

稳态磁场辅助对激光熔凝层表面波纹的抑制作用研究

王 梁^{1,2} 胡 勇^{1,2} 宋诗英^{1,2} 赖三聘^{1,2} 姚建华^{1,2*}

¹浙江工业大学激光加工技术工程研究中心, 浙江 杭州 310014

²浙江省高端激光制造装备协同创新中心, 浙江 杭州 310014

摘要 利用稳态磁场辅助激光熔凝,在不改变激光工艺参数的条件下,抑制了熔凝层表面的波纹。同时,建立了考虑熔池内部的传热、对流、相变、电磁力和熔池表面形貌的多物理场耦合仿真模型。通过对比实验结果讨论了在稳态磁场作用下,熔凝层熔池内部温度场和流场的变化规律以及表面波纹的抑制原理。结果显示,稳态磁场所提供的洛伦兹力为抑制熔池对流的阻力,其方向与熔池对流方向时刻相反。随着磁场强度的增加,熔池内部的整体流速逐渐降低,但温度场的变化不甚明显。当稳态磁场的强度大于0.5 T时,熔池形状发生变化,熔凝层表面的波纹高度明显降低,但金相组织基本不变。

关键词 表面光学; 激光熔凝; 稳态磁场; 表面形貌; 熔池; 抑制作用

中图分类号 TG1488; TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1103005

Suppression Effect of a Steady Magnetic Field on Surface Undulation During Laser Remelting

Wang Liang^{1,2} Hu Yong^{1,2} Song Shiyong^{1,2} Lai Sanpin^{1,2} Yao Jianhua^{1,2}

¹Research Center of Laser Processing Technology and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

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

Abstract A steady magnetic field is applied to suppress the surface undulation after laser remelting without changing the laser processing parameters. A two dimensional (2D) transient multi-physics numerical model, concerning heat transfer, fluid dynamics, phase transition, electromagnetic field and the surface morphology of molten pool, is established. Comparing with the experimental results and numerical results, the suppressing mechanism of surface undulation related to the temperature field and velocity field in the molten pool is discussed. The results indicate that the Lorenz force supported by the steady magnetic field is a sort of drag force, whose direction is opposite to the melt flow all the time. With increasing the magnetic flux density, the velocity of molten pool is reduced gradually, while the temperature field remains changeless. When the magnetic flux density is higher than 0.5 T, the shape of molten pool is changed and the height of surface undulation is decreased obviously without changing the microstructure.

Key words optics at surfaces; laser remelting; steady magnetic field; surface morphology; molten pool; suppression effect

OCIS codes 160.3900; 140.3390; 350.3850

1 引 言

激光熔凝通常作为提高材料表面耐磨性能、耐腐蚀性能、热疲劳性能和机械性能的一种表面处理手段^[1-7]。

收稿日期: 2015-06-08; 收到修改稿日期: 2015-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(51475429)

作者简介: 王 梁(1983—),男,博士,讲师,主要从事多能量场协同激光制造技术方面的研究。E-mail: ddtwl@foxmail.com

*通信联系人。E-mail: laser@zjut.edu.cn

但是激光熔凝处理后,其表面均会留下高低起伏的波纹状褶皱,降低了表面质量。通常在激光熔凝处理后需要对熔凝区表面进行一定的后续机加工处理,以符合应用环节中对工件表面粗糙度的要求。很多学者通过改变激光熔凝的工艺参数,如通过调节扫描速度、激光功率、脉冲宽度来调节熔凝层的表面形貌^[8-9]。虽然此类方法可以在一定程度上改善激光熔凝后的表面形貌,但是在多数情况下,激光工艺参数的改变会导致熔凝层厚度、组织、性能等其他关键指标的变化。因此,为保持熔凝层所起到的表面改性效果,其工艺参数一般是固定的,不允许为了优化表面形貌而进行自由调整。为此,提出利用稳态磁场,抑制激光所致熔池表面的法向流速,降低熔凝区的表面波纹高度,从而改善熔凝区域的表面形貌,减少后续机加工工时和成本。

