

文章编号 1004-924X(2012)11-2402-09

交变磁场对激光熔覆铁基复合涂层宏观形貌的影响及其微观组织演变

刘洪喜*, 蔡川雄, 蒋业华, 张晓伟, 王传琦

(昆明理工大学 材料科学与工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要:通过特殊设计的电路及作用线圈制作了交变磁场发生装置,并用其研究了不同磁场强度对激光熔覆铁基涂层宏观形貌和显微组织的影响。基于电磁学及金属凝固原理,揭示了激光熔覆涂层的固化过程和磁场诱发熔覆涂层柱状树枝晶向等轴晶转变的主要机制。实验结果表明:在交变磁场作用下,熔池金属液表面产生的趋肤效应和交变电磁力使凝固后熔覆层的表面形态呈波浪式,熔高和横截面积均随磁场电流的增加而减小,但熔宽变化不大。熔池内部产生的电磁力驱动熔体流动使树枝晶熔蚀和机械折断,游离的破碎枝晶成为新的形核核心,增加了形核率,从而促使熔覆层顶部组织由树枝晶向等轴晶转变。随着磁场电流的增加,等轴晶区扩大,但涂层底部的组织变化不明显。

关键词:激光熔覆;交变磁场;复合涂层;宏观形貌;显微组织

中图分类号:TG156.99 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122011.2402

Influence of alternative magnetic field on macro morphology and microstructure of laser cladding Fe-based composite coating

LIU Hong-xi*, CAI Chuan-xiong, JIANG Ye-hua, ZHANG Xiao-wei, WANG Chuan-qi

(Faculty of Material Science and Engineering, Kunming University of
Science and Technology, Kunming 650093, China)

* Corresponding author, E-mail: vipliuhx@yahoo.com.cn

Abstract: A alternative magnetic field generator is prepared by special circuits and active coils and the effects of different magnetic field intensities on the macro morphologies and microstructures of Fe-based composite coatings are studied by laser cladding process. Based on the electromagnetic principle and liquid metal solidification theory, it describes the solidification process of laser cladding coatings and reveals the main mechanism that magnetic field induced columnar dendrites transform into equiaxed crystals. The results show that the skin effect of liquid metal molten pool surface and alternating electromagnetic force allow the solidified cladding layer surface morphology to the wave form. The height of cladding layer and cross-section area decrease with the increase of magnetic field current, but the cladding layer width changes a little. The electromagnetic force in molten pool interior drives the dendrite ablation and mechanical break, and the free broken dendrites become a new nuclei to increase the nucleation rate, by which the top microstructure of cladding layer transforms from dendrite crys-

收稿日期:2012-07-17;修订日期:2012-09-16.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51165015);昆明理工大学分析测试基金资助项目(No. 2011008)

tals to equiaxed crystals. Furthermore, the equiaxed crystal zone becomes wider with the increase of magnetic field current, but the bottom microstructure has a little change.

Key words: laser cladding; AC magnetic field; composite coating; macro morphology; microstructure

1 引言

激光熔覆是利用高能密度激光束使熔覆材料与基体表层熔凝后形成具有冶金结合特征熔覆层的一种先进表面改性技术,其目的是改善基体的耐磨、耐蚀、耐热、耐疲劳和高温抗氧化性能,使廉价工程材料零件表面获得良好的综合性能,是一种经济实用的材料表面强化手段,现已在汽车、航空航天、模具、轧辊、石油、热能动力等行业中有着广泛的应用^[1-3]。与钴基和镍基涂层相比,铁基合金涂层具有优异的耐磨性能而且成本低廉,其成分与碳钢、铸铁接近,且界面结合牢固^[4-6]。但由于激光快速熔凝具有高温梯度和高凝固速度的特征^[7],使所得的铁基涂层凝固组织易形成方向性强、粗大的柱状枝晶^[6],这不仅降低了铁基涂层的力学性能,还容易诱发铁基涂层结晶裂纹、气孔等缺陷的形成,对涂层的质量产生不利影响。因此,改善铁基涂层凝固组织并使其细化具有重要的研究意义。

目前,通过细化熔覆层凝固组织控制熔覆层裂纹的方法主要有四种:一是添加变质剂。一般认为稀土及其氧化物对熔覆层能起到细化晶粒和净化组织的作用。如沈以赴等人^[8]在 A3 钢上用激光快速熔凝含稀土硅铁粉末的涂层,实验证明了稀土可细化晶粒、抑制柱状晶生长。刘明喜等人^[9]在 Q235 钢表面制备含纳米 CeO₂ 的 Co 基合金涂层,结果表明,纳米 CeO₂ 可细化熔覆层凝固组织,抑制树枝晶的生长,促使熔覆层形成等轴晶。但针对不同熔覆材料加入稀土及其氧化物的量不易控制,过少对熔覆层组织的作用不大,过多会使熔覆层的脆性增强,导致熔覆层出现裂纹^[10]。二是后热处理。王传琦等人^[11]在激光熔覆镍基涂层后对其进行回火处理,并对其耐腐蚀性进行了研究,表明回火处理可降低熔覆层的残余应力、细化组织、提高耐腐蚀性等。但此方法不能从根本上解决开裂问题,而且会增大生产成本,降低生产效率。三是增加韧性相。一些研究者通过添加镍^[6,12]、钴^[13]等韧性相合金元素来提高熔覆

