

DOI: 10.11973/jxgccl201511010

9Ni 钢手工电弧焊和自动埋弧焊接头的组织及力学性能

朱青松¹, 代建清¹, 彭云², 齐彦昌², 马成勇²

(1. 昆明理工大学材料科学与工程学院, 昆明 650093;

2. 钢铁研究总院, 先进钢铁流程及材料国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 采用手工电弧焊和自动埋弧焊分别对 9Ni 钢板进行焊接, 通过拉伸、弯曲、冲击试验以及组织、断口观察等研究两种焊接接头的组织和力学性能。结果表明: 两种焊接接头的焊缝组织均由奥氏体组成, 热影响区均以马氏体为主; 手工电弧焊接头焊缝的结晶形态呈树枝状, 偏析程度较大, 热影响区的马氏体粗大, 自动埋弧焊接头焊缝的结晶形态为细小的胞状树枝晶, 偏析程度较轻, 热影响区的板条马氏体细小, 板条束较多; 两种焊接接头均具有良好的拉伸性能和弯曲性能, 自动埋弧焊接头的低温冲击韧性优于手工电弧焊接头的; 自动埋弧焊焊接接头冲击断口上的韧窝更大更深, 且分布均匀。

关键词: 9Ni 钢; 焊接接头; 手工电弧焊; 自动埋弧焊; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG445

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2015)11-0044-04

Microstructure and Mechanical Properties of Manual Arc Welded Joint and Automatic Submerged Arc Welded Joint of 9Ni Steel

ZHU Qing-song¹, DAI Jian-qing¹, PENG Yun², QI Yan-chang², MA Cheng-yong²

(1. College of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Process and Steel Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: 9Ni steel plates were welded by manual arc welding and automatic submerged arc welding, respectively, and microstructure and mechanical properties of two kinds of welded joints were studied by tension, bending and impact testing, as well as microstructure and fracture observing. Results show that the microstructure of weld metal in the two welded joint all consisted of austenitic, and that of heat affected zone all consisted of martensitic. Crystal morphology of weld metal of manual arc welded joint was dendritic crystal, segregation degree was relatively large and martensitic in heat affected zone was bulky. Crystal morphology of weld metal of automatic submerged arc welded joint was cellular dendrites, segregation degree was relatively low, lath martensitic in heat affected zone was thin and martensite lath bundle was relatively more. For the two welded joint, tensile properties and bending properties were well, and impact toughness of the automatic submerged arc welded joint at low temperature was better than that of the manual arc welded joint. The dummies on impact fracture of automatic submerged arc welded joint were bigger and deeper, and they distributed evenly.

Key words: 9Ni steel; welded joint; manual arc welding; automatic submerged arc welding; microstructure; mechanical property

0 引言

9Ni 钢由美国阿赛洛米塔尔国际镍公司于 1944 年开发出来的, 为镍质量分数在 8.5%~10% 范围内的铁-镍系低碳马氏体超低温钢。由于其在 -196℃

收稿日期: 2014-09-23; 修订日期: 2015-07-26

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划项目(2007AA03Z506)

作者简介: 朱青松(1986—), 男, 河南开封人, 硕士研究生。

导师: 彭云教授

下仍具有优异的低温韧性,被广泛用于制造大型液化天然气(LNG)储罐等低温设备^[1]。9Ni 钢在焊接过程中容易出现冷裂纹、热裂纹、低温韧性下降和电弧磁偏吹现象,导致产生未焊透、夹杂、气孔等缺陷^[2],因此 9Ni 钢的焊接是 LNG 低温储罐制造的关键点和难点之一。从焊接冶金的角度来说,手工电弧焊最能保证焊接接头的性能,但由于人为操作因素的影响,薄板接头的焊缝、热影响区的低温韧性不稳定。自动埋弧焊的自动化水平高,适用于大热输入焊接,有利于获得性能良好的焊接接头^[3]。目前,9Ni 钢的焊接技术一直被少数发达国家所掌握,而我国对于 9Ni 钢焊接的研究和探索较晚,技术相对滞后。可见,开展 9Ni 钢焊接工艺的研究意义重大。鉴于此,作者对该钢板材分别进行了手工电弧焊和自动埋弧焊,研究了两种焊接接头的组织及力学性能,以期对 9Ni 钢的焊接提供理论和试验依据。