常见的电磁场辅助激光焊接和熔覆过程中,所采用的磁场类型一般为交变磁场或旋转磁场。如昆明理工大学刘洪喜等^[10]利用交变磁场对激光熔覆涂层的宏观形貌和微观组织的演变进行了研究,结果表明交变电磁力使凝固后熔覆层的表面形态呈波浪式,同时促使熔覆层顶部组织由树枝晶向等轴晶转变。沈阳航空航天大学王维等^[11-12]对电磁搅拌作用下激光熔池电磁场、温度场和流场进行了数值模拟,同时利用磁场搅拌对激光沉积钛合金组织和性能的影响进行了实验研究,获得了细化的片状组织,并提高了沉积层的力学性能。德国BIAS实验室的Gatzen等^[13-14]对交变磁场辅助激光焊接过程进行了仿真计算,并利用交变磁场改善了焊接过程中的元素分布。近年来,德国BAM实验室的Bachmann等^[15-16]对稳态磁场作用下的铝合金激光深熔焊进行了研究,证实了稳态磁场对焊接熔池对流的抑制作用,并获得了高质量的铝合金厚板焊缝。由此可见,交变或旋转磁场对熔池可起到加速搅拌作用,而稳态磁场则对熔池的对流起到抑制作用。因此,利用稳态磁场的这一特性,可为解决激光制造过程中所遇到的问题提供新的思路。浙江工业大学的姚建华等^[17]利用数值模拟方法对稳态磁场作用下激光熔池中传热及流动行为进行了前期研究,但稳态磁场对熔凝层表面波纹的抑制机理仍未明确。同时由于现有的实验过程监测手段难以记录熔池内部温度和流速的变化,特别是在附加了电磁场的条件下,熔池内部的传热传质行为变得更为复杂,难以采用实验手段进行深入分析。为此,建立了稳态磁场辅助激光熔凝的二维(2D)瞬态计算模型,该模型中耦合了传热、对流、相变和电磁场等多物理场的偏微分方程组,并通过一种移动网格的方法(ALE),表征了熔凝层表面的波动状态。通过多物理场仿真软件COMSOL Multiphysics求解了上述方程组,获得了稳态磁场的强度与熔凝熔池内部温度场、流场和熔凝层表面形貌之间的影响规律。同时,利用实验手段,证实了稳态磁场对激光熔凝层表面波纹的抑制作用。

2 实验条件

实验基体取材自厚度为20 mm的Q345低碳合金钢板,其化学成分如表1所示。将试样机加工成长条状,具体尺寸为200 mm×20 mm×10 mm。采用最大场强为2 T的电磁铁为熔池区域提供稳态磁场。熔凝所用激光器为2 kW光纤耦合半导体激光器,运动机构为ABB工业机器人。激光熔凝工艺参数为:光斑直径4 mm,扫描速度400 mm/min,激光功率1500 W。将经过静磁场辅助激光熔凝后的试样在Keyence超景深三维数字显微镜下进行表面宏观形貌的观察和轮廓高度的测量,然后将试样沿垂直于扫描方向切开,经打磨、抛光、腐蚀后在Leica金相显微镜下观察横截面的金相组织。实验整体布置如图1所示。

表1 实验基体的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition (mass fraction, %) of the substrate material

C	Mn	Si	Cr	V	Mo	Fe
0.18	0.44	0.23	<0.01	<0.01	<0.01	Bal.

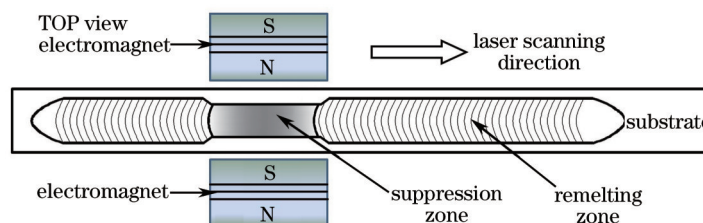


图1 稳态磁场辅助激光熔凝示意图

Fig.1 Schematic of laser remelting with a magnetic field

3 数值仿真

3.1 控制方程

在以流体动力学和传热学为基础的激光熔凝过程数值仿真基础上^[18-20],将稳态磁场在熔池中所产生的洛伦兹力以体积力的形式加入到流体动量方程的源项中。计算采用2D瞬态有限元模型,求解域的大小为30 mm×5 mm。该区域全部设置为流体区域,通过Darcy源项来控制激光熔凝过程中的固液相变。计算模型所用控制方程如下:

质量守恒方程:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p \mathbf{I} + \eta(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \mathbf{F}_{\text{Buoyancy}} + \mathbf{F}_{\text{Darcy}} + \mathbf{F}_{\text{Lorentz}}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{u} 为流速, ρ 为密度, p 为压力, η 为动力粘度, $\mathbf{F}_{\text{Buoyancy}}$, $\mathbf{F}_{\text{Darcy}}$, $\mathbf{F}_{\text{Lorentz}}$ 分别为热浮力源项、Darcy源项和洛伦兹力源项。其中热浮力源自流体中的密度差异,与液态金属的热膨胀系数相关,根据 Boussinesq 假设可表示如下:

$$\mathbf{F}_{\text{Buoyancy}} = \rho[1 - \beta(T - T_m)]\mathbf{g}, \quad (3)$$

式中 β 为热膨胀系数, \mathbf{g} 为重力加速度, T 为温度, T_m 为熔点。

Darcy源项的目的是当熔池从液相凝固时,通过固液两相区的过渡,将固相区的流速减小至0,完成熔凝层固液相变的控制。通过 Kozeny-Carman 方程^[21],Darcy源项可以表述为

$$\mathbf{F}_{\text{Darcy}} = -A_{\text{mush}} \frac{(1 - f_L)^2}{f_L^3 + c} \mathbf{u}. \quad (4)$$

式中 f_L 为液相百分比, A_{mush} 和 c 为一常数(其中 A_{mush} 为一大数,该处 $A_{\text{mush}}=3000$, c 避免分母为0即可,该处 $c=0.01$)。

