

一种风机转子用 FV520(B) 不锈钢碱性焊条的研制

张 敏¹ 李 岩^{1,2} 李继红¹ 吕金波¹

1. 西安理工大学, 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对高性能焊条的要求,结合焊材设计的组织匹配原则,通过金相分析、力学性能测试、断口观察等方法,研制了一种力学性能和工艺性能都较为优异的焊条。结果表明,所研制焊条熔敷金属的合金系为 Cr—Ni—Nb—Cu—Ti,其力学性能优于 FV520(B) 专用焊条;Mo、Nb、Ti、Cr 等合金元素的富铬碳化物和合金碳化物 Mo_2C_3 、NbCrN、Ti(C,N) 提高了熔敷金属的强韧性;焊缝区和 HAZ 的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;1#、2#、4#焊条的断裂机理为准解理断裂,而 3#焊条的断裂机理为韧窝加解理的复合型断裂。

关键词:沉淀硬化;焊条;马氏体;力学性能

中图分类号: TG422

文章编号: 1004—132X(2011)22—2749—05

Development of One Kind of FV520(B) Stainless Steel Matching with Alkalinity Welding Electrode Used on Fan Impeller

Zhang Min¹ Li Yan^{1,2} Li Jihong¹ Lü Jinbo¹

1. Xi'an University of Technology, Xi'an, 710048

2. Xi'an Shaangu Power Co., Ltd., Xi'an, 710075

Abstract: According to the mechanical property requirements of fan impeller welded joints to high performance welding electrode and combination with principles of welding material designed to microstructure matching, a kind of welding electrode with good mechanical and processing properties was developed by using metallurgical analysis, mechanical property testing and fracture observation. The results show that the deposited metal of developed welding electrode with the alloy system Cr—Ni—Nb—Cu—Ti and mechanical properties of welding electrode developed is superior to the special welding electrode of FV520(B) stainless steel. Mechanical properties of deposited metal were improved by carbides rich of chromium and alloying. The carbides are Mo_2C_3 , NbCrN and Ti(C,N) which are composed by alloy element of Mo, Nb, Ti, Cr and so all. The welding zone and HAZ microstructure of FV520(B) stainless steel is composed of tempered sorbite, lath martensite, residual austenite and quadratic precipitated phase. However, the fracture mechanism of No. 1, No. 2 and No. 4 welding electrode is quasi-cleavage crack and the No. 3 is complex fracture consisting of dimple and cleavage fracture.

Key words: precipitation hardening; welding electrode; martensite; mechanical property

0 引言

FV520(B) 是英国 Firth Vickers 材料研究室开发的一种马氏体沉淀硬化不锈钢,由于其具有优良的耐蚀性能、良好的冲击韧度和较大截面上理想的横向性能,因而被广泛应用于风机的叶片、转子、齿轮、螺栓、轴、泵件等场合^[1-4]。叶片与轮盘是通过焊接的方式连接在一起的,目前采用 FV520(B) 专用焊条进行焊接,其特点是工艺性能良好但接头冲击韧性远低于母材。马氏体沉淀硬化不锈钢具有明显的淬火倾向,从而导致裂纹最容易从熔合线处萌生,致使结构在运行过程中经常发生故障(特别是脆性断裂),造成巨大的损失。

目前鲜有针对此问题进行研究的相关报道。本文主要针对焊接接头冲击韧性远低于母材的现状,通过设计焊芯和药皮配方开发出一种低氢碱性手弧焊条,使得接头的综合力学性能和工艺性能优于现有的强度可匹配的焊条。

1 FV520(B) 不锈钢匹配焊条的设计

1.1 焊芯成分设计

FV520(B) 马氏体沉淀硬化不锈钢(成分见表 1)在焊前经过固溶和时效处理后,其组织为回火索氏体(S_H) + 马氏体(M) + 残余奥氏体(A') + 析出相,它是在 Cr13 型马氏体不锈钢的基础上加入 Mo、Ti、Nb、Cu 等强化元素,在 400~650℃ 时效析出时效硬化相而产生沉淀硬化^[5]。

