

# 旋转磁场对激光熔凝钛合金熔池的影响

杨 光, 薛 雄, 钦兰云, 王 维

(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:** 运用有限元方法对不同频率下电磁搅拌辅助装置中心处磁场强度以及熔池电磁力进行了模拟分析, 并研究了旋转磁场对熔池电磁力和熔池温度分布及流场影响。结果表明, 当电流频率增大时, 熔池中电磁力首先有缓慢减小趋势, 同时功率损耗迅速增大, 当频率继续增大时, 电磁力逐渐增大, 此时功率损耗基本趋于稳定; 在激励电流变化的一个周期内, 搅拌装置中磁场强度也发生周期性变化。在施加旋转磁场条件下, 熔池整体温度有所降低, 温度梯度减小, 熔池内形成围绕熔池做周向流动的环流, 流速分布均匀。

**关键词:** 电磁搅拌装置; 旋转磁场; 激光熔池; 温度场; 流场

中图分类号: TG146.2<sup>+</sup>3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)07-1804-07

电磁搅拌技术作为提高金属冶炼工艺效率和产品质量的有效辅助手段, 具有非接触、易于控制等优点, 在冶金制造领域得到了广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。为提高激光熔覆质量, 国内外学者将电磁搅拌技术引入到激光熔覆制造领域, 做了大量的工作取得了可喜的进展<sup>[3-7]</sup>。德国的 M. Kern 等<sup>[3]</sup>通过在激光焊接过程中施加平行磁场来改变熔池流体速度分布, 进而改变焊缝形态抑制驼峰的形成。M. Gatzen 等<sup>[4]</sup>在 Ni-Al 合金激光沉积制造中加入旋转磁场, 发现随着激励电流的加大, 加剧了熔池的对流并促进包晶反应。余本海等<sup>[6]</sup>通过在旋转磁场作用下对 304 不锈钢以及 Al-12Si 进行激光焊接缺陷的研究, 发现旋转磁场能够有效的对其激光熔池进行搅拌抑制柱状晶的产生并且起到细化晶粒的作用。王维等<sup>[8,9]</sup>利用电磁搅拌辅助装置进行激光沉积修复试验, 并运用有限元分析软件对旋转磁场作用下的激光熔池的电磁力及流体流动进行了数值模拟, 主要分析了激励电流幅值对旋转磁场及熔池的影响。结果表明, 增大电流强度对熔池的对流有促进作用, 细化沉积层内的片层组织, 进而提高沉积层的力学性能, 但是电流频率对磁场强度以及熔池电磁力的变化规律的影响尚未有相关报道。因此, 在电流值相同的情况下, 通过模拟不同电流频率条件下电磁力的大小, 研究电流频率与电磁搅拌器中心磁场强度以及电磁力之间的关系, 并对分析旋转磁场作用前后激光熔池温度场及流场的变化。

激光扫描过程中传热传质过程较为复杂, 为了研

究电磁场对激光熔池温度场及流场的影响, 对熔池熔凝及电磁搅拌作用做出适当的简化。通过对短时间激光辐射形成的熔池模拟并分析电磁场对温度场及流场的影响, 建立电磁场搅拌下熔池电磁力的数学模型, 应用有限元分析软件对电磁搅拌器 (Electromagnetic Stirrer: EMS) 及旋转磁场作用下的激光熔池温度场、流场进行模拟分析, 并运用自行研制的电磁搅拌装置进行试验验证。

## 1 关键参数计算及数值模拟

在实际的激光熔覆加工过程中, 很难运用 Maxwell 微分公式对电磁搅拌器中心磁场及熔池电磁力进行定性定量分析, 本研究旨在通过“磁-电-力”经典公式推导出磁场以及电磁力与通入电磁搅拌器线圈电流的关系, 便于数值模拟和实验过程中定性、定量分析。

### 1.1 熔池电磁力计算方法

#### (1) 电磁微元磁矢势

由电磁理论 Biot-Savart 定律<sup>[10]</sup>知, 一条通电导线在空间一点产生磁感应强度  $d\vec{B}$  可由式 (1) 表示:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \vec{e}_r}{r^2} \quad (1)$$