在稳态磁场辅助激光熔凝条件下,根据洛伦兹力(5)式和欧姆定律(微分形式)(6)式可知熔池中产生的洛伦兹力是由熔池流动产生的感应电流在外磁场作用下形成的。在无外加电场的条件下,如磁场方向不变(静态磁场),则洛伦兹力的方向与熔池的流动方向时刻相反。

$$\mathbf{F}_{\text{Lorentz}} = \mathbf{j} \times \mathbf{B}, \quad (5)$$

$$\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}), \quad (6)$$

式中 $\mathbf{F}_{\text{Lorentz}}$ 为洛伦兹力, \mathbf{j} 为电流密度矢量, \mathbf{B} 为磁场强度矢量, σ 为电导率, \mathbf{E} 为外加电场强度(该处 $\mathbf{E}=0$)。

能量守恒方程为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_{\text{source}}, \quad (7)$$

式中 C_p 为比热容, k 为导热系数, Q_{source} 为激光束所提供的热源。由于采用半导体激光器,该处光束能量分布假设为均匀分布。

3.2 边界条件

试样初始温度为外界环境温度,试样表面只考虑对流换热,忽略热辐射。表面张力通过边界条件的形式加载在求解域的上表面。在本模型中,表面张力通过 Marangoni 剪应力的方式加载在熔凝层表面,其在计算软件中通过试函数的形式表达。

$$-\eta \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad -\eta \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (8)$$

式中 $\frac{\partial \gamma}{\partial T}$ 为温度相关的表面张力系数, η 为动力粘度。

为了避免网格畸变对求解精度造成的影响,计算中利用了 ALE 方法。在该方法中,边界层网格法向方向的变形速率等于流速的法向分量。因此,熔凝层表面波纹的控制方程可描述为

$$(x_i, y_i)^T \cdot \mathbf{n} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}, \quad (9)$$

式中 \mathbf{n} 为边界法向, $(x_i, y_i)^T$ 为网格的变形量。

计算所用物性参数和激光工艺参数如表1所示。

表 1 仿真计算用物性参数与激光工艺参数

Table 1 Material properties and laser processing parameters

Property	Value	Unit
Melting temperature	1700	K
Mass density	7800	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Heat capacity	746	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Latent heat of fusion	30	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
Heat conductivity	30	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Dynamic viscosity	0.006	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
Surface tension coefficient	-0.52×10^{-4}	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Spot size	4	mm
Laser scanning speed	400	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
Laser power	1500	W

4 结果与讨论

4.1 流场分布特征

图 2 显示了在不同磁场强度条件下,熔凝熔池纵截面的流速分布($t=2\text{s}$),激光的扫描方向为从左至右。图中红色箭头方向为对流方向,箭头长度与流速大小相关,白色曲线表示熔池的固液界面。由图 2(a)可知,在稳态磁场辅助条件下,熔池表层后方 Marangoni 流区为高流速区域。当稳态磁场的强度由 0.5 T 逐渐增强到 1.5 T 时,熔池的整体流速逐渐减小,最大流速从未加磁场的 0.02 m/s 降低到 0.001 m/s。当磁场强度大于 0.5 T 时,熔池流速的减少不甚明显。其中 Marangoni 区由于原有流速较大,该区的流速抑制效果也最为明显。图 2 计算结果证明了稳态磁场可以抑制熔池内部对流,但无法改变熔池内部的对流方向和分布形式。

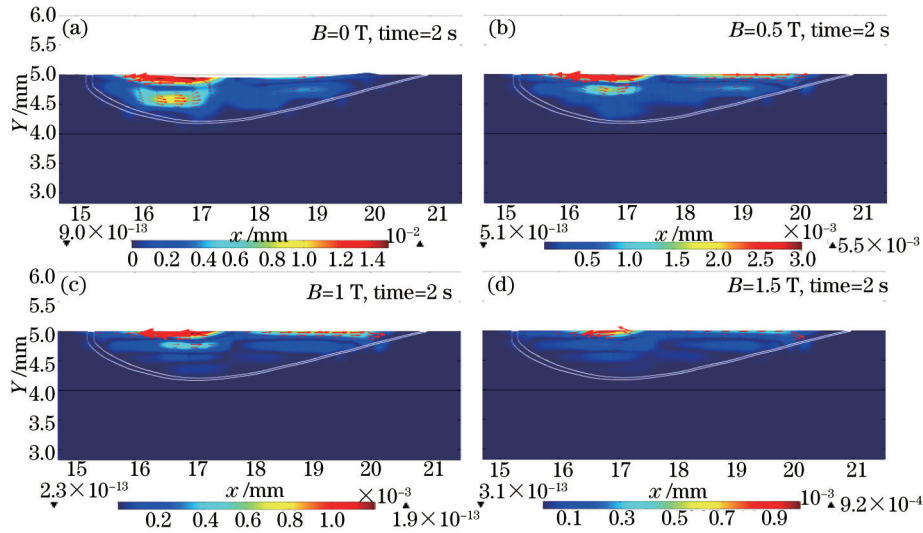


图 2 稳态磁场作用下熔池纵截面流速的分布图($t=2\text{s}$)。 (a) $B=0\text{T}$; (b) $B=0.5\text{T}$; (c) $B=1.0\text{T}$; (d) $B=1.5\text{T}$

Fig.2 Velocity of longitudinal section in molten pool with steady magnetic field ($t=2\text{s}$). (a) $B=0\text{T}$; (b) $B=0.5\text{T}$; (c) $B=1.0\text{T}$; (d) $B=1.5\text{T}$

