

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

王 维 刘 奇* 杨 光 钦兰云 薛 雄

沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 辽宁 沈阳 110136

摘要 建立了描述电磁搅拌辅助激光熔凝过程的电磁场和流场的三维数学模型,采用有限元和有限体积结合的方法实现激光熔池中电磁场与温度场及流场的耦合模拟分析,研究了电磁场对激光熔池流场与温度场的影响。结果表明,电磁力在水平面上呈周向分布,切向电磁力的大小从熔池边缘到中心递减;在旋转磁场的作用下,熔池内温度略有降低,温度梯度减小;熔池内液体趋向旋转运动,速度场分布与电磁力相似;熔池纵向环流增加,使熔池内的熔体对流加剧,有利于传热,加快冷却;激励电流大小对电磁场和熔池流场有明显影响。为激光加工提供理论参考。

关键词 光学制造;激光熔池;电磁场;温度场;熔池流场;电磁力;数值模拟

中图分类号 TG146.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0202007

Numerical Simulation of Electromagnetic flow, Temperature Field and Flow Field in Laser Molten Pool with Electromagnetic Stirring

Wang Wei Liu Qi Yang Guang Qin Lanyun Xue Xiong

Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process,
Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning 110136, China

Abstract A new three-dimensional mathematical model describing the electromagnetic stirring in the laser remelting is developed. The method combining the finite element and finite volume is used to deal with coupling electromagnetic field with flow field and temperature field. The influence of electromagnetic field on temperature field and flow field are analyzed. The results show that the electromagnetic force is distributed circumferentially at horizontal plane, the magnitude of the tangential force decreases from edge to center; Under the effect of rotating magnetic field, the temperature and temperature gradient in the molten pool are slightly reduced; Liquid in the molten pool tends to rotary motion, it is similar that the distribution of velocity field and electromagnetic force; The circulation in the longitudinal of molten pool increases, which is benefit for heat transfer of molten pool and accelerates cooling speed; The distributions of electromagnetic field and flow field are affected by the intensity of exciting current. It provides the theoretical reference for laser processing.

Key words optical fabrication; laser molten pool; electromagnetic field; temperature field; flow field; electromagnetic force; numerical simulation

OCIS codes 350.3850; 000.2190; 220.4610

收稿日期: 2014-07-21; 收到修改稿日期: 2014-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(51305280)、航空基金(2013ZE54017)

作者简介: 王 维(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事激光快速成形、激光再制造技术等方面的研究。

E-mail: wangw1116@sau.edu.cn

* 通讯联系人。E-mail: 773509255@qq.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引言

电磁搅拌技术具有非接触、易于控制和环保等优点,在改善铸坯的凝固组织,减轻铸坯中心偏析和提高等轴晶率等内部缺陷有显著作用^[1],在半固态金属坯料制备,焊接与激光熔覆等领域得到广泛应用^[2-9]。刘洪喜等^[10]对旋转磁场辅助激光熔覆技术的试验研究表明在旋转磁场作用下,熔覆涂层晶粒组织被细化且分布均匀致密。齐鹏等^[11]利用电磁搅拌辅助激光沉积修复进行试验,研究结果表明电磁搅拌能够细化修复层组织,提高其力学性能。熔池熔化凝固的过程伴有液体流动与冶金结合等复杂过程,无法用实验进行检测,随着科学技术的迅猛发展,计算机发展成熟,近些年一些研究学者^[12-16]成功利用计算机对半固态金属坯料制备过程中电磁搅拌对金属熔体凝固过程流场和温度场的影响进行模拟,并对其相互作用机理进行研究。Roplekar等^[17]通过数值模拟对电磁搅拌作用下结晶器内熔体温度场、流场和成分场的分布规律进行研究。但激光熔池不同于铸造熔池,激光熔池较小(面积为 $10^{-2}\sim 10^0$ mm的量级),熔池在液态存在时间较短(例如光束直径为4 mm,光束扫描速度为5 mm/s时,熔池在液态存在时间小于1 s)^[18],熔池内存在复杂的熔化凝固过程。刘昊等^[19]基于生死单元法对激光熔覆瞬态温度场和熔覆层几何形貌进行数值模拟。刘振侠等^[20]利用数值分析的方法对激光熔池内的流动进行分析。但是电磁搅拌技术是如何影响激光微小熔池内的液体流动,有效控制熔体凝固过程的传热与传质的是研究电磁搅拌作用下凝固组织细化作用机理的重要方面。

