

磁控状态下 Fe90 堆焊层显微组织对力学性能的影响*

刘政军¹, 李乐成¹, 武小娟^{1,2}, 苏允海¹

(1. 沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110870; 2. 沈阳理工大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110168)

摘要: 为了研究直流横向磁场对 Fe90 堆焊层组织和性能的影响,在 Fe90 自熔堆焊合金的等离子弧堆焊过程中引入直流横向磁场,采用洛氏硬度仪、磨损试验机对不同规范下试样的硬度、耐磨损性进行测试,采用 OM 及 SEM 对堆焊层进行显微组织分析,进而揭示外加磁场对堆焊层性能的作用机理。结果表明,施加磁场的堆焊层要比无磁场作用的堆焊层硬度高、耐磨性好;当堆焊电流为 $I = 180 \text{ A}$, 磁场电流为 $I_m = 3 \text{ A}$ 时,堆焊层性能取得最佳值,其磨损量为 0.4218 g ,表面硬度 HRC 为 72.1。外加磁场提高堆焊层性能的主要原因是电弧和熔池在磁场作用下运动状态发生改变,改善了堆焊层组织,使堆焊层的组织由柱状晶转化为等轴晶并细化晶粒,进而提高堆焊层的综合力学性能。

关键词: 直流磁场; 堆焊; 显微组织; 铁基合金; 耐磨性; 等离子弧堆焊; 电磁搅拌; 横向磁场
中图分类号: TG 405 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1646(2013)01-0031-05

Effect of microstructure on mechanical properties of Fe90 surfacing layer at magnetic control state

LIU Zheng-jun¹, LI Le-cheng¹, WU Xiao-juan^{1,2}, SU Yun-hai¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China)

Abstract: In order to research the influence of direct current (DC) transverse magnetic field on microstructure and properties of Fe90 surfacing layer, the DC transverse magnetic field was introduced in the process of plasma arc surfacing for Fe90 self-fluxing surfacing alloy. The hardness and wear resistance of the specimens with different specifications were tested with Rockwell hardness tester and wear tester, and the microstructure of surfacing layer was observed with optical microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM). Furthermore, the action mechanism of external magnetic field on the properties of surfacing layer was revealed. The results indicate that compared with the surfacing layer without external magnetic field, the surfacing layer with magnetic field exhibits higher hardness and better wear resistance. When the surfacing current is 180 A and magnetic field current is 3 A, the optimal properties of surfacing layer is acquired, where the wear loss of surfacing layer is 0.4218 g and the surface hardness is 72.1 HRC. The main reason for the improvement in the properties of surfacing layer by external magnetic field is that the motion state of arc and molten pool changes under the action of magnetic field, and the microstructure of surfacing layer gets improved. The microstructure of surfacing layer changes from columnar crystal to equiaxed crystal, and the grains get refined, and thus, the comprehensive mechanical properties of surfacing layer are enhanced.

Key words: DC magnetic field; surfacing; microstructure; iron based alloy; wear resistance; plasma arc surfacing; electromagnetic stirring; transverse magnetic field

收稿日期: 2010-12-28.

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(20042025).

作者简介: 刘政军(1962-),男,黑龙江讷河人,教授,博士生导师,主要从事材料焊接及表面强化等方面的研究.

* 本文已于 2013-01-04 17:29 在中国知网优先数字出版. 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/21.1189.T.20130104.1729.015.html>

