

试验装置如图 1 所示,工艺参数为:空载电压 90 V,电弧电压 30 V,焊接电流 180~200 A,电弧纵向移动速度 3~15 cm/min,电弧横向摆动频率 45 次/分,电弧横向摆动宽度 2.2 cm,电弧距工件 3 mm。用 HRC-150 型洛氏硬度计测量堆焊合金表面的宏观硬度,利用湿砂橡胶轮式磨损试验机进行磨损试验。试验参数如下:胶轮转速 240 r/min,胶轮直径 150 mm,胶轮表面压力 1.5 MPa,20~50 目的石英砂,用砂量 1.5 kg。将试样铣成 56 mm×27 mm×11 mm 的标准试样后,用分度值 0.1 mg 的 TG328A 型分析天平称重得到 G_0 。磨损 3 min 后,烘干,称重得到 G_1 。则试样的磨损失重 ΔG 用 (1) 式表示。

$$\Delta G = G_0 - G_1 \quad (1)$$

经过硬度及磨损试验,最终确定最佳磁场电流。参数调节完毕,利用 OLMPUS BX-6 型金相显微镜对不同磁场电流作用下的堆焊层进行显微组织观察和分析,利用布鲁克 D8 型衍射仪对最佳磁场电流作用下的堆焊层进行物相分析。

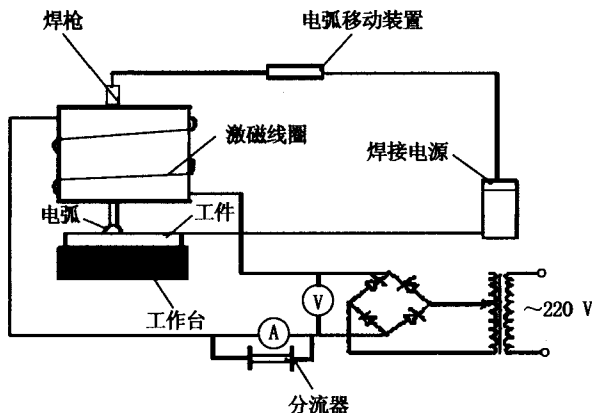


图 1 试验装置简图

2 试验结果及分析

2.1 焊接电流对硬度及耐磨性的影响

磁场作用下电流对硬度的影响是显著的,所以先将磁场电流固定为 1 A,调节焊接电流。经过硬度及磨损试验,确定最佳焊接电流。

铁基两种合金粉末堆焊层在不同焊接电流作用下的硬度曲线,见图 2。堆焊层磨损量随焊接电流变化曲线,见图 3。

从图 2 和图 3 中可看出,Fe5 合金堆焊层与 Fe3 合金堆焊层在焊接电流 120 A 时硬度最高。但是焊接电流为 120 A 时焊缝的成形性不好,硬度高的原因主要是