式中,  $\mu_0$  为真空磁导率;  $I$  为通电导体中的电流, A;  $d\vec{l}$  为导线线单元;  $\vec{e}_r$  为单位方向向量;  $r$  为电流元至所求点的距离, m。

收稿日期: 2015-07-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51375316, 51305280); 航空基金项目 (2014ZE54020); 辽宁省教育厅优秀人才项目 (LJQ2014020)

作者简介: 杨 光, 男, 1978 年生, 博士, 副教授, 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, E-mail: yangguang@sau.edu.cn

(2) Helmholtz 线圈中心磁场强度

电磁搅拌器硅钢片截面为矩形，可近似将缠绕其上的线圈看成成矩形，将线圈模型简化成正方形 Helmholtz 线圈<sup>[11]</sup>，如图 1 所示，同时将正方形的线圈视为 4 段载流直导线，分别计算出中心点处磁感应强度再叠加，得到正方形载流线圈中心点处磁场强度。

根据公式(1)可得正方形通电线圈中心处场强为：

$$B = \frac{\sqrt{2}n\mu_0 I}{\pi L} \quad (2)$$

式中， $n$  为线圈的匝数； $L$  为线圈边长的一半，m； $I$  为线圈中的通电电流，A。

(3) 搅拌器中心磁场强度

计算电磁铁中的磁场强度过于复杂，不适合工程应用，磁场是有旋场非势场不遵循矢量叠加，如图 2 所示。基于上述原因，采用正方形 Helmholtz 线圈中心处的磁场强度通过误差补偿代替电磁搅拌装置中心处的磁场强度，引入补偿系数  $\epsilon$  (与设备的结构有关)，且  $\epsilon < 1$ 。则搅拌器某一极在中心处所产生的磁场强度为：

$$B = \frac{\sqrt{2}n\mu_0 I}{\pi L} \epsilon \quad (3)$$

电磁搅拌装置中心处磁场强度：

$$B = (B_1 + B_2)\epsilon \quad (4)$$

将式(3)代入到式(4)中，即：

$$B = \frac{\sqrt{2}n\mu_0}{\pi L} (|I_1| + |I_2|)\epsilon \quad (5)$$

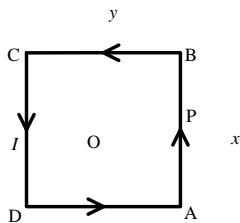


图 1 正方形 Helmholtz 线圈  
Fig.1 Quadrate Helmholtz coil

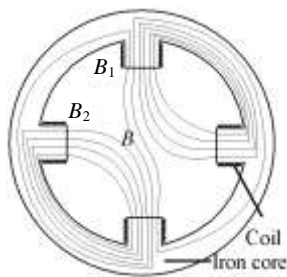


图 2 某一时刻磁场分布示意图  
Fig.2 Magnetic field distribution at a certain time

式中， $B_1$ 、 $B_2$  分别为相邻两极线圈中心磁场强度，T； $I_1$ 、 $I_2$  分别为相邻两极线圈中通入电流的瞬时值，A。

(4) 电磁力计算

由电磁感应定律可知电流密度可由式(6)表示：

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \sigma [ \vec{V} - \vec{V}_s \times \vec{B} ] \quad (6)$$

式中， $\sigma$  为导体的电导率； $\vec{J}$  为电流密度，A/m<sup>2</sup>； $\vec{E}$  为感应电动势，V， $\vec{V}_s$  为熔池单元磁场旋转的线速度，m/s； $\vec{V}$  为熔池旋转的线速度，m/s； $\vec{B}$  为磁感应强度，T。

电磁相互作用：

$$d\vec{F} = [ \vec{J} \times \vec{B} ] \cdot \sigma \{ \vec{V} - \vec{V}_s \times \vec{B} \} \cdot \vec{B} \cdot d\vec{l} \quad (7)$$

代入式(5)有如下：

$$\left| d\vec{F} \right| = \frac{2n^2 \mu_0^2 (|I_1| + |I_2|)^2 \epsilon^2 \sigma}{\pi^2 L^2} (|\vec{V}_s| - |\vec{V}|) \cdot \sin \theta \cdot \sin \gamma \cdot dsdl \quad (8)$$