堆焊是一种在材料制造和修复过程中经常使用的技术.堆焊过程中一般是将两种性能不同的材料复合在一起,以便充分发挥两种材料的性能特点,而将耐磨材料堆焊在硬度较低的碳钢表面则是工程中经常使用的一种提高低碳钢材料耐磨性的方法^[1-2].堆焊合金种类很多,包括钴基合金、镍基合金、铜基合金、铁基合金和复合合金,它们彼此之间的主要差异是所含化学成分不同.除此之外,区分这些合金的另一个指标就是它们的使用温度,其中钴基合金的服役温度最高,铁基合金的服役温度最低,镍基介于两者之间,所以,在航空航天及高温磨损情况下,一般首选钴基合金.由于我国钴的资源储备较少,大量需要进口,钴基的应用受到了一定的限制,因此,有必要开发出一种钴基合金的替代品,使其使用性能与钴基相对,而且成本较低.由此,铁基合金又被提到一个全新的要求,但是采用传统等离子弧堆焊技术对提高堆焊层性能效果十分有限,要想最大限度地发掘铁基堆焊合金的潜力,必须借助一定的外部附加技术或手段,电磁技术正好适应了这一要求.因为将磁场加到焊接过程中,磁场对焊接电弧和熔池的作用是非接触的,对焊接熔池中金属纯度没有影响,并可以影响其结晶过程,这一现象已被相关研究成果所认证^[3-5];相关研究数据和成果表明,外加磁场首先会使电弧的形态和运动方式发生变化,并通过带电粒子传递到熔池,使熔池的运动(对流)方式也发生相应的变化,进而改变其热量和物质的传导过程,影响结晶形核,对组织性能起到很大的影响作用,所以,在铁基合金的等离子弧堆焊过程中施加磁场(由于外加磁场的引入),对堆焊过程进行干预,提高堆焊层的综合力学性能,扩大铁基合金的应用领域将具有十分重要的意义.由于堆焊过程中参数较多,彼此之间的作用规律不太明确,因此,本文就磁场参数对堆焊过程及组织性能的影响开展研究,并揭示外加横向直流磁场对堆焊层组织性能的作用机理.

1 试验材料、设备及方法

1.1 试验材料

试验所用的堆焊材料为 Fe90 自熔堆焊合金粉末,其化学成分见表 1.母材为低碳钢钢板,试验过程将堆焊合金粉末采用正极性等离子弧堆焊设备堆焊到低碳钢钢板上.

1.2 试验设备及方法

在 Fe90 铁基合金等离子堆焊过程中施加直

表 1 Fe90 合金粉末成分(w)

Tab.1 Chemical composition of Fe90 alloy powder (w)

%				
C	Cr	B	Si	Fe
0.815	13.6	1.6	1.1	余量

流磁场,该磁场是由放置在焊枪及工件正下方的 U 形线圈产生的,其方向垂直于焊枪,因此一般称为横向磁场.焊接过程中可以通过调节磁场电流的大小实现磁场强度的调节^[6].堆焊后需对试板进行加工使其成为相应的试样满足试验要求,试验主要包括湿砂磨料磨损、硬度和显微组织分析.磨损试验试样的规格为 56 mm × 27 mm × 11 mm.硬度试验为洛氏硬度,试验设备为 HRC-150 型洛氏硬度计,试验中打 5 点硬度,然后取其平均值,即实验中所用数据为平均值;磨料磨损试验在湿砂橡胶轮式磨损试验机上进行.

2 试验结果及分析

2.1 堆焊层硬度随磁场电流的变化规律

为了探究磁场参数(磁场电流 I_m)对堆焊层硬度的影响规律,对不同磁场电流下堆焊层的硬度进行检测,结果如图 1 所示.在图 1 中有 4 条曲线:140、160、180 和 200 A 分别对应不同的堆焊电流.从这 4 条堆焊层硬度随磁场电流变化曲线的趋势走向可以看出,随着磁场电流的增大,堆焊层的硬度变化规律基本相同,都是先增大后减小,最大值均在磁场电流为 3 A 处取得,只是针对某一条曲线而言,各个区段变化的幅度有所不同.从图 1 中还可以看出,虽然这 4 条曲线随磁场电流的增大走势基本相同,但也存在一定的区别,主要表现在其位置的变化.当堆焊电流 I 为 140 A 时,曲线位于最下方;堆焊电流为 180 A 时,曲线位于最上方,这说明随着堆焊电流的增大,曲线整

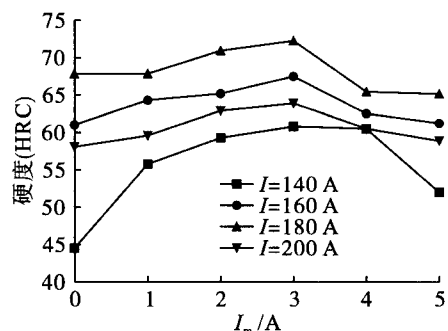


图 1 不同磁场电流下堆焊层表面硬度的变化曲线
Fig.1 Variation in surface hardness of surfacing layer with different magnetic field current

