

低频磁场对轧辊埋弧堆焊组织及性能的影响 *

常云龙¹, 梅 强¹, 张 伟², 夏云才², 谢天男¹

(1. 沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110870; 2. 大连重工·起重集团有限公司 硬面技术研究所 辽宁 大连 116052)

摘 要: 为提高堆焊层熔敷金属的力学性能, 在轧辊埋弧堆焊过程中外加低频脉冲纵向磁场, 通过对堆焊层硬度和显微组织的分析, 研究了磁场参数对轧辊埋弧堆焊层金属组织及力学性能的影响规律。通过对不同磁场参数下堆焊表层试样的硬度及其组织的分析, 发现低频脉冲纵向磁场的电磁搅拌作用能够影响晶粒的形核与长大过程, 细化晶粒, 提高堆焊层硬度, 探讨了低频纵向磁场改善堆焊层金属的组织形态、细化晶粒和提高硬度的机理。结果表明: 当磁场参数为 $I_p=300\text{ A}$, $I_b=200\text{ A}$, $f=5\text{ Hz}$ 时, 焊缝组织细化最为明显, 晶粒尺寸减小到 $30.1\text{ }\mu\text{m}$, 硬度比不加磁场时提高了 4.5 HRC。外加低频纵向磁场通过电弧的旋转来搅拌熔池, 改变晶粒的结晶过程, 使焊缝晶粒得到细化, 提高堆焊层硬度。

关键词: 纵向磁场; 堆焊; 晶粒细化

中图分类号: TG455

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2011)06-0098-06

Effect of Low-frequency Magnetic Field on the Microstructure and Mechanical Property of Submerged-arc Deposited Metal on Roll

CHANG Yun-long¹, MEI Qiang¹, ZHANG Wei², XIA Yun-cai², XIE Tian-nan¹

(1. School of Material Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870; 2. Hardface Technology Institute, DHI DCW Group Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116052)

Abstract: In order to improve the mechanical properties of the overlaying welding layer deposited metal, the additional low-frequency impulsion longitudinal magnetic field was applied during the submerged arc overlaying welding on roll. The effect of low-frequency magnetic on metal microstructure and mechanical property of the deposited metal on roll was studied through analysing overlaying welding layer hardness and microstructure. The electro-magnetic stirring effect of the low-frequency impulsion longitudinal magnetic field can affect the crystal nucleation and growth process. The crystal grain is refined. The overlaying welding layer hardness is improved. Through analysing the different of parameters, hardness and microstructure of overlaying welding layer samples, the mechanism how the metal microstructure shape and hardness are improved and the crystal grain is refined by additional low-frequency longitudinal magnetic field has been discussed. The results indicated that microstructure of weld is refined clearly, crystal grain size is reduced to $30.1\text{ }\mu\text{m}$, and compared to without magnetic field hardness increased 4.5 HRC when peak magnetic field current is 300 A, background magnetic field current is 200 A and magnetic field frequency is 5 Hz. Molten pool is stirring by the additional low-frequency longitudinal magnetic field, the solidification process is charged, the crystal grain is refined and overlaying welding layer is improved.

Key words: longitudinal magnetic field; overlaying welding; crystal grain refinement

0 引 言

采用堆焊方法修复的复合轧辊, 不但成本低, 而且能提高轧辊使用寿命, 降低轧辊耗量, 合理使用及节约合金元素, 并能够提高轧机的作业

率和质量, 是一种有效的技术经济措施^[1]。然而辊类产品中大多要求高硬度、高耐磨性, 而焊接接头的内部晶粒结构显著影响焊缝金属的强度等性能, 因此细化晶粒是提高熔敷金属力学性能的一种很好的方式。外加纵向磁场可以对电弧特性产生影响^[2], 进而对熔池液体金属结晶过程中的传热和传质过程产生影响, 即对熔池的形核和结晶生长进行干预, 使焊缝金属一次

收稿日期: 2011-09-06; 修回日期: 2011-11-11

基金项目: * 沈阳市人才专项(2008030103055); 辽宁省教育厅重点实验室项目(2009S072)

作者简介: 常云龙(1963—), 男(汉), 山西新绛人, 教授, 博士。

结晶组织细化,减小化学不均匀性,从而提高焊缝金属的性能^[3]。目前,国内对埋弧堆焊的研究较多,但是将磁场引入堆焊过程进行轧辊修复,还处于研究阶段。因此,文中对磁控埋弧堆焊进行了工艺参数的优化。