激光扫描过程中的传热传质过程较为复杂,为了研究电磁场对熔池流场及温度场的影响,本文将激光扫描过程中复杂的传热传质进行适当简化,短时间激光照射形成的激光熔池和激光扫描熔凝的某一瞬时状态一致^[18],因此为了使计算模型简单化而又不失其意义,通过短时间激光照射形成的激光熔池研究电磁场对熔池流场与温度场的影响,通过建立简化的电磁搅拌器三维计算模型与激光熔凝模型,应用有限元软件ANSYS求解三维电磁场问题,利用Fluent软件UDF编程实现电磁场与熔池流场及温度场的耦合求解,对旋转磁场是如何作用于微小熔池中,以及电磁场对熔池流场和温度场的影响进行研究,对电磁搅拌技术影响凝固组织的机理进行分析。

2 电磁搅拌装置描述

电磁搅拌器的工作示意图如图1所示。在感应线圈中通入相位差为 120° 的三相交流电,电磁搅拌器产生旋转磁场,当磁感线切割激光熔池的金属熔液时产生感应电流^[21],载流的金属熔液相当于导体,与磁场相互作用产生作用在液体上的电磁力。改变激励电流的大小进而调整旋转磁场强度,从而获得不同的搅拌效果。模拟计算过程中对试验装置进行简化,包括钛合金熔液,线圈,空气和铁芯,图2所示电磁搅拌器计算模型,为了便于观察图中不包含空气。其中,电磁搅拌器内径为280 mm、高为350 mm,激励电流 $I=100\sim 300$ A,电流频率 $f=2\sim 12$ Hz。利用有限元模拟软件Ansys对电磁场的分布进行模拟,采用适用于时谐电磁场分析的Solid97单元,对搅拌器、熔池采用映射网格划分,钛合金液体是电的良好导体,其网格的质量影响计算结果的精度,所以对其进行细密的网格划分。

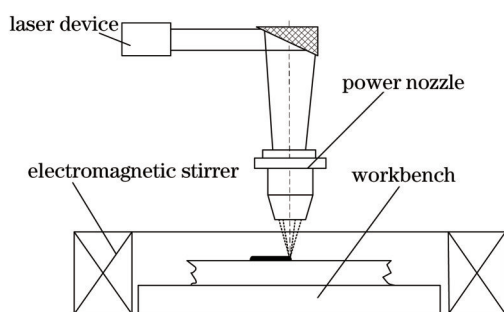


图1 电磁搅拌器工作示意图

Fig.1 Schematic of electromagnetic stirring device

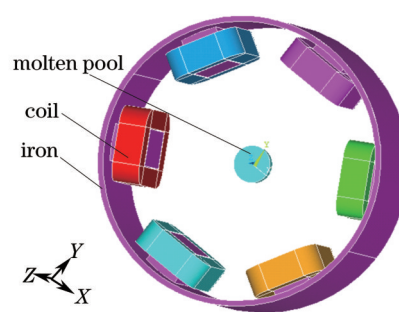


图2 电磁搅拌器计算模型

Fig.2 Geometrical model of electromagnetic stirring

3 数学模型描述

由于电磁搅拌辅助激光加工过程中电磁场和流场耦合问题的复杂性,在建立数学模型时,为了使问题易于处理而又不失其意义,做如下假设:1)激光熔池内液体流动为不可压缩 Newton 流体,熔池内流动为层流;2)将时变的电磁力用时均值代替;3)电磁搅拌所用的交变磁场频率一般在 1~10 Hz,属于准静态场,忽略位移电流;4)电磁搅拌过程中,磁雷诺数很小,忽略液体运动对电磁场的影响。

3.1 电磁场控制方程

电磁搅拌器的电磁场控制方程:

$$\nabla \times \mathbf{H} = -\mathbf{J}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = 0, \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (4)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (5)$$

式中 \mathbf{H} 为磁场强度, A/m; \mathbf{J} 为电流密度, A/m²; \mathbf{E} 为电场强度, V/m; \mathbf{B} 为磁感应强度, T; t 为时间, s; μ 为磁导率, H/m; σ 为电导率, S/m。