4.2 温度场分布特征

与稳态磁场对熔池流速的明显抑制作用不同,稳态磁场辅助下,激光熔凝熔池表面最高温度仅从 2152 K 增加至 2189 K,熔池内部的温度场分布无明显变化(如图 3 所示)。为进一步分析附加稳态磁场后,激光熔凝层熔池的温度分布区别,提取了熔池表面和熔池深度方向的温度及温度梯度分布曲线(如图 4 所示)。其中图 4(a)和图 4(b)分别为熔池表面和深度方向(光斑中心位置)的温度分布情况。当磁场强度大于 0.5 T 直至 1.5 T 时,仅熔池表层中间区域(最高温度区)的温度出现了小幅上升,熔池表层及深度方向其他位置的温度分布无明显变化。图 4(c)和图 4(d)分别为熔池表面和深度方向(光斑中心位置)的温度梯度分布情况。与温度分布情况类似,在附加 0.5 T 的稳态磁场时,熔池表面和熔池深度方向近基体区域的温度梯度略有增加。当场强进

一步加大时,温度梯度的变化微乎其微。根据流速仿真结果,在稳态磁场作用下,熔池表面流速被减缓,对流作用减弱。因此,熔池表面高温的熔体无法在表面张力作用下充分地搅入熔池内部,而在相同激光工

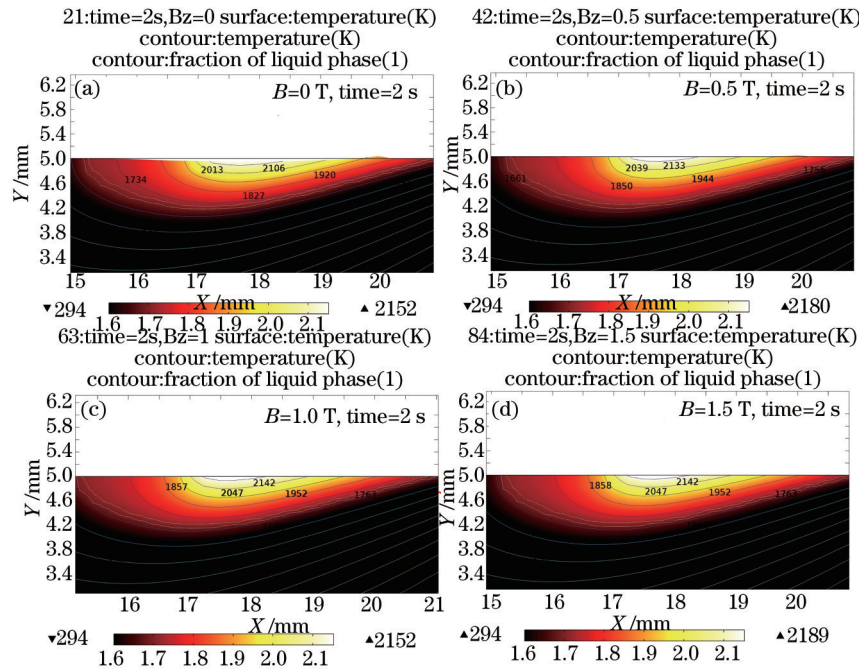


图3 稳态磁场作用下熔池纵截面温度场的分布图($t=2$ s)。(a) $B=0$ T; (b) $B=0.5$ T; (c) $B=1.0$ T; (d) $B=1.5$ T

Fig.3 Temperature of longitudinal section in molten pool with steady magnetic field ($t=2$ s).