式中， $\theta$  为磁场与熔池微元速度的夹角， $\gamma$  为感应电流与磁场的夹角。

1.2 两相两极对电磁搅拌器作用下的熔池电磁力

鉴于电磁搅拌装置多用交流电驱动励磁线圈，文中 EMS 装置采用的是两相四极电磁搅拌器，相位差 90°，且有  $I = i \sin \omega t$ ，代入式(8)如下：

$$\left| d\vec{F} \right| = \frac{2n^2 \mu_0^2 i^2 \epsilon^2 \sigma}{\pi^2 L^2} (|\vec{V}_s| - |\vec{V}|) [ |\sin \omega t| + |\sin(\omega t + \phi)| ]^2 \cdot \sin \theta \cdot \sin \gamma \cdot dsdl \quad (9)$$

式中， $i$  为励磁电流的电流幅值，A； $\omega$  为励磁电流的角速度，rad/s。

熔池微分如图 3 所示。激光加工过程中金属液体的凝固时间较短，即金属液体旋转的线速度远远小于磁场的旋转线速度 ( $|\vec{V}| \ll |\vec{V}_s|$ )，取  $|\vec{V}| = 0$ ，熔池始终处于电磁搅拌装置的中心位置，此时有  $\sin \theta = \sin \gamma = 1$ 。代入式(9)，可得电磁力公式如式(10)：

$$\left| d\vec{F} \right| = \frac{2n^2 \mu_0^2 i^2 \epsilon^2 \sigma}{\pi^2 L^2} |\vec{V}_s| [ |\sin \omega t| + |\sin \omega t + \phi| ]^2 dsdl \quad (10)$$

1.3 流场控制方程

激光熔凝包括了熔池内质量、能量以及动量的复杂变化过程。熔凝过程中不考虑偏析等组织变化对温

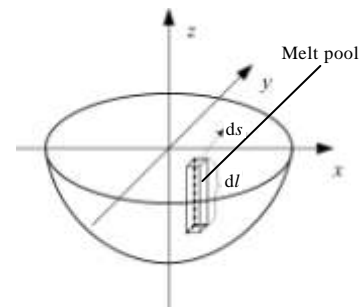


图 3 熔池内电磁微元示意图  
Fig.3 Schematic of infinitesimal in the melt pool

度场及流场所造成的影响。在激光熔池流动及传热过程中各物理量的控制方程表达式如下：

能量方程：

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \text{div}(\rho U h) = \text{div}(\alpha \text{grad} h) + S_h \quad (11)$$

动量方程：

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \text{div}(\rho U u_i) = \text{div}(\mu \text{grad} u_i) + \frac{\partial P}{\partial x} + S_i \quad (12)$$

连续方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \quad (13)$$

式中， $u_i$  为速度矢量  $U$  在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的投影； $h$  为显焓； $P$  为压力； $S_i$ 、 $S_h$  为源项； $\alpha$ 、 $\mu$  分别为液相粘度系数和扩散系数。

### 1.4 物理模型

应用 ANSYS 对电磁搅拌器模型进行模拟分析，在二维与三维分析中分别采用 PLANE53 单元、SOLID97 单元<sup>[12]</sup>。图 4 为电磁搅拌器有限元模型（图中均未显示空气部分）。应用 FLUENT 软件对激光熔凝下熔池的温度场及流场进行模拟，对尺寸为 30 mm × 10 mm × 5 mm 的样件进行定点熔凝，在网格划分中对需要进行激光熔凝的区域进行网格细化以保证计算熔池流动场及温度场的准确性和精确性，如图 5 所示。

### 1.5 热源模型

因激光的定向高能等特性，采用半球形热源对熔

池进行模拟<sup>[13]</sup>，能够很好的符合激光辐射的特点，如式（14）所示。

$$q(x, y, z) = \frac{6Q}{\pi c^3 \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2 - 3y^2 - 3z^2}{c^2}\right) \quad (14)$$

式中， $q(x, y, z)$  为功率密度； $Q$  为热输入功率，W； $c$  为热源半径，m。通过 UDF 汇编语言将半球型热源模型加载到有限元模型上。

### 1.6 模拟过程及参数

旋转磁场作用于激光熔池的计算模型包括熔池、线圈、铁芯和空气，激光加工过程中环境对熔池的影响较为复杂，为了将问题简化而又不失去意义，在模拟过程中做如下假设<sup>[14]</sup>：

