

# 横纵磁场下铁基合金堆焊层组织性能的对比分析

苏允海，李乐成，刘政军

(沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110870)

**摘要：**将 Fe5 自熔合金采用等离子弧堆焊设备堆焊到低碳钢表面, 在堆焊的过程中施加直流横向和直流纵向磁场, 并调节磁场参数和堆焊工艺参数, 对不同参数下堆焊试样进行硬度和磨损试验, 采用显微电镜和扫描电镜对堆焊层显微组织进行分析, 研究两种磁场状态下堆焊层组织、性能的差异性, 并对其中的机理进行探究。结果表明, 直流横向磁场和直流纵向磁场均可提高硬质相的形核率, 改善堆焊层的组织性能; 横向磁场作用下堆焊层中硬质相杂乱分析, 而纵向磁场使堆焊层中的硬质相以规则的“六边形”出现, 这使得横向磁场对提高堆焊层的硬度较明显, 纵向磁场对提高堆焊层耐磨性效果明显。

**关键词：**等离子弧堆焊; 直流横向磁场; 直流纵向磁场; 铁基合金; 组织性能

中图分类号: TG455

文献标识码: A

文章编号: 0253-360X(2012)04-0033-04



苏允海

## 0 序 言

自1933年外加磁场应用于金属的连续铸造过程起, 电磁技术在铸造方面的应用就越来越广, 其中根据电磁搅拌器的布置位置不同分为中间包加热用电磁搅拌、结晶器电磁搅拌、冷却段电磁搅拌和凝固末端电磁搅拌。由于在焊接过程中, 也存在类似于铸造过程的金属凝固, 因此理论上讲外加磁场同样适合于焊接, 但电磁搅拌技术应用于焊接过程相对于铸造要晚些。Brown<sup>[1]</sup> 1962年最先将外加磁场引入不锈钢、钛合金、铝合金的焊接过程中, 并且发现电磁搅拌可以使晶粒细化; Tseng 等人<sup>[2]</sup> 1971年第一个深入研究了在磁控 TIG 焊过程中, 电磁搅拌对微观组织和性能的影响; 随后国内外大量学者开始对磁控焊接技术进行广泛地研究。近年来, 磁控焊接技术不断发展, 大量实践表明<sup>[3-4]</sup>, 外加纵向磁场可促使电弧旋转, 改变弧柱中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形; 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质和传热过程, 从而改变晶粒的结晶方向, 细化一次组织, 减少偏析, 提高焊缝的力学性能。而对于铁基堆焊合金而言, 现在的磁控堆焊技术主要针对不同磁场状态下工艺参数对堆焊层性能的研究规律<sup>[5-6]</sup>, 就不同磁场位置对堆焊层组织性能的对比

分析少有报道。因此文中将就直流横向和纵向磁场状态堆焊层的组织性能进行了对比分析, 并对其作用机理进行研究, 揭示不同磁场形态下堆焊层性能差异的内在原因。

## 1 试验方法

等离子堆焊过程中, 所选用的基体为 20g 低碳钢, 而堆焊合金粉末为铁基自熔合金 Fe5, Fe5 自熔合金的化学成分见表 1。

表 1 Fe5 堆焊合金粉末化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of Fe5 deposited metal

C	Si	B	Cr	Ni	Fe
4.8	0.8	1.5	40	—	余量

堆焊时施加的磁场分为直流横向磁场和直流纵向磁场, 其中直流横向磁场是由放置在堆焊试板下方的 E 形磁铁发出的, 而直流纵向磁场是由安装在喷嘴上的通电螺旋管产生的。两种磁场的电源都是经过整流器整流后的直流电, 且电流的大小可以调节, 因此在堆焊过程中磁场电流和堆焊电流可以调节, 而其它的堆焊参数固定不变, 其具体数值为: 电弧电压 30 V, 电弧移动速度 3~15 cm/min, 氩气流量 0.6 L/min。

为了研究外加磁场对堆焊层力学性能的作用规律, 对堆焊层表面的硬度及耐磨性进行检测。采用

HRC-450 检测堆焊试样的硬度,硬度试验取点位置是堆焊层表面,每个试样任意取 5 点进行测试,并取其平均值作为最终值。而耐磨损性试验则是在 MLS-23 型湿砂橡胶轮式磨损试验机上进行的,试验所得的磨损量用试样磨损前后质量之差  $\Delta G$  来表示。其中磨损试验的参数如表 2 所示。

