、焊接性、低温塑性, 以及良好的综合力学性能, 在工业各领域得到了非常广泛的应用^[1]。室温下不锈钢可分为奥氏体不锈钢、铁素体不锈钢、马氏体不锈钢、沉淀硬化不锈钢和奥氏体-铁素体双相不锈钢^[2], 其中 SUS304 奥氏体不锈钢(牌号 06Cr18Ni9)因铬含量优势而表现出良好的焊接性、耐腐蚀性、无磁性等特征, 被广泛应用在桥梁结构、船舶、航空和轨道交通等众多领域^[3-4]。

目前, 耐腐蚀性的要求使得轨交车辆的车下变流器箱体制造多选用 SUS304 不锈钢材料。而变流器箱体中结构复杂的 SUS304 结构件的连接以 TIG 焊为主。TIG 焊具有热输入低、能量密度高、电弧稳定性好、能较好控制线能量的优点, 且其保护气流具有冷却作用, 可降低熔池表面温度, 提高表面张力, 可获得污染少、焊缝美观、焊接质量高的焊接接头^[5-6]。但是 SUS304 导热系数小、线膨胀系数大导致其焊接时存在残余应力, 接头中易形成结晶裂纹^[7]、晶间腐蚀^[8-9]、应力腐蚀开裂、焊缝脆化、夹杂气孔等缺陷^[10-11]。适当的热处理可以提高接头性能。郭国林^[12]等对 304 不锈钢板焊接接头热处理后组织和性能进行研究发现在 1 000 °C 固溶处理后, 焊接接头的组织和性能良好。杨晓禹^[13]等对 S32101 不锈钢焊接接头在 1 050 °C 热处理后, 晶界的沉淀相 Cr₂N 会重新溶解到基体中。Saeid Ghorbani^[14]等人研究发现, 异种不锈钢焊接接头在 960 °C 热处理后得到最佳的拉伸性能。

目前热处理工艺多是在较高温度下进行^[15-16], 但在轨道交通行业生产中, 考虑到生产周期短及成本控制, 对焊接接头中低温热处理研究具有显著意义。在部分高铁牵引变流器箱内水冷系统 SUS304 管路支架中采用了 TIG 焊, 但在依据 IEC 61373:1999 I 类 A 级设备进行冲击振动试验的过程中, SUS304 管

夹的 TIG 焊接头处出现了断裂。参考成本及工艺生产周期等因素, 本文对焊后试验样件进行中低温热处理, 并对焊后及焊后热处理态焊接接头进行微观组织和性能研究, 以探究改善焊接接头质量的方法。

1 试验材料与方法

试验母材为 SUS304(GB/T 3280-2007) 板材, 试样尺寸 170 mm×35 mm×2 mm, 焊丝选用 308LSi, 直径 Φ1 mm。母材及焊材的名义化学成分和力学性能分别如表 1、表 2 所示。

表 1 母材及焊材化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of base metal and welding material (wt. %)

材料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	Fe
SUS 304	0.06	0.65	2.23	0.025	0.003	9.43	19.73	0.1	Bal
308LSi	0.015	0.75	1.05	0.01	0.01	10.23	21.85	—	Bal

表 2 母材力学性能参数

Table 2 Mechanical properties parameters of base metal

抗拉强度	屈服强度	断后伸长率	硬度
R_m /MPa	R_{el} /MPa	A /%	/HV
≥520	≥205	≥35	≤200

采用手工 TIG 填丝焊制作焊接试板, 焊接接头形式为平板对接, 焊前不开坡口。采用 FK 4000-R 焊机, 焊接电压为 18~25 V, 电流为 75~95 A, 焊接速度为 0.8~1.2 mm/s, 氩气流量为 8 L/min, 热输入为 995~1 260 J/mm。焊接后试板在 300 °C、400 °C、500 °C 下分别退火 30 min、60 min、90 min。