(1) 电磁搅拌过程中，磁 Reynold 数很小，忽略熔池对流对电磁力的影响；

(2) 熔池所处磁场场强分布均匀，方向相同。

计算过程中用到的搅拌器参数及材料热物性参数如表 1 和表 2 所示<sup>[15-17]</sup>。

## 2 模拟结果分析

### 2.1 电磁场分布特征

搅拌器线圈中通入 100 A 交流电，通过对不同电流频率条件下电磁搅拌器的模拟，得到电磁搅拌器产生的磁场和电磁力的分布情况，电磁搅拌器磁场分布如图 6 所示。

通过模拟得出中心点磁场强度为 38 mT，根据  $B=B_1+B_2$ ，取相邻两磁极中心轴线处磁场强度  $B_1$  和  $B_2$ ，

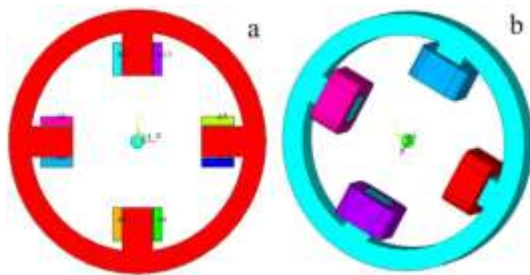


图 4 电磁搅拌器的有限元模型

Fig.4 Geometrical model of EMS: (a) 2D model and (b) 3D model

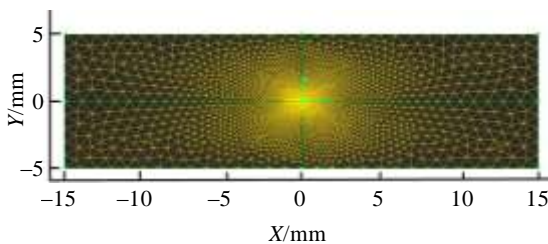


图 5 模型网格划分

Fig.5 Mesh model

表 1 模型中物性参数

| Table 1 Physical parameters in finite element method |                       |   |
|--|-----------------------|---|
| Material   | Relative permeability | Electrical permeability/<br>$\times 10^{-8} \Omega \cdot m$ |
| BT20   | 1                     | 1.85  |
| Coil   | 1                     |   |
| Iron   | 2000                  |   |
| Air  | 1                     |   |

表 2 BT20 材料性能及物性参数

| Table 2 Material performance and thermophysical properties |                           |
|--|---------------------------|
| Properties   | Values                    |
| Temperature/ $^{\circ}C$                                   | 373, 573, 673, 773        |
| Thermal conductivity/<br>W (m K) $^{-1}$                   | 10.47, 12.14, 13.4, 14.65 |
| $C_p$ /(J (kg K) $^{-1}$ )                                 | 574, 641, 699, 729        |
| Density/kg m $^{-3}$                                       | 4200                      |
| Surface tension coefficient/<br>N (m K) $^{-1}$            | $-3.5 \times 10^{-4}$     |
| Dynamic viscosity/m $^2$ s $^{-1}$                         | $1.05 \times 10^{-5}$     |
| Solidus temperature/ $^{\circ}C$                           | 1604                      |
| Liquidus temperature/ $^{\circ}C$                          | 1660                      |



图 6 电磁搅拌器磁场分布  
Fig.6 Magnetic field of EMS

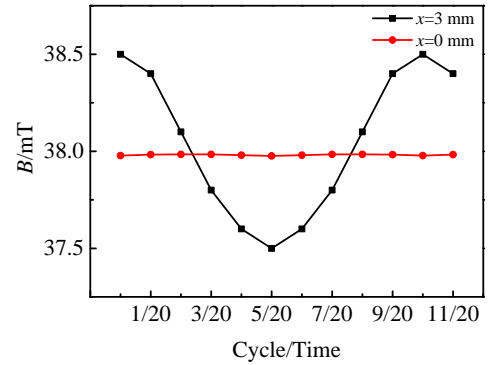


图 8 不同时刻熔池处场强的变化

Fig.8 Variation of center magnetic field strength at different time

计算得出补偿系数  $\epsilon=0.12$ , 为验证计算结果的正确性, 用计算结果与模拟结果进行对比, 计算对比了 1/8 周期内的磁场强度, 计算值与模拟值的最大误差为 3.7%, 不超过 5%, 计算结果与模拟结果基本吻合。