(a) $B=0$ T; (b) $B=0.5$ T; (c) $B=1.0$ T; (d) $B=1.5$ T

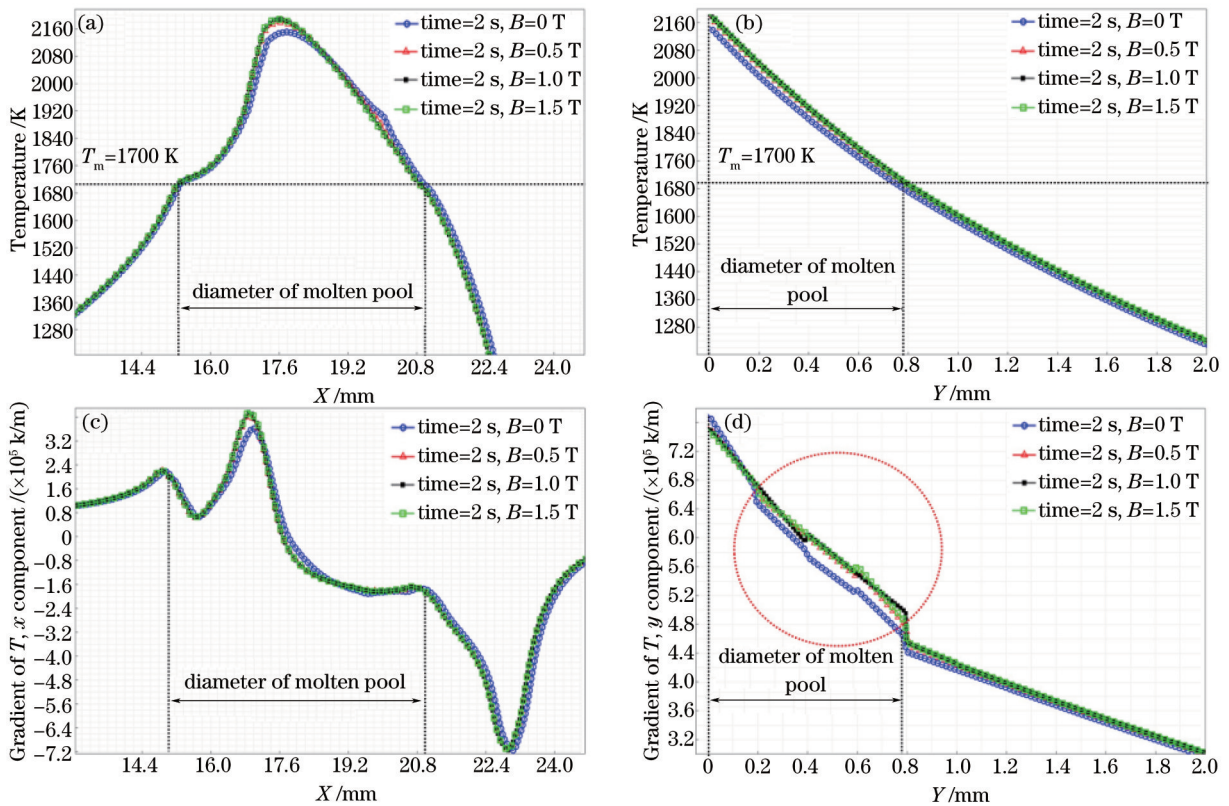


图4 熔池表面及深度方向温度分布。(a) 表面温度分布($Y=0$ mm); (b) 深度方向温度分布($X=17.5$ mm);

(c) 表面温度梯度($Y=0$ mm); (d) 深度方向温度梯度($X=17.5$ mm)

Fig.4 Temperature and temperature gradient distribution of molten pool. (a) Surface temperature ($Y=0$ mm); (b) depth temperature ($X=17.5$ mm); (c) surface temperature gradient ($Y=0$ mm); (d) depth temperature gradient ($X=17.5$ mm)

艺条件下的连续熔凝过程中,熔池每一时刻吸收的能量相等,从而造成附加稳态磁场的试样其熔池表层温度要高于未加磁场的试样。同时,从温度场分布的规律可知,在当前激光工艺参数条件下,熔池内部的传热主要依靠热传导实现,即由热传导占主导,而对流形式传热的比重较小。该现象说明在稳态磁场的辅助条件下,熔凝层熔池的凝固时间基本保持不变,其凝固组织也可维持原状态,从而决定了无需对原有激光工艺参数进行调整。

4.3 表面及截面形貌特征

对附加稳态磁场和不附加稳态磁场条件下的激光熔凝层表面进行了实验验证。在激光熔凝过程中,由于液态金属的周期性运动,其凝固后表面的波纹不可避免。根据表面形貌的控制方程,网格边界法向的变形速率等于流速的法向速度分量。因此,ALE方法可以精确地描述熔凝层表面的波纹状褶皱。为了验证仿真模型对熔凝层表面形貌计算的准确性,将实验实测结果和仿真结果进行了对比。图5(a)为激光熔凝后,利用超景深三维数字显微镜对实物试样纵截面表面形貌的测量结果,而图5(b)为仿真结果。图5(a)和图5(b)中所显示的熔凝层波纹的波峰和波谷之间的高度差均为15~35 μm,且其波动的周期基本一致。上述结果表明仿真结果与实验结果吻合较好,可利用仿真模型来描述激光熔凝后的试样表面形貌。图6为不同磁场强度条件下,熔凝层表面的波纹轮廓。由于稳态磁场对流速的缓冲作用,熔池表层法向的流速减小,从而使熔凝层表面的波纹凸起高度也相应减小。当磁场强度从0增加到1.5 T时,熔凝层表面波纹被逐渐抑制。这是因为从控制方程(6)式可知,稳态磁场所提供的阻力大小与磁场强度的平方倍呈正比。随着磁场强度的增加,熔凝层表面波纹的高度将快速减小。

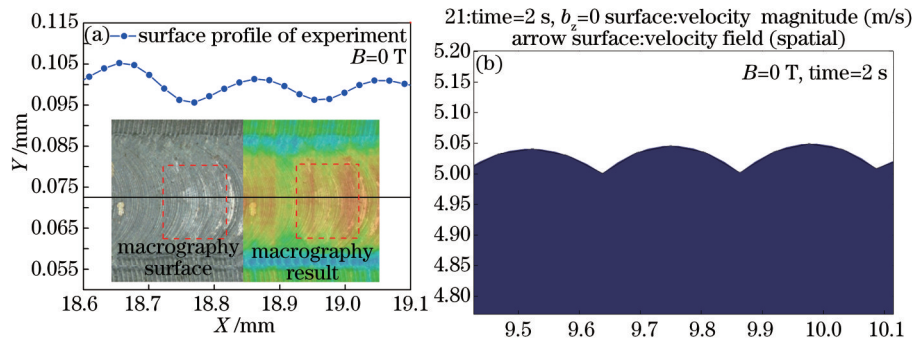


图5 熔凝层纵截面表面形貌。(a) 实验结果;(b) 仿真结果

Fig.5 Surface morphology of longitudinal section of laser remelting layer. (a) Experimental result; (b) numerical result