收稿日期: 2010—12—10

基金项目: 陕西省教育厅自然科学基金资助项目(00K904); 西安市科技计划资助项目(CXY09024)

表 1 FV520(B)的化学成分 %

元素	C	Si	Mn	P	S
质量分数	0.040	0.33	0.57	0.024	0.003
元素	Cr	Ni	Cu	Mo	Nb
质量分数	13.60	5.21	1.47	1.38	0.30

由于 FV520(B)马氏体沉淀硬化不锈钢含有大量合金元素,焊接过程中冷却速度较快,因此 FV520(B)不锈钢在焊接过程中具有较大的冷裂纹敏感性,焊后接头易产生冷裂纹。热裂纹敏感系数为

$$HCS = \frac{w_C(w_S + w_P + w_{Si}/25 + w_{Ni}/100)}{3w_{Mn} + w_{Cr} + w_{Mo} + w_V} \times 10^3 \quad (1)$$

根据式(1)^[6]和表 1 可知,FV520(B) 不锈钢的热裂纹敏感系数 $HCS = 0.50$,对于金属材料, HCS 越大,热裂纹敏感性越高,当 $HCS \leq 2$ 时不会产生热裂纹。因此,FV520(B) 不锈钢在焊接过程中对热裂纹不太敏感。

FV520(B)沉淀硬化不锈钢 HAZ 脆化会出现粗晶脆化、组织脆化(包括析出脆化与遗传脆化)、热应变时效脆化等现象^[6],为此在设计焊芯化学成分时应充分考虑上述情况。化学元素对沉淀硬化不锈钢有重要影响。Ni 含量的增加会降低元素 C、N 在奥氏体中的溶解度,从而使碳氮化合物脱溶倾向增强,提高了不锈钢晶间腐蚀敏感性^[7-8]。Cu 是降低 γ 相相变温度的元素,能增加过冷奥氏体的稳定性,降低 M_s 点,它是 FV520(B)钢沉淀硬化的主要元素。Ti 是缩小 γ 相区的元素,可以降低焊缝金属中自由 N 的含量,而生成的 Ti(C,N)、TiO 夹杂物与基体的化学反应造成的成分变化可促使奥氏体晶内针状铁素体的形成^[9-10]。与此同时,B 可明显抑制铁素体在奥氏体晶界上的形成,使铁素体转变曲线明显右移。另外,B 和 Ti 之间存在强烈的交互作用,二者相辅相成^[11-12]。作为缩小 γ 相区的元素,Nb 在高温时能形成稳定的碳化物(NbC),可抑制碳化铬的形成,推迟敏化时间而改善抗晶间腐蚀性能;Nb 在 1050℃ 固溶处理时产生的沉淀强化相 Nb-CrN 在提高强度、改善耐蚀性方面有显著作用^[6]。轻稀土加入焊缝之后,会富集在硅酸盐夹杂物中,使夹杂物球化并以弥散状态分布,使焊缝组织得到细化,它在焊缝中起到净化杂质和微合金化的作用,有利于改善塑韧性,可综合发挥 Mo、Ti、B 的强化效果^[6,13-14]。

根据舍夫勒(Schaeffler)图^[15]和表 1 可知,焊缝的铬当量($Cr_{eq} = w_{Cr} + w_{Mo} + 1.5w_{Si} + 0.5w_{Nb}$)为 16.25,焊缝的镍当量($Ni_{eq} = w_{Ni} + 30w_C + 0.5w_{Mn}$)为 7.5,焊缝组织位于 A+M+F(20%)

相组织的区域,因此设计焊条时应降低铬当量以减少铁素体含量,从而获得与母材匹配的组织。拟定焊缝金属的化学成分见表 2。

表 2 焊缝金属的化学成分 %

元素	C	Si	Mn	Cr	Ni	S、P
质量分数	<0.050	0.40~1.00	0.50~1.50	13.0~13.5	4.5~7.0	<0.010
元素	Mo	Nb	Cu	Ti	B	Fe
质量分数	1.0~2.0	0.20~1.00	0.50~2.00	0.10~1.00	0.002~0.010	0.10~1.00