表 2 磨料磨损试验参数

Table 2 Grinding abrasion test parameters

磨料	磨料粒度	胶轮转速	胶轮直径	胶轮压力	磨损时间
类型	$\mu$ (目)	$v/(r \cdot min^{-1})$	$d/mm$	$p/10^5 \text{ MPa}$	$t/min$
石英砂	20~40	240	150	15	4

## 2 试验结果与分析

### 2.1 堆焊电流对 Fe5 合金堆焊层力学性能的影响

为了揭示不同磁场状态下,铁基合金堆焊层的力学性能随堆焊电流的变化规律,固定磁场电流为 1 A,对不同磁场形态、相同堆焊电流下堆焊层的硬度进行汇总,如图 1 所示。从图 1 可以看出,虽然在纵向磁场和横向磁场状态下,堆焊层的硬度随堆焊电流的变化规律不尽相同:即纵向磁场状态下,堆焊层的硬度随堆焊电流的增大呈现先增大后减小趋势,而横向磁场状态下,堆焊层的硬度呈现随堆焊电流的增大而增大趋势;出现这种现象的原因主要是两种磁场对堆焊过程的作用机理有所不同所致。但是从两组曲线对比可以发现,横向磁场状态下,堆焊层的硬度要比纵向磁场状态下的硬度要高,这说明横向磁场对提高铁基合金堆焊的硬度要比纵向磁场作用明显。

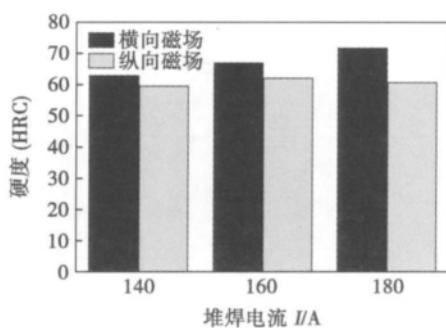


图 1 堆焊层的硬度随堆焊电流变化的对比

Fig. 1 Hardness of surfacing layer with different I

图 2 为磁场电流为 1 A 时,不同磁场形态下铁基堆焊层的磨损量随堆焊电流变化的对比。从图 2 中可以看出,在纵向和横向磁场作用下堆焊层的磨损量随堆焊电流的变化差异较大,但从整体上来看

也有一定共同点,就是横向磁场状态下堆焊层的磨损量均要高于纵向磁场作用下的堆焊层,这表明纵向磁场对提高堆焊的耐磨损性作用效果优于横向磁场。此外从图 2 中还可以看出,随着堆焊电流的增大,横向磁场状态下堆焊层的磨损量是逐渐减小的;而纵向磁场状态下堆焊层的磨损量则是先减小后增大的变化趋势,这与硬度曲线有所相似。

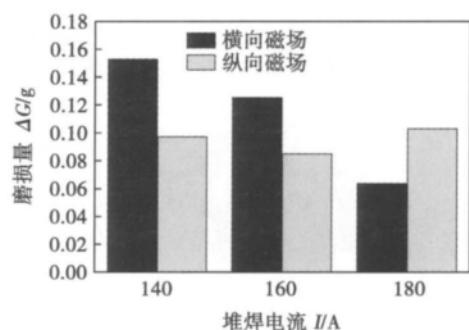


图 2 堆焊层的磨损量随堆焊电流变化的对比

Fig. 2 Wear extent of surfacing layer with different I

综合图 1,图 2 可以发现,磁场电流固定不变,随着堆焊电流从 140 A 增大到 180 A 时,在横向磁场状态下堆焊层的硬度及磨损量层呈现出单调变化规律,即硬度逐渐增大、磨损量逐渐减小,即当堆焊电流为 180 A 时,堆焊层的硬度和磨损量分别达到其最大值和最小值;而在纵向磁场状态下,堆焊层的硬度及磨损量则呈现出极值曲线,即在堆焊电流为 160 A 时,堆焊层的硬度及磨损量分别取得其最大值和最小值。试验中所用相同的基材、堆焊材料,并用同一设备进行堆焊,因此理论上讲堆焊层最佳性能所对应的堆焊电流应为同一值,但实际上两种磁场状态下最佳堆焊电流并不相同,出现这种现象说明外加磁场对堆焊过程中堆焊层实际吸收的热输入有影响,即不同的磁场形式改变了电弧的传热情况,使堆焊层最终吸收的热量也有所区别,进而最佳堆焊电流并不相同。