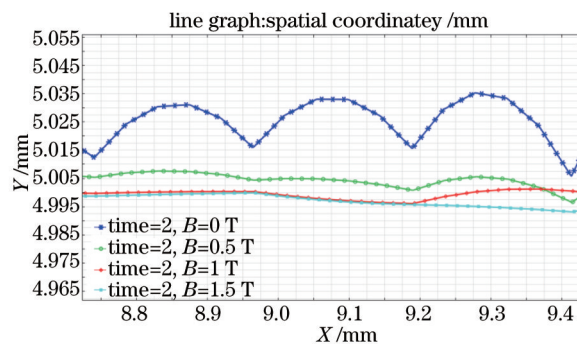


图6 熔凝层表面波纹仿真结果

Fig.6 Numerical result of surface undulation of laser remelting layer

图7(a)为通过超景深显微镜获得的熔凝层整体表面形貌(纵向),左边虚线框内为无磁场辅助区域,右边虚线框内为稳态磁场辅助区域($B=0.5$ T)。由图6(a)可知,在当激光扫描进入稳态磁场辅助区域后,熔凝层的表面波纹起伏被显著抑制。将图7(a)中的两个区域进行放大提取后获得熔凝层横截面的轮廓形貌,其中图7(b)所示区域为无磁场辅助区域,图7(c)所示区域为稳态磁场辅助区域。对比图7(b)和图7(c)下方的截面轮廓图可知,在无磁场辅助时,激光熔凝层横截面中部呈拱形凸起,两侧则出现下凹(咬边现象)。出现此类横截面形状与熔池表面张力系数和激光工艺参数有关。在相同激光工艺参数下,对熔凝区域附加稳态磁

场,熔凝层横截面表面则较为平缓,两侧下凹幅度减小。该现象说明,稳态磁场的辅助在改变熔凝层纵向波动起伏的同时,还可以平抑熔凝层横向的拱起,减少咬边程度。这是因为在稳态磁场中,熔池的三维对流方向与洛伦兹力的方向总是相反,熔池中各向对流都受到电磁阻尼的作用,进而对熔凝层的表面波动起到了整体平抑的作用。而且,温度场仿真结果显示,附加稳态磁场后,熔池表层的温度较高,表层熔融金属有充分地时间进行流动,补充到表面波纹的下凹区域,最终获得较为平滑的熔凝表面。

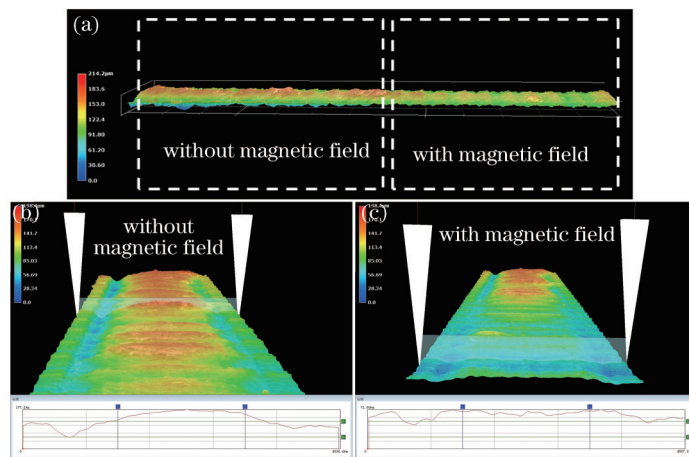


图7 熔凝层表面形貌。(a) 熔凝层纵向表面形貌; (b) 熔凝层形貌截面(无磁场辅助); (c) 熔凝层形貌截面(稳态磁场辅助)

Fig.7 Surface morphology of laser remelting layer. (a) Longitudinal section; (b) cross section(without magnetic field); (c) crosssection(with magnetic field)

图8为激光熔凝区的横截面金相组织,其中图8(a)和图8(b)分别为无磁场辅助区域和稳态磁场辅助区域($B=0.5\text{ T}$)的横截面金相组织。图中白实线外圍为基体组织,为呈带状分布的铁素体和珠光体;白实线和白虚线之间为热影响区,部分珠光体发生分解;红实线区域内为熔凝过程中熔池的液相区,主要为马氏体;白虚线和红实线之间为固液两相区(糊状区)。因此,在附加稳态磁场后,熔凝层横截面的固液两相截面形状发生了变化。该现象反映了在附加稳态磁场后,熔凝层温度场的分布出现变化,进而影响了熔池的形状。通过进一步观察,图8(a)中熔凝层表面呈拱形凸起,而图8(b)中的熔凝层表面则较为平坦,该结果与图6中呈现的表面形貌结果保持一致。为确切判断液相区的组织,对图8(a)和图8(b)中液相区的组织进行高倍放大,其组织形貌如图8(c)和图8(d)所示。由图8(c)和图8(d)可知,无论是否有稳态磁场辅助,激光熔凝区的组织类型基本一致,主要为马