热输入较小,冷却速度快,形成了大量马氏体组织。所以对于 Fe5 合金堆焊层我们确定焊接电流 160 A 为最佳电流,Fe3 合金堆焊层的最佳电流是 140 A。

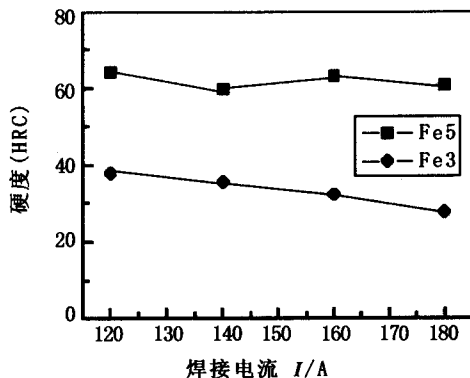


图 2 堆焊层硬度随焊接电流变化曲线

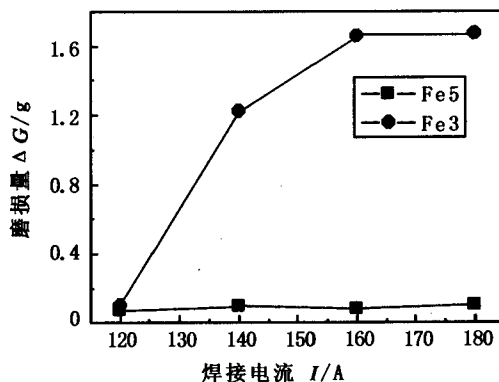


图 3 堆焊层磨损量随焊接电流变化曲线

2.2 磁场电流对硬度及耐磨性的影响

铁基合金堆焊层在不同磁场电流作用下的硬度曲线,见图 4。堆焊层磨损量随磁场电流变化曲线,如图 5 所示。

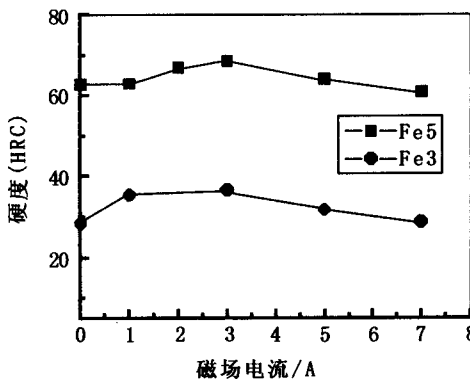


图 4 堆焊层硬度随磁场电流变化曲线

由图 4 和图 5 可知,加入了纵向磁场的堆焊层的硬度比无磁场的堆焊层硬度明显提高了。其中 Fe5 与 Fe3 合金堆焊层在磁场电流为 3 A 时硬度最高。

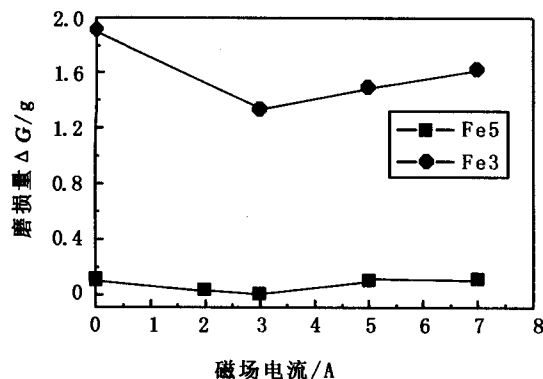


图5 堆焊层磨损失量随磁场电流变化曲线

在一定磁场强度范围内,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,堆焊层一次结晶组织细化程度提高。外加磁场可以促进马氏体转变、减少残余奥氏体量。电磁作用还

有助于堆焊层中裂纹和气孔的减少^[2]。但是恒定的磁场会对液体金属产生电磁阻尼作用,在过大的恒定磁场作用下,电磁阻尼将抑制熔体自然对流,从而抑制了热量的对流传输,使温度起伏减小,晶粒变得粗大,对堆焊层性能起了负面作用^[3]。也就是说,对于某一种特定材料就会有一个达到最佳晶粒细化效果的磁场,所以堆焊层在磁场电流 5 A, 7 A 时,出现了硬度下降现象。

2.3 堆焊层的组织结构

图 6 是 Fe5 合金粉末堆焊层的表面金相组织。其中图 6a 是无磁场作用下的金相组织,图 6b 是磁场电流 3 A 时的金相组织,图 6c 是磁场电流 7 A 时的金相组织。

当磁场电流为 3 A 时堆焊层的硬度是最高的。从图 6 金相照片中,可看到 3 A 磁场电流作用下的堆焊层硬质相 Cr_7C_3 数量最多,分布最为均匀,而且晶粒明显得到细化。而 7 A 时几乎看不到硬质相。