体呈现出先上移后下降的变化趋势,最佳堆焊电流应为 180 A,所以对于表面硬度而言,最佳参数应为磁场电流 3 A,堆焊电流 180 A。

磁场的施加使得金属的结晶情况发生明显变化,这必然会影响到堆焊层的性能。为了了解磁场作用下堆焊层表面和侧面力学性能是否存在差异性,除了对堆焊表面进行硬度检测外,还要对堆焊层侧面进行硬度检测,结果如图 2 所示。图 2 为 Fe90 合金堆焊层侧面硬度随磁场电流的变化曲线。由于异种材料堆焊存在稀释率问题,而本实验堆焊层为单层,因此用在堆焊层侧面进行硬度检测时,硬度的取值点均靠近堆焊层表面远离熔合线,分别取五点,然后求平均值,这样可以有效地屏蔽突变点,减小误差。对比图 1 和图 2 的曲线可以发现,堆焊层侧面和表面的硬度随磁场电流的增大走势基本相同,都是随着磁场电流的增大呈现出先增大后减小的变化趋势,而且 4 条曲线的最大值点对应的磁场电流也是一致的,都是取在磁场电流为 3 A 处,即最佳参数也是取在磁场电流为 3 A,堆焊电流为 180 A。

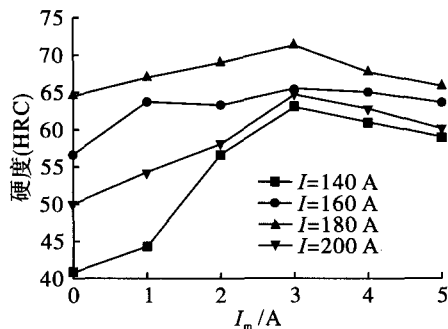


图 2 不同磁场电流下堆焊层侧面硬度的变化曲线

Fig. 2 Variation in lateral hardness of surfacing layer with different magnetic field current

图 1 和图 2 将堆焊层表面和侧面硬度随磁场电流的变化规律进行展示,从两图可直观看出堆焊层表面硬度和侧面硬度的差异性。由于两图均是在堆焊电流为 180 A 时堆焊层的硬度达到了最高值,因此,选取堆焊电流为 180 A 时堆焊层侧面和表面的硬度进行对比,结果如图 3 所示。从图 3 可知,两条曲线随磁场电流的变化规律相同,且极值点均取在磁场电流为 3 A 处,但是当磁场电流小于等于 3 A 时,堆焊层表面硬度高于侧面硬度;当磁场电流进一步增大并超过 3 A 时,堆焊层表面的硬度反而被侧面反超。之所以出现这种现象,是因为堆焊层表面的硬度并非一直优于侧面,而当磁场电流大于 3 A 时,磁场对堆焊层侧面金属的作用效果明显。综合上述数据和分析,磁场电流

对堆焊层表面的效果要优于侧面,实验中当磁场直流横向磁场时,采用堆焊层表面作为受力面,这样可以使大量硬质材料作为力的承受者,从而提高其使用性能,所以后续的磨损试验面就选为堆焊层表面。

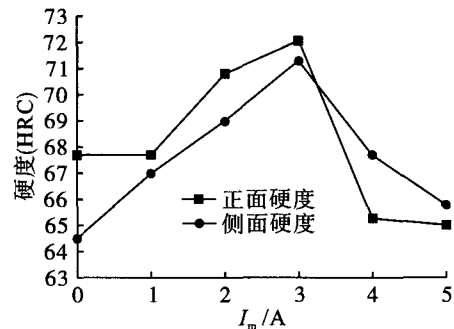


图 3 当 $I = 180$ A 时,不同磁场电流下堆焊层硬度的变化曲线

Fig. 3 Variation in hardness of surfacing layer with different magnetic field current and $I = 180$ A

2.2 磁场电流对 Fe90 堆焊层磨损量的影响

虽然图 1 和图 2 对堆焊层的硬度进行了分析,明确了磁场电流对硬度的影响规律,但是硬度并不能完全反映材料的耐磨性,为此,对不同磁场电流下堆焊层的磨损量进行测定,结果如图 4 所示。