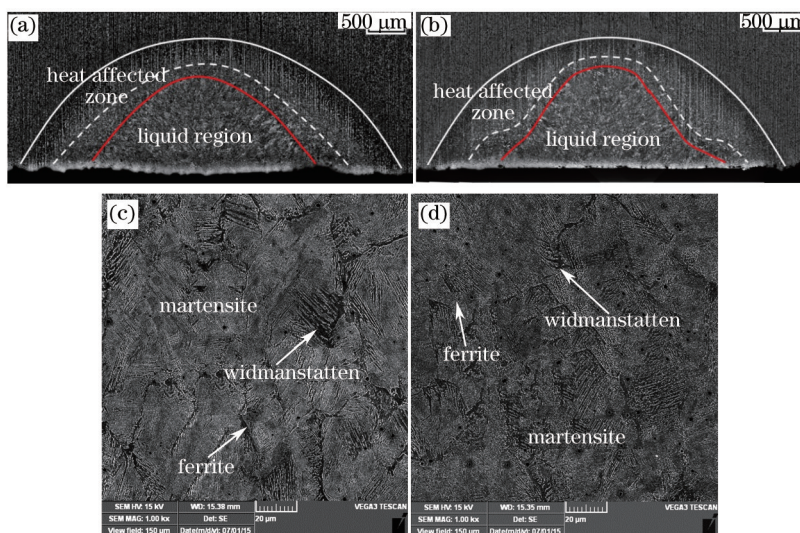


图8 熔凝层横截面金相组织。(a) 无磁场辅助区域(OM); (b) 稳态磁场辅助区域(OM); (c) 无磁场辅助区域(SEM); (d) 稳态磁场辅助区域(SEM)

Fig.8 Microstructure of cross section of laser remelting layer. (a) Without magnetic field (OM); (b) with magnetic field (OM); (c) without magnetic field (SEM); (d) with magnetic field (SEM)

氏体、沿晶界析出的铁素体和少量魏氏体,且两者晶粒大小基本相同。同时,根据无磁场辅助区域和稳态磁场辅助区域激光熔凝层的X射线衍射(XRD)分析结果(如图9所示),无论是否有稳态磁场辅助,熔凝层中物相类型皆为晶面指数为(110)、(200)、(211)和(220)的马氏体/ α 铁素体和 Fe_3Si ,吻合金相组织的观察结果。其衍射峰的相对强度基本相同,表明激光熔凝层中各物相的相对含量也基本一致。上述金相分析、SEM照片和XRD分析结果表明,在当前激光熔凝工艺参数条件下,无论是否有稳态磁场辅助,熔凝层的金相组织无明显差异。该现象说明在稳态磁场辅助条件下,虽然熔池的温度梯度发生了微小的变化,但其凝固速率无明显改变,进而其凝固组织和物相也与无附加磁场的保持一致。因此,稳态磁场在平抑熔凝层表面波纹的同时,可保持熔凝层原有的组织形态,从而无需对原有激光熔凝工艺参数进行调整,可节省大量的工艺调整时间。

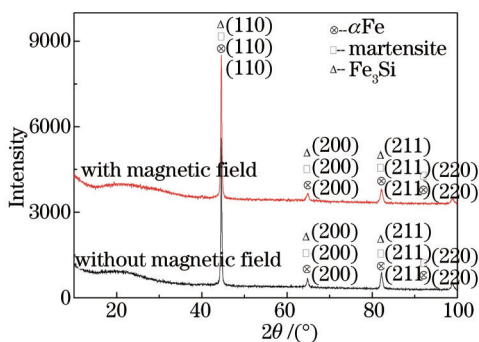


图9 激光熔凝层XRD衍射图谱
Fig.9 XRD spectra of laser remelting layer

5 结 论

1) 稳态磁场在熔池中所产生的洛伦兹力成为了时刻与熔池对流相反的阻力。当磁场强度大于0.5 T时,熔池流速即被明显减缓,当磁场强度进一步提高时,流速减缓不再明显。