耦合计算过程中,电磁力用时均值表示:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{J} \times \mathbf{B}^*), \quad (6)$$

式中 \mathbf{F} 为时均电磁力, N/m³; Re 为负数的实数部分; \mathbf{B}^* 为 \mathbf{B} 的共轭负数。

3.2 流场控制方程

激光熔凝过程是熔化和凝固的过程,这一过程包含了熔池内质量、动量和能量的变化及其所导致的材料固液相的转换。采用合理恰当的数学模型描述这一复杂多样的物理过程是重要的一步。激光熔池流动及传热动力学过程中各物理量的控制方程组包括连续性方程、能量方程和动量方程。其表达形式如下:

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{U}) = 0; \quad (7)$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{U} h) = \text{div}(\alpha \text{grad } h) + S_h; \quad (8)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{U} u_i) = \text{div}(\mu \text{grad } u) - \frac{\partial P}{\partial x} + S_i; \quad (9)$$

式中 u_i 分别是速度矢量 \mathbf{U} 在 x, y, z 轴上的投影, h 为显焓, P 为压力, S_i, S_h 为源项, α, μ 分别为液相粘性系数和热扩散率, $\alpha = k/c, k$ 为导热系数, c 为比热。

4 边界条件与求解方法

电磁搅拌器采用高磁导率的硅钢片,漏磁较小,因此模拟计算中电磁搅拌器最外层节点的磁矢量为零,边界条件施加磁力线平行,电磁搅拌器的线圈绕组简化为具有相同导电截面的载流区,电流强度由载流密度表示。其中钛合金液体和空气的相对磁导率均为 1;铁芯的相对磁导率为 2000;钛合金熔液的相对电导率为 $1.85 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$,钛合金熔液热物性参数如表 1 所示^[22-26]。

温度场与流场的边界条件如下:

在试样的上表面:

$$-k \nabla T \mathbf{n}_i = \frac{\eta Q}{2\pi r_0^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2r_0^2}\right) - [h_c(T - T_a) + \sigma \xi (T^4 - T_a^4)], \quad (10)$$

式中 \mathbf{n}_i 为试样上表面的法向单位矢量, η 为热源效率, Q 为激光输出功率, r_0 为高斯分布参数, r 为工件上某

点与热源中心的距离, h_c 为对流和辐射边界的综合热传导系数, T 为工件上表面温度, T_a 为环境温度, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, ξ 为发射率。

表 1 材料性能及热物性参数

Table 1 Material performance and thermo physical properties

Properties	Values					
Temperature /K	293	373	473	573	673	773
Thermal conductivity /($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	9.63	10.47	11.72	12.14	13.40	14.65
C_p / ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)		574		641	699	729
Density / ($kg^{-1} \cdot m^{-3}$)	4200					
Surface tension coefficient /($N \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	-3.5×10^{-4}					
Dynamic viscosity / ($m^2 \cdot s^{-1}$)	1.05×10^{-5}					
Solidus temperature /K	1604					
Liquidus temperature /K	1660					

在试样的下表面和侧面的对流换热与辐射的边界条件为:

$$-k\nabla T \mathbf{n}_0 = -h_c(T - T_a) - \sigma\xi(T^4 - T_a^4), \quad (11)$$

式中 \mathbf{n}_0 为法向单位矢量。

采用 Ansys 软件求解电磁搅拌条件下激光熔池中的电磁场分布, 然后采用有限体积法离散流场微分方程, 用交错网格存储速度分量, 流场计算采用 Simplec 算法, 采用 UDF 编程, 将 Ansys 计算的电磁力加入动量源项。当连续方程的质量源小于 10^{-4} 时, 即认为迭代收敛。

5 模拟结果与分析

5.1 电磁场分布特征

为了验证模拟的可靠性, 将实际测量和数值模拟得到的磁场强度值进行对比。图 3 为电流频率为 6 Hz, 激励电流分别为 100、150、200、250、300 A 时中心磁场强度的计算值与测量值对比图, 由图中可知, 在一定范围内中心磁场强度与激励电流呈线性关系, 电流每增加 50 A, 中心磁场感应强度相应增加约 10 mT。由于受测量设备(沈阳汇博自动化仪表有限公司的 SHT-6A 型数字高斯计) 和电磁搅拌器在实际工作过程中有磁漏而在模拟计算中假设为理想情况, 忽略漏磁等不可避免的因素影响, 测量值和计算值不完全相同, 计算值略高于测量值, 但是变化规律完全一致, 而且最大误差不超过 3%, 因此不影响模拟结果的参考意义。