1 电磁搅拌的基本原理

电磁搅拌就是在外加磁场作用下,使带电粒子在磁场力的作用下发生漂移旋转,宏观表现为焊接电弧的旋转,带动熔池金属作复杂的循环运动从而改变了焊缝金属的结晶条件,细化了焊缝组织的晶粒,进而改善金属性能。文中利用脉冲交变纵向磁场,线圈安装在埋弧焊枪的导电嘴上,通过改变励磁电源的输出电流和频率来调节线圈的磁场,磁力线方向与电弧轴线平行,并以电弧轴线为中心形成轴对称分布。图 1 为磁控堆焊装置示意图。图 2 为励磁电流波形图。

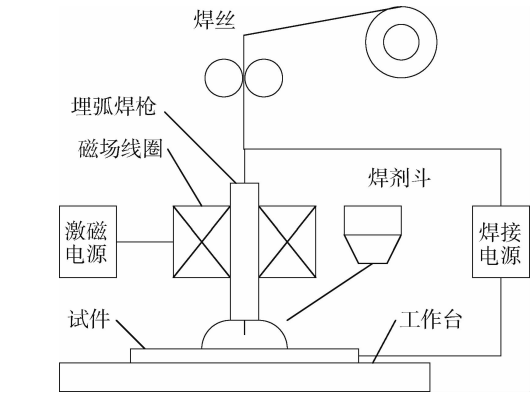


图 1 磁控堆焊装置示意图
Fig. 1 The sketch map of the magnetic control welding device

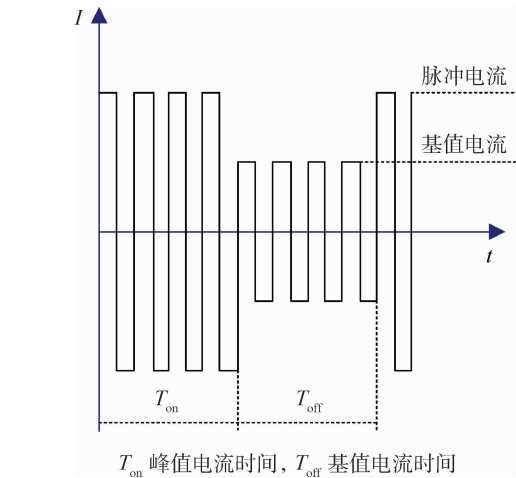


图 2 交流脉冲方波的电流波形
Fig. 2 Current waveform of the exchange pulse square wave

通常条件下,熔池金属连续冷却,结晶速度取决于焊接速度,焊接热输入等。如图 3 所示,过冷度的大小取决于平衡温度 T_L 与实际温度 T_a 之间距离,距离越大过冷度越大。此外过冷度对焊缝金属结晶组织的横向尺寸有影响,在纵向交变磁场作用下,电弧周期性正反向交变旋转,从而带动熔池中液态金属流动,使电弧周边高温金属流向熔池末端,打断了先长大的枝晶,重新溶入熔池的枝晶成为异质形核源,进而增加了形核率;同时电磁搅拌作用改变了结晶前沿的温度及温度梯度,从而创造了细化结晶组织的条件^[4]。

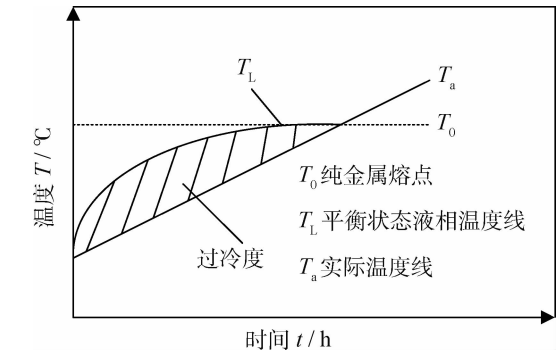


图 3 金属结晶示意图^[4]
Fig. 3 The sketch map of metal crystallization^[4]