图 7 为电磁力及搅拌器的功率损耗随频率的变化规律图。可见当电流频率由 3 Hz 逐渐增大到 7 Hz 时, 电磁力缓慢减小, 与此同时电磁搅拌器的功率损耗增长迅速; 当频率继续增大时, 电磁力开始呈线性增大。在此阶段功率损耗阻碍了电磁力的进一步增大, 故在提高频率的过程中电磁力首先出现减小的趋势。当频率继续增大时, 电磁搅拌器的功率损耗已经趋于稳定, 在此阶段激励电流的频率对电磁力影响起主导作用, 所以在电流频率继续增大的过程中, 电磁力呈线性增大。

在激励电流变化的 1 个周期内, 熔池处磁场方向及强弱在交变电流作用下发生周期性变化, 如图 8 所示, 由于距离某一磁极越近所受缠绕在该磁极上线圈电流变化的影响就越大, 熔池边缘电磁场强度随电流频率变化较大, 进而影响电磁力的变化, 搅拌器中心处的磁场强度变化幅度较小。

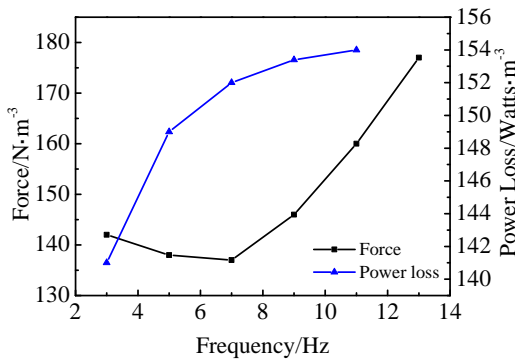


图 7 不同电磁频率下电磁力和搅拌器的功率损耗曲线

Fig.7 Variation of electromagnetic force and power loss with different frequency

## 2.2 旋转磁场对钛合金熔池的影响

### 2.2.1 温度场分布

在钛合金待加工表面上施加高能激光束, 激光功率为 1600 W, 光斑直径为 2 mm, 照射时间为 0.5 s, 对试件熔凝过程进行模拟, 图 9 为激光熔池的温度分布图。图 9a 与图 9b 分别为施加 80 mT、5 Hz 磁场强度前后所形成的激光熔池。由对比结果可知, 未施加磁场条件下的激光熔池最高温度可达 2290 °C, 中心温度高, 热量集中, 温度梯度大。施加旋转磁场后最高温度降为 2210 °C, 熔池热量分散, 温度梯度减小, 温度分布均匀, 而未熔化的部分温度分布没有发生明显的变化。在激光熔覆加工过程中, 基材受到高能激光辐射熔化成液态, 液态熔池受电磁力的作用沿周向旋转, 使熔池温度分布均匀, 降低温度梯度, 而未熔化的部分不会受到电磁力的影响, 因而未发生变化。

图 10 为施加电磁搅拌前后水平方向以及垂直方向熔池温度分布曲线, 对比施加磁场前后 X-Y 平面(熔池表面)内温度分布, 曲线斜率表示温度梯度, 施加旋转磁场后熔池温度曲线变化平缓, 温度梯度减小。