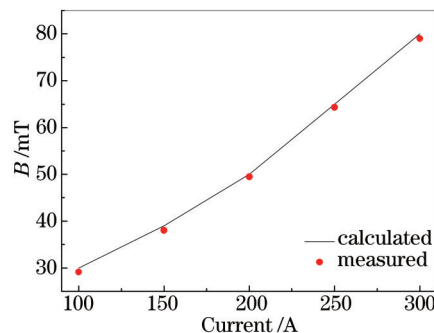


图 3 不同激励电流条件下电磁搅拌器中心磁场强度计算值与测量值的比较

Fig.3 Comparison of measured and calculated magnetic flux densities at the center with different excitation currents

图 4 所示激励电流为 100 A, 电流频率为 6 Hz 时激光熔池水平剖面所受切向电磁力矢量分布图。熔池内熔液受到与磁场方向一致的切线力, 即电磁力。电磁力呈周向分布, 在熔池边缘最大, 向中心不断衰减。图 5 为不同激励电流时电磁搅拌器横截面(X-Y 平面)上切向电磁力分布图。从图中可知, 切向电磁力随着激励电流的增大而增大, 激励电流从 100 A 增大到 250 A, 最大切向电磁力增大大约 3 倍。

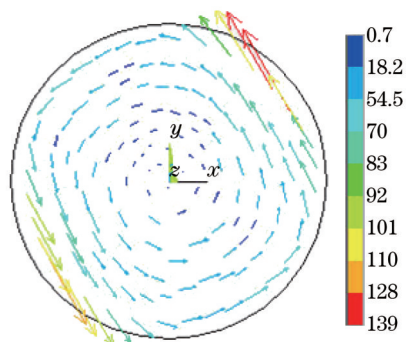


图4 激光熔池水平剖面内切向电磁力矢量分布图
Fig.4 Vector distribution of tangential electromagnetic force in laser molten pool

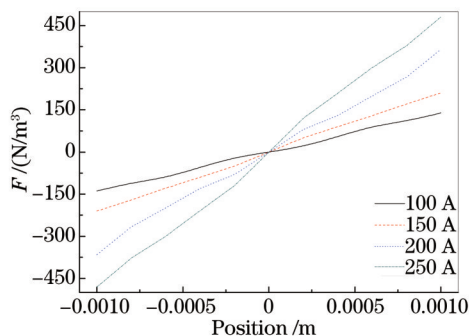


图5 不同激励电流时电磁搅拌器横截面上切向电磁力分布图($x=0, y=0, f=6\text{ Hz}$)
Fig.5 Distribution of tangential electromagnetic force at different current intensities ($x=0, y=0, f=6\text{ Hz}$)

5.2 温度场分布特征

钛合金在 $1660\text{ }^\circ\text{C}$ 时达到液相线温度,完全变为液态。高能量密度的激光束照射在基材表面,激光功率为 1500 W ,光斑直径约 2 mm ,扫描速度为 8 mm/s 时,液态激光熔池存在时间约为 0.25 s ^[18],因此对激光束持续照射基材表面 0.25 s 形成的激光熔池进行模拟分析。图6为激光熔池 $X\text{-}Y$ 平面内温度分布图。由图6(a)未施加电磁搅拌的熔池温度分布图可知,激光熔池上表面面积约为 2.64 mm^2 ,最高温度达到 $2440\text{ }^\circ\text{C}$ 。施加激励电流 100 A ,频率为 6 Hz 的电磁搅拌后[如图6(b)],激光熔池面积扩大,约为 2.98 mm^2 ,熔池内温度有所降低,最高温度达到 $2340\text{ }^\circ\text{C}$,这是因为未施加电磁搅拌熔池内热量主要通过传到基材和空气中进行散热,而施加电磁搅拌后液体的加速流动会带走一部分热量,因此温度会略有下降,而且熔液的加剧流动增加熔池内能量的交换,使温度趋于均匀,温度梯度减小。