1.2 药皮配方设计

碱性渣系具有碱度高和细熔滴渣壁过渡的特点,能够满足焊缝金属高强度和高韧性的要求。根据 FV520(B)不锈钢的使用要求,选择低氢碱性渣系药皮,其主要成分有大理石、萤石、石英、金红石、稀土硅铁和铁合金。大理石主要作为造气、造渣剂而加入;萤石用于除氢、调节渣的熔点;石英具有稀渣打作用,可以调节渣系的黏度系数;金红石对药皮脱渣具有积极作用;稀土硅铁可以细化焊缝晶粒、降低氢含量;铁合金主要起脱氧、过渡合金元素的作用。

2 试验材料与方法

试验材料是 FV520(B)沉淀硬化不锈钢,经过退火后切割成圆形锻棒,其尺寸为 275mm×228mm×22mm。试验焊条共有 4 种,其中 3 种由本次研制的焊芯匹配不同配方药皮而制作得到,焊条编号分别为 1、2、3;另外一种市场上现有的 FV520(B)沉淀硬化不锈钢焊条,编号为 4。根据焊条直径和母材尺寸,确定打底、填充、盖面焊电流分别为 120~140A、130~150A、140~160A,电压控制在 26~32V,焊接线能量为 1.2~1.8kJ/mm。为了减少冷裂纹倾向,采取如下工艺:焊前 300℃×1h 预热+1050℃×1h 固溶+630℃×3h 时效,焊后进行 850℃×2h 调整(油淬)+600℃×3h 时效,并控制层间温度在 200~250℃之间。

热处理工艺在型号为 SG-7.5-12 和额定功率为 7.5kW 的井式电阻炉中进行;根据 GB/T 2651-2008 和 GB/T 2650-89,焊接接头的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,而冲击试验为 V 形缺口标准试样。维氏硬度试验根据 GB/T 2654-2008《焊接接头硬度试验方法》进行,载荷设为 300N,保压时间为 10~15s。在 AMRAY-1000B 型扫描电子显微镜上对-40℃的冲击断口进行扫描,以分析断裂

形式和断裂过程。

3 试验结果及讨论

3.1 焊接接头微观组织特征

图 1 所示为四种焊缝区的微观组织, 取样部位在垂直于焊缝的横截面中心, 属于多层焊接。从图 1 可以看出, 4 种接头焊缝组织均为回火索氏体+板条马氏体+残余奥氏体+二次析出相。其中呈平行状的为板条马氏体, 它与回火索氏体相互交错排列, 形成编织状; 在晶界处有少量残余奥氏体, 二次析出相则散布于晶界和晶粒内部, 主要起沉淀强化作用。