### 2.2 磁场电流对铁基堆焊层金属力学性能的影响

图 3 为堆焊电流为 160 A,不同磁场电流下堆焊层硬度的变化曲线。从图 3 可以看出,无论在纵向磁场还是横向磁场状态下,随着磁场电流的增大,堆焊层的硬度均呈现出先增大后减小的变化趋势,且堆焊层硬度的最大值均在磁场电流为 3 A 时取得。但是两条也有一定的差异,当磁场电流  $I_m < 3$  A 时,横向磁场状态下堆焊层的硬度要略高于纵向磁场状态下,而当磁场电流  $I_m > 3$  A 时,横向磁场状态下堆焊层的硬度反而低于纵向磁场。但是由于硬度

最大值取在磁场电流  $I_m = 3$  A 时,因此横向磁场堆焊层硬度要高于纵向磁场堆焊层硬度,所以横向磁场对堆焊层硬度的作用效果要比纵向磁场明显。

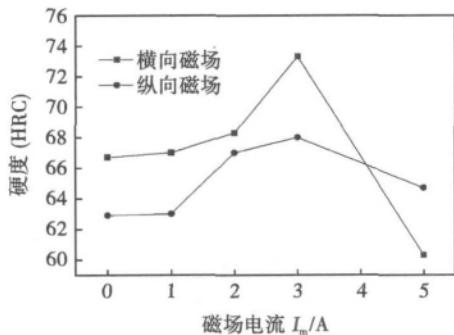


图3 堆焊层的硬度随磁场电流变化的对比

Fig. 3 Hardness of surfacing layer with different  $I_m$

图4为不同磁场形态下,堆焊层磨损量随磁场电流变化的对比。从图4中可以看出,不论是横向磁场还是纵向磁场,两条曲线的变化趋势基本相同,都是“V”形曲线;但是两条的变化幅度和相对位置不同,横向磁场状态下堆焊层的磨损量总体要高于纵向磁场状态下堆焊层的磨损量,这说明纵向可以显著提高堆焊层的耐磨性。

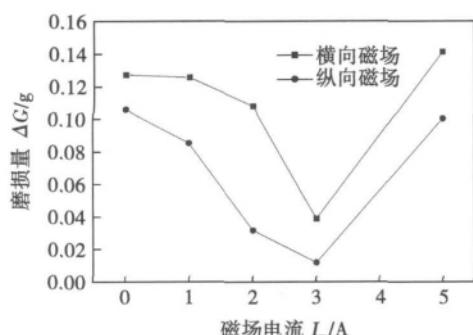


图4 堆焊层的磨损量随磁场电流变化的对比

Fig. 4 Wear extent of surfacing layer with different magnetic field current

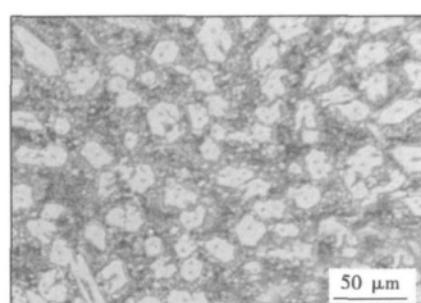
从图3和图4还可以看出,并非施加磁场堆焊层的力学性能就一定得到显著提高,只有磁场参数在合适的情况下,堆焊层的力学性能才能得到显著改善。

综合图3,图4的试验数据可以发现,在直流横、纵向磁场作用下,堆焊层的硬度与磨损量变化规律不尽相同。通常状态下材料的硬度可以近似的反映材料的耐磨性,硬度越高,耐磨性越好。但是这种变化规律在磁控铁基合金的堆焊过程中并没有得到