2) 稳态磁场作用下,热传导仍为熔池内部主要的传热方式,导致熔凝层熔池的温度场变化不明显,仅温度梯度稍有增加。

3) 磁场强度变化对激光熔凝表面波纹有显著的抑制作用,当磁场强度大于0.5 T时,熔凝层表面波纹被明显抑制,而熔凝层的组织无明显变化。

4) 在不改变原有的激光熔凝工艺参数情况下,可以利用稳态磁场改善熔凝层的表面形貌。

参 考 文 献

- 1 Li Meiyang, Wang Yong, Han Bin, *et al.*. Microstructure and corrosion resistance of laser surface melting modified layer on high chrome steel[J]. *Materials Protection*, 2010, 43(3): 61-65.
李美艳,王 勇,韩 彬,等. 高铬钢激光熔凝处理后的组织与耐蚀性能[J]. *材料保护*, 2010, 43(3): 61-65.
- 2 Shi Hualiang, Li Jiqiang, Jia Zhixin, *et al.*. Microstructure and properties of SKD61 die steel strengthened by biomimetic laser-remelting [J]. *Materials for mechanical engineering*, 2014, 38(8): 39-43.
史华亮,李继强,贾志欣,等. SKD61模具钢激光仿生强化后的组织和性能[J]. *机械工程材料*, 2014, 38(8): 39-43.
- 3 Gong Renzheng, Fan Xiangfang, Hu wei, *et al.*. Influence of laser melting on microstructure and mechanical properties of high velocity oxy-fuel sprayed cemented carbide coatings[J]. *Hot Working Technology*, 2015, 40(4): 81-84.
龚仁政,樊湘芳,胡 巍,等. 激光熔凝对高速火焰喷涂硬质合金层耐磨性的影响[J]. *金属热处理*, 2015, 40(4): 81-84.
- 4 Wang C, Zhou H, Liang N, *et al.*. Mechanical properties of several laser remelting processed steels with different unit spacings[J]. *Applied Surface Science*. 2014, 313: 333-340.
- 5 Deng Meng, Wang Yiqiang, Gu Yan, *et al.*. Microstructure and wear behavior of laser hardened gray cast iron guideway[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0403009.
邓 猛,王义强,谷 岩,等. 激光强化灰铸铁导轨的微观组织及磨损性能[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0403009.
- 6 Wang Zhitai, Lin Xin, Cao Yongqing, *et al.*. External cooling condition effects on formation of anomalous eutectic in Ni-Sn alloy by laser remelting[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(12): 1203006.

- 汪志太, 林 鑫, 曹永青, 等. 外部冷却条件对激光熔凝 Ni-Sn 合金反常共晶形成的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1203006.
- 7 Yi Peng, Xu Pengyun, Yin Keping, *et al.*. Laser thermo-repairing process modeling and thermal response analysis on gray cast iron surface [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0303007.
- 伊 鹏, 许鹏云, 殷克平, 等. 灰铸铁表面激光热修复过程建模及热响应分析[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0303007.
- 8 Zhang Z, Lin P, Cong D, *et al.*. The characteristics of treated zone processed by pulsed Nd-YAG laser surface remelting on hot work steel [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 64: 227-234.
- 9 Chikarakara E, Naher S, Brabazon D. Process mapping of laser surface modification of AISI 316L stainless steel for biomedical applications [J]. Applied Physics a-Materials Science & Processing, 2010, 101(2): 367-371.
- 10 Liu Hongxi, Cai Chuanxiong, Jiang Yehua, *et al.*. Influence of alternative magnetic field on macro morphology and microstructure of laser cladding Fe-based composite coating[J]. Optics and Precision engineering, 2012, 20(11): 2402-2410.
- 刘洪喜, 蔡川雄, 蒋业华, 等. 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[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2402-2410.
- 11 Qin Lanyun, Yang Guang, Bian Hongyou, *et al.*. Experimental study on electromagnetic stirring laser metal deposition titanium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0303004.
- 钦兰云, 杨 光, 卞宏友, 等. 电磁搅拌辅助激光沉积成形钛合金试验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0303004.
- 12 Wang Wei, Li Qi, Yang Guang, *et al.*. Numerical simulation of electromagnetic flow, temperature field and flow field in laser molten pool with electromagnetic stirring[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0202007.
- 王 维, 刘 奇, 杨 光, 等. 电磁搅拌作用下激光熔池电磁场、温度场和流场的数值模拟[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0202007.
- 13 Gatzen M. Influence of low-frequency magnetic fields during laser beam welding of aluminium with filler wire[J]. Physics Procedia, 2012, 39: 56-66.
- 14 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.
- 15 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 and Mass Transfer, 2013, 60: 309-321.
- 16 Bachmann M, Avilov V, Gumenyuk A, *et al.*. Experimental and numerical investigation of an electromagnetic weld pool support system for high power laser beam welding of austenitic stainless steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(3): 578-91.
- 17 Hu Yong, Chen Zhijun, 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.
- 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.
- 18 Liu Huilin, Lei Yuxia, He Jiajian, *et al.*. Research status of laser surface melting technology and its numerical simulation[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2013, 36(4): 86-91.
- 刘慧林, 雷玉霞, 贺家健, 等. 激光熔凝表面强化技术及其数值模拟研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36(4): 86-91.
- 19 Yi Peng, Liu Yancong, Shi Yongjun, *et al.*. Numerical simulation of surface iron laser melting behavior and temperature distribution[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2011, 32(8): 81-84.
- 伊 鹏, 刘衍聪, 石永军, 等. 铸铁表面激光熔凝行为及温度场数值模拟[J]. 焊接学报, 2011, 32(8): 81-84.
- 20 Han Tao, Wang Yong. FEM simulation of laser melting of CK45 steel[J]. Hot Working Technology, 2007, 36(16): 80-83.
- 韩 涛, 王 勇. CK45 钢激光熔凝有限元模拟[J]. 热加工工艺, 2007, 36(16): 80-83.
- 21 Brent A D, Voller V R, Reid K J. Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: Application to the melting of a pure metal[J]. Numerical Heat Transfer Part B-fundamentals, 1988, 13(3): 297-318.

栏目编辑: 张浩佳