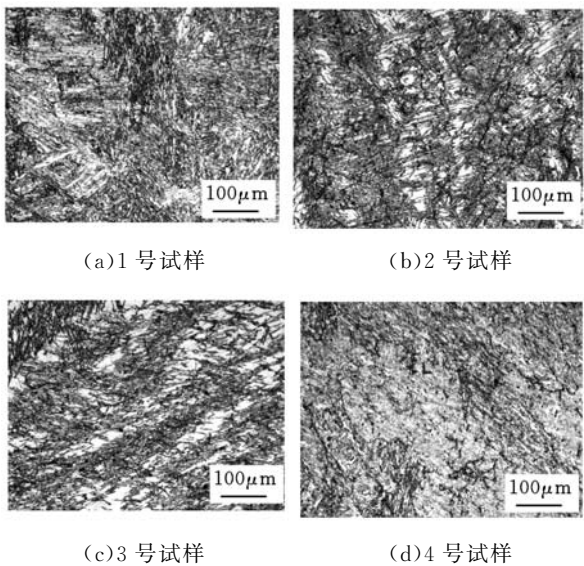


图 1 焊接接头焊缝区微观组织

根据马氏体沉淀硬化不锈钢的冶金特点和能谱分析, 析出的二次相为 ϵ -Cu、NbC、 Mo_2C_3 、 Cr_{23}C_6 、 Cr_7C_3 、Ti(C, N)。当温度升高到 A_{c3} (830°C) 线以上时, 奥氏体中溶入了较高含量的 Cu、Nb、Ti 等合金元素, 而当温度下降至 A_{c3} 线以下时奥氏体开始分解, 获得了过饱和 Cu、Nb、Ti 马氏体, 基体得到了一定程度的强化; 再经过时效处理后, Cu、Nb、Ti 等沉淀硬化元素以极细的质点形式析出, 这种析出质点可能是合金元素的质点也可能是金属间化合物的质点, 弥散于基体上的析出质点对接头组织起到了强烈的沉淀强化作用。奥氏体化后空冷形成的马氏体具有较大的淬火倾向, 由于马氏体形成温度较低 (M_s 为 155°C), 因此奥氏体转变不完全, 室温组织有部分奥氏体存在, 称为残余奥氏体 (A'), 而 A' 的存在在形貌、数量和位置影响着接头组织的综合力学性能。

图 2 所示为四种热影响区 (HAZ) 的微观组织, 取样部位在垂直于焊缝的横截面熔合线 HAZ

区, 属于多层焊接。从图 2 中可以看出, HAZ 区组织均为回火索氏体+板条马氏体+残余奥氏体+二次析出相。对比图 1 可知, HAZ 区的 S_H 与板条 M 的晶粒尺寸比焊缝区细小, A' 的数量有所减少, 二次相分布更为均匀。

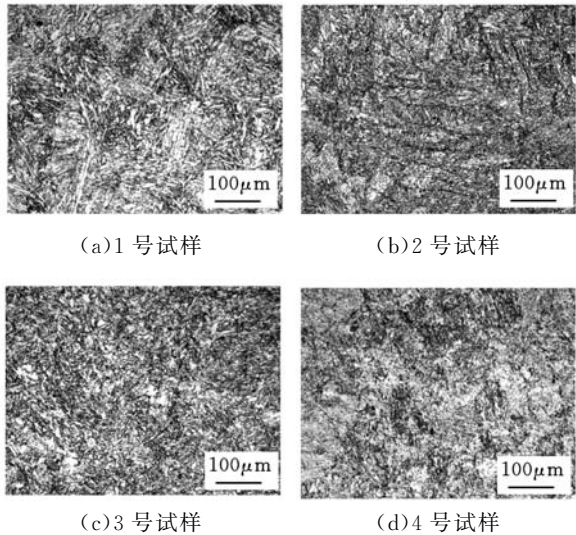


图 2 焊接接头 HAZ 区微观组织

熔合区的 S_H 与板条 M 的晶粒尺寸比焊缝区粗大, A' 的数量有所减少, 二次相分布更为均匀。由于奥氏体相变不完全, 铁素体一般沿着凝固晶界和亚晶界出现或者分布在马氏体相内或其周围^[16], 这和奥氏体不锈钢中出现的“骨架”铁素体形成的机理相似。在冷却时也会有一些碳化物析出, 这取决于冷却速度, 这些碳化物一般是 $M_{23}C_6$ 和 M_7C_3 型, 这里的 M 主要是 Cr 和 Fe。

细晶区马氏体变得细小, 残余奥氏体有所减少。在焊接过程中当温度加热到奥氏体区时, 碳化物开始溶解但是溶解不完全, 奥氏体晶粒长大也不显著。这是由于晶粒长大时温度降低, 也即所需要的过冷度不足, 同时还由于母材中未溶解的碳化物起了钉扎作用。碳化物不能溶解使奥氏体的含碳量降低, 冷却后形成的马氏体的硬度也随之较低。