层韧性,对抑制裂纹的产生非常有效,但这样会使熔覆层硬度下降,降低其使用性能。四是对激光熔池施加外场处理。在激光熔覆过程中,对正在凝固的激光熔池施加超声振动^[12]或电磁搅拌^[14],可以均匀和细化熔覆层组织,进而提高熔覆层韧性,减少裂纹,但其均是针对预置涂层而设计的,与同步送粉相比,其工艺较为复杂,不易实现自动化。

研究表明,采用外加交变磁场控制金属凝固过程可以破碎柱状晶,得到等轴晶,并可提高涂层的力学性能,降低气孔、裂纹等缺陷的敏感性^[15],具有附加装置简单、投入成本低、效益高和耗能少等特点。本文通过特殊设计的电路及作用线圈构成交变磁场发生装置,利用其产生的交变磁场作用于激光熔池,对熔体实现非接触式处理,使凝固过程中树枝晶或难以长大,或被折断、击碎,成为新的晶核,以达到改善铁基涂层凝固组织并使其细化,提高涂层质量的目的^[16]。重点探讨了交变磁场作用下激光熔覆铁基涂层的宏观形貌、显微组织及磁场诱发涂层柱状晶向等轴晶转变的主要机制。

2 实验

2.1 实验材料

实验选用涂层材料为 Fe55 合金粉末,其化学成分如表 1 所示。粉末粒径为 106 μm,熔化温度为 1 080~1 180 °C。实验前将粉末置于干燥箱 100 °C 下干燥 10 h。实验基材尺寸为 100 mm×10 mm×10 mm 的 A3 钢,试样表面经打磨、除油后分别用无水乙醇和丙酮反复清洗 10 min,以除去试样表面可能残存的氧化物和油污等杂质。

表 1 实验用铁基合金粉末的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of Fe55 alloy powder

| (%) | | | | | |
|---------|-------|---------|---------|-------|------|
| C | Cr | Si | B | Ni | Fe |
| 0.8~3.5 | 15~30 | 2.0~5.0 | 2.0~3.5 | 10~20 | Bal. |

2.2 实验方法

试验在 GS-TFL6000A 型 6 kW 横流多模二氧化碳激光器及其配套的西门子数控机床上进行。为了比较激光熔覆时不同磁场电流的作用效果,实验中采用的固定激光工艺参数为:激光功率 3.8 kW,扫描速度 450 mm/min,离焦量 55 mm,采用同步送粉方式(单粉管光外侧向送粉法),送粉盘转速为 9.5 r/min,熔池保护气体为氩气(纯度 99.99%)。磁场装置为自制带有激磁线圈的交变磁场,如图 1 所示。磁场电流(对应磁场强度)可调,外加磁场所产生的磁力线方向大体上与

扫描速度方向垂直,并以熔覆层为中心,采用单道扫描,扫描带长度约为 90 mm,外加交变磁场电流分为 6 组,即 $I=0、1、3、5、7、9$ A。沿激光扫描的垂直方向用线切割截取试样,每组试样表面均经研磨抛光后用王水($V_{\text{HNO}_3} : V_{\text{HCl}} = 1 : 3$)腐蚀。利用 LEICADFC280 型光学图像分析系统和荷兰飞利浦公司 XL30ESEM-TMP 型扫描电镜(SEM)研究熔覆涂层截面的组织,并将截面形貌图片以光栅形式导入 Auto CAD 软件中,按比例标注出熔覆涂层的高度(熔高 H),然后计算出熔覆涂层的横截面积(S)。

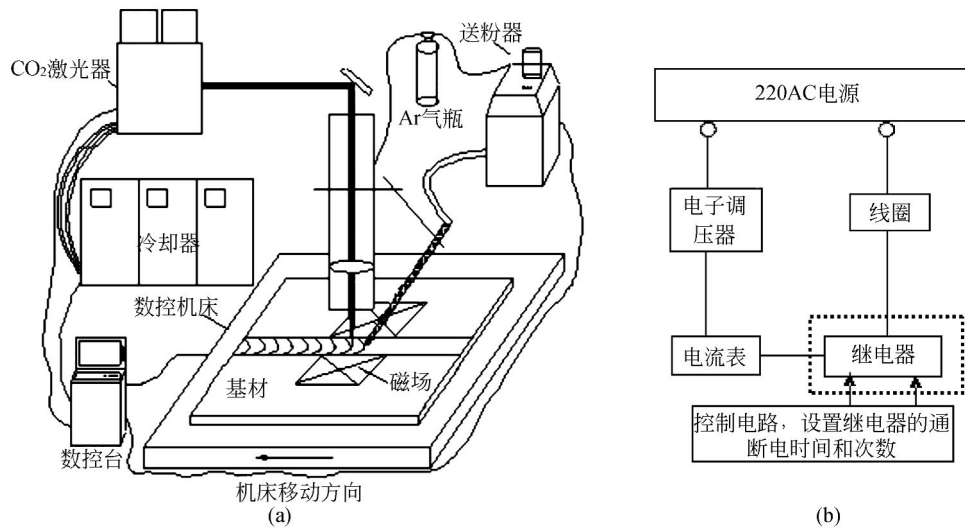


图 1 磁场辅助激光熔覆装置示意图(a)和交变磁场控制原理示意图(b)

