

# 稳态磁场对激光熔注尖角 WC 涂层颗粒分布及显微组织的影响

胡晓冬<sup>1,2</sup>, 朱秀晖<sup>1,2</sup>, 胡勇<sup>1,2</sup>, 王梁<sup>1,2</sup>, 陈智君<sup>1,2</sup>, 姚建华<sup>1,2</sup>

(1. 浙江工业大学 激光先进制造研究院, 杭州 310014;

2. 浙江省高端激光制造装备协同创新中心, 杭州 310014)

**摘要:** **目的** 研究稳态磁场对激光熔注尖角 WC 涂层中 WC 颗粒分布及涂层显微组织的影响。**方法** 利用稳态磁场辅助激光熔注技术, 在 316L 不锈钢基板上制备了 WC/316L 复合涂层。采用光学显微镜 (OM) 对涂层横截面形貌进行分析, 采用扫描电镜 (SEM) 观察涂层显微组织结构和特征, 采用能谱仪 (EDS) 对涂层元素分布进行分析, 采用维氏硬度计对涂层的显微硬度进行测定。**结果** 未施加稳态磁场的涂层中 WC 颗粒均匀分布, 涂层主要由鱼骨状的共晶组织组成, 在涂层的顶部出现了十字花状的过共晶组织。施加稳态磁场后, 涂层横截面形貌发生明显改变, 涂层深度减小, 宽度增大, WC 颗粒主要分布在涂层底部。涂层顶部由细长的树枝状组织组成; 在涂层中部, 树枝状组织变短变粗; 在涂层底部, 转变为大量的十字花状组织。施加稳态磁场后, 涂层的平均显微硬度由未加磁场时的 394 HV<sub>0.3</sub> 提高到 478 HV<sub>0.3</sub>。**结论** 稳态磁场能有效作用于熔池, 通过抑制熔池的流动来改变 WC 颗粒的受力状况以及熔池的传热、传质情况, 最终改变熔池中 WC 颗粒的分布状态和涂层的显微组织。

**关键词:** 激光熔注; 稳态磁场; 横截面形貌; 尖角 WC 颗粒; 显微组织; 显微硬度

**中图分类号:** TG174.44; V261.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)02-0054-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.02.008

## Effect of Steady Magnetic Field on Distribution and Microstructure of Sharp WC Particle by Laser Melt Injection

HU Xiao-dong<sup>1,2</sup>, ZHU Xiu-hui<sup>1,2</sup>, HU Yong<sup>1,2</sup>, WANG Liang<sup>1,2</sup>, CHEN Zhi-jun<sup>1,2</sup>, YAO Jian-hua<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Laser Advanced Manufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Zhejiang Provincial Collaborative Innovation Center of High-end Laser Manufacturing Equipment, Hangzhou 310014, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effect of steady magnetic on the distribution and microstructure of sharp WC particle by the laser melt injection coating. The WC/316L composite coating was prepared on 316L stainless steel by laser melt injection under the steady magnetic field. The profile of coating cross section was analyzed by microscope (OM), the microstructure and characteristics of the coating were analyzed by scanning electron microscope (SEM), the element distribution of the coating was

收稿日期: 2018-10-23; 修订日期: 2018-12-25

Received: 2018-10-23; Revised: 2018-12-25

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFB1103601); 国家自然科学基金资助项目 (51705464)

Fund: The National Key Research and Development Program of China (2017YFB1103601), the National Natural Science Foundation of China (51705464)

作者简介: 胡晓冬 (1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光加工技术领域方面的研究。

Biography: HU Xiao-dong (1975—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: laser processing technology.

通讯作者: 陈智君 (1978—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为激光表面改性技术方面的研究。邮箱: roll@zjut.edu.cn

Corresponding author: CHEN Zhi-jun (1978—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: laser manufacturing technology and application. E-mail: roll@zjut.edu.cn

analyzed by energy disperse spectrometer (EDS), and the hardness of the coating was determined by Vicker shardness tester. In the coating not under steady magnetic field, WC particles were evenly distributed. The coating was mainly composed of herring bone microstructure, but there were some cross-shaped hypereutectic structureson the top of the coating. In the coating under steady magnetic field, the profile of the cross section changed significantly. The depth of profile decreased, the width of profile increased, and the WC particles were mainly distributed at the bottom of the coating. On the top of the coating, slender dendritic structures were formed. In the middle of the coating, the shorter and thicker dendritic structure appeared. At the bottom of the coating, lots of cross-shaped hypereutectic structures occurred. After the steady magnetic field was applied, the average micro-hardness of the coating increased from 394HV<sub>0.3</sub> to 478HV<sub>0.3</sub>. The steady magnetic field can affect the molten pool effectively, and change the stress conditions of WC particles and the heat transfer and mass transfer by inhibiting the flow of molten pool, so as to change the distribution of WC particles in the molten poll and the microstructure of the coating.

