

## 电磁搅拌对激光熔池熔体流速及其凝固组织影响研究

杨 光,赵恩迪,钦兰云,李长富,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:** 为了研究电磁搅拌对 TA15 钛合金激光熔池的影响,构建了一种三相三极旋转式电磁搅拌器作用下微小熔池内部的磁流体动力学数学模型。运用该模型计算了不同激励电流情况下磁场中心处的磁感应强度和熔池内熔体周向流速,分析了其对熔池温度分布和组织形成的影响。并采用试验手段对分析计算结果进行了验证。结果表明:电磁力驱使熔体作周向运动,且随着远离磁场中心,洛伦兹力越大,周向流速越大。随着激励电流的增大,磁感应强度增强,熔质周向流速增大。流速加剧能够降低熔池内温度及凝固界面处的温度梯度,有利于等轴晶的增多。试验证明施加磁场后熔池顶部组织出现等轴晶,且随着远离磁场中心,熔池顶部的等轴晶数量逐渐增多,与计算结果的分析趋势相吻合。

**关键词:** 电磁搅拌; 激光熔凝; 磁流体动力学模型; CET 转变

**中图分类号:** TG146.2+3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0906006

## Effect of electromagnetic stirring on melt flow velocity of laser melt pool and solidification structure

Yang Guang, Zhao Endi, Qin Lanyun, Li Changfu, Wang Wei

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

**Abstract:** In order to study the effect of electromagnetic stirring on laser melt pool solidification of TA15 titanium alloy, A MHD mathematical model was established on minimal melt pool under the three-phase three-pole rotating electromagnetic stirrer. This model was used to calculate magnetic induction intensity in the center of magnetic field and the melt circumferential flow velocity in melt pool under different exciting current. The influence of circumferential flow velocity on temperature field and solidification structure formation were analyzed. At last the analysis results were verified by experiment method. The results showed that the electromagnetic force drove melt to flow circumferentially. Farer from the magnetic field center, Lorentz force was larger which promoted the circumferential flow velocity of melt. Magnetic induction intensity was rising with the increase of exciting current, which caused more faster circumferential flow velocity. The enhance of flow velocity resulted in temperature going down in melt pool and temperature gradient on solid-liquid interface, which were good for generation of the equiaxed crystal. The experiment results testified that equiaxed

收稿日期:2017-01-10; 修订日期:2017-02-20

基金项目:国家科技重大专项(2013ZX04001-041-04);国家自然科学基金(51305280)

作者简介:杨光(1978-),男,副教授,硕士生导师,博士,主要从事激光沉积制造和修复技术等方面的研究。Email: yangguang@sau.edu.cn

grains were generated at the top of melt layer with the magnetic field. The number of the equiaxed grains were rising with an increase of the distance from magnetic field center. The tendency of analysis results are in good agreement with the experimental results.

**Key words:** electromagnetic stirring; laser melting; magnetohydro dynamics model; columnar-to-equiaxed transition

## 0 引言

电磁搅拌技术作为一种控制金属凝固的有效方法,因其非接触、易控制以及易实现自动化等特点,被用于材料制备和加工过程中。自 20 世纪 20 年代以来,该技术在国内外铸造、焊接等传统领域得到广泛的应用<sup>[1-4]</sup>,并在激光熔覆这一新领域进行了有益的探索<sup>[5]</sup>。期间研究者们运用数值模拟手段对熔池中导热、对流以及成形质量的问题进行了大量研究,并取得可喜成果。如王维等<sup>[6-8]</sup>运用 ANSYS 有限元分析软件模拟了激光熔凝过程中熔池内部的电磁场、温度场和流场情况,并分析了电磁搅拌对激光沉积钛合金组织的影响。陈兴润<sup>[9]</sup>等在考虑了温度对流场影响的前提下,建立了铝合金电磁搅拌过程宏观传输物理量的耦合数学模型,分析出电磁搅拌参数对温度场和流场的影响。浙江工业大学王梁<sup>[10]</sup>等建立了涉及熔池内部的传热、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,利用稳态磁场辅助激光熔凝,抑制了熔凝层表面的波纹。Barman N<sup>[11]</sup>等在考虑了液态金属流变特性的基础上,建立了涉及能量、动量及质量守恒的控制方程,研究了线性电磁搅拌作用下连铸过程的传输现象,获得了熔体浓度场和固相分数的分布规律。Gerald Tennyson P<sup>[12]</sup>等通过相场研究计算了 Al-7Si-0.3Mg 合金枝晶的生长过程,分析了搅拌磁场对二次枝晶臂重熔的影响和球化过程。Wei L<sup>[13]</sup>等采用随机折线捕获规则和最小邻居固相分数法,实现了各向异性的溶质分配算法。

上述研究大多通过数值仿真手段进行科学研究,尤其依赖计算机能力、数值模拟方法和数值计算模型等方面。很多学者对数值计算模型进行大量的研究,研究范围囊括了传能、传质、传动行为所涉及的各个方面。但对于在旋转磁场辅助下的激光熔池中熔体的动力学数学模型的研究有限,多以商业