1 试样制备与试验方法

试验材料为某钢厂生产的 9Ni 钢板,其热处理状态为淬火+回火。试验用 9Ni 钢的化学成分及低温拉伸性能($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$)分别见表 1 和表 2。

表 1 试验用 9Ni 钢的化学成分(质量分数)

Tab.1 Chemical composition of tested 9Ni steel (mass)						%
C	Si	Mn	S	P	Ni	Fe
0.05	0.45	0.62	0.001	0.002 4	9.35	余

表 2 试验用 9Ni 钢在 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的拉伸性能

Tab.2 Tensile properties of tested 9Ni steel at $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$			
抗拉强度/MPa	下屈服强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%
1 100	935	35	68

手工电弧焊试样的尺寸为 $500\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 12\text{ mm}$,选用 $\phi 3.2\text{ mm}$ 伊萨 OK92.55 型电焊条(ENiCrMo-6)进行焊接,该电焊条的化学成分和性能满足 AWS A5.11-2005 的要求。自动埋弧焊试样的尺寸为 $500\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 27\text{ mm}$,选用钢铁研究总院研制的 GHM-N276(ERNiCrMo-4)型焊丝及 GM-N1 型焊剂,焊丝的化学成分和性能满足 AWS A5.14-2005 的要求,且它们的直径均为 2.4 mm 。手工电弧焊和自动埋弧焊的焊接工艺参数如表 3 所示。经 X 射线检测,两种焊缝均未发现超标缺陷,评定为 I 级。

表 3 手工电弧焊和自动埋弧焊的焊接工艺参数

Tab.3 Welding process parameters for manual arc welding and automatic submerged arc welding

焊接方法	热输入 /($\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$)	电流 /A	电压 /V	道间温度 / $^{\circ}\text{C}$
手工电弧焊	15	120	25	<100
自动埋弧焊	15	350	30	<100

采用 WE-300 型液压万能试验机进行拉伸和弯曲试验。拉伸试验按照 GB/T 2651-2008《焊接接头拉伸试验方法》进行,试样尺寸为 $\phi 16\text{ mm}\times 105\text{ mm}$,试验温度为室温($22\text{ }^{\circ}\text{C}$)。依照 GB/T 2653-2008《焊接接头弯曲试验》进行面弯、背弯、侧弯试验,采用压头弯曲,弯曲角为 180° 。采用面弯和背弯试验测试手工电弧焊接头的弯曲性能,采用侧弯试验测试自动埋弧焊接头的弯曲性能。

采用 JBZ-300 型自动冲击试验机,按照 GB/T 2650-2008《焊接接头冲击试验方法》进行冲击试验,冲击试样为带 V 形缺口的标准试样(其尺寸为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 55\text{ mm}$),缺口分别位于焊缝中心、熔合线、熔合线+1 mm、熔合线+3 mm、熔合线+5 mm 处,试验温度为 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冲击功取 3 个试样的平均值。

金相试样经研磨抛光后,先用 10%(体积分数,下同)铬酸电解腐蚀焊缝,再用 10%硝酸酒精溶液腐蚀热影响区和母材,然后采用 LEICAMEF4 型光学显微镜(OM)和 SCIAS6.0 图像分析系统观察焊缝及热影响区的组织;利用日立 S-4300 型扫描电镜(SEM)观察 V 形缺口位于焊缝和热影响区的冲击试样的断口形貌,以及手工电弧焊接头焊缝中析出相的形貌;采用扫描电镜附带的能谱仪(EDS)分析析出相的化学成分。

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

由图 1 可以看出,手工电弧焊接头焊缝和自动埋弧焊接头焊缝的组织均主要由奥氏体组成,它们的结晶形态分别为树枝状晶和胞状树枝晶,并具有一定的方向性,前者偏析较后者更严重。这是因为自动埋弧焊接头焊缝金属中的胞状树枝晶比较细小,分布较为均匀,故而偏析程度也会减弱,这对其低温韧性有利。