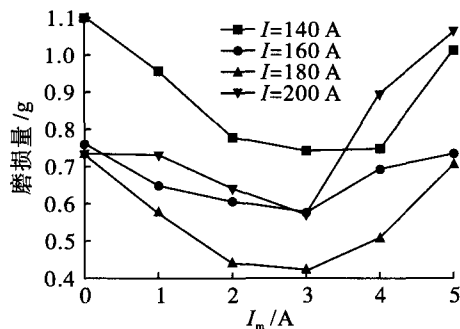


图 4 Fe90 堆焊层磨损量随磁场电流的变化曲线

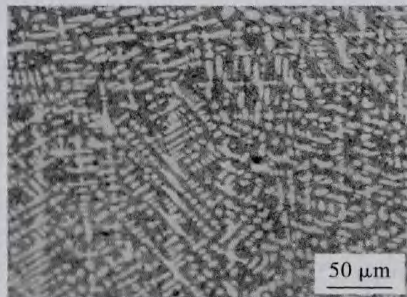
Fig. 4 Wear loss of Fe90 surfacing layer as a function of magnetic field current

从图 4 可以看出,对于 4 条不同堆焊电流下的曲线而言,曲线走势大致相同,堆焊层的磨损量随着磁场电流的增大,呈现出先减小后增大的规律,总体都是呈抛物线式,并且它们的最小值均在磁场电流为 3 A 时取得,这说明不管堆焊电流如何改变,对最佳磁场电流的值基本没有影响,堆焊电流的改变只是改变了各自曲线的相对位置,即随着堆焊电流的升高,堆焊层磨损量随磁场电流的变化曲线整体呈现出先下移后上移的趋势,在堆焊电流为 180 A 时,堆焊层的磨损量曲线达到了最低端。由此可见,在磁场电流为 3 A,堆焊电流为 180 A 时,堆焊层的磨损量最低,这与硬度最

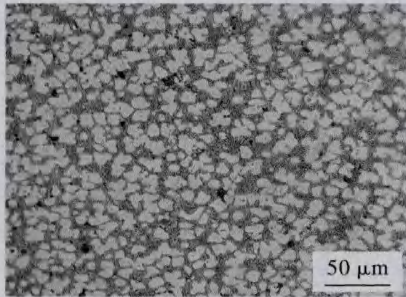
佳参数匹配点相一致,说明在提高堆焊层硬度的同时可以降低堆焊层的耐磨性,这与相关材料力学性能理论相吻合,因为,在两对磨材料中,相对硬的材料一般都充当了磨料使较软的材料被磨损,而自身的磨损量则较小。

2.3 磁场电流对 Fe90 堆焊层显微组织的影响

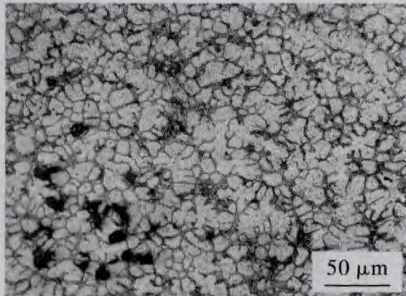
通过上述分析可知,当堆焊电流为 180 A 时堆焊层的力学性能达到了最佳状态,因此,在分析外加磁场对堆焊层显微组织影响规律的过程中,仅对堆焊电流 $I = 180$ A 和不同磁场电流下堆焊层的显微组织进行观测,具体金相图片如图 5 所示。在无磁场状态下,树枝晶占据了堆焊层的绝大部分,而且这些树枝晶的一次枝晶呈一定的方向性(近乎平行),一些短棒状的二次枝晶依附于一次枝晶伴生生长,呈现出一定的孪生长特点(见图 5a)。出现这种现象的原因是:无磁场状态下熔池处于自由状态,熔池靠近母材两侧,由于母材温度很低,导致在熔合线前沿形成很大的温度



a $I_m = 0$ A



b $I_m = 3$ A



c $I_m = 5$ A

图5 堆焊层显微组织随磁场电流的变化情况
Fig. 5 Microstructures of surfacing layer with different magnetic field current