**KEY WORDS:** laser melt injection; steady magnetic field; profile of cross section; sharp corner WC particle; microstructure; micro-hardness

激光熔注技术作为一种表面强化技术已广泛应用于工业生产中<sup>[1]</sup>。随着激光装备及材料技术的发展,以及工业装备所服役环境的日趋恶劣,人们对强化涂层提出了更高的要求。单一合金涂层已越来越难以满足工业应用,通过激光熔注硬质颗粒来提高涂层性能成为了一种有效的方法。WC 颗粒具有高硬度、高耐磨性,且与 Fe 基合金具有良好的润湿性<sup>[2-3]</sup>,故本文采用 WC 作为激光熔注颗粒增强材料。激光熔注硬质颗粒的过程中,涂层性能与硬质颗粒的分布以及涂层的显微组织密切相关,单纯通过调整激光熔注工艺参数,虽然可在一定程度上改变硬质颗粒的分布状态,但很难实现颗粒的梯度分布,同时工艺调控过程复杂,有可能引入其他新问题。为此,本文通过在激光熔注过程中施加稳态磁场(MCF)的方法,对熔池区域施加恒定可调的稳态磁场,实现对激光熔注涂层中硬质颗粒分布以及涂层显微组织的调控。

磁场辅助激光加工作为一种外场辅助的方法,国内外许多学者都对其进行了研究。德国 Oliver<sup>[4]</sup>采用稳态磁场实现 TiC 颗粒强化铝合金基体气孔缺陷的消除。德国联邦材料测试研究所(BAM)实验室的 Bachmann<sup>[5-6]</sup>将稳态以及交变磁场引入铝合金激光焊接工艺中,实现焊接形貌的调控。德国不莱梅射线研究所(BIAS)的 Gatzert 等<sup>[7]</sup>建立了稳态磁场下激光焊接熔池对流的 CFD 模型,揭示了稳态磁场对激光焊接熔池流速的抑制机理。本课题组前期对电磁场辅助激光熔注仿真及实验进行了系列研究,通过数值模拟仿真发现静态磁场对熔池速度起抑制作用<sup>[8]</sup>。通过实验研究发现,电磁复合场可显著改变,甚至反转球形 WC 的分布梯度<sup>[9-10]</sup>。国内外专家学者对于稳态磁场作用下激光熔注硬质颗粒的研究,大多集中在球形 WC 颗粒的分布及组织研究,针对磁场调控尖角 WC 颗粒研究很少见报道。因此,本文基于课题组前期的研究结果<sup>[11]</sup>,通过稳态磁场对于熔池传热、传质过程的控制,研究了稳态磁场对激光熔注尖角 WC 颗粒过程中 WC 的分布状态和显微组织的影响。

1 实验

1.1 实验用材

实验所用的基体材料为 316L 不锈钢,其主要元素为 Fe、Cr、Ni、Mo 和 Mn 等,其化学成分如表 1 所示。基板的尺寸为 10 mm×20 mm×200 mm。实验前,基板经砂纸打磨,丙酮清除油污。实验所用的粉末为尖角 WC,粉末的粒径范围为 75~106 μm,SEM 图如图 1 所示。实验前,将粉末置于 120 ℃的保温箱干燥 2 h。实验基材和熔注粉末皆为顺磁性材料,不会直接受到磁场的作用而影响粉末利用率。

表 1 316L 基体不锈钢的化学成分  
Tab.1 Chemical composition of 316L matrix stainless steel wt%

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
0.02	0.55	1.55	<0.03	<0.03	10.0	16.5	2.08	Bal.

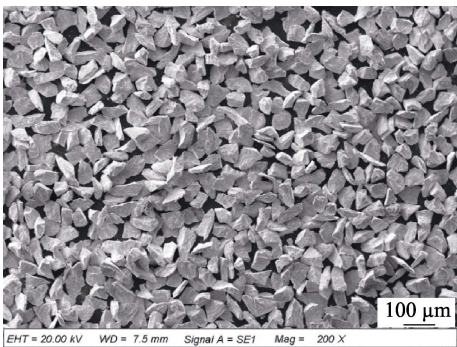


图 1 WC 粉末形貌  
Fig.1 Morphology of WC powder

1.2 分析方法

实验采用的激光器为 2 kW 光纤耦合半导体激光器,运动机构为 ABB 工业机器人。光斑直径为 4 mm,采用自制送粉器,送粉气体和保护气体均采用氩气,

装置中的磁场由电磁铁提供,磁感应强度的调节范围为 0~1.2 T。为了更明显地反映稳态磁场对 WC 涂层颗粒分布以及组织的影响规律,经过前期的工艺参数优化,选用的工艺参数为:磁感应强度 1.2 T,送粉量 10 g/min,激光束扫描速率 4 mm/s,激光功率 1600 W,光斑直径 4 mm。稳态磁场辅助激光熔注的装置如图 2 所示。在实验过程中,试样和磁场装置保持不变,沿试样长度方向移动激光头扫描试样。熔注后,采用线切割将单道熔注试样沿横截面和纵截面切割,然后进行镶样、磨抛,最后用王水腐蚀。王水是浓盐酸和浓硝酸按体积比 3:1 组成的混合物。采用 ZEISS 光学显微镜 (OM) 和 ZEISS EVO18 型扫描电子显微镜 (SEM) 对涂层的组织进行观察,采用 BRUKER XFlash 6130 型能谱仪 (EDS) 对熔注层的元素分布进行分析。采用 HMV-2TADWXY 型自动式维氏硬度计对试样的显微硬度进行测试,载荷 2.942 N,加载时间 10 s。

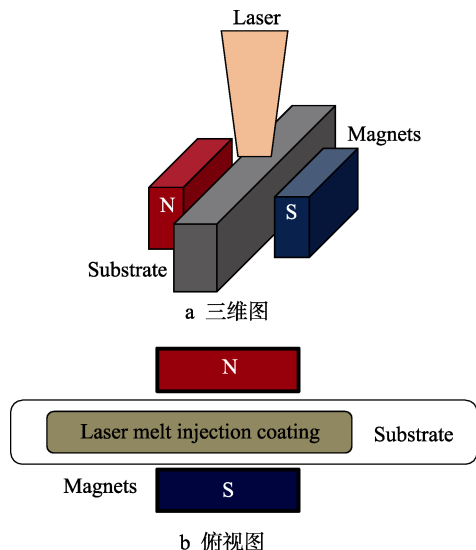


图 2 稳态磁场辅助激光熔注示意图

Fig.2 Schematic diagram of laser melt injection assisted by steady magnetic field: a) three-dimensional view; b) top view

## 2 结果与讨论

### 2.1 WC 涂层横截面形貌分析

图 3 为稳态磁场施加前后的涂层横截面形貌。通过测量涂层宽度、高度及深度数值,发现当施加 1.2 T 稳态磁场后,涂层深度由施加前的 1407  $\mu\text{m}$  降低到 864  $\mu\text{m}$ ,降低了 38.6%;涂层宽度由施加前的 4083  $\mu\text{m}$  增加到 4654  $\mu\text{m}$ ,增加了 13.9%;涂层高度由施加前的 652  $\mu\text{m}$  降低到 405  $\mu\text{m}$ 。利用图像处理方法测算施加稳态磁场前后涂层横截面面积,其值分别为 5.02  $\text{mm}^2$  和 4.95  $\text{mm}^2$ ,涂层横截面面积相差小于 1.5%,这也说明在相同的激光工艺条件下,磁场未改变熔池的热输入量。

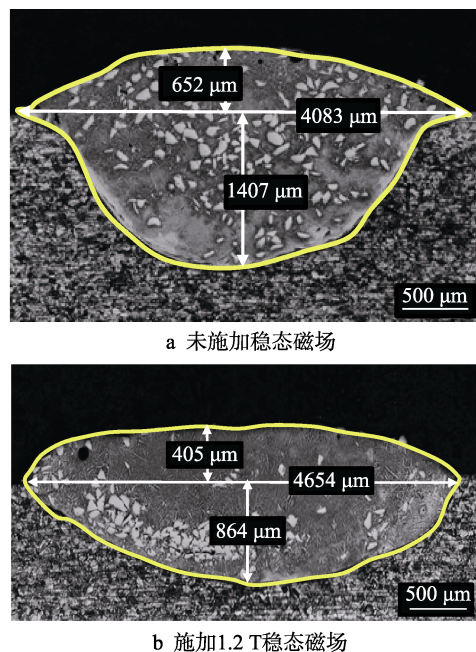


图 3 激光熔注 WC 涂层横截面形貌

Fig.3 Profile of cross section of WC coating by laser melt injection: a) without MCF; b) 1.2 T MCF

### 2.2 WC 颗粒的分布特征

图 4 为相同工艺参数下,磁场强度为 0、1.2 T 时获得的涂层 WC 颗粒分布图。由图 4 可知,施加稳态磁场前,WC 颗粒在熔池中为均匀分布的状态;施加 1.2 T 稳态磁场后,WC 颗粒大量分布在涂层的底部。

通过对熔池中单个 WC 颗粒受力分析可知(图 5b),WC 颗粒在熔池中主要受到重力  $G$ 、浮力  $F_B$  和拖曳力  $F_D$  (其中  $F_x$ 、 $F_y$  为  $F_D$  的分量)的作用<sup>[12]</sup>。其中颗粒所受拖曳力的表达式为:

$$F_D = \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p \left( \frac{1}{\tau_p} \right) (U_f - U_s) \quad (1)$$

式中:  $d_p$  为颗粒直径;  $\rho_p$  为熔池金属熔体的密度;  $\tau_p$  为颗粒松弛时间;  $U_f$  为流体流速;  $U_s$  为颗粒流速。

WC 颗粒在熔池中的运动如图 5a、图 5c 所示,在尖角 WC 颗粒进入熔池后,未施加稳态磁场前,熔池流体由于表面张力梯度力的驱使<sup>[13]</sup>,在表层由熔池中心沿液面两侧向下运动。因此,WC 颗粒在注入过程中,将受到侧向(即水平方向)流体拖曳力  $F_x$  的作用,在拖曳力的作用下,WC 颗粒在熔池中被“搅拌”均匀。当施加 1.2 T 稳态磁场后,熔池中流动的金属液体在垂直于磁场强度方向能产生感应电流,该电流与磁场相互耦合,产生与熔池运动时刻相反的感应洛伦兹力,因此熔池流动被抑制<sup>[8]</sup>,流速  $U_f$  减小。由公式(1)可知,熔池的拖曳力  $F_D$  减小,因此水平方向流体的拖曳力  $F_x$  也相应减小,导致其侧向速度降低,又由于尖角 WC 颗粒易穿透熔池液面,使其易直接注入至熔池底部。同时,因熔池整体速度被抑制,到达底部的 WC 颗粒也很难被流动流体输运至上部。



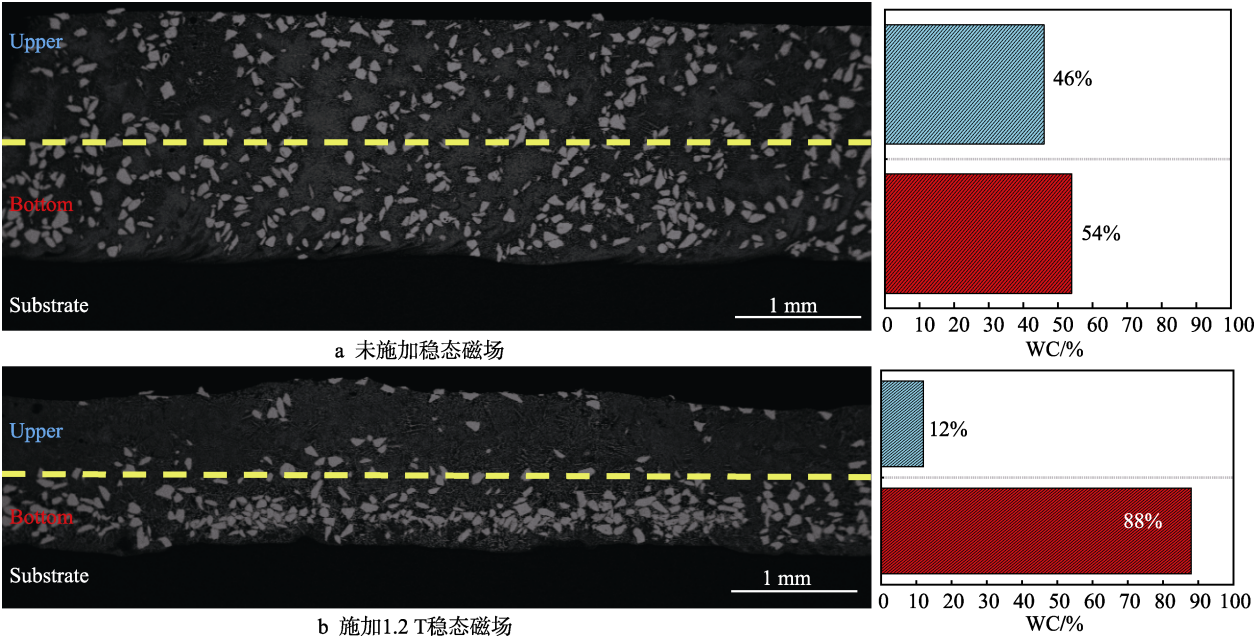


图 4 激光熔注 WC 涂层纵截面 WC 颗粒分布图  
Fig.4 Distribution of WC particle on the longitudinal section of the WC coating by laser melt injection:  
a) without MCF; b) 1.2 T MCF

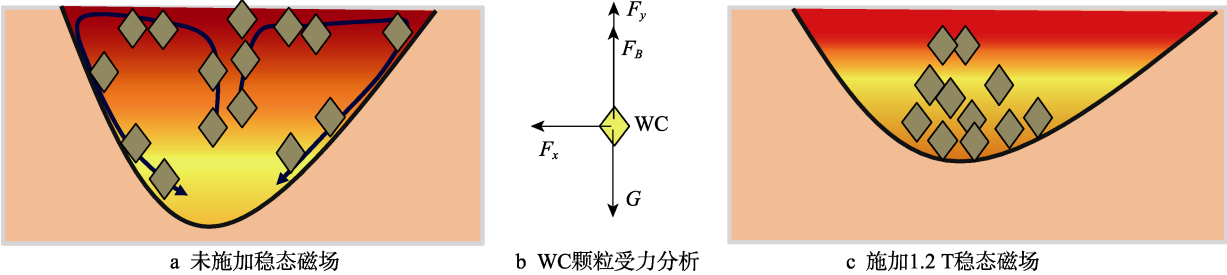


图 5 WC 颗粒受力分析及运动趋势示意图  
Fig.5 Schematic diagram of stress distribution and motion trace of WC particles:  
a) without MCF; b) stress analysis of WC particle; c) 1.2 T MCF

所以，当施加稳态磁场后，WC 颗粒出现沉底现象。

2.3 显微组织分析

图 6、图 7、图 8 分别为施加稳态磁场前后激光熔注层顶部、中部与底部的显微组织图。如图 6a，未施加稳态磁场熔注层顶部主要由鱼骨状的共晶组织组成，并伴随较多十字花状的过共晶组织；如图

6b，施加稳态磁场后熔注层顶部主要由大量树枝状白色过共晶组织组成。如图 7a，未施加稳态磁场熔注层中部由片层状鱼骨状组织组成；如图 7b，施加稳态磁场后熔注层中部主要由树枝状白色过共晶组织组成，但相对于涂层顶部，涂层中部的树枝状组织变短、变粗。如图 8a，未施加稳态磁场熔注层底部主要由鱼骨状共晶组织组成，相对于涂层中部，涂层

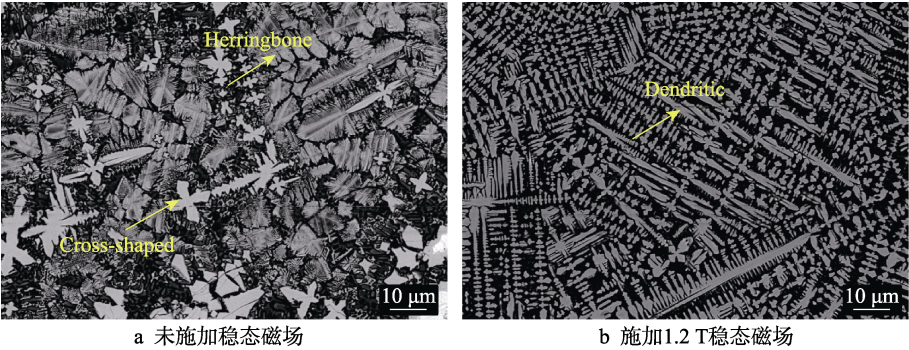
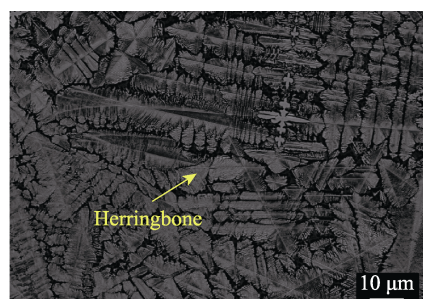


图 6 激光熔注 WC 涂层顶部显微组织  
Fig.6 Microstructure at the top of the WC coating by laser melt injection: a) without MCF; b) 1.2 T MCF



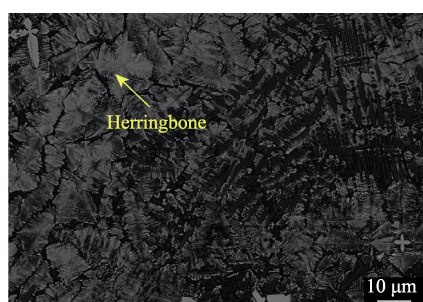


a 未施加稳态磁场

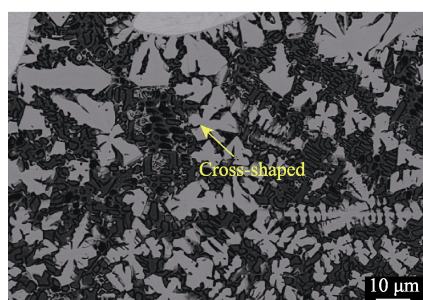


b 施加1.2 T稳态磁场

图7 激光熔注 WC 涂层中部显微组织  
Fig.7 Microstructure in the middle of the WC coating by laser melt injection: a) without MCF; b) 1.2 T MCF



a 未施加稳态磁场

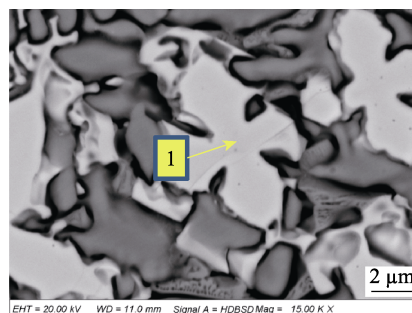


b 施加1.2 T稳态磁场

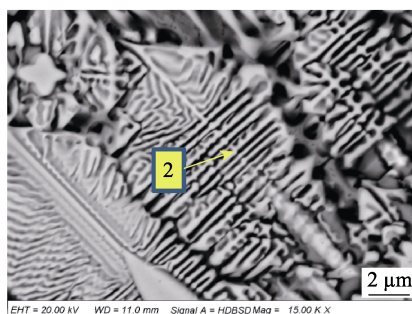
图8 激光熔注 WC 涂层底部显微组织  
Fig.8 Microstructure at the bottom of the WC coating by laser melt injection: a) without MCF; b) 1.2 T MCF

底部的鱼骨状组织数量减少；如图 8b，施加稳态磁场后熔注层底部主要由十字花状过共晶组织组成。

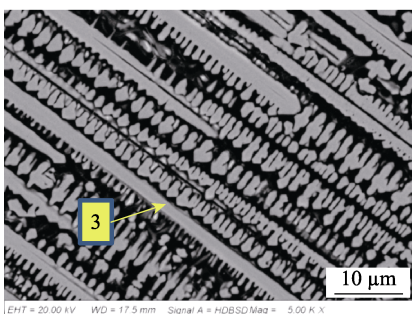
熔注层中的组织形态主要与基体 ( $\gamma$ -Fe 固溶体) 中所固溶的 W 和 C 元素相关，因此对不同形态的组织元素含量进行分析，如图 9 所示，能谱分析结果如表 2 所示。从表 2 中可以发现图 6、图 7、图 8 中的鱼骨状共晶组织、十字花状过共晶组织以及树枝状过



a 十字花状组织



b 鱼骨状组织



c 树枝状组织

图9 激光熔注 WC 涂层显微组织  
Fig.9 Microstructure of the WC coating by laser melt injection: a) cross-shaped structure; b) herring bone structure; c) dendritic structure

表2 图9中不同组织的能谱分析结果  
Tab.2 EDS analysis results of different microstructure in fig.9

Position	wt%						
	C	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	W
Point 1	14.50	6.14	0.23	18.05	2.33	1.43	57.32
Point 2	16.32	8.76	0.45	26.24	3.59	2.37	42.26
Point 3	18.03	6.65	0.36	18.86	2.97	1.57	51.57

共晶组织，同时存在 C、W、Fe、Cr、Ni 等元素，且 W 含量对比情况为：十字花组织>树枝状组织>鱼骨状组织。结合课题组前期的 XRD 分析结果<sup>[9]</sup>以及表 2 的能谱分析，上述组织均为 WC 与基体金属发生冶金反应所生成的一类  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$  等  $\text{M}_6\text{C}$  型碳化物。

为了解释稳态磁场的施加对于涂层组织转变的作用机理，根据 Fe-W-C 三元相图（图 10a）分析鱼骨状共晶组织、十字花状过共晶组织以及树枝状过共

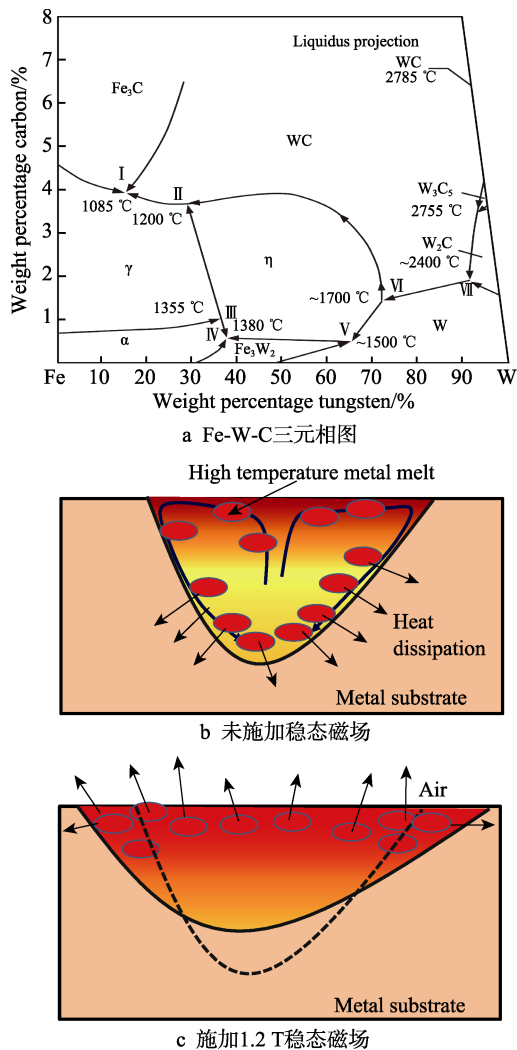
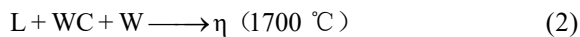
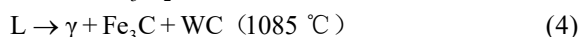
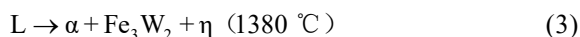


图 10 Fe-W-C 三元相图<sup>[17]</sup>与熔池传热示意图  
Fig.10 Phase diagram of Fe-W-C and diagram of heat transfer in molten pool: a) phase diagram of Fe-W-C; b) without MCF; c) 1.2 T MCF

晶组织的形成条件和过程。WC 颗粒进入熔池后, 与高温金属熔体接触而分解出 W 元素和 C 元素, 当熔池体系中 W 含量(质量分数, 全文同)为 35%~52%、C 含量为 2.8%~3.8%时, 熔池将发生如下反应<sup>[14]</sup>:



$\eta$  相为  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ , 熔池 WC 颗粒周围边缘为十字花状的组织以及以  $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$  为主的过共晶组织。随着熔池中 W 元素和 C 元素不断输运, 两者的含量不断降低, 同时熔池温度也在逐渐降低, 在平衡状态下, 熔池中发生以下反应:



在液相中析出  $\eta$  相后, 熔池液相中的 W 和 C 含量迅速降低, 合金逐渐接近共晶成分。当体系中 W 元素含量在 20%~35%时, 涂层中就会形成由  $\eta$  相和  $\gamma$ -Fe 固溶体组成的鱼骨状共晶组织<sup>[15]</sup>。

