

风机叶轮用 0Cr13Ni5Mo 钢焊条的研制

张 敏¹, 吴伟刚¹, 褚巧玲¹, 李继红¹, 张海存²

(1. 西安理工大学 材料科学与工程学院, 西安 710048; 2. 西安陕鼓动力股份有限公司, 西安 710075)

摘 要: 根据风机叶轮焊接接头强韧性要求, 利用组织匹配原则设计焊芯, 用药皮过渡方法补充选用焊芯与设计焊芯成分间的差距, 并通过金相分析、力学性能及工艺性能测试等方法, 研制了 0Cr13Ni5Mo 钢专用焊条。结果表明, 用药皮过渡方式补充选用焊芯与设计焊芯成分之差的方法, 既可验证所设计焊芯能否达标, 也可用于指导小批量生产特种焊条; 1 号、2 号、3 号焊条所得接头的焊缝区和 HAZ 组织均为回火索氏体 + 板条马氏体 + 残余奥氏体 + 二次析出相, 其对应接头力学性能均高于 4 号传统焊条; 2 号焊条工艺性最好, 3 号综合性能最好, 可作为 0Cr13Ni5Mo 钢专用焊条。

关键词: 焊条; 药皮过渡; 马氏体; 力学性能; 工艺性能

中图分类号: TG422.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2013)08-0001-04



张 敏

0 序 言

0Cr13Ni5Mo 马氏体不锈钢因具有良好的强韧性、可焊性以及耐磨性, 可将其作为现有的、不甚理想的高速离心风机叶轮的首选替换材料^[1]。目前还没有与其匹配的专用焊条, 一般选择 FV520(B) 焊条对其焊接。但试验发现 FV520(B) 焊条焊后接头韧性并不能满足工程对 0Cr13Ni5Mo 钢接头性能要求^[2]。文中从提高焊接接头强韧性角度出发, 研发了一种具有较好的工艺性能和力学性能的 0Cr13Ni5Mo 钢专用焊条, 这对国内风机行业的发展起到了较大的推动作用。

1 0Cr13Ni5Mo 钢匹配焊条的设计

1.1 焊缝的设计

1.1.1 焊缝组织的选择

0Cr13Ni5Mo 钢退火态组织为粗大的板条马氏体, 淬火 + 回火 + 二次回火后组织为细小的板条状马氏体, 故一般选择该工艺为其热处理工艺。为保证焊接接头具有较好的强韧匹配性, 焊缝组织选择板条马氏体为主 + 适量铁素体 + 少量残余奥氏体。该组织将会使焊接接头比奥氏体焊材具有更高强度

和硬度, 比马氏体焊材具有更高的塑性和韧性。

1.1.2 焊缝成分的确定

根据焊缝组织可选择 Ni-Cr-Mo 为焊缝合金系, 结合舍夫勒图、母材 CCT 曲线及合金元素对焊缝组织和性能的影响, 确定焊缝成分见表 1。

表 1 焊缝化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of weld

C	Si	P	S	Mn	微合金及 Fe
<0.04	≤0.4	≤0.01	≤0.01	0.9~1.2	余量

1.2 药皮的设计

结合酸性及碱性药皮渣系的特点, 选择 CaO-CaF₂-SiO₂-TiO₂ 为药皮渣系。根据药皮各组分及相互间交互作用对碱性焊条工艺性能的影响, 并着重考虑稳弧、脱渣、发红及飞溅等工艺^[3], 拟定碱性药皮主要成分质量分数为: 碳酸盐 41%~45%、萤石 19%~23%、石英 2%~10%, 其余为铁合金。为了借鉴酸性焊条工艺性好的药皮成分配比特点, 以此来改善碱性焊条药皮配方, 又设计了一种酸性药皮配方, 其主要成分质量分数为: 碳酸盐 30%~35%、萤石 12%~15%、石英 35%~40%, 其余为铁合金。

1.3 焊芯的设计

母材熔合比 θ 计算方法为

$$\theta = \frac{C_w \cdot C_d}{C_b \cdot C_d} \quad (1)$$

式中: C_w 为焊缝金属化学成分; C_b 为母材化学成

收稿日期: 2012-07-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274162); 国家 863 高技术
研究发展计划资助项目(2013AA031303); 西安市科技
计划资助项目(CX12163)

分; C_d 为熔敷金属化学成分. 不同的焊接接头及不同的工件厚度对应不同的熔合比 θ . 按照风机叶轮的应用状况, 取 θ 为 0.3. 由式(1)和表 1 可得熔敷金属化学成分 C_d .