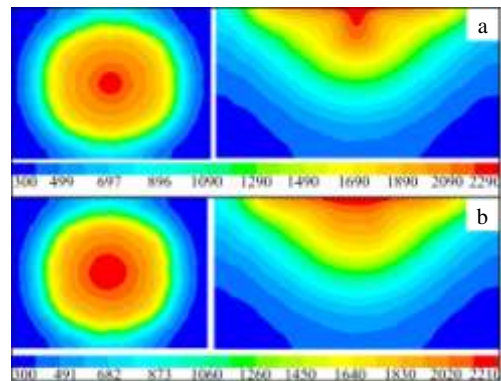


图 9 熔池温度场分布

Fig.9 Distribution of temperature fields: (a) no EMS and

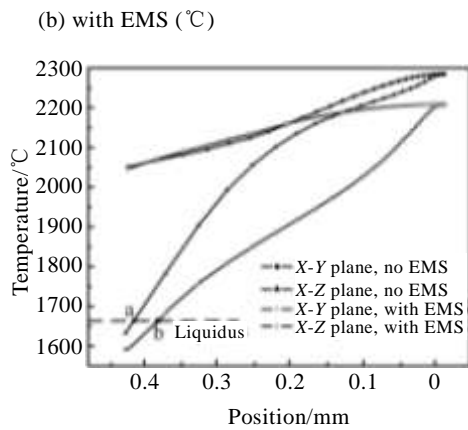


图 10 熔池温度分布曲线

Fig.10 Melt pool temperature distribution curves

这是由于在周向环流以及对流作用下,加速了熔池内的热交换,使温度变化平缓。对比熔池垂直方向 X-Z 平面(熔池横切面)内温度分布, a、b 点为垂直方向熔池的深度,可以看出施加磁场后熔池深度有所减小。

### 2.2.2 熔池流场分布

图 11 为熔池上表面速度的分布图。可以看出,速度呈 M 形分布,施加旋转磁场后,由于熔池整体温度有所下降,熔池的对流速度相应减小。速度由中心向边缘逐渐增大,后又逐渐递减,这是由于熔池中心温度熔化的金属粘度系数小,流动性好,因此由中心向边缘随着半径的增大速度逐渐增大;在熔池的边缘处熔池属于半熔化状态,粘度系数大,速度又迅速递减。

图 12 为激光熔池上表面液体流场分布图。图 12a 为未施加电磁搅拌液体速度矢量图。在激光熔池内由于受到表面张力和浮力等作用,流体从中心流向熔池边缘,最大速度出现在中心附近,温度对熔池对流影响作用明显。图 12b 为施加电磁搅拌作用下熔池上表面液体流动速度矢量图。熔池在旋转磁场作用下强制了熔池的周向旋转,使切向速度增大,从而加速了水

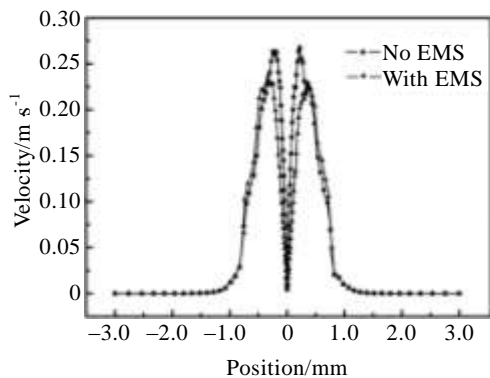


图 11 施加磁场前后熔池 X-Y 平面线速度分布

Fig.11 Velocity distribution in X-Y plane of the melt pool before

and after applying magnetic field

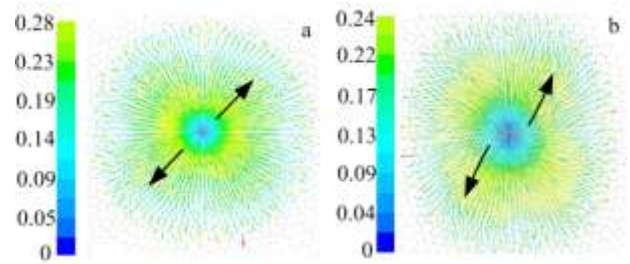


图 12 X-Y 平面内流场分布图

Fig.12 Velocity vector distribution in X-Y plane: (a) no EMS and (b) with EMS

平方向的热交换,降低熔池温度,而熔池温度的降低又会减小熔液的对流速度。

## 3 实验验证

试验采用 DL-HL-T5000 型 CO<sub>2</sub> 激光器在钛合金 BT20 材料表面进行旋转磁场辅助条件下激光熔凝试验。试验基板采用与模拟相同的 30 mm×10 mm×5 mm 的 BT20 锻料,实验前对基板进行打磨去除氧化皮。选择激光透镜正离焦面进行熔凝试验,光斑直径 2 mm,激光照射时间 0.5 s,功率 1600 W,分别在未施加电磁搅拌以及施加强度为 80 mT、频率为 5 Hz 的旋转磁场条件下进行试验。激光熔凝后采用电火花切割沿垂直于熔池方向切取试样,试样表面经研磨抛光后用 Kroll 腐蚀液(HF:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O=2:6:100)腐蚀 30~45 s。采用 OLYMPUS 光学显微镜对激光熔凝试样组织结构及形貌进行观测,并运用 Image-Pro Plus 6.0 软件对熔池的熔深和熔宽进行测量。