未施加稳态磁场前, 如图 10b 所示, 熔池内部流

体运动剧烈, 通过熔池的对流使 WC 颗粒分布较为均匀, WC 颗粒熔解产生的 W 元素和 C 元素, 通过熔池对流和元素扩散也均匀地分布在涂层中。W 元素和 C 元素在输运过程中, 两者的含量不断降低, 同时温度也逐渐下降, 最终形成了由  $\eta$  相和  $\gamma$ -Fe 固溶体组成的鱼骨状共晶组织, 如图 7a、图 8a 所示。涂层顶部的 WC 颗粒最后注入到熔池中, WC 熔解产生 W 元素和 C 元素向基体熔池扩散, 由于涂层顶部冷却速度快, 液态熔池停留时间短, W 元素和 C 元素来不及输运, 使得涂层顶部的液相中 W 含量增高, 当体系中 W 元素含量在 35%~52%时, 一次碳化物在冷却过程中首先析出并长大, 成为棒状、十字花状或树枝状组织。由于熔池顶部的凝固速度快, 因此最终形成了十字花状的组织, 如图 6a 所示。

稳态磁场的施加不仅仅对熔池的流动产生影响, 同时也改变了熔池的传热情况, 由熔注层横截面的形状改变可证实这一点, 图 3b 中熔池界面结合线变得更平缓, 该结果符合文献[5]获得的形貌改变结果。图 10b、c 为稳态磁场施加前后的传热分析示意图, 当施加稳态磁场后, 熔池流速被抑制<sup>[8]</sup>。熔池对流减弱, 熔池顶部的高温熔体无法通过熔池对流被带到底部与金属基体接触传热, 使得大量的高温熔体留在熔池顶部。同时, 由于高温熔体无法通过熔池对流作用向下传热, 因此涂层的深度会明显减小, 熔池顶部积聚的高温熔体向熔池水平方向传热, 因此涂层宽度会增加, 这与图 3 的实验结果吻合良好, 说明传热分析的正确性。由于磁场施加后, 熔池温度升高, 熔池中 WC 的溶解量增加, 同时由于 WC 颗粒富集在涂层底部, 因此 W 元素的含量高于中部和顶部。由反应式 (2) 可知, 当体系 W 含量较高时, 涂层析出的碳化物呈十字花状, 并且熔池底部凝固较快, 十字花状的组织来不及长大变粗, 所以涂层组织如图 8b 所示。随着 W 元素和 C 元素向中部和顶部扩散, 涂层组织在顶部和中部的一次碳化物首先析出并长大, 成为棒状、十字花状或树枝状组织, 同时由于施加了稳态磁场, 导致涂层顶部和中部的温度上升和冷却速度下降, 涂层中部和顶部的一次碳化物有更多的时间长大, 最终形成了树枝状组织<sup>[16]</sup>, 如图 6b、图 7b 所示。

## 2.4 显微硬度分析

图 11 为施加稳态磁场前后涂层显微硬度分布曲线。由于 WC 颗粒的硬度显著高于金属基组织的硬度, 因此在硬度测试时均避开 WC 颗粒, 测得硬度皆为金属基组织的硬度。由图 11 可见, 316L 基体的硬度约为  $180\text{HV}_{0.3}$ , 而金属基组织的硬度则显著提升至基体硬度的 2 倍以上。未施加稳态磁场时, 熔注层的硬度分布较均匀, 硬度平均值为  $394\text{HV}_{0.3}$ ; 施加稳态磁场后, 涂层的硬度为  $478\text{HV}_{0.3}$ 。硬度出现上述变化的主要原因是熔池运动和颗粒分布变化而引起的金



属基组织的变化,因为过共晶组织、共晶组织和亚共晶组织的硬度依次降低。由上述显微组织分析可知,未施加稳态磁场时,涂层主要由大片鱼骨状共晶组织组成;而施加稳态磁场后,涂层组织主要由树枝状和十字花状的过共晶组织组成。因此,施加了稳态磁场后,涂层表现出了更高的硬度。

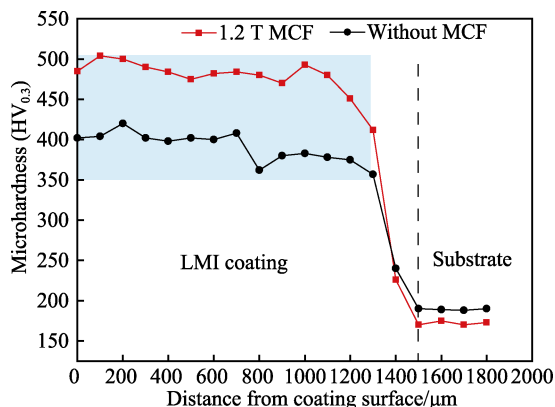


图 11 激光熔注 WC 涂层的显微硬度分布曲线  
Fig.11 Micro-hardness distribution curve of the WC coating by laser melt injection

### 3 结语

1) 施加 1.2 T 稳态磁场后,涂层形貌发生明显变化,与未施加磁场的涂层相比,涂层深度降低了 38.6%,涂层深度明显减小,宽度增加了 13.9%。

2) 施加稳态磁场前,WC 颗粒在涂层中均匀分布;而施加 1.2 T 稳态磁场后,WC 颗粒主要分布在涂层的底部。

3) 施加 1.2 T 稳态磁场后,由于颗粒分布状态和熔池对流运动的变化,导致涂层显微组织由大片鱼骨状共晶组织向树枝状和十字花状的过共晶组织转变。

4) 施加 1.2 T 稳态磁场后,涂层平均显微硬度由未加磁场时的 394HV<sub>0.3</sub> 增加到 478HV<sub>0.3</sub>。涂层硬度的提升主要是由于涂层组织由共晶组织向过共晶组织转变,过共晶组织比共晶组织有更高的硬度。