2 试 验

2.1 试验材料

试验选用 ZY-YD245-S 焊丝,焊丝直径为 3.2 mm,成分如表 1 所示,母材成分如表 2 所示,焊剂选用 SJ400。

表 1 焊丝化学成分(质量分数/%)				
Table 1 Chemical composition of the welding wire (w/%)				
元素	C	Mn	Si	Cr
质量分数	0.20~	2.00~	0.20~	3.00~
	0.50	4.00	0.80	5.00
元素	Mo	Ni	其他	
质量分数	2.00~3.50	3.00~5.00	余量	

表 2 母材化学成分(质量分数/%)				
Table 2 Chemical composition of the base metal (w/%)				
元素	C	Mn	Si	Cr
质量分数	0.40~	0.35~	0.40~	4.50~
	0.58	0.70	0.70	5.50
元素	Mo	Ni	V	其他
质量分数	0.45~0.60	0.40~0.50	0.10~0.20	余量

2.2 试验设备及方法

试验采用 LINCOLN IDEALARC DC-1000 焊机,外加磁场是交流纵向磁场,由自制励磁电源产生,该磁场通过安装在导电嘴上的线圈产生,磁力线方向与电弧轴线平行,并以电弧轴线为中心成轴对称分布。磁场的激磁电流为双向脉冲方波电流,占空比为 50%,输入电压 380 V,最大输出电流 500 A,频率:1~50 Hz。焊接工艺参数如表 3 所示。

表 3 焊接工艺参数

Table 3 Parameters of the welding procedure

参数	数值
焊接电压/V	26
焊接电流/A	300
焊接速度/(mm·min ⁻¹)	248
磁场频率/Hz	1~50
激磁电流/A	0~500
占空比/%	50
干伸长/mm	15

对轧辊进行埋弧堆焊后,采用洛氏硬度计测量堆焊层合金表面的宏观硬度。采用立式金相显微镜 XJL-02A 观察焊缝断面金相组织。在金相试验后,将试件加工成 10 mm×8 mm×3 mm 的试样,进行 X 射线衍射分析。利用荷兰 PW30400160 型 X 射线衍射仪对堆焊层金属进行物相分析,研究其微观组织,找出强化机理,最后对测试的结果进行整理、分析和讨论。

2.3 焊前预热与层间保温

预热的主要目的是降低堆焊过程中堆焊金属及热影响区的冷却速度,降低淬硬倾向并减少焊接应力,防止母材和堆焊金属在堆焊过程中发生相变导致裂纹产生。预热温度的确定需依据母材以及堆焊材料的碳和合金的质量分数(%)而定,可参考经验公式^[1]:

$$T_0(^{\circ}\text{F})=1020-630w(\text{C})-72w(\text{Mn})-63w(\text{Si})-36w(\text{V})-36w(\text{Cr})-31w(\text{Ni})-18w(\text{Cu})-18w(\text{Mo})-9w(\text{W})+27w(\text{Co})+54w(\text{Al}) \quad (1)$$

其中, $^{\circ}\text{C}=5/9(^{\circ}\text{F}-32)$

堆焊轧辊是多层多道焊,如果道间温度不足,就相当于预热温度偏低,起不到防止裂纹的作用^[5]。堆焊过程中应控制预热及层间温度高于 Ms 点,避免堆焊金属发生马氏体相变及淬回

火效应,应使整个堆焊层焊完之后在热处理电炉中同时进行马氏体转变,只有这样才能保证堆焊层的组织、硬度均匀性^[1]。由于支承辊母材及堆焊材料的合金含量均相对较高,另外支承辊的尺寸及堆焊厚度均较大,焊接应力大,故应尽量提高预热和层间温度,同时又要考虑到实际操作上容许程度。因此在试验中将预热温度确定为 300~350℃,层间温度控制在 400~450℃。

3 试验结果及分析

为了更准确的研究外加低频纵向磁场对堆焊层组织及性能的影响规律,分别在 $I_p=240\text{ A}$ 、 270 A 、 300 A 情况下,改变 I_b 的值,以找到合适的磁场参数。表 4 为试验所选磁场参数(其中: I_p 为峰值电流, I_b 为基值电流, f 为激磁频率, D 为占空比)。

表 4 磁场参数

Table 4 Parameters of the magnetic field

序号	I_p/A	I_b/A	f/Hz	$D/\%$
1 号	240	160	5	50
2 号	240	160	8	50
3 号	270	160	5	50
4 号	270	160	8	50
5 号	300	160	5	50
6 号	300	160	8	50
7 号	300	200	5	50
8 号	300	200	8	50
9 号	无磁场			