施加磁场前后熔池上表面形貌特征对比如图 13



图 13 熔池上表面形貌

Fig.13 Melt pool surface topography: (a) no EMS and (b) with EMS 所示, 施加电磁搅拌前熔池呈规则的圆形分布, 施加磁场后熔池边缘形状不规则, 并且沿熔池流动方向有细微的波纹状纹理。这是由于在施加电磁搅拌前, 熔池同时受到浮力驱动下产生的自然对流以及在表面张力驱动下产生的 marongoni 流的作用, 而形成纵向环流, 因而在上表面形成规则的形貌。而在施加电磁搅拌后, 熔池还会因电磁力作用产生周向环流, 因激光辐射时间短, 熔池冷却速度快, 所以在施加磁场辅助后熔池呈不规则形貌。

施加磁场前后的熔池横切面形貌对比如图 14 所示。经测量, 在未施加磁场辅助的情况下, 熔池的熔宽和熔深分别为 2012 和 390  $\mu\text{m}$ , 与模拟结果误差分别为 5.5% 和 7.1%; 施加磁场辅助的情况下, 熔池的熔宽和熔深分别为 1961 和 347  $\mu\text{m}$ , 熔宽熔深的误差分别为 3.1% 和 8.7%。对比可知, 在施加磁场辅助后, 熔池的熔宽和熔深均变小, 符合模拟结果趋势。因旋转磁场的作用促进了激光熔池内的周向环流, 使得熔池内的热量分布更为均匀, 温度梯度相比于施加磁场前亦有所降低。

图 15 为施加磁场前后激光熔池横切面的宏观组

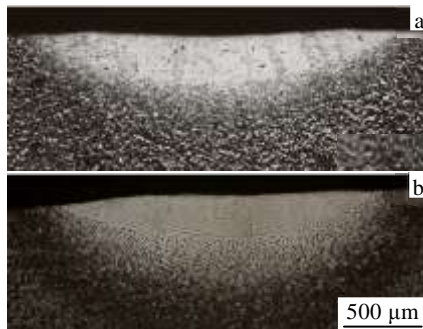


图 14 熔池横切面形貌

Fig.14 Melt pool cross-sections morphology: (a) no EMS and (b) with EMS

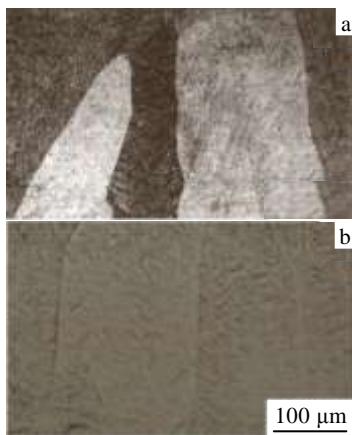


图 15 激光熔池的柱状晶组织

Fig.15 Macrostructure of  $\beta$  columnar grain in laser melt pool:

(a) no EMS and (b) with EMS

织照片。由图 15 清晰可见熔池内外延生长的粗大  $\beta$  柱状晶。可见, 磁场的搅拌对初生的  $\beta$  晶粒的整体生长趋势影响不大。在熔池冷却过程中最初进入到  $\beta$  相区从而沿冷却方向形成  $\beta$  晶粒, 熔池快速冷却, 晶粒成形的时间短, 从而电磁力不会影响  $\beta$  晶粒的生长。

## 4 结论

1) 通过对频率参数的模拟, 在电流值不变的情况下, 电流频率由 3 Hz 增大到 7 Hz 时, 电磁搅拌器的功率损耗加大, 进而影响熔池电磁力的变化, 电磁力缓慢减小; 当频率继续增大时, 功率损耗趋于稳定, 在此过程中对电磁力的影响很小, 电磁力随着频率的增大而增大。在电流变化的一个周期内, 电磁搅拌器内的磁场强度也发生周期性变化, 且变化幅度由熔池边缘向中心称递减。