在焊接热循环的影响下,焊接接头热影响区中的回火马氏体会转变为板条马氏体^[4]。从图 2 可以

看出,手工电弧焊接头热影响区中的板条马氏体比较粗大,自动埋弧焊接头热影响区的板条马氏体较为细小,且板条束较多。板条马氏体具有优良的强韧性,较多的板条马氏体可显著提高材料的韧性。李峰等^[5]认为在马氏体板条间均匀分布着逆转变奥氏体,这些“逆转变奥氏体”又称为“沉淀奥氏体”,它是在低于 A_{c1} 以下温度时从过饱和固溶体(马氏体)中沿着马氏体晶界析出的,含有较高的镍元素及杂质元素,其在一196℃下仍然保持着较高的稳定性。

雷鸣等^[6]证实弥散分布的奥氏体可以显著提高 9Ni 钢的低温韧性。因此,自动埋弧焊接头热影响区的低温韧性较好。

由图 3(a)可见,手工电弧焊接头焊缝的组织由奥氏体和析出相组成,析出相呈不连续的块状和条状分布于树枝状晶间;这些析出相主要为富铬相,如图 3(b)所示。虽然镍基合金的溶碳能力远低于钢的,但由于合金本身含有较多的铬、钼等组元,因此,即使是碳含量很低,组织中仍然出现了析出相。

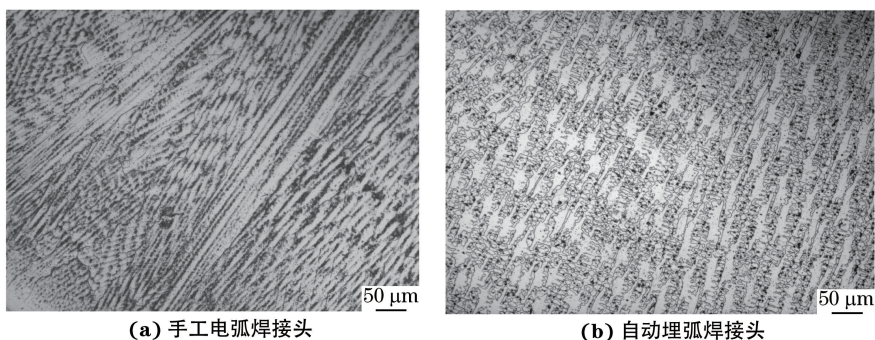


图 1 不同焊接接头焊缝的 OM 形貌

Fig.1 OM morphology of weld metal in different welded joints: (a) manual arc welded joint and (b) automatic submerged arc welded joint

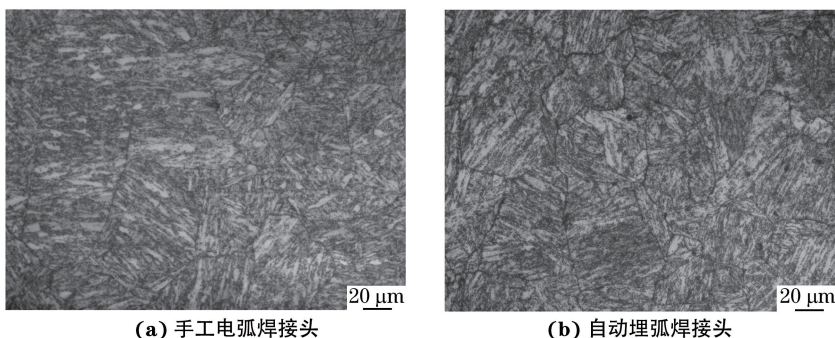


图 2 不同焊接接头热影响区的 OM 形貌

Fig.2 OM morphology of HAZ in different welded joints: (a) manual arc welded joint and (b) automatic submerged arc welded joint

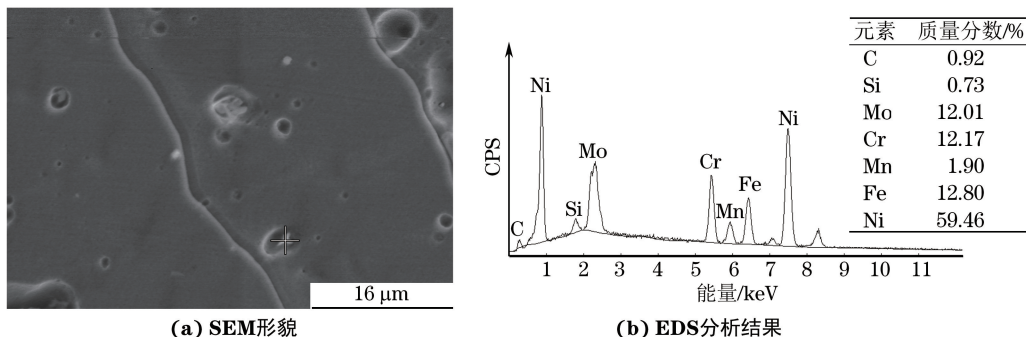


图 3 手工电弧焊接头焊缝中析出相的 SEM 形貌和 EDS 分析结果

Fig.3 SEM morphology (a) and EDS analysis result (b) of precipitated phase in weld metal of manual manual arc welded joint

2.2 焊缝的化学成分

由表 4 可知,与手工电弧焊接头焊缝相比,埋弧焊接头焊缝中的碳、硫、磷元素含量较少,而钨、钼元

素含量较多。硫、磷等杂质元素的存在会恶化焊缝金属的低温韧性。钨和钼为合金固溶体元素,它们能减慢高温扩散,加强固溶体中的原子结合力,减慢

表 4 不同焊接接头焊缝的化学成分(质量分数)

Tab.4 Chemical composition of welding metal in different welded joints (mass)

%

焊接接头	C	Si	Mn	S	P	Fe	Cr	Mo	W	Nb
手工电弧焊接头	0.04	0.34	2.68	0.007	0.005	10.81	12.15	5.79	1.36	1.29
自动埋弧焊接头	0.013	0.19	0.48	0.005	0.004	16.67	12.79	14.18	3.33	—

软化速度,对焊缝起增强作用^[7]。

2.3 焊接接头的力学性能

由表 5 可见,在室温下,两种焊接接头的抗拉强度都在 710~730 MPa 之间,均满足 9Ni 钢板接头的常温技术要求(680~820 MPa);此外,两种接头的弯曲性能均合格。可见,焊接方法对焊接接头室温拉伸性能和弯曲性能的影响不大。

表 5 不同焊接接头的室温拉伸性能和弯曲性能

Tab.5 Tensile properties and bending properties of different welded joints at room temperature

焊接接头	拉伸性能		弯曲性能
	抗拉强度/MPa	断裂位置	
手工电弧焊接	729,723	母材	面弯($d=4a$),合格 背弯($d=4a$),合格
自动埋弧焊接	716,713	焊缝	侧弯($d=4a$),合格

由表 6 可知,自动埋弧焊接头在-196℃下的低温韧性高于手工电弧焊的;对于同一种焊接接头,V形缺口位于焊缝中心时的冲击吸收功最低,位于熔合线+5 mm 处(母材)的冲击吸收功最高。V形

缺口位于不同位置的焊接接头的低温冲击吸收功均满足英国标准 BS7777 对液化天然气储罐焊接接头的要求($A_{kv(-196℃)} > 35 J$)。

表 6 不同焊接接头的低温冲击吸收功(-196℃)

Tab.6 Low temperature (-196℃) impact absorbing energy of different welded joints

J

焊接接头	缺口位置				
	焊缝中心	熔合线	熔合线 +1 mm	熔合线 +3 mm	熔合线 +5 mm
手工电弧焊接头	86.7	98.3	99	160.3	204.3
自动埋弧焊接头	116	129.3	141.3	206.6	217.7

2.4 冲击断口形貌

V形缺口位于焊缝中心处的手工电弧焊接头和自动埋弧焊接头的冲击试样断口均呈韧窝状,如图 4 所示,这是高强度、高韧性材料的典型断口形貌特征。在手工电弧焊接头的冲击断口上,韧窝具有一定的方向性,呈撕裂状,且韧窝较浅;在自动埋弧焊接头的冲击断口上,韧窝大且深,分布也比较均匀,且存在撕裂棱,低温冲击韧性更好。