Fig. 1 Principle schematic of laser cladding auxiliary magnetic fields (a) and control principle schematic diagram of alternating magnetic field (b)

3 试验结果与分析

3.1 熔覆层表面宏观形貌

图 2 所示为不同磁场电流,相同激光工艺参数经激光束辐照后制备 Fe55 单道涂层的表面宏观形貌。从图中可看出,未加磁场时熔覆层表面异常光亮(图 2a),随着外加磁场的引入和磁场强度的逐渐增大,涂层表面波纹形态越趋明显,表明外加磁场的引入使熔池内处于熔融状态的金属在快速凝固过程中发生了不同程度扰动。分析扰动发生的原因,一是由于当线圈通入一定频率的交变电流时,在液态金属内部将产生交变感应电流,磁场与感应电流之间发生电磁作用,产生沿径向将熔融金

属拉离熔覆层中心的交变电磁力,从而使熔融金属产生了规则的波动^[17-19]。电磁力使金属液体向一定方向流动,在较小磁场电流的作用下,产生的电磁力不足以克服熔融金属的黏度,使得液态金属的流动受阻,熔池内波动相对较小,涂层表面形态变化不大;随着磁场电流的增加,电磁力亦增大,因而熔池内的波动越发激烈,涂层表面越容易出现波浪形变化。二是因为交变感应电流通过熔融金属时,引起导体截面上电流分布不均匀,越近熔池表面电流密度越大^[20](即趋肤效应),相应电磁力也越大,熔池表面产生的波动较熔池内部越激烈。其次,感应电流的存在使熔池表面产生了交变电磁压力来压缩液态金属,磁场电流越大时感应电流越大,熔池表面受到的电磁压力也越大,从而使得熔覆层表

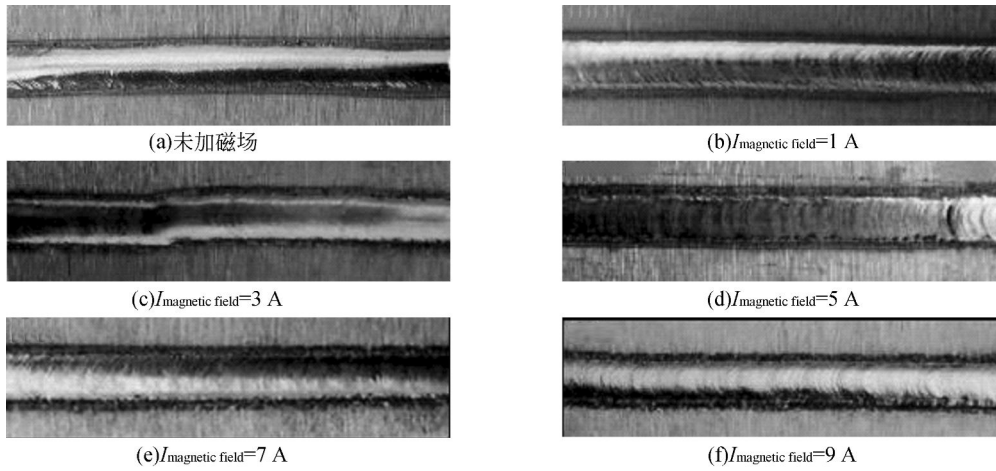


图 2 不同磁场电流下熔覆层宏观形貌特征

Fig. 2 Macro morphologies of laser cladding coating under different magnetic field current conditions

面形态发生变化,影响了涂层的表面质量,应予消除或抑制。因此,熔覆过程中应选择合适的磁场电流和激光工艺参数,以便获得表面光滑、平整和成形良好的熔覆层。

3.2 熔高和横截面积变化

通常根据光学显微镜放大倍数和刻度尺可以读出熔覆层横截面的几何尺寸,但读数的不确定性会带来较大误差。本研究将金相显微镜拍照后的

截面形貌图片导入 Auto CAD 软件,按比例标注出对应的熔高和熔宽,可以较好地解决这一问题。设熔覆层外轮廓线为抛物线,熔覆层的横截面积 S 可用下式计算^[21]:

$$S = \frac{2}{3} HW, \quad (1)$$

式中: H 为熔高, W 为熔宽, S 为横截面积。

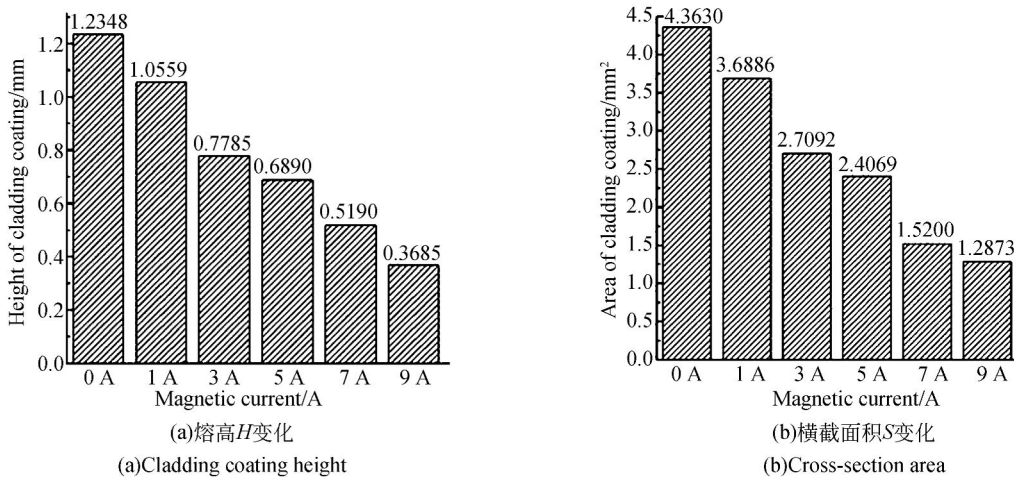


图 3 不同磁场电流下熔覆层的变化

Fig. 3 Geometric parameters of cladding coatings under different magnetic current conditions

图 3 所示为不同磁场电流作用下激光熔覆涂层熔高 H 和横截面积 S 的变化。从图 3(a)中可以看出,熔高 H 随着磁场电流的增强出现逐渐减小的趋势。其原因在于铁、镍是常见的铁磁性金属,铁、镍小颗粒在很小的磁场中就能被磁化达到

饱和^[22],使粉末颗粒沿磁场力与重力的合力方向运动,随着磁场强度的增大,一小部分微粒会偏离原来的运动轨迹而不能进入熔池。一方面使进入熔池的粉末材料质量减小,但熔宽 W 受熔池大小的限制不可能变化很大^[23],因而熔高会减小;另一

方面,粉末流中铁、镍的减少又会使透过粉粒照射到熔池的能量密度增加,从而使熔池整体吸收的激光能量更多,导致熔池内合金元素不同程度地烧损,致使熔高减小,甚至不能形成完整的熔覆涂层。由图 3(b)可知,面积的变化趋势和熔高很相似。因为面积由熔高和熔宽决定,相同的激光工艺参数下,熔宽 W 受熔池大小限制,且与焦点光斑直径相当^[21],所以面积和熔高的变化必然趋于一致。

3.3 熔覆层微观组织特征

通常情况下,温度梯度 G 与凝固速度 R 的比值(即 G/R)是凝固组织生长形态选择的控制参数(称之为形状控制因子)。在激光熔覆过程中,温度梯度和凝固速度^[24]分别定义为式(2)和式(3):

$$G = \frac{2k(T - T_0)}{\eta P}, \quad (2)$$

式中: T 为液态金属温度; T_0 为基材初始温度; η 为吸光率; P 为激光功率; k 为基材导热系数。

$$R = v_s \cdot \cos \theta, \quad (3)$$

式中: v_s 为扫描速度; θ 为扫描速度与凝固速度夹角。

对于激光快速熔凝过程,凝固初期凝固界面处的温度梯度最大,随着凝固的进行,温度梯度逐渐减小,直至凝固结束时 $G \rightarrow 0$ 。当考虑凝固潜热时,随着凝固的进行,凝固速度 R 从 0 增加到一个有限值, G/R 将从凝固开始时的趋于无穷 (G_{\max} , $R=0$) 逐渐到凝固结束时的趋于 0 ($G=0$, R 为定值)。理论上,随着 G/R 比值的减少,凝固界面通常经历平界面 \rightarrow 柱状胞晶 \rightarrow 柱状枝晶 \rightarrow 等轴晶的生长转变^[25]。

图 4 所示为不同磁场电流下熔覆层在垂直于激光束扫描方向的剖面显微组织。从图 4(a)和图 4(b)可明显看出,未加磁场和磁场电流较小时,熔覆层主要由生长方向不一的细长柱状枝晶组成,顶部枝晶细小而发达,呈现典型的外延柱状生长特点。其原因是随着熔池与界面距离的增加, G/R 快速减小,平界面失去原有的稳定,晶粒逆着热流方向择优生长,树枝晶生长方式占主导地位^[26-27]。在熔池上方,熔体与空气接触,散热速度加快, G/R 减小,成分过冷增大,导致熔覆层顶部枝晶尺寸较小^[28]。结合图 4(a)~(d)可看到,熔覆过程中,无论是不加磁场,还是加不同强度的交变磁场,熔覆层底部组织均为垂直于界面生长的柱状枝晶。这是因为在熔池底部液态金属与固态基体产生的附