接头试样经打磨、抛光后, 以焊缝中心为基准, 参考 GB/T2654-2008《焊接接头硬度试验方法》和 GB/T4340.1-2009《金属材料-维氏硬度试验》, 采用 MHV 5Z 硬度计在母材区(BZ)、热影响区(HAZ)、焊缝区(WZ)取若干测量点, 加载负荷 0.98 N (100 gf)并持续时间 15 s, 进行接头硬度测试。用电火花线切割的方法沿着焊缝横截面截取 20 mm×10 mm×2 mm 的方形小块, 包含焊缝区(WZ)和母材区(BZ), 然后用砂纸(400#、600#、800#、1000#、

1500#、3000#)由粗到细的原则对金相观察面进行打磨,使用 2.5 μm 的金刚石抛光膏进行抛光处理,然后采用王水溶液(体积比 $\text{HCl}:\text{HNO}_3=3:1$)进行晶界腐蚀,腐蚀时间 25~30 s,腐蚀完成后立即用去离子水将试样清洗干净并用吹风机将其吹干备用,采用 XRD (SMARTLAB X-ray)、金相显微镜 (DMI 5000M)和扫描电镜 (ZEISS SUPRA 55)对焊接接头的微观组织和断口进行分析。参考 GB/T2649-1989《焊接接头机械性能试验取样方法》和 GB/T228-2002《焊接接头拉伸试验方法》,利用万能试验机 WDW-3100 对焊接接头的拉伸性能进行分析,加载速度 2 mm/min,拉伸样尺寸如图 1 所示。

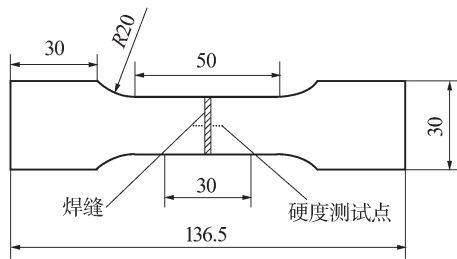


图 1 拉伸样尺寸示意

Fig. 1 Schematic diagram of drawing sample size

2 试验结果与讨论

2.1 热处理对接头硬度的影响

焊后未处理态及不同温度热处理后焊接接头的硬度曲线如图 2 所示,硬度值如表 3 所示。可以

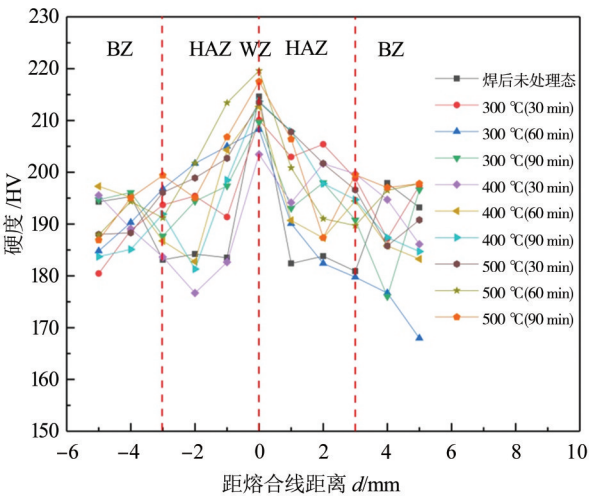


图 2 焊接接头硬度分布

Fig. 2 Hardness distribution of welded joints

看出,硬度值先增高后降低,显微硬度峰值均出现在 WZ,HAZ 硬度处于母材与焊缝区之间。焊接接头存在焊接应力,同时有富 Cr 相析出,因此在焊接接头处有较高的硬度。经过不同温度与时间的热处理,硬度值变化趋势大致相同。这是因为随着热处理的进行,部分焊接应力得到释放,硬度值表现为不同程度的降低,但是热处理温度超过 450 $^{\circ}\text{C}$ 达到材料敏化区会有碳化物 Cr_{23}C_6 形成^[17],降低焊接接头塑性,因此在经过 400 $^{\circ}\text{C}$ 退火 30 min 后硬度值小于其他温度热处理的硬度(见图 2),焊缝处硬度值降低 5.2%,可见在该热处理条件下,其塑性相对较好。以下讨论均以此参数为热处理的对比参数。