#### 参考文献:

- [1] 陈彦宾,刘德健,李俐群,等. 激光熔注 WC<sub>p</sub>/Ti-6Al-4V 梯度复合材料层形成机制[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1718-1722.  
CHEN Yan-bin, LIU De-jian, LI Li-qun, et al. Formation mechanism of WC<sub>p</sub>/Ti-6Al-4V graded metal matrix composites layer produced by laser melt injection[J]. Chinese journal of lasers, 2008, 35(11): 1718-1722.
- [2] KRESSE T, MEINHARD D, BERNTHALER T, et al. Hardness of WC-Co hard metals: Preparation, quantitative microstructure analysis, structure-property relationship and modelling[J]. International journal of refractory metals & hard materials, 2018, 75: 287-293.
- [3] 赵运才,上官绪超,张继武,等. 激光重熔改性 WC/Fe 等离子喷涂涂层组织及其耐磨性能[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 20-27.  
ZHAO Yun-cai, SHANGGUAN Xu-chao, ZHANG Ji-wu, et al. Microstructure and wear resistance of WC/Fe plasma sprayed coatings modified by laser remelting[J]. Surface technology, 2018, 47(3): 20-27.
- [4] VELDE O, TECHEL A, GRUNDMANN R. Suppression of the development of pores during laser-induced surface dispersion of TiC into aluminium, by means of a static magnetic field[J]. Surface & coatings technology, 2002, 150(2-3): 170-176.
- [5] BACHMANN M, AVILOV V, GUMENYUK A, et al. About the influence of a steady magnetic field on weld pool dynamics in partial penetration high power laser beam welding of thick aluminium parts[J]. International journal of heat & mass transfer, 2013, 60: 309-321.
- [6] BACHMANN M, AVILOV V, GUMENYUK A, et al. Numerical simulation of full-penetration laser beam welding of thick aluminium plates with inductive support [J]. Journal of physics D: Applied physics, 2012, 45(3): 35201-35213.
- [7] GATZEN M, TANG Z. CFD-based model for melt flow in laser beam welding of aluminium with coaxial magnetic field [J]. Physics procedia, 2010, 5: 317-326.
- [8] 胡勇,陈智君,王梁,等. 静态磁场对激光熔池传热及流动行为的调控作用数值模拟[J]. 应用激光, 2014, 34(6): 508-512.  
HU Yong, CHEN Zhi-jun, WANG Liang, et al. Numerical simulation of the static magnetic field regulation of the laser molten pool heat transfer and flow behavior[J]. Applied laser, 2014, 34(6): 508-512.
- [9] 宋诗英,王梁,胡勇,等. 稳态磁场辅助激光熔注制备梯度涂层[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 63-70.  
SONG Shi-ying, WANG Liang, HU Yong, et al. Graded coating produced by laser melt injection under steady magnetic field[J]. Chinese journal of lasers, 2016, 43(5): 63-70.
- [10] 赖三聘,王梁,胡勇,等. 稳态磁场辅助对激光熔注球形 WC 涂层的组织与性能研究[J]. 应用激光, 2016, 36(5): 501-505.  
LAI San-pin, WANG Liang, HU Yong, et al. Microstruc-

- ture and properties of WC composite coatings by laser melt injection assisted with steady magnetic field[J]. *Applied laser*, 2016, 36(5): 501-505.
- [11] 王梁. 电磁复合场协同激光同轴熔注对增强颗粒分布梯度的调控研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
- WANG Liang. Study of reinforcement particle distribution under an electric-magnetic composite field in laser coaxial melt injection[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
- [12] 车得福, 李会雄. 多相流及其应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 80-89.
- CHE De-fu, LI Hui-xiong. Multiphase flow and its application[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007: 80-89.
- [13] 胡雪. 激光填粉焊接熔池流动数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- HU Xue. Numerical simulation of weld pool flow in laser welding with powder feed[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [14] ANTONI-ZDZIOBEK A, SHEN J Y, DURAND-CHARRE M. About one stable and three metastable eutectic microconstituents in the Fe-W-C system[J]. *International journal of refractory metals & hard materials*, 2008, 26(4): 372-382.
- [15] RIABKINA-FISHMAN M, RABKIN E, LEVIN P, et al. Laser produced functionally graded tungsten carbide coatings on M2 high-speed tool steel[J]. *Materials science & engineering A*, 2001, 302(1): 106-114.
- [16] 赵敏海. 等离子熔化-注射制备碳化物增强涂层组织及耐磨性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- ZHAO Min-hai. Microstructure and wear resistance of carbides reinforced coating by plasma melt injection[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [17] LIU De-jian, LI Li-qun, LI Fu-quan, et al. WC<sub>p</sub>/Fe Metal matrix composites produced by laser melt injection[J]. *Surface & coatings technology*, 2008, 202(9): 1771-1777.