梯度,进而为柱状晶生长提供良好的条件.磁场的施加,对堆焊层显微组织的影响还是很明显的.当磁场电流处于较小状态(1 A)时,堆焊层中的一次枝晶和二次枝晶仍清晰可见,但是其方向性已基本看不到;当磁场电流进一步增大时,堆焊层中的枝晶已被大量的等轴晶取代,而且这些等轴晶呈弥散分布之态(见图 5b),此时显微组织的分布形态为最佳,这主要是由于外加磁场的电磁搅拌和熔池温度梯度的改变所致;但当磁场电流继续增大时,堆焊层的显微组织反而出现了粗化现象(见图 5c),这与堆焊层的力学性能随磁场电流的变化规律相吻合。

3 磁场作用机理

根据物理学相关知识可知,电弧是在两电极之间的强电场作用下被电离的空气,中间伴随着带电粒子的传送(若焊材作为一极,则焊接过程中还会伴有液态焊材的过渡).实际上电弧的组成十分复杂,一般被称为物质的第四种状态(除了液态、固态和气态).这是由于电弧中含有大量的带电粒子,使其在磁场环境中会受到一定影响的缘故,即外加磁场可以改变电弧中带电粒子的运动状态和轨迹,进而改变电弧的形态和运动轨迹,并过渡到熔池,改变熔池的结晶形核。

实际上晶粒的形成都要经历结晶形核和长大的过程.由于堆焊层是在等离子热源的作用下被瞬间加热熔化,而且在随后的冷却过程中冷却速度较快并存在不同方向散热条件不同的情况(底部有母材其散热到快过周围的空气),这就使得在无磁场状态下出现按一定方向排列生长的显微组织不足为奇.横向磁场通过与电弧和熔池的相互作用,形成洛伦兹力,使电弧的摆动带动熔池进行相应复杂循环运动^[7-8],从而对堆焊层液态金属进行有效地搅拌,改变熔池金属的结晶状况,降低一次枝晶四周侧壁处浓度差异,使得原先具有择优生产方向被破坏,进而抑制柱状晶的形成.此外,电磁搅拌作用将使整个熔池的温度均匀程度得到提高,温度梯度减小,扩大熔池的结晶温度范围,抑制柱状晶的生成,转而促进等轴晶的形成,这也是焊缝金属常得到等轴晶的原因.电磁的搅拌作用除了改变熔池的温度梯度和浓度梯度外,也使熔池内部的结晶枝晶受到外力作用,这种电磁力尤其对沿母材侧先生成的枝晶作用最为明显.因为,沿母材侧的晶粒由于具有较大的温度梯度都会先结晶形核并以柱状晶的形式生产,这些

柱状晶将同时向熔池内容生长或延伸,但是彼此之间的生长速度不尽相同.无论这些先生长的柱状晶大小和位置如何不同都会受到电磁搅拌形成剪切力的作用,此力的大小对显微组织影响十分明显.当剪切力较小的时候,先结晶的柱状晶受到的力不足以使其发生剪切断裂,只能使其发生扭曲或偏移,这对提高晶粒的形核率,促进等轴晶的形成作用不是很明显,只是改变了原先晶粒的生长方向,即抑制原先呈一定方向生长的枝晶的出现.当剪切力达到一定的程度,并足以切断枝晶时,被切断的枝晶将被电磁搅拌作用带到熔池的不同位置呈弥散分布形态^[9-10].虽然这些枝晶一部分会受到熔池的热量作用被熔化,但是大部分将被保留下来(熔池的温度是在逐渐降低的),成为异质形核源,对提高熔池的形核率十分有利,可以促进等轴晶的形成.而剪切力实际上是由磁场作用形成,其与磁场强度成正比,因此增大磁场电流的作用效果(正如上述剪切力的分析,当磁场电流较小时),对细化显微组织的作用效果并不明显,随着磁场电流的增大,作用效果逐渐显现,在合适的磁场(磁场电流为3 A)作用下效果最佳,形成细小的等轴晶,提高了堆焊层的性能.