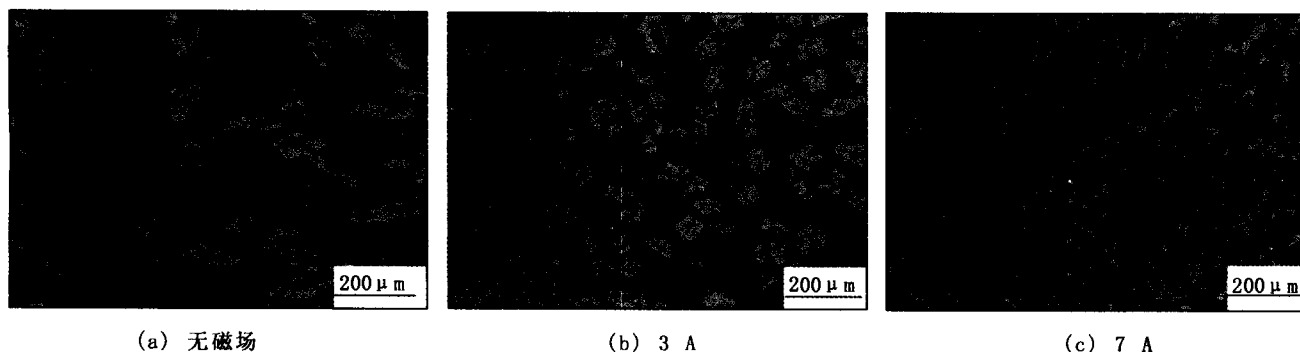


图6 Fe5合金堆焊层组织

根据凝固理论,晶粒组织形态及尺寸受形核率和过冷度的影响。当有磁场作用时,电磁搅拌细化晶粒主要是通过三个途径增加形核率:

- (1) 熔池尾部的树枝晶碎片;
- (2) 熔池边缘半熔化晶粒的分离;
- (3) 异质形核粒子^[4]。

形成晶核后在长大过程中,电磁作用改变了熔池形状,也改变了传热方向,使得最大散热方向不断变化。这样,树枝晶晶粒沿最大散热反方向生长的时间很短,从而减小晶粒尺寸。这就是磁场电流 3 A 时硬质相细化增多的原因。当磁场电流达 7 A 时,电磁搅拌作用增强,过强的磁搅拌不利于硬质相的形核。同时,硬质相 Cr_7C_3 本身是不稳定的化合物,在强烈的电磁搅拌下很容易分解形成稳定的化合物 $Cr_{23}C_6$ 。从图 6 中可看出,7 A 时已经观察不到硬质相 Cr_7C_3 ,因而它的硬度也随之降低。

图 7 是 Fe3 合金堆焊层的表面金相组织。其中图 7a 是无磁场作用下的金相组织,图 7b 是磁场电流 3 A 时的金相组织,图 7c 是磁场电流 7 A 时的金相组织。

从图 7 中我们看到,由于 Fe3 合金粉末中含碳量较低,合金元素的含量也较少,因此施加 3 A 磁场电流后生成的硬质相的数量很少,但是奥氏体晶粒明显细化了,而且在磁场作用下奥氏体晶粒的生长方向趋于一致。当磁场电流 7 A 时,过度增加的磁感应强度使得晶粒结构单元尺寸加宽,导致一次组织变得粗大,因而硬度下降。

由图 8 和表 2 可知,铁基堆焊层主要是由 α, γ 固溶体和各种化合物硬质相组成。合金粉末中都含有大量 C 及元素 Cr, B, Fe 等,在快速冷却过程中铁基合金粉末形成大量碳化物,固溶的 C, B 等部分脱溶形成不同类型的碳化物相。大量的硬质相使得堆焊层的硬度提高,耐磨性增强。

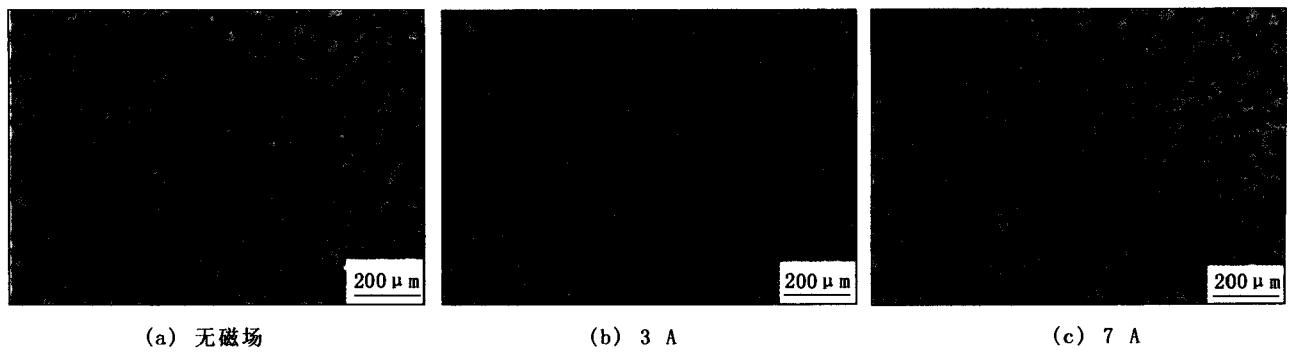
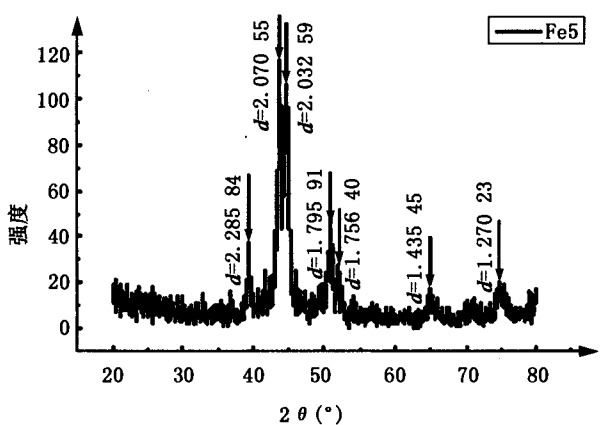
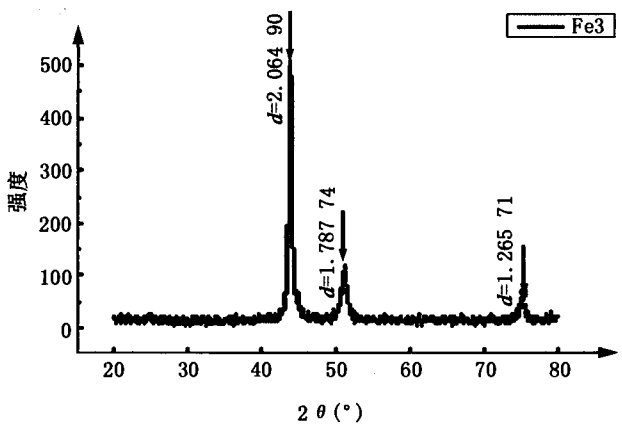


图7 Fe3合金堆焊层组织



(a) Fe5



(b) Fe3

图8 Fe5与Fe3的X射线衍射图

表2 堆焊层的X衍射分析结果

合金层	堆焊层的相
Fe5	α -Fe, Fe ₃ C ₂ , Fe ₂ C, Cr ₇ C ₃ , CrB, Fe ₂₃ (C, B) ₆
Fe3	γ -Fe, Cr ₇ C ₃

3 结 论

(1) 在等离子弧堆焊过程中引入纵向磁场,有效的控制了硬质相的形态及分布,从而使堆焊层的硬度提高、耐磨性增强。

(2) 施加磁场的堆焊层比无磁场作用的堆焊层硬度高,耐磨性好。

(3) 磁场电流1 A时,Fe5合金在焊接电流160 A时硬度最高、耐磨性最好,Fe3合金在焊接电流140 A时硬度最高、耐磨性最好。

(4) 在一定的磁场强度范围内,电磁搅拌作用可以细化晶粒,增加形核率。Fe5与Fe3合金堆焊层在磁场电流3 A时硬度最高,耐磨性最好。磁场电流大于3 A时会使晶粒变得粗大,对堆焊层性能起负面作用。

参 考 文 献

- 1 刘家浚,李诗卓.材料磨损原理及其耐磨性.北京:清华大学出版社,1993:5~10
- 2 张忠典,李冬青,尹孝辉,等.外加磁场对焊接过程的影响.焊接,2002(3):76~82
- 3 阿勃拉洛夫 M A,阿勃杜拉赫曼洛夫 P Y.电磁作用焊接技术.北京:机械工业出版社,1988:50~55
- 4 Kou S,Le Y. Improve weld quality by low frequently arc oscillation. Welding Journal, 1985,64(3):51~55

(收稿日期 2005 07 19)

作者简介: 刘政军,1962年出生,教授,博士生导师。沈阳工业大学材料科学与工程学院科研院长,中国焊接协会理事,沈阳市焊接学会理事长。一直从事焊接冶金及表面强化方面的研究。