着阻力和糊状区(如枝晶中部和底部)液态金属较大的动力学黏度,均使对流难以进行,即使增加磁场电流,这部分液态金属的流动也很弱,强热、强冷所造成的单向散热起主要作用,故枝晶逆着热流方向垂直于熔覆层的界面生长。

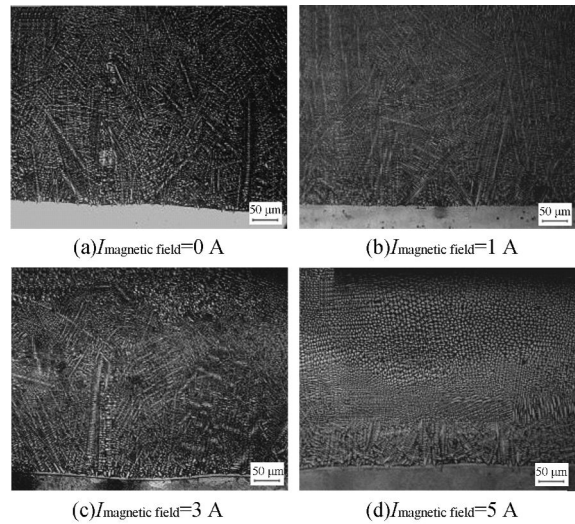


图 4 不同磁场电流下熔覆层截面的显微组织
Fig. 4 Cross-section microstructures of cladding coating under different magnetic current conditions

合金在凝固过程中,凝固界面前沿成分过冷区的宽窄决定着凝固组织的形貌。若合金凝固界面前沿温度梯度较小,易形成较大的成分过冷,就有可能形核而导致等轴晶生长。文献[29]指出,低频磁场作用于液态金属凝固时,凝固前沿的温度梯度随磁泰勒数(T_a)的增加而降低,其表达式为:

$$T_a = \frac{\sigma \omega B^2 R^4}{2 \rho \nu^2}, \quad (4)$$

式中: σ 为液态金属的电导率; B 为磁感应强度; ω 为角频率; R 为液态金属的旋转半径; ρ 为液态金属的密度; ν 为液态金属的动力学黏度。

从图 4(b)、(c)、(d)还可看出,随着磁场电流的增加,熔覆层顶部开始出现等轴晶区,并且在磁场电流为 5 A 时,等轴晶区最大,基本占据熔覆涂层面积的四分之三。结合式(4)可知,当磁场电流(磁场强度)较小时,磁泰勒数 T_a 小,凝固前沿的温度梯度 G 较大(G/R 变大),给涂层顶部的枝晶沿逆着热流方向生长提供了必要条件(如图 4b)。随着磁场电流的增大,磁泰勒数 T_a 也随之增大,导致凝固前沿温度梯度 G 逐渐变小(G/R 变小),成分

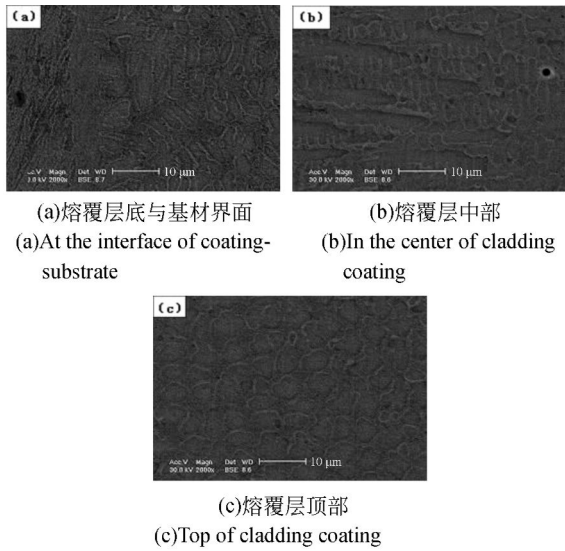


图 5 $I_{\text{magnetic field}} = 5 \text{ A}$ 时, 熔覆层截面不同位置的 SEM 微观组织形貌
Fig. 5 SEM microstructure of cladding coating under magnetic current 5 A condition

过冷度增大, 从而使涂层顶部开始出现一定范围的等轴晶(如图 4c)。且随着磁场电流的增大, 等轴晶区范围扩大(如图 4d)。为了进一步研究交变磁场对涂层不同位置凝固组织形貌的影响, 对磁场电流为 5 A 的涂层进行 SEM 分析, 如图 5 所示。可以看出, 涂层的中下部为粗大的树枝晶, 如图 5(a) 和 5(b) 所示, 顶部是均匀细小的等轴晶, 如图 5(c) 所示。因此, 选择合适的激光熔覆工艺参数和磁场电流, 涂层的顶部组织将由树枝晶向等轴晶转变。