3.1 磁场参数对堆焊层组织的影响

图 4 是堆焊表层在有、无磁场条件下的金相组织对比图。

由于堆焊层中含有一些合金元素,焊接冷却后容易获得马氏体或者贝氏体等非平衡组织。如图 4(i)所示,无磁场时堆焊表层焊缝的金相组织呈现出焊缝经历一次结晶后所形成的粗大的枝晶特征,组织比较粗大,枝晶方向性非常明显,且具有很强的连续性。当外加低频纵向磁场时,组织形态发生了不同程度的变化,当 $I_b=160\text{ A}$ 、 I_p 分别=240 A、270 A、300 A 时,对比发现在 $I_p=300\text{ A}$ 时,轮廓线变得细密网状,柱状晶的轮

廓形态和 4(i)相比不明显,轮廓变得模糊。这是因为在一定的磁场强度范围内,随着外加磁场电流的增大,磁场强度增强,磁场对熔池的搅拌作用也因而加强,焊接电弧旋转并扩张,熔池液态金属作复杂的循环运动,熔池头部高温液态金属被推向尾部,此外还受到结晶前沿的温度提高及温度梯度降低等因素的影响,使结晶前沿存在较强的液相流动,使枝晶折断,重新熔化,堆焊层一

次结晶组织细化程度提高。在 $I_p=300\text{ A}$ 时分别使 $I_b=160\text{ A}$ 和 200 A ,并且调节磁场频率 $f=5\text{ Hz}$ 和 8 Hz 进行金相实验,发现以 7 号($I_p=300\text{ A}$, $I_b=200\text{ A}$, $f=5\text{ Hz}$)试样组织变化最为明显,晶粒得到了细化,部分枝晶方向发生了改变,不再是始终指向一个方向,轮廓线变得模糊,出现了断续的现象;晶内则析出了较多晶粒细小的板条状和针状马氏体。