表 3 焊接接头硬度 (HV)

Table 3 Hardness value of welded joint

距焊缝距 离/mm	焊后未处理 态	300 $^{\circ}\text{C}$ (30 min)	300 $^{\circ}\text{C}$ (60 min)	300 $^{\circ}\text{C}$ (90 min)	400 $^{\circ}\text{C}$ (30 min)	400 $^{\circ}\text{C}$ (60 min)	400 $^{\circ}\text{C}$ (90 min)	500 $^{\circ}\text{C}$ (30 min)	500 $^{\circ}\text{C}$ (60 min)	500 $^{\circ}\text{C}$ (90 min)
-5	180.4	180.5	184.8	194.7	195.5	197.3	183.7	188	187.9	186.9
-4	188.8	188.8	190.3	196.1	189.1	195.1	185.1	188.3	194.3	195.1
-3	193.7	193.7	196.8	187.7	183.6	186.7	191.9	196.1	191.2	199.4
-2	195.4	195.4	201.7	194.4	176.7	182.7	181.3	198.9	201.7	195.1
-1	191.3	191.4	205.0	197.4	182.6	204.3	198.5	202.7	213.4	206.8
0	210.1	210.1	208.2	209.6	203.4	212.7	213.7	213.5	219.6	217.5
1	202.9	202.9	190.1	193.1	194.15	190.7	207.9	207.8	200.85	206.4
2	205.4	205.4	182.4	198	201.6	187.3	197.8	201.7	191.1	187.3
3	198.8	198.8	179.75	190.8	199.7	194.4	194.7	196.6	189.7	199.5
4	187.2	187.2	176.7	176	194.7	185.8	187.4	185.8	196.5	197.1
5	197.4	197.4	167.95	196.6	186.1	183.25	184.7	190.8	197.8	197.8

2.2 热处理对焊缝组织的影响

焊接接头的XRD图谱如图3所示。可以看出,焊缝组织主要为 γ -奥氏体和 δ -铁素体,在 $44^\circ\sim 45^\circ$ 区间内热处理后焊接接头衍射峰强度相对焊态降低,表明经 400°C 退火30 min后 δ -铁素体含量有一定程度的减少。焊接接头焊态及 400°C 退火30 min后的金相组织如图4所示。SUS304母材组织为典型的奥氏体晶粒,但是焊接接头的结晶模式主要由Cr、Ni元素的含量决定,WZ区主要由 γ -奥氏体与 δ -铁素体组成。这是因为Ni、Cr、Fe三相共晶时,富Cr区域位于三角区的右侧,铁素体优先在富Cr区形核结晶,因此焊缝处的金属凝固时是以 δ -铁素体作为初始相析出,最终形成蠕虫状铁素体。新的物相和晶粒的变化是热力学和动力学综合作用的结果,晶粒的长大主要表现为晶界的迁移,实质是晶界处原子跨越界面迁移的扩散过程。热处理过程中促进原子的激活、扩散与界面反应造成 δ -铁素体含量减少^[17]。

2.3 热处理对焊接接头力学性能的影响

焊态和 400°C 热处理30 min焊接接头拉伸后的应力应变曲线如图5所示。由图可知,未热处理焊接接头的屈服强度为189.5 MPa,应变为64.5%,热处理后接头屈服强度为221 MPa,较焊态提升了