由于激光熔覆是高温梯度和高凝固速度的快速凝固过程, 因此有必要对成形过程中的柱状枝晶/等轴晶生长转变问题进行分析。图 6 是电流为 5 A 时, 熔覆层显微组织的演变过程。结合图 4 和图 6 可明显看出, 熔覆层组织由柱状枝晶向等轴晶转变, 晶粒尺寸细小且分布均匀。这是因为激光熔池施加交变磁场后, 在产生的电磁力作用下, 将形成正反两个方向的旋转运动, 加剧了熔池金属的对流, 其对激光熔池产生了如下作用^[29-32]: (1) 机械作用。熔池液态金属正反两个方向的旋转运动会使凝固界面前沿产生较强的机械冲刷力, 冲刷力会打断正在生长的初生枝晶臂而形成细小晶块, 这些细小晶块进入熔池形成新的晶核。一方面, 磁场电流越大, 对结晶前沿枝晶尖端的冲刷作用越大, 被打断进入熔池的晶块越多, 形成游离的晶核并且增

殖, 增加了形核率。另一方面, 游离的枝晶碎片进入液相区, 提高了熔池中熔融金属的平衡结晶温度, 减少了结晶区域浓度过冷, 提高了结晶前沿的稳定性, 促进了形核, 有利于等轴晶凝固组织的形成, 细化等轴晶晶粒。(2) 促进传热。熔融金属对流加速了熔池内部的热量交换, 使液态温度趋于一致, 两相区迅速扩大, 凝固界面前沿的温度梯度变小, 成分过冷增大, 熔池内大量晶核进行各向同性生长, 促进了等轴晶的形成。同时液相中凸出的枝晶可在液流带动下不断运动及自身旋转, 再加上均匀的温度场和液态成分, 使得这些枝晶组织很难连成一片, 故可抑制柱状枝晶的生长。(3) 改变传质。交变磁场使熔池产生强烈的混合对流, 将枝晶间隙内溶质浓度较大的液体带到枝晶尖端, 使枝晶尖端的溶质浓度提高, 导致枝晶前端部分的溶解以降低浓度。其中一些枝晶臂完全熔断, 熔断而游离的枝晶被液流带入液相区, 成为碎片保留下来形成新的晶核, 促进了等轴晶的形成。因此, 在磁流体力学作用系统中, 磁场、流场和温度场是相互影响、相互作用的, 要研究交变磁场作用下快冷快热激光熔池凝固过程中的各种冶金过程及磁场参数对凝固成形过程的影响规律就将更为复杂。

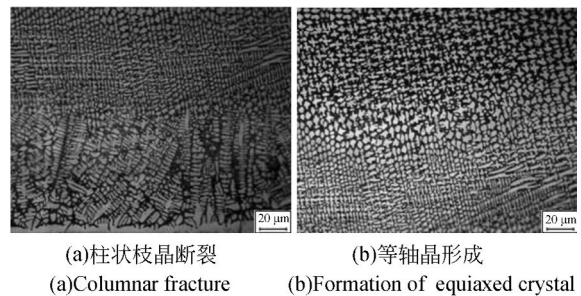


图 6 磁场电流 5 A 时熔覆层显微组织的演变过程
Fig. 6 Microstructure evolution process of laser cladding coating under 5 A magnetic current condition

4 结 论

通过优化的激光熔覆工艺参数获得了表面光滑、呈均匀连续分布的铁基涂层。在外加交变磁场作用下, 熔池表面受到交变的电磁力作用引起表面波动, 涂层表面形态由光滑向波浪形变化, 影响表面质量, 应予消除或抑制。在交变磁场作用下, 铁基熔

覆层的高度 H 和横截面积 S 随磁场电流增强出现逐渐减小的趋势,而熔宽 W 由于受熔池大小限制基本保持不变,且与焦点光斑直径相当。未加磁场时,铁基涂层的组织基本上是平面晶(过渡区)、柱状枝晶(熔覆层底部)、细小枝晶(熔覆层顶部)的结构。

交变磁场使凝固过程中树枝晶或难以长大,或被折断、击碎,成为新的晶核,促使熔覆层形成等轴晶,随着磁场电流的增加,等轴晶的区域范围扩大。在交变磁场作用下,激光熔覆熔池内的液态金属对流加剧,缓解了熔覆层出现的裂纹、气孔等缺陷。

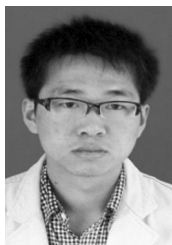
参考文献:

- [1] ZHANG P L, YAN H, YAO CH W, *et al.*. Synthesis of Fe-Ni-B-Si-Nb amorphous and crystalline composite coatings by laser cladding and remelting [J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2011, 206(6): 1229-1236.
- [2] 黄凤晓, 江中浩, 刘喜明. 激光熔覆工艺参数对横向搭接熔覆层结合界面组织的影响 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2): 316-322.
- HUANG F X, JIANG ZH H, LIU X M. Effects of parameters on microstructure of bonding interface formed by overlapping laser cladding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 316-322. (in Chinese)
- [3] 张晓伟, 刘洪喜, 蒋业华, 等. 激光原位合成 TiN/Ti₃Al 基复合涂层 [J]. *金属学报*, 2011, 47(8): 1086-1093.
- ZHANG X W, LIU H X, JIANG Y H, *et al.*. Laser in situ synthesized TiN/Ti₃Al composite coatings [J]. *Acta Metall Sin.*, 2011, 47(8): 1086-1093. (in Chinese)
- [4] YAO CH W, H J, ZHANG P L, *et al.*. Toughening of Fe-based laser-clad alloy coating [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2011, 257(6): 2184-2192.
- [5] SHI SH H, XU A Q, FAN J W, *et al.*. Study of cobalt-free Fe-based alloy powder used for sealing surfaces of nuclear valves by laser cladding [J]. *Nucl. Eng. Des.*, 2012, 245(4): 8-12.
- [6] YANG X Y, PENG X, CHEN J, *et al.*. Effect of a small increase in the Ni content on the properties of a laser surface clad Fe-based alloy [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2007, 253(9): 4420-4426.
- [7] ZHANG L M, SUN D B, YU H Y, *et al.*. Characteristics of Fe-based alloy coating produced by plasma cladding process [J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 2007, 457(1-2): 319-324.
- [8] 沈以赴, 程继志, 冯中潮, 等. 稀土在激光熔覆涂层中的分布和行为 [J]. *中国稀土学报*, 1997, 15(4): 344-349.
- SHEN Y F, CHEN J ZH, FENG ZH CH, *et al.*. Distribution and behaviour of rare earth in laser coating [J]. *Journal of the China Rare Earth Society*, 1997, 15(4): 344-349. (in Chinese)
- [9] LI M X, ZHANG SH H, LI H SH, *et al.*. Effect of nano-CeO₂ on cobalt-based alloy laser coatings [J]. *J. Mater. Process Tech.*, 2008, 202(1-3): 107-111.
- [10] 尚丽娟, 才庆魁, 刘常升, 等. 用稀土改性钴基合金激光熔覆层 [J]. *稀有金属*, 2002, 26(3): 173-178.
- SHANG L J, CAI Q H, LIU CH SH, *et al.*. Effects of RE doping on properties of Co-based alloy coating treated by laser cladding [J]. *Chinese Journal Rare Metals*, 2002, 26(3): 173-178. (in Chinese)
- [11] 王传琦, 刘洪喜, 周荣, 等. 回火处理对多道 Ni 基熔覆涂层组织和耐腐蚀性能的影响 [J]. *材料热处理学报*, 2011, 32(7): 145-150.
- WANG CH Q, LIU H X, ZHOU R, *et al.*. Influence of tempering on microstructure and corrosion resistance of multi-pass Ni-based coating on 45 steel prepared by laser cladding [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2011, 32(7): 145-150. (in Chinese)
- [12] 陈畅源, 邓琦林, 宋建丽. Ni 含量及超声振动对激光熔覆中裂纹的影响 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2005, 37(增): 44-48.
- CHEN CH Y, DENG Q L, SONG J L. Influence of Ni content and ultrasonic vibration to cracks in process of laser cladding [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2005, 37(supp): 44-48. (in Chinese)
- [13] GAO L L, BIAN X F, TIAN Y SH, *et al.*. Effect of Co on microstructure and interfacial properties of Fe-based laser cladding [J]. *J. Iron Steel Res. Int*, 2009, 16(4): 84-88.
- [14] 余本海, 胡雪会, 吴玉娥, 等. 电磁搅拌对激光熔覆