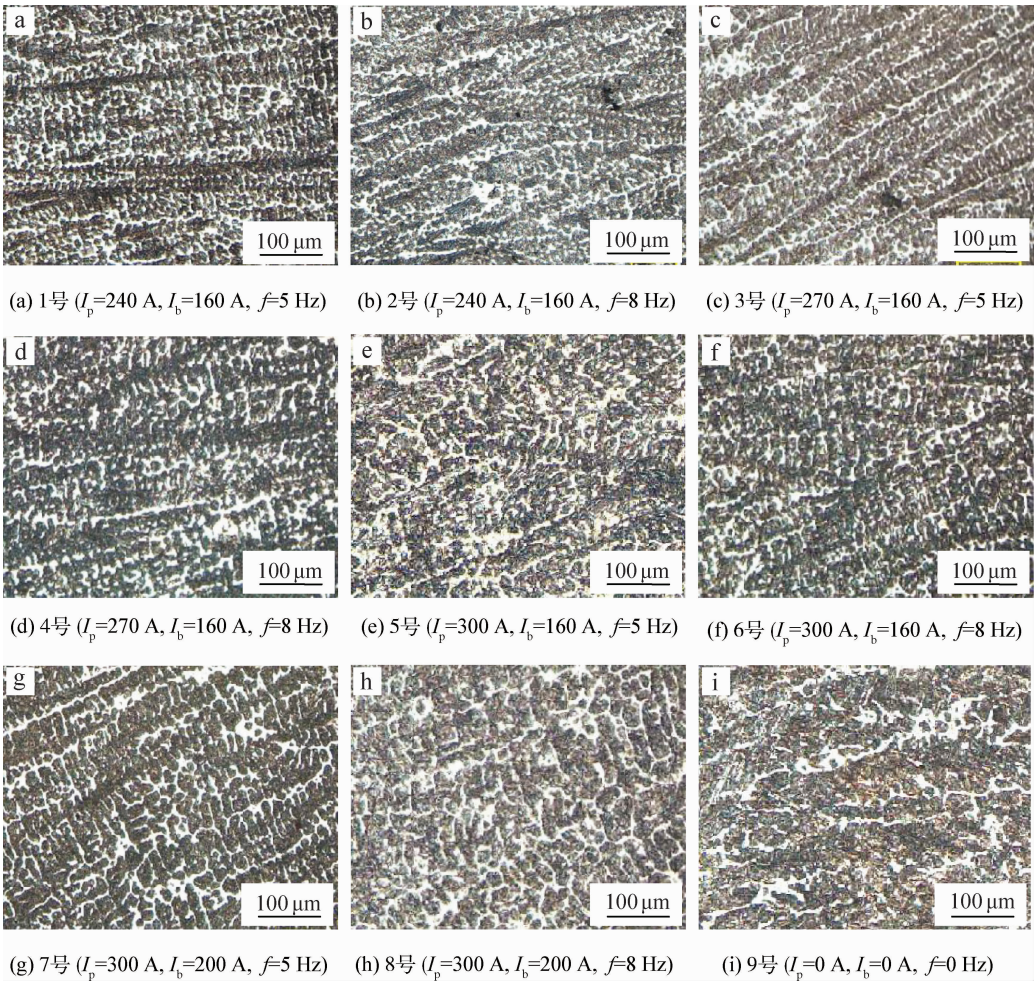


图 4 堆焊表层金相组织

Fig. 4 Metallurgical structure on the bead weld surface

根据金属凝固理论,晶粒组织形态及尺寸受形核率和过冷度的规律影响。当有磁场作用时,电磁搅拌细化晶粒主要是通过 3 个途径增加形核率^[6]:①熔池尾部的枝晶碎片;②熔池边缘半熔化晶粒的分离;③异质形核粒子。晶核形成后的长大过程中,电磁搅拌作用改变了熔池形状,电弧带动熔池液态金属作旋转运动,使焊接熔池温度梯度减小,温度也变得均衡;另外随着磁感应强度的增加,电弧带动熔池金属的流动速度增

加,传热方向被改变,扩散过程加快^[3]。因此,枝晶晶粒沿最大散热反方向生长的时间变短,从而减小晶粒尺寸。另外加磁场能引起相变加速。马氏体是铁磁相,而奥氏体是顺磁相,加磁场可以在母相和产物之间产生附加的自由能差,促进马氏体转变、细化晶粒,增加了晶界和亚晶界的比表面积,使位错数量增多,残余奥氏体量相对减少,从而提高堆焊层硬度。同时,磁滞收缩导致马氏体和母相奥氏体的点阵畸变,产生弹性畸

变能,促使马氏体的形核与转变,从而细化马氏体组织^[7]。

另外控制凝固的电磁力作用并非越大越好,只有合理的控制激磁电流的大小,才能合理的控制结晶。利用磁场控制结晶过程,磁场的作用包括磁场和电场交互作用产生电磁搅拌和抑制熔体流动两个方面。过大的纵向磁场,电磁阻尼作用将占主导地位,抑制了熔化金属的对流,因而热量的对流传输受到抑制,使温度起伏减少,晶粒变得粗大,导致堆焊层的性能下降^[7]。

为更清晰地探究堆焊层组织的组成,对 7 号($I_p=300\text{ A}$, $I_b=200\text{ A}$, $f=5\text{ Hz}$)试样进行了 X-射线衍射分析,将试件加工成 $10\text{ mm}\times 8\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 的试样,结果如图 5 所示,堆焊层组织主要由 $\text{Cr}_{26}\text{Fe}_{174}$ (马氏体)基体和 $\text{CFe}_{15.1}$ (奥氏体)组成,堆焊层主要是由焊丝熔化而成,焊丝中含有 C、Si、Mn、Ni、Cr 等元素,在冷却过程中又形成了少量的化合物 CrMn_3 和 $\text{Cr}_3\text{Ni}_2\text{Si}$ 。

X 射线衍射分析的结果显示,堆焊层中显微组织以马氏体基体为主,伴有奥氏体及化合物。焊丝中含有 C 及合金元素 Cr、Si、Mn、Ni 等,在快速冷却的条件下,生成 Cr、Ni 等化合物,这些化合物的出现使得堆焊层的性能进一步提高。