从传热学角度来说,流动的熔池在运动过程中将切割直流磁场的磁力线,进而产生感生电流^[9],此电流就会在熔池内部产生一定的热量,当热量聚集到一定程度时,会对熔池产生电磁阻尼作用,即限制熔池的对流,使熔池的运动速度降低,局部晶粒吸收热量增多,最终使晶粒过度生长形成粗晶.当磁场电流过大,使得电磁阻尼作用大于其电磁搅拌效果时,这些感应热将使堆焊层高温停留时间延长,上述现象就会发生,进而使堆焊层的组织变得粗大,所以磁场电流不易过大.

4 结 论

1) 磁场的引入可以显著提高堆焊层的力学性能,即磁场状态下堆焊层的力学性能明显高于无磁场状态下的力学性能.

2) 当堆焊电流为 $I = 180 \text{ A}$,磁场电流为 $I_m = 3 \text{ A}$ 时,堆焊层综合力学性能取得最佳值,其磨损量为 0.4218 g ,硬度HRC为72.1.

3) 当磁场电流较小时,堆焊层组织以“骨节”形式生长;当磁场电流合适时,堆焊层组织以细小等轴晶形式出现;当磁场电流过大时,堆焊层组织粗化使其性能变差.

参考文献(References):

- [1] 邵荷生,曲敬信,许小棣,等.摩擦与磨损[M].北京:煤炭工业出版社,1992:150-184.
(SHAO He-sheng, QU Jing-xin, XU Xiao-ti, et al. Friction and wear [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1992:150-184.)
- [2] 董允,张廷森,林晓婷.现代表面工程技术[M].北京:机械工业出版社,2000:32-60.
(DONG Yun, ZHANG Ting-sen, LIN Xiao-ping. Modern surface engineering technologies [M]. Beijing: China Machine Press, 2000:32-60.)
- [3] 江淑园,陈焕明,刘志凌.磁控技术在焊接中的应用及进展[J].中国机械工程,2002,13(21):1876-1879.
(JIANG Shu-yuan, CHEN Huan-ming, LIU Zhi-ling. Application and progress of magnetic control technology in welding [J]. China Mechanical Engineering, 2002,13(21):1876-1879.)
- [4] 周旭辉,胡传顺.磁场控制技术在带极堆焊中的应用[J].焊接,2003(2):13-15.
(ZHOU Xu-hui, HU Chuan-shun. Application of the magnetic-control technology in strip surfacing [J]. Welding and Joining, 2003(2):13-15.)
- [5] Brown D. The effect of electromagnetic stirring and mechanical vibration on arc welding [J]. Welding Journal, 1962,41(2):41-50.
- [6] 刘政军,孙景刚.磁场控制对堆焊金属组织及性能的影响[J].沈阳工业大学学报,2009,31(2):159-163.
(LIU Zheng-jun, SUN Jing-gang. Influence of magnetic field controlling on microstructure and properties of plasma arc surfacing layer [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2009,31(2):159-163.)
- [7] 罗键.外加纵向磁场GTAW焊接熔池流体流动与传热行为的研究[D].西安:西安交通大学,1999:28-86.
(LUO Jian. Study on fluid flow and heat transfer of GTAW weld pool in the longitudinal magnetic field controlling [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1999:28-86.)
- [8] 郭大勇,杨院生,童文辉,等.电磁驱动熔体流动与枝晶变形断裂模拟[J].金属学报,2003,39(9):914-919.
(GUO Da-yong, YANG Yuan-sheng, TONG Wen-hui, et al. Simulation of electromagnetic force driven-melt flow and fracture of dendrites [J]. Acta Metallurgical Sinica, 2003,39(9):914-919.)
- [9] 范金辉,翟启杰.物理场对金属凝固组织的影响[J].中国有色金属学报,2002,12(5):11-17.
(FAN Jin-hui, ZHAI Qi-jie. Effects of physical fields on solidification structure of metals [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002,12(5):11-17.)
- [10] 张丰收.特种合金软接触电磁成形定向凝固技术研究[D].西安:西北工业大学,2003:115-125.
(ZHANG Feng-shou. Study on soft-contact electromagnetic shaping and directional solidification of special alloys [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003:115-125.)

(责任编辑:邓美艳 英文审校:尹淑英)