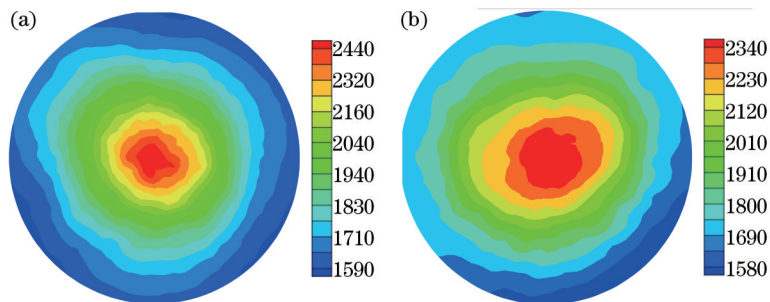


图6 $X\text{-}Y$ 平面熔池内温度场分布图。(a) 未施加电磁搅拌; (b) $I=100\text{ A}, f=6\text{ Hz}$

Fig.6 Distribution of temperature fields at $X\text{-}Y$ plane in molten pool. (a) Without electromagnetic stirring; (b) $I=100\text{ A}, f=6\text{ Hz}$

5.3 流场分布特征

图7为激光熔池 $X\text{-}Y$ 平面内液体流动分布图,图7(a)为未施加电磁搅拌的熔池内液体流动矢量图。激光熔池内由于受到表面张力和浮力等力的作用,熔液从熔池中间流向边缘,流速均匀。施加激励电流为 100 A ,频率为 6 Hz 的旋转磁场后,由图7(b)可知在电磁力的作用下熔池内的液体流向发生改变,趋向旋转运动,液体的流动速度由中心向边缘逐渐增大,与电磁力的分布相吻合。说明旋转磁场对存在时间极短的熔池产生作用,加速液体流动并驱使熔液流向熔池边缘。再加之熔池径向温度梯度减小,熔体外侧粘度减小会使凝固后出现中间低两侧高的特征,与文献[27-28]研究的电磁搅拌辅助激光熔覆件表面出现中间下凹两侧凸起的现象一致。

熔池内的液体流动与材料的冶金结合密切相关,在激光熔凝过程中熔池的内部流动是材料熔化再凝固后组织性能至关重要的研究。激光熔化过程中由于温度的变化会在熔池内产生浮力和表面张力,这两个力主要影响熔池内的液体流动^[20,29]。图8(a)[图8(b)为示意图]所示为未施加电磁搅拌的激光熔池 $X\text{-}Z$ 平面的流场分布图,在浮力和表面张力的作用下近上表面的熔体由熔池中心流向熔池边沿,液面产生高度差,形成的重力梯度又驱使熔体回流,因此在熔池对称两边形成流向相反的对流回路,熔池内的对流对激光熔池的

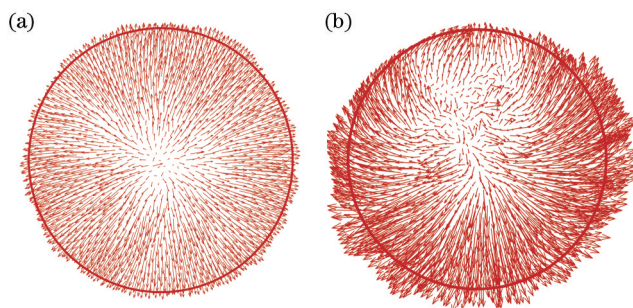


图7 X-Y平面熔池内流场分布图。(a) 未施加电磁搅拌; (b) $I=100\text{ A}$, $f=6\text{ Hz}$

Fig.7 Distribution of flow fields at X-Y plane in molten pool. (a) Without electromagnetic stirring; (b) $I=100\text{ A}$, $f=6\text{ Hz}$

形貌有重要影响。由图 8(c)[图 8(d)为示意图]可知施加激励电流为 100 A, 电流频率为 6 Hz 的电磁搅拌的过程中, 在旋转磁场的作用下, 液体流向发生明显变化, 液体向熔池边缘流动, 并形成多个环流。环流的增多, 不仅改变熔池的形貌而且加剧了液体的流动, 增加了熔池内的能量交换, 加速热量传输, 减小温度梯度, 加速冷却, 进而使凝固组织得到细化, 影响其力学性能。文献[10]的研究成果表明, 在电磁场作用下, 熔覆涂层晶粒组织细化且分布均匀致密, 提高熔覆涂层质量, 与本文研究结果一致。