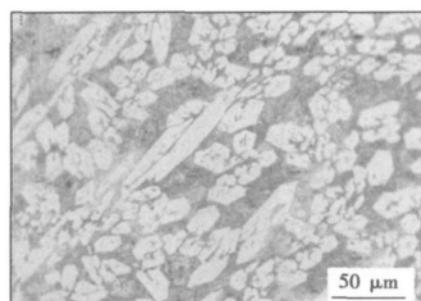
体现。在图3中横向磁场状态下的硬度要高于纵向的,而在图4中横向的耐磨性却要低于纵向磁场的。这说明横向磁场作用虽然可以提高堆焊层的硬度,但是对改善堆焊层的耐磨性却作用有限。但是当磁场电流为5 A时,两种磁场状态下堆焊层的硬度和磨损量变化却与其它参数下不同,符合传统规律,即硬度高磨损量小,产生这种现象的主要原因是,此时由于磁场电流较大,堆焊层的硬质相较少,这使得堆焊层的硬度和耐磨性主要由基体承担所致。

### 2.3 铁基合金堆焊层显微组织的分析

通过上述分析发现,对于铁基合金粉末其堆焊层的硬度和耐磨性随工艺参数的变化呈现出不相协调的变化规律。按常规理论来讲,硬度虽不能绝对衡量材料的耐磨性,但一般情况下材料的硬度较高,其耐磨性就较好。然而上述分析得出的结论则是横向磁场对提高堆焊层的硬度作用好,而纵向磁场则对提高堆焊层的耐磨性作用好。为了揭示上述现象的本质,对堆焊层的显微组织进行了分析。图5为磁场电流  $I_m = 3$  A,堆焊电流  $I = 160$  A情况下,不同磁场状态下堆焊层的显微组织形貌。从图5可以看出,两图中硬质相的数量都较多,但分布形态有一定区别。在横向磁场状态下,堆焊层中的硬质相除了以六边形出现外,还有部分呈长条状;而在纵向磁场状态下堆焊层中的硬质相基本均以六边形截面出



(a) 纵向磁场



(b) 横向磁场

图5  $I_m = 3$  A 与  $I = 160$  A 堆焊层微观组织形貌

Fig. 5 Microstructure of surfacing layer when  $I_m = 3$  A,  $I = 160$  A

现。实际上长条状是六边形硬质相的侧面,所以其硬度应和六边形一样,但由于长条状所占的体积较大,这使得堆焊层在做洛氏硬度试验时,打到硬质相的几率提高,进而提高了堆焊层的宏观硬度——洛氏硬度。但是在磨损过程中,堆焊层中的硬质相作为耐磨骨架承受大部分力,当硬质相以六边形呈现在堆焊层中,说明硬质相的轴向方向较深的“扎入”到堆焊层的基体中,其耐磨性能较好;而当硬质相以长条形出现在堆焊层中,说明硬质相的轴向方向平行于外力方向,“扎入”到基体内部的深度有限,这使得在较大的外力作用下硬质相将有脱离的倾向,此外脱离的硬质相将成为磨料进一步加速磨损,使耐磨性较差。所以导致横向磁场对提高堆焊层的硬度作用明显,而纵向磁场可以显著改善堆焊的耐磨性。

#### 2.4 横纵向磁场作用机理差异性分析

通过上述性能、组织分析,发现横向与纵向磁场状态下堆焊层的性能存在差异性,出现如此的变化其主要是因为磁场的作用所致。由于电弧和熔池在堆焊过程中都是由带电粒子组成的电流通路,因此在外加磁场状态下将受到磁场作用而改变其原来的运动形式。横向磁场是由安装在试板下方的线圈产生的,而磁场线圈上面放置的低碳钢试板为磁性材料,这将使大部分磁力线从试板中通过,所以等离子堆焊电弧虽然在其所受到的洛伦兹力的作用下,进行相应的摆动或旋转<sup>[6]</sup>,但是电弧实际所受到的电磁力相对较小,横向磁场对熔池的作用效果要比电弧明显,也就是说电弧受到磁场的作用较小,其能量密度的改变程度也较小。由于纵向磁场是由安装在枪体上的线圈产生的,所以纵向磁场将主要作用于电弧,使电弧产生螺旋向下的旋转运动<sup>[5]</sup>,电弧的旋转使其电流密度增大,电弧挺度大,进而使堆焊层实际吸收的热量增多。所以横向磁场状态电弧的能量密度要小于纵向磁场状态下,最终横向磁场作用下堆焊最佳工艺参数出现滞后于纵向磁场。至于横纵状态下堆焊层组织与性能随磁场电流变化规律的差异性,主要是因为堆焊层所受磁场力方向不同所致。通过相关分析发现,图5中白色物质为堆焊层中的硬质相,其化学成分经过分析应为Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>。而硬质相Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>是顺磁性材料,在磁场中Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>将以易磁化方向分布于磁场中,进而呈现出一定的择优取向生长规律。由于文中试验采用两种不同磁场形式,即直流横向磁场和直流纵向磁场,这两种磁场磁力线分布截然不同。在横向磁场状态下,磁力线是垂直于电弧轴线,而纵向磁场状态下,磁力线是平行于电弧轴线。因此在这两种磁场作用下,堆焊层中硬