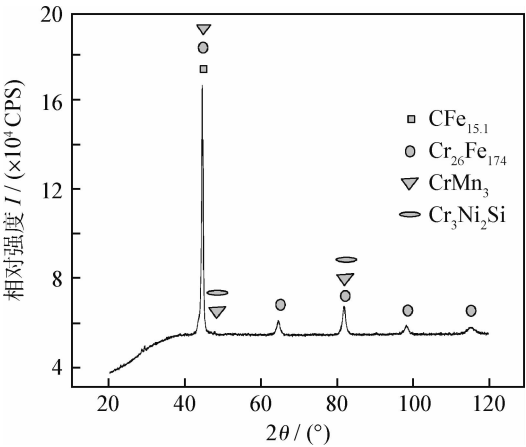


图 5 堆焊层金属 X-射线衍射谱

Fig. 5 X-ray diffraction spectrum of bead weld metal

3.2 磁场参数对堆焊层硬度的影响

采用 HRC-150 型洛氏硬度计测量堆焊合金表面的宏观硬度(HRC)。测试时在堆焊层表面上均匀的测 5 点硬度,然后取平均值,用其平均值来衡量试件堆焊层表面硬度。图 6 是不同磁场参数下堆焊层金属的平均硬度值。

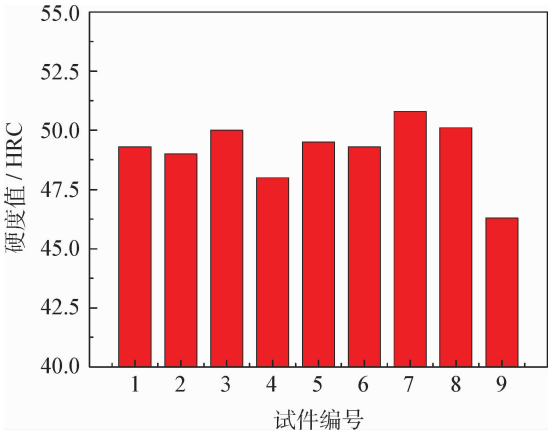


图 6 硬度随磁场电流的变化规律

Fig. 6 Hardness change with the magnetic current

从图 6 中可以看出,无磁场时硬度值为 46.3 HRC,外加低频纵向磁场后,熔敷金属的硬度均有不同程度的提高,其中 7 号($I_p=300\text{ A}$, $I_b=200\text{ A}$, $f=5\text{ Hz}$)件的硬度提高程度最为明显,硬度值提高到 50.8 HRC,提高了 9.7%。但当在保证激磁电流不变,使用磁场频率 $f=8\text{ Hz}$ 时,即 8 号($I_p=300\text{ A}$, $I_b=200\text{ A}$, $f=8\text{ Hz}$),硬度值反而略微下降。这说明在磁场和电场交互作用下产生的抑制熔体流动作用增大。只有当磁场参数适当,电磁搅拌起主导作用时,枝晶细化,并促进马氏体转变,有利于提高金属硬度,改善力学性能。但磁场参数不合适时,抑制熔体流动起主要作用,磁场对液体金属产生的电磁阻尼作用占主导地位,此时将抑制热量传输,使晶粒变得粗大,硬度下降。外加纵向磁场使电弧产生旋转,改变弧柱等离子流和电流密度的径向分布,影响母材的加热熔化和焊缝成型;通过电磁搅拌的作用,改变焊接熔池液态金属结晶过程中的传热和传质过程,从而改变晶粒的结晶方向,细化一次组织,减少偏析,提高堆焊层的力学性能^[8]。但当磁场强度和焊接规范不相匹配时,电磁搅拌效果变差,降低堆焊层质量。因此,在磁场作用下进行堆焊过程中,磁场参数的选择具有重要的意义,它直接影响堆焊层金属的性能。

3.3 磁场参数对堆焊层晶粒尺寸的影响

为研究组织细化程度,根据 GB/T6394-2002《金属平均晶粒度测定方法》的规定^[9],采用横向面截距法,对比测量晶粒细化程度。截距法是通过统一一定长度的一条或几条线段上所截的晶粒个数,计算出晶粒平均截距来测定晶粒度

的大小,计算公式如式(2):

$$S = \frac{L}{M \times P} \tag{2}$$

式中: L 为所使用的测量线段(或网络)长度,单位毫米(mm); S 为试样检验面上(1×)晶粒截距的平均值; M 为观测时放大倍数; P 为测量网络上的节点数。