在靠近母材区域的混晶区内, 经过 $800\sim 950^\circ\text{C}$ 区间时, 碳化物变粗而形成了比母材软的区域。在含碳量增加的情况下, 高温奥氏体+铁素体两相区将缩小并最终消失, 这会使熔合线软化区消失, 这是由于奥氏体相变产生的未回火的马氏体区将一直延伸到熔合区^[16]。经过高温回火后, 组织中会形成富铬碳化物和(或)合金碳化物, 并使得马氏体的 BCT(体心正方)晶体结构转变为铁素体的 BCC(体心立方)结构。

3.2 焊接接头力学性能分析

在相同的焊接和热处理工艺制度下, 本文对

四种焊接接头的综合力学性能进行了测试,表 3 为常温力学性能测试结果,表 4 为冲击试验结果,图 3 为维氏硬度值对比图。

表 3 四种焊接接头的常温力学性能

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
1 号	989	824	12.8	53.3	偏离焊缝
2 号	985	831	12.2	52.5	偏离焊缝
3 号	991	828	13.3	56.7	偏离焊缝
4 号	956	790	11.8	48.3	焊缝

表 4 四种焊接接头的冲击试验结果

试样	冲击韧性 A_{kv} (J)			断裂位置
	20℃	0℃	-40℃	
1 号	50.3	32.5	19.6	焊缝
2 号	47.2	29.4	25.8	
3 号	52.4	36.8	22.6	
4 号	36.5	20.2	16.4	

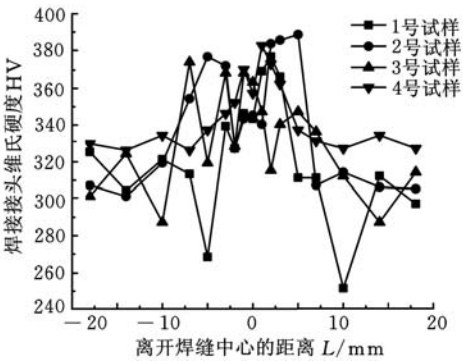


图 3 四种焊接接头维氏硬度值

从表 3 可以看出,本文研制的焊条接头的抗拉强度和屈服强度均高于 4 号试样,而同时却表现出了基本相同的断后伸长率和断面收缩率。这是由于 1 号、2 号、3 号焊缝处含有大量板条马氏体和少量残余奥氏体,而 4 号焊缝还含有少量夹杂物和析出相,从而降低了界面之间的结合能;另外由于 4 号试样在焊接过程中的焊接线能量大于 1 号、2 号、3 号试样的焊接线能量,导致其晶粒粗大,强度下降。1 号、2 号、3 号接头均断裂于偏离焊缝处,4 号接头断裂于焊缝,由此说明所研制焊条接头的强度与母材接近,而 4 号接头强度略低于母材。

从表 4 可以看出,1 号、2 号、3 号焊条接头的常温和低温冲击韧性均高于 4 号,所研制焊条的冲击韧性在各个温度点下基本相同,四种接头的断裂位置均在焊缝处,这是由于所研制焊条中添加了 Mo、Nb、Cu、Ti 等合金元素,这些元素起到了细化晶粒和扩大奥氏体区域的作用,减少 1 号、2 号、3 号焊缝组织中的残余奥氏体含量的同时也提高了接头的强度和冲击韧性,图 1 和图 2 证实

了上述结果。

从图 3 可以看出,1 号焊接接头 HAZ 区出现了软化,2 号焊缝出现了硬度较高的点,3 号和 4 号焊接接头硬度变化相对较为平缓;母材的维氏硬度值为 310HV30,焊缝区硬度值为 360HV30,四种接头的维氏硬度值变化趋势基本一致,各区域硬度相差无几,即母材处的硬度值一致且均低于焊缝区。这是由于四种接头焊缝区的金相组织均为马氏体+回火索氏体+残余奥氏体+析出物,其综合效果体现在硬度值的变化趋势上。