质相Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>由于受力方向不同而使其分布形式不同。在横向磁场状态下,由于堆焊层熔池同时受到外加磁场的洛伦兹力和本身电弧感应产生的磁偏吹力的共同作用,使堆焊熔池中受力并不是垂直或平行于堆焊层表面,而是呈一定的角度,所以硬质相的分布也呈现出较凌乱情况,表现为堆焊层中硬质相同时以六边形和长条形形式出现。在纵向磁场状态下,外加磁场对电弧和熔池作用明显明确,其方向是垂直于堆焊层表面,因此堆焊层中硬质相也将六边形截面形式出现在堆焊中,即硬质相的长轴(长条形)沿着磁力线方向垂直于堆焊层表面分布。硬质相分布形态的不同直接反映到它们的力学性能上,这一点通过上面力学性能的分析可以得到佐证。

### 3 结 论

(1) 直流横向磁场对提高堆焊层的硬度的作用明显,而直流纵向磁场对提高堆焊层的磨损量作用明显。

(2) 无论直流横向还是纵向磁场,都对提高堆焊中硬质相起到积极作用,但两者对硬质相的分布形态有所不同。直流横向磁场状态下堆焊层中的硬质相分布较杂乱,六边形和长条形均有出现;而直流纵向磁场状态下,堆焊层中的硬质相基本均以六边形形式出现。

### 参考文献:

- [1] Brown D C. The effect of electromagnetic stirring and mechanical vibration on arc welding[J]. Welding Journal, 1962, 41(2): 41–50.
- [2] Tseng C F, Savage W F. The effect of arc oscillation in either the transverse or longitudinal direction has a beneficial effect to the fusion zone microstructure and tends to reduce sensitivity to hot cracking[J]. Welding Journal, 1971, 50(12): 777–785.
- [3] 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.
- [4] 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]. 路登平, 韦福水, 译. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [5] 刘政军, 陈宏, 刘臣, 等. 等离子堆焊层的组织与性能的磁场控制[J]. 焊接学报, 2005, 26(8): 16–21.  
Liu Zhengjun, Chen Hong, Liu Chen, et al. Magnetic field control on microstructure and properties of plasma arc surfacing layer [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(8): 16–21.
- [6] 武志斌. 外加直流横向磁场对铁基堆焊层组织性能的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2010.

**作者简介:** 苏允海,男,1980年出生,博士,讲师。主要从事焊接冶金、特种焊接材料及表面强化方向的研究。发表论文20余篇。Email: su\_yunhai@yahoo.com.cn

ized the adaptive online detection on different dynamic characteristics of arc welding power supply. The main idea of this method was to select some certain features from the complete feature set which were the closest to the detection targets. The correlation among features and the efficiency of the online detection were fully taken into account in the use of this method. A perfect welding data collection platform was set up, the samples of the voltage and current data were collected in the 189 welding processes, and the artificial evaluation results were taken as the teacher's signals, namely the cluster labels, in the dimension reduction. 150 samples were randomly selected as training set, while the remaining 39 samples were used as the test suite. The results of the experiments showed that the automatic evaluation accuracy of the chosen one reached 97.435 9% and satisfied the application requirements when the optimal feature subset was chosen based on the dimension reduction method.