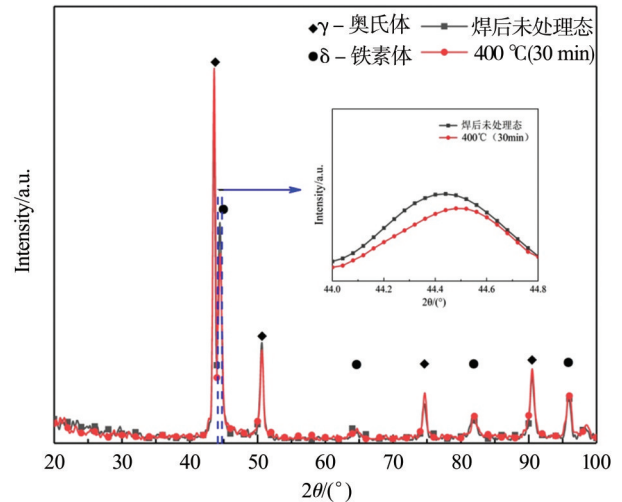
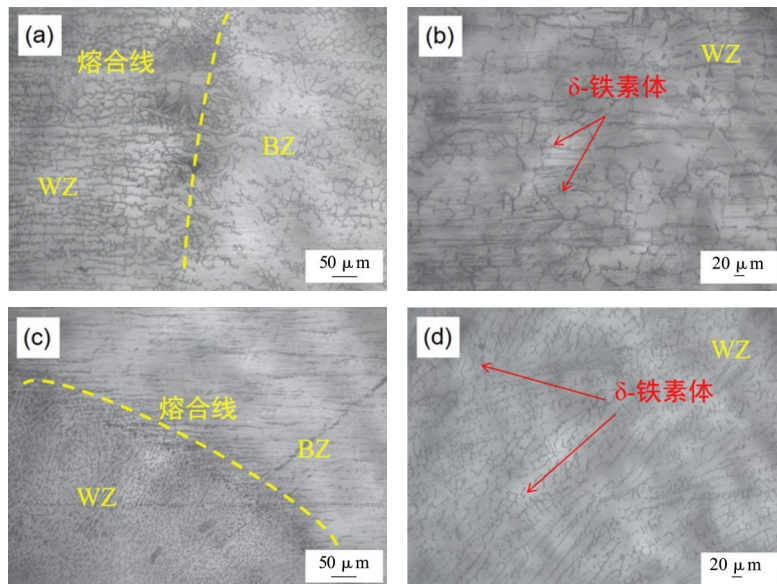


图3 焊接接头XRD图谱

Fig. 3 XRD patterns of welded joints

16.6%,达到母材的屈服强度,同时应变也提高为72.7%,与热处理前后硬度的变化趋势一致。这是因为焊态SUS304不锈钢焊接接头铁素体含量较多,硬度较高,且大量的铁素体分布在奥氏体中,在位错滑移过程中起到钉扎作用,阻碍了滑移系运动^[15],而热处理后铁素体分布更加均匀且含量减少,故应变有一定程度的提高。

图6为拉伸试验后焊接接头的断口微观形貌,观察未发现显著的焊接缺陷。其中图6b断口的韧



(a)、(b)未经热处理;(c)、(d) 400°C 退火30 min

图4 焊接接头金相组织

Fig. 4 Microstructure diagram of welded joint

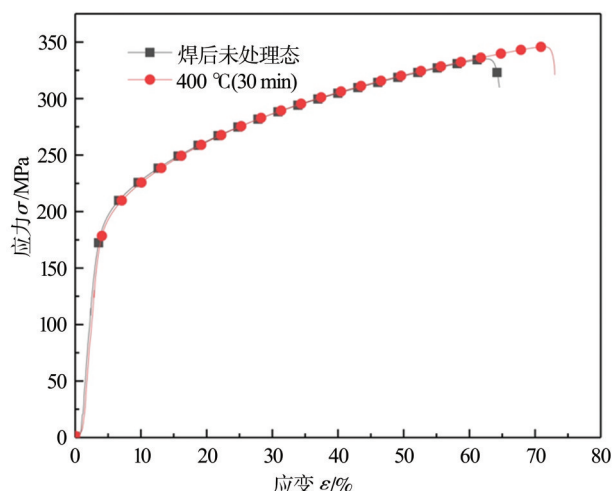
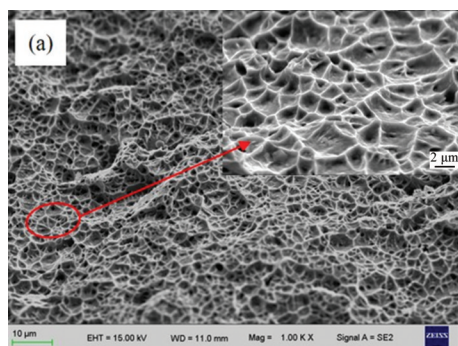