3.3 焊接接头冲击断口分析

图 4 为四种焊缝区在-40℃时冲击断口扫描结果。从图 4a、图 4b、图 4d 中可以观察到大量短而弯曲的撕裂棱线条,断口局部区域出现了较浅的韧窝从而表现出较小的韧性,因此可以推断其断裂机制为准解理断裂。从图 4c 中可以看出 3 号试样接头冲击断口由数量较多的细而浅的韧窝和少量撕裂棱线条组成,由此可知其断裂机制为韧窝加解理的复合型断裂。微观金相分析表明,3 号试样的组织最为均匀并且析出物也细小,这为韧窝的形成提供了必要条件,韧窝越多韧性越好,这与冲击试验结果相一致。与上述热处理条件相同的母材在-40℃下的冲击断裂机制为微孔聚合型断裂,断口具有韧窝形貌从而表现出了较大的韧性,这也是焊缝区冲击韧性远低于母材的原因。

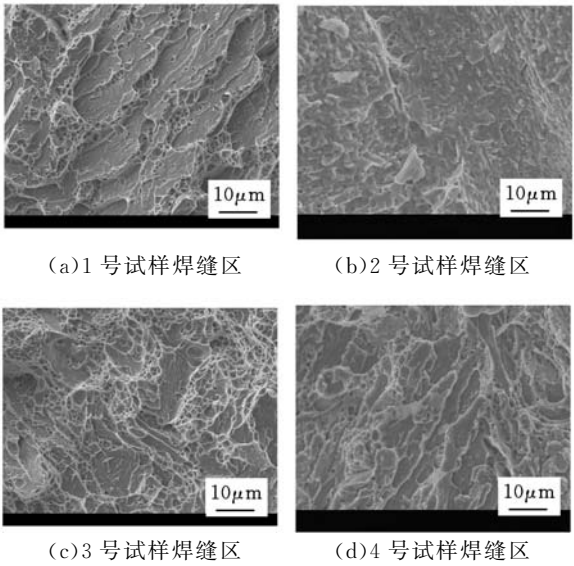


图 4 -40℃时四种焊缝区冲击断口扫描

4 焊条的工艺性能

综上所述,3 号试样的综合力学性能较为优异,为此本文对 3 号和 4 号焊条的工艺性能进行了对比测试,测试结果如表 5 所示。从表 5 可以看出,3 号焊条的脱渣性和稳弧性良好,成形美

观,烟尘和飞溅都较少,发红情况一般,而起弧性比 4 号焊条差一些。

表 5 焊条工艺性能比较

试样号	起弧	稳弧	烟尘	飞溅	发红	脱渣	成形
3 号	一般	良好	良好	良好	一般	好	好
4 号	良好	一般	良好	一般	一般	良好	良好

焊条脱渣性好的条件是:焊缝金属与焊渣间线膨胀系数差值较大,两者间没有生成尖晶石氧化物,焊渣松脆^[17]。在试验中发现,药皮组分中 TiO₂与硅铝酸盐的比例以及萤石、金属锰、元素硅等对焊条的脱渣性有重要影响,而药皮厚度对脱渣性也有影响。适宜的熔滴过渡形式对稳弧性和起弧性有重要影响,粗熔滴与细熔滴配比合理的渣壁过渡才能对工艺性起到积极作用。

5 结论

(1)通过向沉淀硬化不锈钢 FV520(B)焊缝金属中过渡 Mo、Nb、Ti、Cr 等合金元素,使得马氏体的 BCT(体心正方)晶体结构转变为铁素体的 BCC(体心立方)结构,同时它们的富铬碳化物和合金碳化物 Mo₂C₃、NbCrN、Ti(C,N)提高了熔敷金属的强韧性。

(2)焊缝区和 HAZ 的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;断口分析表明 1 号、2 号、4 号焊条的断裂机理为准解理断裂,3 号焊条的断裂机理为韧窝加解理的复合型断裂,故而表现出较好的综合力学性能。

(3)以 Cr-Ni-Nb-Cu-Ti 为主要合金系的焊条,其焊接接头的抗拉强度和屈服强度高于现有的 FV520(B)专用焊条,相同试验条件下的冲击韧性亦高于 4 号焊条。

参考文献:

[1] 李志,支敏学,刘天琦,等. 新型超高强度高韧性马氏体沉淀硬化不锈钢的组织 and 力学性能初探[J]. 航空材料学报,2000,20(3):1-5.