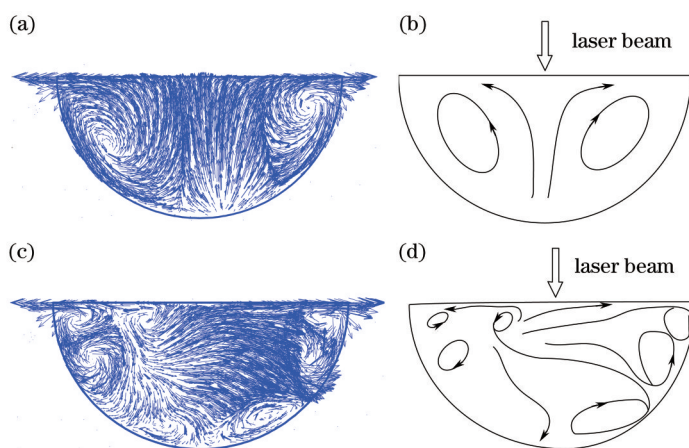


图8 X-Z平面熔池内流场分布图。(a) 未施加电磁搅拌; (b) 图 8(a)的示意图; (c) $I=100\text{ A}$, $f=6\text{ Hz}$; (d) 图 8(c)示意图

Fig.8 Distribution of flow fields at X-Z plane in molten pool. (a) Without electromagnetic stirring; (b) schematic diagram of Fig.8(a); (c) $I=100\text{ A}$, $f=6\text{ Hz}$; (d) schematic diagram of Fig.8(c)

图 9 为不同激励电流下熔池横截面(X-Y平面)上的液体切向速度分布。可以看出液体切向速度随着激励电流的增大而增大, 边缘的熔液切向速度由 100 A 时的 0.2 m/s 增大到 250 A 时的 0.63 m/s, 旋转磁场强度的增大, 促使熔池内液体加剧流动, 加速熔池内热量的疏散, 使温度与溶质分布均匀, 冷却速度加快, 组织得到细化。但并不是旋转磁场强度越大越好, 过强的旋转磁场会使熔液过多的趋向熔池边缘, 影响修复件的表面形貌与内部组织。这与文献[11]、[27]的试验研究结果, 在一定范围内, 旋转磁场强度越大, 激光沉积修复层内 α 片层组织越细密的现象一致。

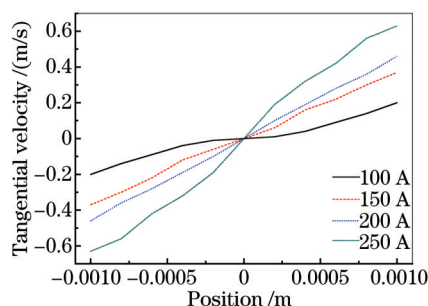


图9 不同激励电流下激光熔池横截面内液体切向速度分布图($x=0$, $y=0$, $f=6\text{ Hz}$)

Fig.9 Variations of the tangential velocity in laser molten pool at different current intensities ($x=0$, $y=0$, $f=6\text{ Hz}$)

6 结 论

1) 在一定范围内激光熔池内的液体表面中心磁场强度与激励电流呈线性关系, 电流每增加 50 A, 中心磁场感应强度相应增加约 10 mT。

2) 激光熔池中熔液所受电磁力的方向与磁场旋转方向一致, 大小从熔池边缘到熔池中心逐渐衰减, 随着激励电流从 100 A 增大到 250 A, 最大切向电磁力增大约 3 倍。

3) 激光熔池在浮力和表面张力等力的作用下熔池内的液体由熔池中间流向边缘形成环路对流。

4) 施加电磁搅拌后, 熔池内液体在电磁力的作用下温度降低, 流动发生改变, 形成多个环流, 加速热量传输, 减小温度梯度。

5) 随着激励电流的增大, 熔池横截面上熔液的切向速度随之增大, 熔池边缘的切向速度由 100 A 时的 0.2 m/s 增大到 250 A 时的 0.63 m/s。但磁场强度并不是越大越好。