焊条合金元素过渡系数 η 计算公式为

$$\eta = \frac{C_d}{C_e} = \frac{C_d}{C_{ew} + K_b C_{co}} \quad (2)$$

式中: C_e 为合金元素原始含量; C_{ew} 为合金元素在焊芯中的含量; C_{co} 为合金元素在药皮中的含量. η 为总的合金过渡系数, 实际的焊芯和药皮的过渡系数并不相等, 尤其是当药皮氧化性较强时更为明显. 碱性焊条两种过渡系数接近相等. 常见合金元素 η 值见表 2^[4].

表 2 合金元素过渡系数

Table 2 Transition coefficient of alloying element

Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	W
0.86	0.6	0.9	0.9	0.94	0.94	0.95

文中药皮重量系数 K_b 为 0.3, 已知 η , C_d , K_b 及 C_{co} 结合式(2)可得焊芯化学成分 C_{ew} . 由 C_{ew} 可选择现有的 FV520(B) 焊芯为试验用焊芯. 根据 FV520(B) 焊芯化学成分及式(2)可得需通过药皮过渡的合金元素种类及含量为 Mn(1.7%~4.5%), Ni(2%~9%), Cr(3.4%~6.0%), 结合药皮配方、FV520(B) 焊芯及药皮过渡的合金元素制备焊条, 即可达到所设计焊条的成分要求.

2 试验方法

试验用母材为 6 块尺寸为 200 mm × 160 mm × 20 mm 的 0Cr13Ni5Mo 钢板, 其化学成分见表 3.

表 3 0Cr13Ni5Mo 钢化学成分(质量分数, %)

Table 3 Chemical compositions of 0Cr13Ni5Mo steel

C	Si	Mn	P	S	微合金
≤0.03	≤0.8	0.4~1.0	≤0.035	≤0.035	16.5~21.0

将母材编号为 A, B, C, D, E, F, 其中 F 为母材测试试样. 试验焊条编号为 1 号、2 号、3 号、4 号, 前三种是选用市场上现有的 FV520B 焊芯, 其中 1 号、2 号、3 号依次匹配碱性药皮配方、酸性药皮配方及碱性药皮配方, 并依次在药皮中添加需通过药皮过渡的合金元素的最大值、中间值及最小值. 4 号为市场上现有的 FV520(B) 专用焊条.

试样开双 V 形坡口, 钝边为 1 mm, 焊芯直径均

为 4.0 mm. 打底、填充、盖面电流分别为 120, 130, 140 A, 电弧电压在 22~26 V 之间, 热输入在 1.2~1.8 kJ/mm 之间. A, B, C, D 试样分别用 1 号、2 号、3 号、4 号焊条焊接, 试样热处理工艺均为焊前 200 °C × 1 h 预热, 焊后 1 000 °C × 1 h 油淬 + 620 °C × 2 h 空冷 + 600 °C × 2 h 空冷. E 试样用 1 号焊条焊接, 焊前进行 200 °C × 1 h 预热, 焊后不热处理.

试验采用 Nebula400 数字化逆变焊机, 热处理试验采用 SX-8-10 箱式电阻炉. 焊接接头拉伸试验和冲击试验分别在型号为 HT-2402-100KN 和 JB300 的试验机上进行, 拉伸试验为棒状比例试样, 取样部位垂直于焊缝横截面正中心, 冲击试验为 V 形缺口标准试样, 缺口开在焊缝中心. 维氏硬度试验在 HV-120 试验机上进行, 试验载荷为 98 N. 金相试验在 OLYMPUS-GX71 大型金相显微镜上进行.

3 试验结果与分析

3.1 焊接接头微观组织特征

3.1.1 焊缝区微观组织分析

图 1 为 A, B, C, D 焊缝区微观组织, 取样部位垂直于焊缝横截面中心, 属于多层多道焊.