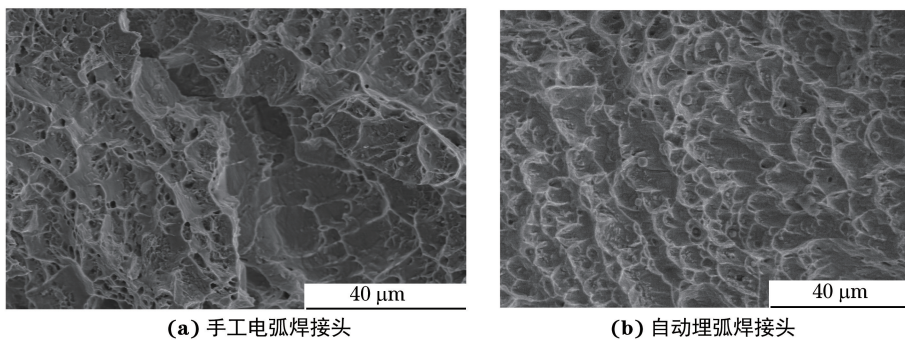


图 4 V形缺口位于焊缝中心处焊接接头冲击试样断口的 SEM 形貌

Fig.4 SEM morphology of fracture of different welded joints impact samples with V-shape notch located in the center of weld metal:

(a) manual arc welded joint and (b) automatic submerged arc welded joint

V形缺口位于熔合线+1 mm 处的手工电弧焊接头和自动埋弧焊接头的冲击试样断口均呈韧窝状,如图 5 所示,均为韧性断裂;且手工电弧焊接头冲击试样断口上的韧窝少且较浅,自动埋弧焊接头冲击试样断口上分布有大韧窝和小韧窝,小韧窝分布在大韧窝周围,韧窝较深,分布均匀。

可见,自动埋弧焊接头的低温冲击韧性较手动电弧焊接头的更好。

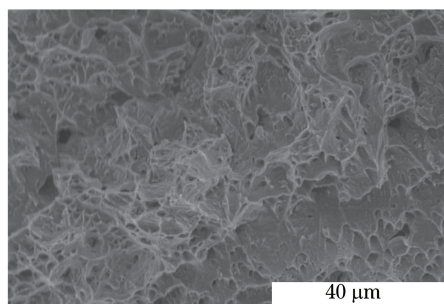
3 结 论

(1) 采用手工电弧焊与自动埋弧焊两种焊接方法对 9Ni 钢进行焊接,两种焊接接头的焊缝组织均以奥氏体为主,热影响区组织均为板条马氏体;与手工电弧焊接头相比,自动埋弧焊接头中的胞状晶更细小,分布更均匀,偏析程度更轻,热影响区中的板条马氏体更细小,板条束更多。

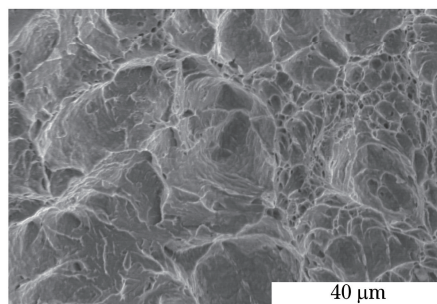
(下转第 73 页)