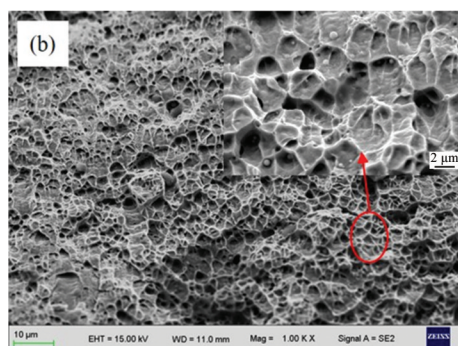
图5 应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve

窝较图 6a 的韧窝更圆、更大、更深,呈等轴韧窝状,属于韧性断裂。从右上角高倍断口形貌图中可以观察到韧窝里分布着第二相粒子,这成为裂纹的主要发源地之一,即随着拉伸变形的发生,不同的滑移带相交汇集至一处时,会因第二相阻碍滑移造成应力集中而产生微坑,在滑移作用下微孔逐渐长大,相邻微孔逐渐连接在一起形成大的空洞进而扩



(a)焊态



(b)400 °C退火 30 min

图6 断口扫描图

Fig. 6 Fracture scanning diagram

大为微裂纹,最终发生断裂^[17-18]。

3 结论

(1)焊接接头组织由 γ -奥氏体与 δ -铁素体组成,在富Cr区形成了蠕虫状 δ -铁素体。经400 °C退火30 min热处理后,在热力学和动力学综合作用下 δ -铁素体含量有一定程度的减少。

(2)焊缝热处理后硬度值整体较焊态低。焊后焊缝屈服强度为189.5 MPa,应变为64.5%,热处理态屈服强度为221 MPa,应变为72.7%,屈服强度提升了16.6%,达到母材的屈服强度。

(3)板厚2 mm的SUS304不锈钢TIG焊后能够获得致密的焊接组织,对焊接接头断口扫描分析为韧性断裂,断口无显著焊接缺陷,主要呈现出较深的韧窝,韧窝分布着第二相粒子。

参考文献:

- [1] Kurt H, Samur R. Study on microstructure, tensile test and hardness 304 stainless steel jointed by TIG welding [J]. International Journal of Science and Technology, 2013, 2(2): 163-168.
- [2] 薄鑫涛. 常用不锈钢种类及特点[J]. 热处理, 2017, 32(02): 56.
BO Xintao. Types and characteristics of common stainless steel[J]. Heat Treatment, 2017, 32(02): 56.
- [3] Erinosh M F, Akinlabi E T, Ogundimu E O. Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by Tig-Mig hybrid welding[J]. Surface Review & Letters, 2018, 25(01): 1-14.
- [4] Li Z, Gobbi S L. Laser welding for lightweight structures [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 70(1-3): 137-144.
- [5] Feng L, Yang N. Stainless Steel Welding and Development Trend of Welding Technology [J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2019 (252): 022117.
- [6] Chidambaram S, Srinivasan R. Study & Optimization on the effect of welding current & active flux coating thickness in the weld profile of Al-SiC composite weldment using A-TIG welding [J]. Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems, 2017, Special Issue(11): 409-418.