- WC-Co 合金涂层的组织结构和硬度的影响及机理研究 [J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2672-2677.
- YUE B H, HU X H, WU Y E, *et al.*. Studies of the effects and mechanism of electromagnetic stirring on the microstructures and hardness laser cladding WC-Co based alloy coating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, 37(10): 2672-2677. (in Chinese)
- [15] 罗键, 贾昌中, 王雅生, 等. 外加纵向磁场 GTAW 焊接熔池流动机理 [J]. 机械工程学报, 2001, 37(4): 29-32.
- LUO J, JIA CH SH, WANG Y SH, *et al.*. Fluid flow of LD10CS Aluminum alloy weld pools in gtaw with longitudinal magnetic field controlling [J]. *Chin. J. Mech. Eng.*, 2001, 37(4): 29-32. (in Chinese)
- [16] 孙景刚. 间隙交变磁场对等离子堆焊金属组织及性能影响机理的研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009: 107-118.
- SUN J G. *Research on principles of influence of intermittent alternative magnetic field on microstructure and properties of plasma arc surfacing layer* [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2009, 107-118. (in Chinese)
- [17] 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(1): 11-17.
- FAN J H, ZHAI Q J. Effects of physical fields on solidification structure of metals [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 12(1): 11-17. (in Chinese)
- [18] CONRAD H. Influence of an electric or magnetic field on the liquid-solid transformation in materials and on the microstructure of the solid [J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 2000, 287(2): 205-212.
- [19] BASKAR G, NICHOLAS Z. On the control of solidification using magnetic field sand magnetic field gradients [J]. *Int. J. Heat Mass. Tran.*, 2005, 48(2): 4174-4189.
- [20] 陈在锋, 崔景华, 邢怀民. 电趋肤效应与电子能态关系的研究 [J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2005, 33(3): 157-158.
- CHEN Z F, CUI J H, XING H M. A study of the relationship between electric skin effect and electron energy state [J]. *Journal of Henan Normal University (Nature Science)*, 2005, 33(3): 157-158. (in Chinese)
- [21] 王志坚, 董世运, 徐滨士, 等. 激光熔覆工艺参数对金属成形效率和形状的影响 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 315-319.
- WANG ZH J, DONG SH Y, XU B SH, *et al.*. Effect of laser cladding processing efficiency and parameters on metal forming geometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 315-319. (in Chinese)
- [22] 铁磁性手册 [M]. 刘代琦译. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- BUSCHOW K H J *Handbook of magnetic materials* [M]. LIU D Q Transl. Beijing: Mechanical industry press, 1987. (in Chinese)
- [23] ZHOU SH F, DAI X Q, ZHENG H ZH. Analytical modeling and experimental investigation of laser induction hybrid rapid cladding for Ni-based WC composite coatings [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2011, 43(3): 613-621.
- [24] HUANG Y J, ZENG X Y, HU SH F, *et al.*. Microstructure and interface interaction in laser induction hybrid cladding of Ni-based coating [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, 255(7): 3940-3945.
- [25] ZHOU SH F, ZENG X Y. Growth characteristics and mechanism of carbides precipitated in WC-Fe composite coatings by laser induction hybrid rapid cladding [J]. *J. Alloy Compd.*, 2010, 505(2): 685-691.
- [26] HUANG Y J, ZENG X Y. Investigation on cracking behavior of Ni-based coating by laser-induction hybrid cladding [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2010, 256(20): 5985-5992.
- [27] 李雨田, 关振中. Ni-Cr-B-Si 系合金激光熔覆结合带与热影响区 [J]. 光学精密工程, 1993, 1(3): 41-45.
- LI Y T, GUAN ZH ZH. The study on laser cladding Ni-Cr-B-Si alloys bonding zone and heat affected zone [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1993, 1(3): 41-45. (in Chinese)
- [28] 刘洪喜, 曾维华, 张晓伟, 等. 不锈钢表面多道激光熔覆 Ni 基涂层的组织与性能 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 516-523.
- LIU H X, ZENG W H, ZHANG X W, *et al.*. Microstructures and properties of multiple-pass laser cladding Ni-based coatings on stainless steel surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 516-523. (in Chinese)
- [29] WILLERS B, ECKERT S, MICHEL U, *et al.*. The columnar-to-equiaxed transition in Pb-Sn al-

- loys affected by electromagnetically driven convection [J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 2005, 402(1-2): 55-65.
- [30] 李大生, 刘继常. 激光熔覆金属层柱状晶/等轴晶转变模型的研究进展 [J]. *机械工程材料*, 2008, 32(2): 8-14.
LI D SH, LIU J CH. Progress of study on the columnar to equiaxed transition model of laser clad metal layers [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2008, 32(2): 8-14. (in Chinese)
- [31] YAO L, HAO H, GU S W, *et al.*. Effects of electromagnetic stirring on microstructure and mechanical properties of super light Mg-Li-Al-Zn alloy [J]. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2010, 20(B07): 388-292.
- [32] 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(09): 914-919.
GUO D Y, YANG Y SH, TONG W H, *et al.*. Simulation of electromagnetic force driven melt flow and fracture of dendrites [J]. *Acta Metall Sin*, 2003, 39(09): 914-919. (in Chinese)

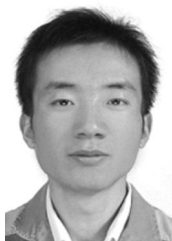
作者简介:



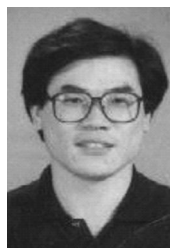
蔡川雄(1987—),男,云南曲靖人,硕士研究生,2010年于昆明理工大学获学士学位,主要从事激光熔覆表面改性方面的研究。E-mail: vipliuhx@yahoo.com.cn



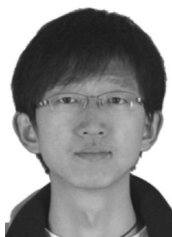
蒋业华(1968—),男,安徽巢湖人,博士,教授,1991年、1994年于昆明理工大学分别获学士、硕士学位,2001年于西安交通大学获博士学位,主要从事离子束和激光束表面改性方面的研究。E-mail: piiliuhx@sina.com



张晓伟(1984—),男,山西汉中人,博士研究生,2008年、2011年于昆明理工大学分别获学士、硕士学位,主要从事激光束表面改性方面的研究。E-mail: vipliuhx@yahoo.com.cn



刘洪喜(1972—),男,湖北黄冈人,博士,教授,1994年于北京航空航天大学获得学士学位,2003年、2007年于哈尔滨工业大学分别获硕士和博士学位,主要从事离子束和激光束表面改性方面的研究。E-mail: vipliuhx@yahoo.com.cn



王传琦(1984—),男,黑龙江牡丹江人,博士研究生,2008年、2011年于昆明理工大学分别获学士、硕士学位,主要从事激光束表面改性方面的研究。E-mail: vipliuhx@yahoo.com.cn

导师简介: