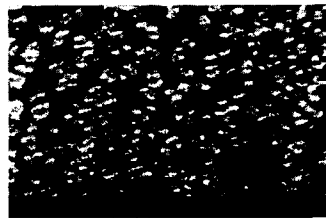


(a) 未加磁场



(b) 磁场电流 3 A



(c) 磁场电流 7 A

图3 Fe5合金堆焊层组织

从图3中可看到, 磁场电流为3 A时, 虽然生成的硬质相数量很少, 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。当磁场电流为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, 因而硬度降低。

2.2 不同磁场电流对Fe5堆焊层硬度及耐磨性的影响

图4、图5是在不同的磁场强度下, 堆焊电流为160 A时, Fe5堆焊层表面硬度及耐磨性能随之变化的曲线。

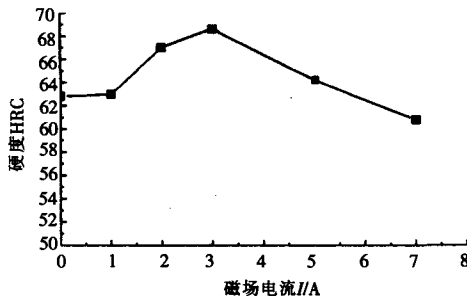


图4 Fe5堆焊层硬度随磁场电流变化的曲线

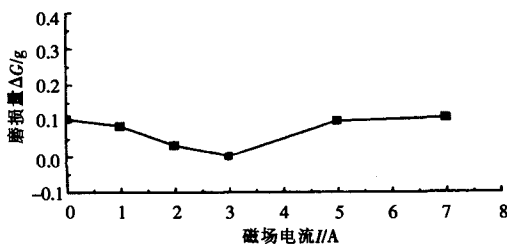


图5 Fe5堆焊层的磨损量随磁场电流变化的曲线

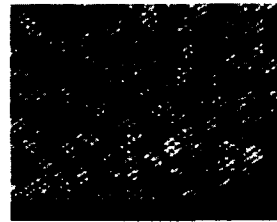
图6是Fe5合金粉末堆焊层表面的金相组织。



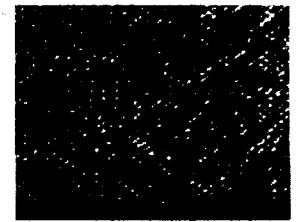
(a) 未加磁场



(b) 磁场电流 2 A



(c) 磁场电流 3 A



(d) 磁场电流 7 A

图6 Fe5合金堆焊层组织

从图4、图5可以看出, 当磁场电流为3 A时, 堆焊层的硬度最高, 磨损量最小。从图6金相照片中可看到: 随着磁场强度的增强, 堆焊层中硬质相的数目在不断地增加, 当磁场电流为3 A时, 堆焊层硬质相Cr₇C₃数量最多, 分布最为均匀, 而且晶粒明显得到细化。而磁场电流为7 A时几乎看不到硬质相。

2.3 不同磁场电流对Co-Cr-W系Co基自熔合金粉末堆焊层硬度及耐磨性的影响

堆焊电流为160 A, Co基堆焊层的硬度和磨损量随不同磁场电流的变化曲线如图7、图8所示。

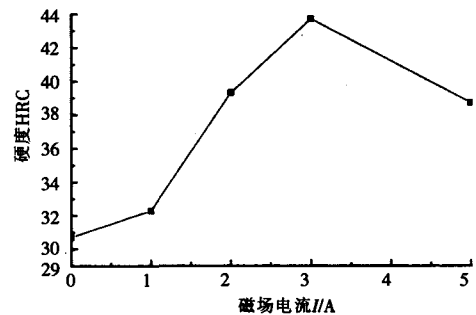


图7 Co基合金粉末堆焊层硬度随磁场电流变化曲线

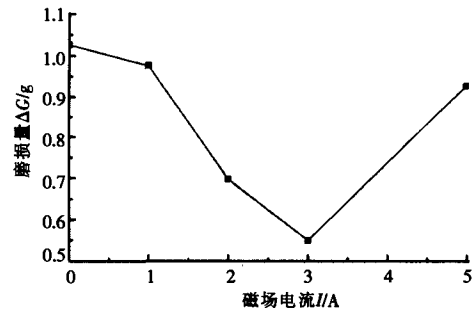


图8 Co基合金粉末堆焊层磨损量随磁场电流变化曲线

从图7、图8中可以看出: 与未施加磁场时相比, 施加磁场时堆焊层的硬度高, 耐磨性好, 随着磁场电流的增大, 堆焊层

金属的硬度也随之增加, 磨损量逐渐减小, 当磁场电流达到3 A时, 堆焊层金属的性能达到最佳, 此时堆焊层金属的硬度最高, 磨损量最小, 当磁场电流进一步增大时, 过大的磁场电流对堆焊层金属的性能有负面影响, 使得堆焊层金属的硬度不断降低, 磨损量不断加大。

一般认为, 金属力学性能的变化是由微观组织的改变引起的。图9是堆焊层金属在不同磁场作用下的金相组织图。

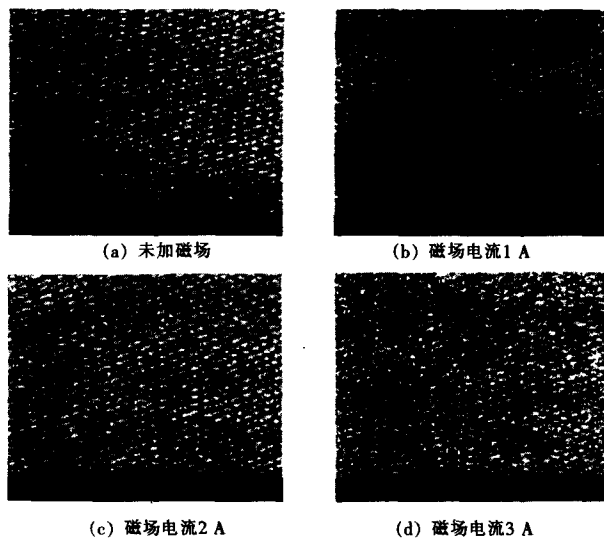


图9 磁场电流不同时Co合金堆焊层的组织

从图9中可以看出: 在电磁场的作用下, 堆焊层组织的晶粒比未加磁场时要细化, 当磁场电流为3 A时, 其晶粒细化更加显著。

3 不同磁场电流对堆焊层金属的作用机理

堆焊熔池的上部放置直流线圈时, 熔池中产生恒稳磁场, 在堆焊过程中通过电弧给熔池金属通以电流, 直流磁场与运动液态熔池金属之间的交互作用具有“电磁制动”的功能^[2], 在一定的磁场强度范围内, 随着磁场电流的增大, 磁场强度增强, 作用于熔池的电磁力也随之增大; 熔池中的液态金属受洛伦兹力的作用, 作复杂的循环运动, 磁场对熔池的搅拌作用也随之增强。由于离心力的作用, 熔池前部高温液态金属被推向尾部, 以及结晶前沿的温度及温度梯度提高等因素的影响, 使得结晶前沿存在着较强的液相流动, 从而使枝晶折断^[3]; 而且, 高温金属流对结晶前沿的冲刷作用, 提高了熔池中熔融金属的平衡结晶温度, 使结晶区域过冷度减少, 从而使得结晶前沿的稳定性提高, 促进了均匀扩散, 细化凝固组织的作用效果。

外加纵向磁场等离子弧堆焊时, 外加磁场与其在熔池液态金属内部会诱发形成感应电流, 两者之间的交互作用, 在熔池中产生电磁力, 根据Maxwell方程组得^[4]:

$$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} = -\frac{\nabla B^2}{2\mu} + \frac{(\vec{B} \cdot \nabla) \vec{B}}{\mu}, \quad (2)$$

式中: \vec{F} 为洛伦兹力, μ 为磁导率, \vec{B} 为磁感应强度。

公式(2)表明洛伦兹力由2部分组成: 第1项为电磁压力, 对熔池的液态金属产生约束作用; 第2项为电磁搅拌力。由此可见, 堆焊层金属力学性能的最佳值是由这2种力相互作用的结果。

从磁场带来的波动效应来看, 磁场强度越大, 电磁压力越大, 因而波动越激烈, 晶粒细化效果越显著。但是在磁场强度增大的同时, 相应地在熔池凝固体系内增大了热效应, 磁场对金属流的滞止力增大, 产生电磁阻尼现象, 抑制流体流动^[5]。因此, 在一定范围内的磁感应强度有助于晶粒细化, 改善堆焊层金属力学性能; 但是当磁场强度高于此范围时, 随着磁场电流的增大, 电弧旋转的直径减小, 磁场对熔池的搅拌作用反而不明显; 而过大的恒定磁场, 电磁阻尼将会占主导地位, 它抑制了熔体自然对流, 从而抑制了热量的对流传输, 使温度起伏减小, 过冷度随之减少, 进而使形核率下降, 晶粒变得粗大, 使堆焊层的性能下降^[6]。从以上研究结果中可以推断, 外加磁场控制多种合金粉末等离子弧堆焊过程中, 针对所用的纵向磁场搅拌设备, 当磁场电流为3 A时, 堆焊层金属细化的效果达到最佳状态。

4 结论

(1) 电磁搅拌可以改善堆焊层金属的结晶形态, 细化晶粒, 促使堆焊层组织分布均匀化, 提高堆焊层金属的硬度和耐磨性。

(2) 通过对外加纵向直流磁场作用下堆焊层的金属性能及组织的分析, 发现磁场参数(磁场电流)与焊接参数必须相匹配, 焊缝组织才能获得最佳的细化效果。

(3) 通过对Fe₃, Fe₅和Co基自熔合金粉末堆焊层硬度和耐磨性分析, 发现磁场电流 $I=3$ A时, 堆焊层性能达到最佳, 此时堆焊层金属的硬度达到最大值, 磨损量最小。

参考文献:

- [1] [苏联] 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[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [2] 黄小星. 铝合金在脉冲磁场作用下的定向凝固技术研究[D]. 陕西西安: 西北工业大学, 2003.
- [3] 殷威青, 罗键, 李海刚. 纵向磁场参数对LD10CS合金TIG焊缝组织的影响[J]. 西安交通大学学报, 1999, 40(7): 71-74.
- [4] 张北江. 低频电磁场作用下铝合金半连续铸造工艺与理论研究[D]. 辽宁沈阳: 东北大学, 2002, 32-50.
- [5] 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.
- [6] YU Jiang-rong, ZHANG Jia-ying. Contracted effect of bell-shape welding arc and accompanied magnetic field with spiral pipe paper[J]. Transactions of Nonferrous Metal Society of China, 1997, 7(2):92-98.