[2] Nakagawa H, Miyazaki T, Yokota H. Effects of Aging Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of 1.8Cu-7.3Ni-15.9Cr-1.2Mo-low C,N Martensitic Precipitation Hardening Stainless Steel[J]. Journal of Materials Science, 2000,35(9):2245-2253.

[3] Isogawa S, Yoshida H. Improvement of the Formability of 17-4 Precipitation Hardening Stainless by Ausforming[J]. Materials Processing Technology,

1998,74:298-306.

[4] Ping D H, Ohnuma M, Hirakaw Y A, et al. Microstructural Evolution in 13Cr-8Ni-2.5Mo-2Al Martensitic Precipitation-hardened Stainless Steel[J]. Materials Science and Engineering, 2005, (1/2):285-295.

[5] 牛靖,董俊明,付永红,等. FV520(B)钢时效组织和力学性能分析[J]. 热加工工艺,2006,35(4):33-36.

[6] 张文钺. 焊接冶金学(基本原理)[M]. 北京:机械工业出版社,1999.

[7] Farrar R A, Harrison P L. Acicular Ferrite in Carbon-manganese Weld Metals:an Overview[J]. Mater Set,1987,22(12):3812-3820.

[8] Musiyachenko V E, Kasatkin O G. Calculating the Optimum Alloying of the Weld Metal When Welds are Made in High-strength Low-alloy Steels[J]. Autom Weld,1976,30(11):12-17.

[9] Ohkita S, Homma Tsushima H, et al. The Effect of Oxide Inclusions on Microstructure of Ti-B Containing Weld Metal[J]. Australian Weld Journal, 1984,29(3):29-36.

[10] Evans G M. The Effect of Titanium on the Microstructure and Properties of C-Mn All-weld Metal Deposits[J]. Welding Journal,1993,72(3):123-133.

[11] 杨军,薛锦,段立宇. Ti-B 微量合金化元素对焊缝金属韧性的影响机制[J]. 西安交通大学学报, 1999,33(1):97-101.

[12] 尹士科,张小牧. 碳钢及低合金钢焊接接头性能调控与应用[M]. 北京:兵器工业出版社,1993.

[13] 余宗森. 钢中稀土[M]. 北京:冶金工业出版社,1982.

[14] 金宝士,李慕勤,马臣,等. 轻稀土对低合金钢焊缝韧性的影响[J]. 中国稀土学报,2002,20(1):53-56.

[15] 埃里希·福克哈德. 不锈钢焊接冶金[M]. 栗卓新,朱学军,译. 北京:机械工业出版社,2004.

[16] Pollard B. Selction of Wrought Precipitation-hardening Stainlels in ASM Metals Handbook[J]. ASM International Materials Park. OH, 1993, 6(10):482-494.

[17] 赵卫民,王炳英. 药皮组分对不锈钢焊条工艺性能的影响规律[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001,25(2):110-115.

(编辑 陈 勇)

作者简介:张 敏,男,1967 年生.西安理工大学材料科学与工程学院教授、博士。主要研究方向为新型焊接材料、焊接结构断裂强度。获中国专利 7 项。发表论文 70 余篇。李 岩,男,1984 年生.西安理工大学材料科学与工程学院硕士,西安陕鼓动力股份有限公司助理工程师。李继红,男,1973 年生.西安理工大学材料科学与工程学院讲师、博士。吕金波,男,1985 年生.西安理工大学材料科学与工程学院硕士研究生。