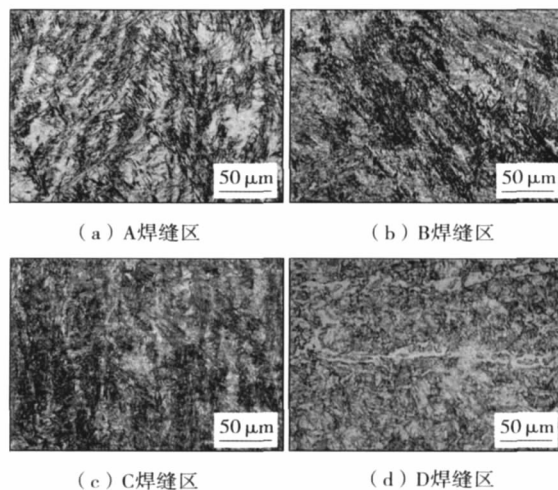


图 1 焊接接头焊缝区微观组织形貌

Fig. 1 Microstructure of weld area of welded joints

由图 1 可看出 4 种焊缝组织均为回火索氏体 (S_H) + 板条马氏体 (M) + 残余奥氏体 (A') + 二次析出相. 板条马氏体呈平行状, 回火索氏体与板条马氏体相互交错排列成编织状; 残余奥氏体与二次析出相主要分布在晶界及晶粒内部^[5]. 根据马氏体不锈钢的冶金特点及焊芯化学成分可知, 二次析出相可能为铌、钼、铬、钛等的碳、氮化合物^[6].

图 1a 表明 ,A 试样回火处理后形成了由大量细小的粒状渗碳体和铁素体组成的 S_H 。图 1a ,b 可看出 ,A 焊缝组织较 B 焊缝组织更加细小 ,交错程度更密集 ,分散于晶界与晶粒内的强化相碳化物较多。图 1a ~ c 显示 ,随着焊缝中合金元素含量的降低 ,焊缝组织逐渐变的粗大 ,C 与 D 焊缝合金元素含量相当 ,但由于药皮不同 ,C 焊缝较 D 焊缝有更多的 S_H ,焊缝韧性更高。

3.1.2 热影响区微观组织分析

图 2 为 4 种热影响区的微观组织(近焊缝侧) , 取样部位垂直于焊缝横截面熔合线 ,属于多层多道焊。

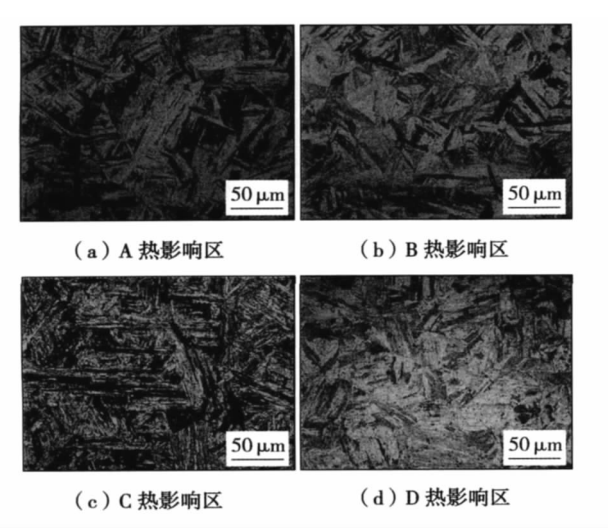


图 2 接头热影响区微观组织形貌
Fig. 2 Microstructure of HAZ of welded joints

从图 2 可看出 A ,B ,C ,D 的热影响区组织主要为板条 $M + S_H + A' +$ 二次析出相。板条马氏体按一定的向位排列 ,与焊缝区马氏体相比 ,HAZ 马氏体板条束较宽 ,更具有方向性; 回火索氏体与渗碳体颗粒较焊缝区变大 ,铁素体较焊缝区变粗 ,且数量有所减少; 残余奥氏体数量稍有增多 ,二次析出相与焊缝区基本相同。热影响区中熔合区在冷却时有一些碳化物析出 ,不同的冷却速度会析出不同的碳化物 ,一般主要是铬和铁的碳化物。细晶区马氏体更加细小 , A' 更少。高温回火后组织中形成富铬、钛、钼等碳化物 ,使得马氏体的 BCT(体心正方) 晶格转变为铁素体的 BCC(体心立方) 结构。