2) 熔池在施加电磁搅拌后, 整体温度有所下降, 温度梯度减小, 流动状态发生改变, 形成围绕熔池中心的周向环流。熔池流动径向速度降低, 但切向速度加大。

3) 施加旋转磁场后熔池的形貌发生一定的变化并且测得激光熔池的熔深和熔宽均有所减小, 进一步验证模拟的正确性。然而磁场所产生的电磁力对熔池的内部组织  $\beta$  柱状晶的生长影响很小。

## 参考文献 References

- [1] Kore S D, Date P P, Kulkarni S V. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2007, 34(8): 1327
- [2] Afanas'eva L E, Barabonova I A. *Welding International*[J], 2013, 27(7): 545
- [3] Kern M, Berger P *et al.* *Welding Journal*[J], 2000, 79(3): 72
- [4] Gatzen M, Tang Z, Vollertsen F. *Physics Procedia*[J], 2011, 12: 56
- [5] Zhang Xinge(张新戈), Wang Qun(王群), Li Liqun(李俐群) *et al.* *Materials Reviews(材料导报)*[J], 2009, 9: 39
- [6] Yu Benhai(余本海), Hu Xuehui(胡雪惠), Wu Yu'e(吴玉娥) *et al.* *Chinese Journal of Lasers(中国激光)*[J], 2010, 37(10): 2672
- [7] Liu Hongxi(刘洪喜), Ji Shengwei(纪升伟), Jiang Yehua(蒋业华) *et al.* *High Power Laser and Particle Beams(强激光与粒子束)* [J], 2012, 24(12): 2901
- [8] Wang Wei(王维), Liu Qi(刘奇), Yang Guang(杨光) *et al.* *Applied Laser(应用激光)*[J], 2014, 34(5): 389
- [9] Wang Wei(王维), Liu Qi(刘奇), Yang Guang(杨光) *et al.* *Chinese Journal of Lasers(中国激光)*[J], 2015, 42(2): 48

- [10] Zhang Sanhui(张三慧). *University Physics*(大学物理学第 3 册电磁学第 2 版)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999: 1
- [11] She Shouxian(余守宪), Zhang Sijiong(张思炯). *College Physics*(大学物理)[J], 1998, 18(8): 1
- [12] Xie Longhan(谢龙汉). *ANSYS Electromagnetic Field Analysis* (ANSYS 电磁场分析)[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2012: 1
- [13] Zhang Ping(张平), Ma Lin(马琳), Zhao Junjun(赵军军) *et al.* *China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2006, 19(S1): 161
- [14] Huang Yanlu(黄延禄), Zou Dening(邹德宁). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属与材料工程)[J], 2003, 32(5): 330
- [15] Chen Xingrun(陈兴润), Zhang Zhifeng(张志峰), Xu Jun(徐骏). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(5): 937
- [16] Zhang Qi(张琦), Jin Junze(金俊泽), Wang Tongmin(王同敏) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2007, 17(1): 98
- [17] Zou Wuzhuang(邹武装). *Titanium Handbook*(钛手册)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012

## Influence of a Rotating Magnetic Field on Laser Melting Titanium Alloy Melt Pool

Yang Guang, Xue Xiong, Qin Lanyun, Wang Wei

(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process,

Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** The central magnetic field intensity of electromagnetic stirring equipment and the melt pool's electromagnetic force were simulated, and the influence of the rotating magnetic field on melt pool electromagnetic force, the flow field and temperature distribution of the melt pool was analyzed by a finite element method. The results show that the electromagnetic force in melt pool decreases slowly at first when increasing the current frequency, and the power loss increases rapidly at the same time. As the frequency continues to rise, the electromagnetic force increases gradually, and the power loss becomes stable. And the magnetic field strength of the electromagnetic stirrer changes periodically in one exciting current cycle. Under the condition of rotating magnetic field, the temperature and the temperature gradient of the melt pool decrease, and circulation along circumferential direction in the melt pool forms whose velocity distribution is uniform.

**Key words:** EMS; rotating magnetic field; laser melting; temperature field; flow field

---

Corresponding author: Yang Guang, Ph. D., Associate Professor, Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, P. R. China, Tel: 0086-24-89723852, E-mail: yangguang@sau.edu.cn