- [7] 黄彦良, Brian Kinsella, Thomas Becker, 等. 原子力显微镜评价奥氏体不锈钢晶间腐蚀敏感性的研究[J]. 材料开发与应用, 2008(03): 7-11.
HUANG Yan Liang, Brian Kinsella, Thomas Becker, et al. Identification of Sensitization of Austenitic Stainless Steel to Intergranular Stress Corrosion Cracking by Atomic Force Microscopy[J]. Development and Application of Materials, 2008(03): 7-11.
- [8] 王建. 晶间腐蚀的危害及原因分析[J]. 铸造技术, 2011, 32(12): 1756-1759.
WANG Jing. Perniciousness and Prevention Measure of Inter-crystalline Erosion [J]. Foundry Technology, 2011, 32(12): 1756-1759.
- [9] 罗宏, 龚敏. 奥氏体不锈钢的晶间腐蚀[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006, 18(5): 357-360.
LUO Hong, GONG Min. On intergranular corrosion of austenitic stainless steel[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2006, 18(5): 357-360.
- [10] Mishra D, Dakkili M. Gas tungsten and shielded metal arc welding of stainless steel 310 and 304 grades over single and double 'V' butt joints[J]. Materials Today: Proceedings, 2020(27): 772-776.
- [11] 冯小松. 应变强化技术在低温储罐轻型化设计中的应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2012.
FENG Xiaosong. Application of Strain-Strengthening technology in the Light-Weight design of Liquefied-gas Cryogenic Tanks [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012.
- [12] 郭国林, 刘鹏, 杨莉, 等. 热处理对 304 不锈钢板激光焊接接头组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(21): 194-200.
GUO Guolin, LIU Peng, YANG Li, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Welded Joint of 304 Stainless Steel Plate [J]. Hot Working Technology, 2016, 45(21): 194-200.
- [13] 杨晓禹, 田一清, 毛红奎, 等. 热处理工艺对双相不锈钢 S32101 焊接接头力学性能与微观组织的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 21(48): 153-155.
YANG Xiaoyu, TIAN Yiqing, MAO Hongkui, et al. Effect of Heat Treatment Process on Mechanical Properties and Microstructure of Duplex Stainless Steel S32101 Welded Joints [J]. Hot Working Technology, 2019, 21(48): 153-155.
- [14] Saeid Ghorbani, Reza Ghasemi, Reza Ebrahimi-Kahrizangi, et al. The effect of heat treatment after welding on the microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance of dissimilar stainless steels [J]. Materials Science & Engineering A, 2017(688): 470-479.
- [15] 孙会兰, 毕子墨, 张迪, 等. 不同热处理条件下高氮奥氏体不锈钢冷轧组织与力学性能研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(04): 117-120, 124.
SUN Huilan, BI Zimo, ZHANG Di, et al. Microstructure and Mechanical Properties of High Nitrogen Austenitic Stainless Steel After Cold Rolling by Different Heat Treatment[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(04): 117-120, 124.
- [16] 陈双建. SUS304 拼焊管非均质接头组织力学行为及塑变性能优化[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2012.
CHEN Shuangjian. Microstructure evolution and mechanical behavior of heterogeneous joint and plastic deformation optimization of SUS304 tailor-welded tube [D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [17] 何远灵. SUS304 不锈钢 TIG 焊接接头的组织表征与性能研究[D]. 山西: 山西农业大学, 2019.
HE Y L. Microstructure Characterization and Properties Investigation of Welded Joint of SUS304 Stainless Steel with TIG Welding [D]. Shanxi: Shanxi Agricultural University, 2019.
- [18] 许云秀. 奥氏体不锈钢 0Cr21Mn17Mo2N0.8 腐蚀及疲劳性能研究[D]. 吉林: 长春工业大学, 2019.
XU Y X. Austenitic stainless steel 0Cr21Mn17Mo2N0.8 study on corrosion and fatigue properties [D]. Jilin: Changchun University of Technology, 2019.