参 考 文 献

- 1 Chen Yong. Mold electromagnetic stirring technique for continuous casting[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2003, 2(24): 29-33.
陈 永. 连铸结晶器电磁搅拌技术[J]. 钢铁钒钛, 2003, 2(24): 29-33.
- 2 N Barman, P Kumar, P Dutta. Studies on transport phenomena during solidification of an aluminum alloy in the presence of liner electromagnetic stirring[J]. J Mater Process Technol, 2009, 209(18-19): 5912-5923.
- 3 P G Tennyson, P Kumar, H Lakshmi, *et al.*. Experimental studies and phase field modeling of microstructure evolution during solidification with electromagnetic stirring[J]. Trans of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(S3): 774-780.
- 4 Wang Baofeng, Li Jianchao. Application of electromagnetic stirring technology in continuous casting[J]. Angang Technology, 2009, 1: 1-5.
王宝峰, 李建超. 电磁搅拌技术在连铸生产中的应用[J]. 鞍钢技术, 2009, 1: 1-5.
- 5 Wang Shaohua, Yang Shoufeng, Fang Canfeng, *et al.*. Zhang Xingguo. Effects of electromagnetic casting on as-cast microstructures and solid solubility inside crystals of Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 12(19): 2083-2089.
王少华, 杨守东, 房灿峰, 等. 电磁铸造对 Al-Zn-Mg-Cu-Zr 合金微观组织及晶内固溶度的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(12): 2083-2089.
- 6 Chen Jianguo, Jiang Guoli, Pang Yonggang. Application of mold electromagnetic stirring in continuous casting middle billet[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 1(29): 142-145.
陈建国, 江国利, 庞永刚. 结晶器电磁搅拌在小方坯连铸上的应用[J]. 北京科技大学学报, 2007, 1(29): 142-145.
- 7 Zhang Nan. Simulated Research of Effect of Final Electromagnetic Stirring to Segregation and Shrinkage Porosity on Continuous Casting Billet[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
张 楠. 末端电磁搅拌对钢连铸坯成分偏析及缩松影响的模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- 8 Yu Shengpu, Zhang Youzhou, Xie Zhiqiang, *et al.*. The influence of rotating magnetic field on the microscopic structure of welded metal by laser welding[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2005, 33(12): 24-26.
余圣甫, 张友寿, 谢志强, 等. 旋转磁场对激光焊缝金属显微组织的影响[J]. 华中科技大学学报, 2005, 33(12): 24-26.
- 9 Yu Benhai, Hu Xuehui, Wu Yu'e, *et al.*. Studies of the effects and mechanism of electromagnetic stirring on the microstructures and hardness of laser cladding WC-Co based alloy coating[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(10): 2672-2677.
余本海, 胡雪惠, 吴玉娥, 等. 电磁搅拌对激光熔覆 WC-Co 基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.
- 10 Liu Hongxi, Ji Shengwei, Jiang Yehua, *et al.*. Microstructure and property of Fe60 composite coatings by rotating magnetic field auxiliary laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0103007.
刘洪喜, 纪升伟, 蒋业华, 等. 旋转磁场辅助激光熔覆 Fe60 复合涂层的显微组织与性能[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0103007.
- 11 Qi Peng. The Application and Research of Electromagnetic Stirring Technology in Titanium Alloy Laser Rapid Repair[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2013.
齐 鹏. 电磁搅拌技术在钛合金激光快速修复中的应用与研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2013.
- 12 Yu Haiqi, Zhu Miaoyong. 3D numerical simulation of flow field in a round billet continuous casting mold with continuous casting mold with electromagnetic stirring[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(12): 1465-1473.
于海岐, 朱苗勇. 圆坯结晶器电磁搅拌过程三维流场与温度场数值模拟[J]. 金属学报, 2008, 44(12): 1465-1473.