3.2 焊接接头力学性能分析

不同焊接接头力学性能测试结果见表 4 ,其中母材 F 与 A 热处理工艺相同。冲击试验结果见表 5。焊接接头不同区域维氏硬度对比见图 3。

由表 4 可看出 ,D 试样接头强度要高于 A 试样 ,

表 4 拉伸试验结果
Table 4 Results of tensile test

试样	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 R_{eL} /MPa	断后伸长率 A (%)	断面收缩率 Z (%)	断裂位置
A	862	775	17	68	母材区
B	837	680	21	67	母材区
C	799	682	18	71	母材区
D	1 010	800	18	63	HAZ
E	1 014	715	6	31	焊缝
F	830	760	21	68	

表 5 冲击试验结果
Table 5 Results of impact test

试样	冲击吸收功 A_{KV} /J(室温)		
	焊缝区	HAZ	母材区
A	257	141	219
B	251	158	230
C	145	80	221
D	34	36	118
E	63	70	220
F(母材)		232	

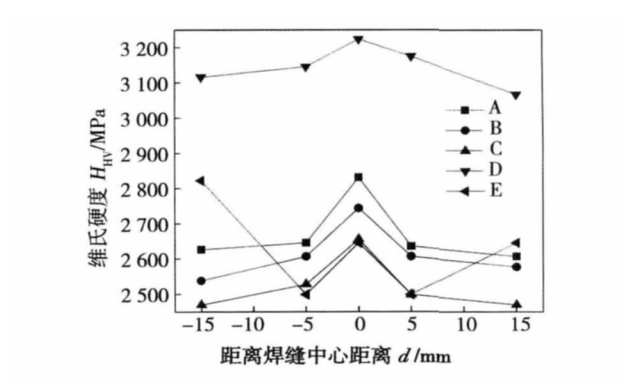


图 3 焊接接头硬度曲线
Fig. 3 Curves of hardness of welded joints

这是由于 D 试样焊完直接冷却 ,焊缝区和热影响区主要为粗大的马氏体组织 ,而热处理后的 A 试样为细小的 S_H 和板条 M。随着焊缝镍含量的降低 ,A , B ,C 试样接头强度逐渐降低 ,原因为镍可扩大奥氏体相区 ,当焊缝温度升高到 A_{c3} 线以上时 ,奥氏体中溶入了较多的 Nb ,Ti ,Mo 等合金元素 ,温度降至 A_{c3} 线以下时奥氏体分解 ,获得了包含 Nb ,Ti ,Mo 等合金元素的马氏体 ,对焊缝起到了强化作用^[6-7]。FV520(B) 专用焊条中含有较高的 Mo ,故 E 试样焊接接头强度较高。对比母材 F 可看出 A ,B ,C 试样均与母材强度相差不大 ,符合等强匹配的原则; 断后伸长率及断面收缩率结果显示除 D 试样外 ,其余试样断后伸长率均在 20% 左右 ,断面收缩率均在 67%

左右;从断裂位置来看,A、B、C试样均断在母材区,这可以保证接头的安全性。

由表5可看出,D试样焊缝区和HAZ韧性极低,且母材区与F试样相差甚远,由此可知淬火和双回火处理可大幅度提高马氏体不锈钢韧性;A、B、C结果表明,随着焊缝合金元素含量的降低,焊缝冲击值降低,合金元素在熔池结晶过程中增加了形核质点,细化了晶粒,同时这些合金元素扩大了奥氏体相区,使得焊缝中残余奥氏体数量减少,提高了焊缝韧性;C试样与E试样相比,焊缝中镍含量相同,由于铬、钼等含量的调整,使得C试样焊缝冲击吸收功远高于E试样。

由图3可看出,D试样硬度整体都很高,这与其较粗大的微观组织特征相吻合;A、B、C试样硬度变化基本一致,焊缝中心硬度最高,都在热影响区出现了软化现象,这是由于在混晶区含碳量增加时,由于奥氏体相变产生的马氏体区一直延伸到熔合区,使得高温奥氏体和铁素体两相区缩小并消失,熔合线软化区随之消失。

4 焊条工艺性能

由接头微观组织及接头拉伸试验结果分析可知,1号、2号焊条焊接接头力学性能较好,但其合金元素含量较高,成本较高,3号焊条成本较低,性能也优异,同时为了探究相同条件下酸性焊条工艺性好的原因,文中对2号、3号及4号焊条的工艺进行了测试,测试结果以百分制进行评定,其结果见表6。

表6 工艺性试验结果(%)
Table 6 Results of processing property test

	稳弧	脱渣	飞溅	发红	气孔	成形
2号	90	95	90	90	98	90
3号	90	75	85	80	98	80
4号	90	80	75	75	98	85

由表6可看出,2号酸性焊条的工艺性能均优于碱性焊条,对比分析酸、碱性药皮配方可知,这是由于酸性药皮中较多的氧化性较强的硅酸盐、氧化铁和氧化钛等所致,碱性药皮中大理石、萤石及TiO₂的含量及相互间交互作用对碱性焊条工艺性影响最为显著;3号与4号相比,除脱渣与成形稍差外,其它工艺性均优于4号焊条。

5 结 论

(1) 用药皮过渡方式补充选用焊芯与设计焊芯

成分之差的焊条研制方法,既可验证所设计焊芯能否达标,也可用于指导特种焊条的小批量生产。

(2) 1号、2号、3号焊条焊接接头焊缝区和HAZ组织均为回火索氏体+板条马氏体+残余奥氏体+二次析出相,随合金含量降低,焊缝组织逐渐变粗,但强韧性均较高,综合力学性能均优于4号焊条。

(3) 2号焊条工艺性最好,3号次之但优于4号焊条。综合考虑,3号焊条可作为0Cr13Ni5Mo钢专用焊条。

参考文献:

- [1] 李标峰,王军,张杰. 0Cr13Ni5Mo/Q345C马氏体不锈钢复合板的焊接性[J]. 材料开发与应用,2002,17(4): 17-21.
Li Biaofeng, Wang Jun, Zhang Jie. Weldability of 0Cr13Ni5Mo/Q345C martensitic stainless steel clad steel plate[J]. Development and Application of Materials, 2002, 17(4): 17-21.
- [2] Gesnoui C, Hazarabedian A, Bilmes P, et al. Effect of post-weld heat treatment on the microstructure and hydrogen permeation of 13CrNiMo steels[J]. Corrosion Science, 2004, 46(12): 1633-1647.
- [3] 孟工戈,储继军,梁敬岳,等. 新渣系碱性焊条工艺性能综合评价[J]. 焊接学报,2010,31(10): 81-84.
Meng Gongge, Chu Jijun, Luan Jingyue, et al. Comprehensively optimizing usability of new slag system basic electrode[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(10): 81-84.
- [4] 刁淑生,徐婷,杨克. 手工电弧堆焊焊条某些合金元素的过渡系数[J]. 焊接学报,1995,16(4): 214-221.
Diao Shusheng, Xu Ting, Yang Ke. Transition factors of some alloy elements in overlaying welding electrode of SMAW[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1995, 16(4): 214-221.
- [5] Pollard B. Selection of wrought precipitation hardening stainless steels in ASM metals handbook[J]. ASM International Materials Park, OH, 1993, 6(10): 482-494.
- [6] Xia M, Takayanagi H, Kimmochi K. Analysis of Multi2 layered filament2 wound composite pipes under internal pressure[J]. Composite Structures, 2004, 53: 483-491.
- [7] 周世锋,王昱成,李向阳,等. ZG0Cr13Ni5Mo马氏体不锈钢模拟焊接HAZ组织与性能[J]. 焊接学报,2004,25(4): 63-66.
Zhou Shifeng, Wang Yucheng, Li Xiangyang, et al. Microstructure and mechanical properties in simulated HAZ of 0Cr13Ni5Mo martensitic stainless steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(4): 63-66.

作者简介: 张敏,男,1967年出生,博士,教授,博士研究生导师。主要从事焊接成形过程的力学行为及其结构质量控制、焊接凝固过程的组织演变行为及先进焊接材料研究。发表论文100余篇。
Email: zhmmn@xaut.edu.cn

MAIN TOPICS ABSTRACTS & KEY WORDS

Development of 0Cr13Ni5Mo steel matching electrode used on fan impeller

ZHANG Min¹, WU Weigang¹, CHU Qiaoling¹, LI Jihong¹, ZHANG Haicun² (1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Xi'an Shaangu Power Co. Ltd., Xi'an 710075, China). pp 1-4

Abstract: According to the requirements for mechanical property of fan impeller welded joints, cored wire was designed based on the principle of microstructure match. The component gap between the tested cored wire and designed cored wire was filled by alloying elements transition of the coating. An electrode special for 0Cr13Ni5Mo steel was developed after metallurgical analysis, mechanical and processing property testing. The results show that the method of filling the component gap between the tested cored wire and designed cored wire by alloying elements transition of the coating could verify whether the designed cored wire achieved the purpose and also guide the small batch production of special electrodes. The microstructure of the weld and heat-affected zone (HAZ) made with the No. 1, No. 2 and No. 3 electrodes consisted of tempered sorbite, lath martensite, residual austenite and quadratic precipitated phase, and the mechanical properties of the resultant joints were better than those with the No. 4 electrode. The No. 2 electrode had the best processing property, and the No. 3 electrode had the best comprehensive property which could be used as a special electrode for 0Cr13Ni5Mo steel.

Key words: electrode; transition of coating; martensite; mechanical property; processing property

Detection of welding pool width with frequency domain filtering in strong arc reflection environment

GAO Xiangdong, JIANG Liangzheng, LONG Guanfu (School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China). pp 5-8

Abstract: In this paper, a method to detect the welding pool width based on the specular reflection physical characteristics of a welding pool during TIG welding of Q235 steel was investigated. The combination of spatial filtering and frequency domain filtering was applied to eliminate the disturbance in a welding pool image which was polluted by the high frequency noises. In comparison with spatial filtering, using the low pass of frequency domain filtering and the compensation of high frequency enhancement filtering could better eliminate the welding pool image noises. The arc welding experimental results show that the welding pool width could be extracted accurately by the proposed identification algorithm.

Key words: arc welding; arc reflection; welding pool width; frequency domain filtering

Pulsed DE-GMA welding brazing between magnesium and galvanized steel

HUANG Jiankang¹, SHAO Ling², SHI Yu¹, GU Yufen² (1. State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-Ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Non-Ferrous Metal Alloys, The Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China). pp 9-12

Abstract: Bead welding was made with AZ92A magnesium alloy wire on galvanized steel plate by pulsed DE-GMAW. By adjusting the welding parameters, homogeneous fusion width and good morphology of welded seam were obtained under the optimized welding parameters. The microstructure in the interface center of the joint was observed and analyzed by SEM, EDS and EPMA. And $Mg_{17}Al_{12}$, $Mg_{0.97}Zn_{0.03}$ and Fe_4Zn_9 intermetallic compounds were detected on stripped surfaces using XRD. The results show that under appropriate parameters, welding-brazing of magnesium/galvanized steel dissimilar metals were achieved by pulsed DE-GMAW. And Mg and Fe elements reacted with Zn to form intermetallic compounds during welding-brazing of magnesium alloy to galvanized steel.

Key words: pulsed DE-GMAW; magnesium-galvanized steel welding; intermetallic compound

Microstructure and properties of nanobainite steel joint by TIG welding

FANG Kun¹, SONG Kuijing¹, YANG Jianguo^{1,2}, LIU Xuisong¹, ZHAO Delong, FANG Hongyuan¹ (1. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Institute of Process Equipment and Control Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China). pp 13-16

Abstract: Nanobainite steel with a tensile strength of 1500MPa was welded by TIG welding process. The microstructure and fracture morphology of the joint were observed and analyzed by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), transmission electron microscope (TEM) and X-ray diffraction (XRD). And the hardness and tensile strength of the joint were measured. The results show that the weldability of nanobainite steel was poor, because the microstructure in fusion zone and quenched zone were almost brittle martensite with hardness as high as 1000HV. Solute elements in nanobainite steel tended to partition into liquid and hence to segregate toward the boundary between dendrite arms, which formed austenite at the boundary between dendrite arms. Cold cracks were easily found in nanobainite bainitic steel weld which were brittle intercrystalline fracture. Massive carbides grew in the tempered zone, which mainly consisted of M_7C_3 (M: Fe, Cr, Mn) and Fe_3C . And the amount of precipitated cementite increased with the increasing of peak temperature.