- [2] 鲍崇高,付平安.碳钢不锈钢材料抗冲蚀磨损性能研究[J]. 铸造技术,2009,30(1):23-26.
- [3] 庞佑霞,刘厚才,唐果宁.基于流体机械工况的冲蚀磨损特性研究[J].机械工程材料,2005,28(12):36-38.
- [4] 朱韬,王树奇,纪秀林. $0\text{Cr}17\text{Ni}7\text{Al}$ 沉淀硬化不锈钢的冲蚀磨损性能研究[J].钢铁钒钛,2013,34(5):1-8.
- [5] 鲍崇高,高义民,邢建东.水轮机用不锈钢材料的抗冲蚀磨损性能研究[J].机械工程学报,2002,38(2):8-10.
- [6] YE H J W, CHEN S K, LIN S J, *et al.* Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes[J]. *Adv Eng Mater*, 2004, 6(5):299-303.
- [7] YE H J W, CHEN S K, Formation of simple crystal structures in solid solution alloys with multi-principal metallic elements [J]. *Metallurgical and Materials Transation: A*, 2004, 35(8): 2533-2536.
- [8] LIU Y, CHEN M, LI Y X, *et al.* Microstructure and mechanical performance of $\text{Al}_x\text{CoCrCuFeNi}$ high-entropy alloys [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(9):1602-1607.
- [9] TONG C J, CHEN M R, CHEN S K, *et al.* Mechanical performance of the $\text{Al}_x\text{CoCrCuFeNi}$ high-entropy alloy system with multiprincipal elements[J]. *Metallurgical and Materials Transation: A*, 2005, 36(5):1263-1271.
- [10] 陈敏,刘源,李言祥,等.多主元高熵合金 AlTiFeNiCuCr_x 微观结构和力学性能[J].金属学报,2007,43(10):1020-1024.
- [11] HSU Y J, CHANG W C, WU J K. Corrosion behavior of FeCoNiCrCu high-entropy alloys in 3.5% sodium chloride solution[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2005, 92(1): 112-117.
- [12] WU J M, LIN S Y, YE H J W, *et al.* Adhesive wear behavior of $\text{Al}_x\text{CoCrCuFeNi}$ high-entropy alloys as a function of aluminum content[J]. *Wear*, 2006, 261(2):513-519.
- [13] 唐群华,赵亚光,蔡建宾,等.时效处理对 $\text{Al}_{0.5}\text{FeCoCrNi}$ 高熵合金微观组织和力学性能的影响[J].有色金属(冶炼部分), 2011(4):47-50.
- [14] 丁一刚,王慧龙,郭兴蓬,等.金属在液固两相流中的冲刷腐蚀[J].材料保护,2001,34(11):16-18.
- [15] 代真,沈士明,丁国铨.金属在固液两相流体中的冲刷腐蚀及其防护[J].腐蚀与防护,2007,28(2):86-89.
- [16] 刘新宽,方其先.两种不锈钢冲刷腐蚀的研究[J].化工机械, 1998, 25(1):12-15.
- [17] HEITZ E. Chemo-mechanical effects of flow on corrosion[J]. *Corrosion*, 1991, 47(2):135-145.
- [18] 张安峰,王豫跃,邢建东.不锈钢与碳钢在液固两相流中冲刷腐蚀特性的研究[J].兵器材料科学与工程,2003,26(2):36-39.
- [19] 潘牧,罗志平.材料的冲蚀问题[J].材料科学与工程,1999, 17(3):92-96.
- [20] 樊爱民,陶子云,龙晋民,等.不锈钢冲刷磨损影响因素及机理探讨[J].兵器材料科学与工程,1994,17(1):38-42.
- [21] 董仕节,卢宗津.高速氧化铝粒子冲蚀下高锰钢的磨损特性[J].机械工程材料,1997,21(1):18-20.

(上接第47页)



(a) 手工电弧焊接头



(b) 自动埋弧焊接头

图5 V形缺口位于熔合线+1 mm处焊接接头冲击试样断口的SEM形貌

Fig.5 SEM morphology of fracture of different welded joints impact sample with V-shape notch located in FL+1 mm:

(a) manual arc welded joint and (b) automatic submerged arc welded joint

(2) 两种焊接接头都具有较好的室温拉伸性能和弯曲性能,且自动埋弧焊接头的低温韧性优于手工电弧焊的。

(3) V形缺口位于焊缝中心和熔合线+1 mm处的接头冲击试样的断口均呈韧窝状,为韧性断裂,且自动埋弧焊接接头冲击断口上的韧窝更大更深,且分布均匀。

参考文献:

- [1] 李应钦,刘树峰,肖飞雁.9%Ni钢及其在LNG储罐建造中的焊接[J].中国化工装备,2014(1):28-32.
- [2] 颜丙锁,马红广,汪春标.LNG储罐中9Ni低温钢焊接[J].焊管,2013,36(2):29-31.
- [3] 刘仲民.低温储罐焊接技术分析[J].安装,2014(4):47-50.
- [4] 李峰,张丽茹.9%Ni钢焊条电弧焊材料及工艺要点[J].金属加工(热加工),2008(8):41-43.
- [5] 雷鸣,郭蕴宜.9%Ni钢中沉淀奥氏体的形成过程及其在深冷下的表现[J].金属学报,1989(1):13-17.
- [6] 崔忠圻.金属学与热处理原理[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2007:202.
- [7] 孟根巴根.9Ni钢焊接材料及接头组织和性能研究[D].呼和浩特:内蒙古工业大学,2009:12-13.