表 5 为熔敷金属晶粒尺寸测量值,根据测量结果可知,堆焊时,外加低频磁场可以细化晶粒,晶粒的细化程度随磁场强度变化,当 7 号($I_p=300\text{ A}$, $I_b=200\text{ A}$, $f=5\text{ Hz}$)时,晶粒细化程度最好,晶粒尺寸为 $30.1\text{ }\mu\text{m}$;其次是 8 号($I_p=300\text{ A}$, $I_b=200\text{ A}$, $f=8\text{ Hz}$)时,晶粒尺寸为 $30.8\text{ }\mu\text{m}$ 。一般认为晶粒细化是电磁搅拌的结果,一次结晶过程本身包括两个过程,即晶粒的形核和晶粒的生长。焊接熔池金属的凝固是在特殊的条件下(存在着基本金属的半熔化晶粒,正温度梯度,较小的熔化金属体积,随着加热热源的移动而移动的温度场)进行的。这些特殊条件有利于晶粒从基体金属的半熔化晶粒上生长,如同现成垫板一样^[10]。电磁作用对焊缝金属的一次结晶特性有影响,外加磁场作用在焊接熔池结晶的金属上,在一定的磁感应强度值时,迫使熔体做复杂的位移运动和蜗旋运动。该运动改变了液态金属中质量和热量的交换过程,并且给结晶前沿施加附加的动压力,使得位错数量增大,在高温情况下,在结晶前沿之后的固相中,会发生位错重新分布的过程,这引起了相反符号位错的消失和形成稳定的能量上有利的二次(多边形)晶界的形状。随着位错密度的提高,二次晶界的长度增加,从而就导致了组织的细化^[3]。

表 5 熔敷金属晶粒尺寸测量值(μm)
Table 5 Measured value of grain size for deposited metal(μm)

试件	晶粒尺寸平均值
1 号	36.5
2 号	31.7
3 号	34.4
4 号	35.4
5 号	36.5
6 号	32.5
7 号	30.1
8 号	30.8
9 号	43.1

4 结 论

- (1) 在低频磁场作用下,堆焊层硬度比不加磁场时均有一定提高,且晶粒也得到一定细化。
- (2) 在磁场参数为 $I_p=300\text{ A}$, $I_b=200\text{ A}$, $f=5\text{ Hz}$ 时,电磁搅拌促进马氏体转变,堆焊层硬度提高到 50.8 HRC,比不加磁场提高了 9.7%,可以确定此时的磁场参数为最佳。
- (3) 控制凝固的电磁力并非越大越好,需要通过试验来确定合理的磁场参数,只有在合理的磁场作用下才能获得最佳堆焊效果。

参考文献

[1] 沈凤刚,刘景凤. 冶金轧辊堆焊技术综述 [J]. 中国表面工程, 2006, 19(3): 14-19.

[2] Размышляев. А. Д., Миронова. М. В., Дели. А. А. . Влияние продольного магнитного поля на характеристики дуги при сварке неплавящимся электродом в аргоне [J]. Автоматическая сварка, 2008(3): 21-25.

[3] 阿勃拉洛夫 М А, 阿勃杜拉赫曼洛夫 Р Y. 韦福水, 路登平, 译. 电磁作用焊接技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.

[4] 苏允海, 刘政军, 王玉, 等. 磁场参数对 AZ31 焊接接头组织和性能的影响 [J]. 焊接学报, 2007, 28(5): 45-48.

[5] 丁洁, 申茜辉. 轧辊堆焊工艺 [J]. 焊接技术, 2005, 34(2): 64-65.

[6] Kou S, Le Y. Improve weld quality by low frequently arc oscillation [J]. Welding Journal, 1985, 64(3): 51-55.

[7] 刘政军, 刘景铎, 牟力军, 等. 磁场强度对重熔层耐磨性的影响 [J]. 焊接学报, 2001, 22(5): 73-75.

[8] 刘政军, 程江波, 刘銘, 等. 外加纵向磁场对堆焊层金属性能的影响 [J]. 焊接技术, 2006, 35(1): 16-18.

[9] 全国钢标准化技术委员会. GB/T 6394-2002 金属平均晶粒度测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.

[10] 胡汉起. 金属凝固 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985: 69-79.

作者地址: 沈阳经济技术开发区沈辽西路 111 号 110870
沈阳工业大学 材料科学与工程学院
Tel: (024) 2549 9991
E-mail: sychyl@126.com