**Key words:** arc welding power supply; online detection; Dimensionality reduction

**Application of image morphology in detection of initial welding position** WANG Jian ,WEI Shanchun ,LIN Tao ,CHEN Shanben ( Intelligentized Robotic Welding Technology Laboratory ,Shanghai Jiao Tong University ,Shanghai 200240 ,China) . pp 21 – 24

**Abstract:** The image morphology was introduced to detect the initial welding position of straight welding seam. The straight seam image was acquired by using a small CCD camera. The erosion edge detection algorithm was used to process the image, which could maintain the key information and eliminate other interference. Finally the initial welding position was obtained by filter with directional liner structure elements and Hough transformation. The whole processing is very intuitionistic, simple and fast. In addition, it's higher self-adaptability, higher process accuracy and stronger robustness. This research can meet the need of practical work, and lay a good foundation for the guidance of initial welding position.

**Key words:** image morphology; structure elements; initial welding position

**FEM of welding stress in AH36 steel plate with different welding parameters** WU Mingfang<sup>1</sup> ,LU Xuedong<sup>1</sup> ,CEN Yue<sup>2</sup> ,WANG Huan<sup>2</sup> ( 1. Department of Material Science and Engineering ,Jiangsu University of Science and Technology ,Zhenjiang 212003 ,China; 2. HuDong ZhongHua Ship Building Company Limited ,Shanghai 200129 ,China) . pp 25 – 28

**Abstract:** With the three-dimensional finite element and experimental method, the residual stress in the AH36 steel plate of 6 mm in thickness under different welding conditions was studied in this paper. The results showed that the peak stress, which was the largest with the combined welding method, was related with the welding heat input under the same cooling condition. The longitudinal stress distribution varies with cooling conditions for the same welding process. Compared with the conventional welding, the welding residual stress distribution, especially in the peak residual tensile stress, was improved by water cooling. An experiment with the same parameters was carried out to verify the finite element simulation results. The experimental results

are consistent with the numerical results, which indicates that the welding stress evolution under different welding conditions can be simulated with the three-dimensional finite element simulation technology, and provide the basis of the control of welding residual stress.

**Key words:** AH36 steel; residual stress; water cooling; finite element method

**Theoretical analysis for output characteristics of soft-switching arc welding inverter** WANG Ruichao ,XUE Jiaxiang ( School of Mechanical and Automotive Engineering ,South China University of Technology ,Guangzhou 510641 ,China) . pp 29 – 32

**Abstract:** Through the analysis of phase-shifted soft-switching full-bridge power converter characteristics, a soft-switching arc welding power system topology of peak-current mode control is proposed. The full-bridge model of arc welding power is equated to Buck model using small-signal analysis method. Buck model works in continuous conduction mode or discontinuous conduction mode under different load conditions. Based on circuit theory, the boundary points of static characteristics in one PWM working process cycle of phase-shifted full-bridge zero-voltage-switch are analyzed with theoretical derivation. The adjustment range of welding parameters is directly determined by the boundary curves of arc welding power output characteristics. Thus, it can achieve the required output characteristics of arc welding power source by using different control strategies.

**Key words:** soft-switching arc welding power; equivalent model; boundary of output characteristics; peak-current mode control

**Comparison of microstructure and properties of deposited metal under DC longitudinal/transverse magnetic field** SU Yunhai ,LI Lecheng ,LIU Zhengjun ( School of Materials Science and Engineering ,Shenyang University of Technology ,Shenyang 110780 ,China) . pp 33 – 36

**Abstract:** The Fe5 alloy was overlaid on low carbon steel by plasma arc surfacing with DC longitudinal magnetic field and DC transverse magnetic field, respectively. The magnetic field current and surfacing current were changed during surfacing. After PLA with magnetic field, the OM, wear loss test, micro-hardness test were used to analyze the effect of magnetic field style on microstructure and properties of deposited metal. The difference and mechanisms of magnetic field style and parameters on properties and microstructure of deposited metal were researched. The results indicate that the introduced longitudinal and transverse magnetic field can increase the nucleation ratio of hard phase and improve the properties of deposited metal. The distribution of hard phase is random under the transverse magnetic field, but it is hexagonal under longitudinal magnetic field. So the effect of DC longitudinal magnetic field is better than that of DC transverse magnetic field on wear resistance of surfacing layer, the effect of DC longitudinal magnetic field is worse than that of DC transverse magnetic field on hardness of surfacing layer.

**Key words:** plasma arc surfacing; DC transverse magnetic field; DC longitudinal magnetic field; Fe-based alloy; microstructure and properties