- 13 Yuan Youzhi, Wang Yanfeng, Liu Xiaorui. Numerical simulation of three-dimensional thermal field and flow field in TIG welding pools based on fluent[J]. Jiangxi Science, 2008, 26(6): 880-883.
袁尤智, 汪延峰, 刘晓瑞. 基于 FLUENT 的 TIG 焊三维熔池热场与流场的数值模拟[J]. 江西学报, 2008, 26(6): 880-883.
- 14 Shi Yu, Guo Chaobo, Xu Lesheng, *et al.*. Numerical simulation of the force in TIG welding pool based on Fluent[J]. Electric Welding Machine, 2011, 41(9): 21-24.
石 玟, 郭朝博, 许乐生, 等. 基于 Fluent 熔池内部受力的数值分析[J]. 电焊机, 2011, 41(9): 21-24.
- 15 Guo Xiaofeng, Wang Chengzhi, Zhang Yutuo, *et al.*. The numerical simulation of magnetofluids in the course of semisolid slurry preparation of aluminum alloy[J]. Research Studies on Foundry Equipment, 2007, 1: 19-22.
郭晓凤, 王承志, 张玉妥, 等. 铝合金半固态浆料制备过程的电磁-流体数值模拟[J]. 铸造设备研究, 2007, 1: 19-22.
- 16 Zhang Qi, Jin Junze, Wang Tongmin, *et al.*. Analysis of molten metal flow in rotating magnetic field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(1): 98-104.
张 琦, 金俊泽, 王同敏, 等. 金属液在旋转电磁搅拌器作用下的流动分析[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(1): 98-104.
- 17 Roplekar J K, Dantzig J A. A study of solidification with a rotating magnetic field[J]. Int J Cast Metal Res, 2001, 14: 19-95.
- 18 Chen Jing, Tan Hua, Yang Haiou, *et al.*. Evolution of molten pool shape in the process of laser rapid forming[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(3): 442-446.
陈 静, 谭 华, 杨海鸥, 等. 激光快速成形过程中熔池形态的演化[J]. 中国激光, 2007, 34(3): 442-446.
- 19 Liu Hao, Yu Gang, He Xiuli, *et al.*. Three-dimensional numerical simulation of transient temperature field and coating geometry in powder feeding laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1203007.
刘 昊, 虞 钢, 何秀丽, 等. 送粉式激光熔覆中瞬态温度场与几何形貌的三维数值模拟[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1203007.
- 20 Liu Zhenxia. Modeling and Numerical Simulation on Laser Remelting Cladding[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003.
刘振侠. 激光熔凝和激光熔覆的数学模型及数值分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
- 21 Chen Xingrun, Zhang Zhifeng, Xu Jun, *et al.*. Numerical simulation of electromagnetic field, flow field and temperature field in semi-solid slurry preparation by electromagnetic stirring[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(5): 932-945.
陈兴润, 张志峰, 徐 骏, 等. 电磁搅拌法制备半固态浆料过程电磁场、流场和温度场的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(5): 932-945.
- 22 Zhang Xiyan, Zhao Yongqing, Bai Chenguang, *et al.*. Titanium Alloy and Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. 21-56.
张喜燕, 赵永庆, 白晨光, 等. 钛合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 21-56.
- 23 Zhou Wuzhuang. Titanium Handbook[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012. 1-78.
邹武装. 钛手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012. 1-78.
- 24 Li Shifeng, Chen Suling. Numerical simulation of laser welding for BT20 Titanium alloy mouthpiece by using the gauss heat-source model[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 5: 85-89.
李世峰, 陈素玲. 基于 Gauss 热源模型的 BT20 钛合金管口激光焊接数值模拟[J]. 航空制造技术, 2009, 5: 85-89.
- 25 Zhao Yongqing, Cheng Yongnan, Zhang Xuemin, *et al.*. Titanium Alloy Phase Change and Heat Treatment[M]. Changsha: Central South University Press, 2012. 3-25.
赵永庆, 陈永楠, 张学敏, 等. 钛合金相变及热处理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2012. 3-25.
- 26 G Lutjering, J C Williams. Titanium[M]. (2nd edition) Lei Ting Transl.. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011. 1-48.
卢特金, 威廉姆斯. 钛[M]. (第2版). 雷霆译. 北京: 冶金工业出版社, 2011. 1-48.
- 27 Qin Lanyun, Yang Guang, Bian Hongyou, *et al.*. Experimental study on electromagnetic stirring assisted 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.
- 28 Xu Hua. Investigation on Laser Cladding Hard Alloy and Laser Cladding Hard Alloy with Electromagnetic Stirring[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005. 1-25.
许 华. 激光熔覆硬质合金及电磁搅拌辅助激光熔覆硬质合金的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005. 1-25.
- 29 Zhang Qi, Wang Jin, Chu Zhong. Development of the numerical simulation of the molten metal under electromagnetic stirring[J]. Materials Review, 2011, 8(25): 135-144.
张 琦, 王 进, 褚 忠. 电磁搅拌金属熔体数值模拟的研究进展[J]. 材料导报, 2011, 8(25): 135-144.

栏目编辑: 张 雁