有限元软件中的固有功能单元为基础进行分析<sup>[6-10]</sup>。文中采用等效和修正系数等方法,建立了旋转磁场作用下激光熔池熔体的磁流体力学(Magnetohydro Dynamics, MHD)模型,通过理论计算手段,研究了当加载不同激励电流时,电磁搅拌作用下激光熔池熔体流速的变化情况,分析了流速的改变对熔池内部温度梯度及凝固组织生长的影响,并进行了试验验证。

## 1 数学模型建立

电磁搅拌器所产生的旋转磁场虽然可以通过 Maxwell 方程组进行描述,但其过程复杂,求解困难。文中将复杂的有旋时变磁场问题进行简化,运用经典的电磁-力学公式推导出电磁搅拌器所涉及的工艺参数与磁场中电磁力及该力作用下熔池周向速度的关系。

### 1.1 磁感应强度计算方法

#### 1.1.1 圆形 Helmholtz 线圈<sup>[14]</sup>产生的磁场

图 1 为自制的交流电磁搅拌器(Electromagnetic Stirrer, EMS),其线圈截面近似为圆形,可简化为

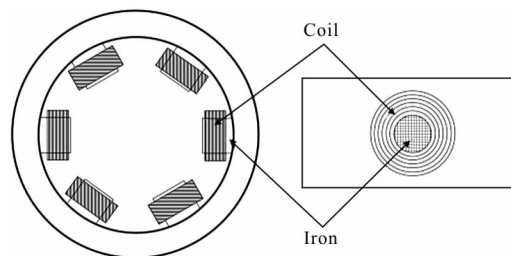


图 1 电磁搅拌器内部结构示意图

Fig.1 Internal structure diagram of electromagnetic stirrer

求解单匝圆形 Helmholtz 线圈在任意位置磁感应强度。由电磁学 Biot-Savart 定律知,任意点  $P$  处磁感应强度  $B'$  的计算如公式(1)所示:

$$dB' = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} dl \quad (1)$$

式中:  $\mu_0$  为真空磁导率,  $H/m$ ;  $I$  为导体中的电流,

$A; dl$  为圆形 Helmholtz 线圈中的电流元;  $r$  为电流元至所求点的直线距离,  $m$ 。

图 2 为圆形 Helmholtz 线圈中心法线上任一点所受磁场强度的分析图。磁感应强度在  $z$  轴方向和  $xoy$  平面内方向的分量可分别由公式(2)和公式(3)进行表述。

$$dB_p' = dB' \sin\theta = \frac{\mu_0 I D}{8\pi r^3} dl \quad (2)$$

$$dB_v' = dB' \cos\theta \quad (3)$$

式中:  $D$  为线圈直径,  $m$ ;  $\theta$  为  $B$  与线圈平面的夹角。

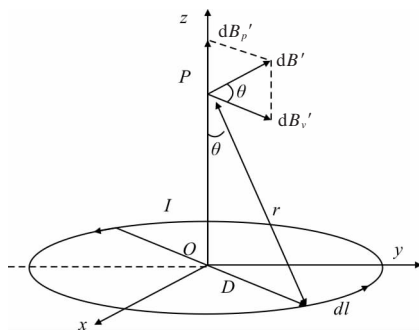


图 2 圆形 Helmholtz 线圈  
Fig.2 Cyclo-Helmholtz coil

考虑到圆形线圈的对称性, 总存在相互对称的两个电流元在  $P$  点处产生大小相同、方向相反的磁感应强度分量  $B'_v$ , 而相互抵消。线圈中心线上任意点所受磁感应强度  $B'$  可由公式(4)进行描述。

$$B' = \frac{\mu_0 I R^2}{2r^3} = \frac{\mu_0 I D^2}{(2D^2 + 4z^2)^{3/2}} \quad (4)$$

式中:  $z$  为  $O$  点到  $P$  点之间的距离,  $m$ ;

其中  $B'$  的方向沿  $Z$  轴正方向, 指向与电流流向符合右手螺旋定则。

### 1.1.2 多匝线圈中心线上任意点的磁感应强度

图 3 为多匝线圈简化结构模型。由于旋转式电磁搅拌器上的线圈均匀密绕在其对应铁芯上, 可将线圈看作一个直螺线管, 其各匝线圈都是螺旋形,

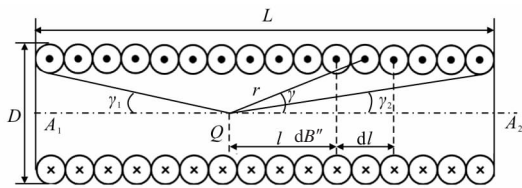


图 3 线圈简化结构  
Fig.3 Simplified structure of coil

在密绕的条件下简化为多个圆形线圈紧密排列组成<sup>[15]</sup>。

在  $n$  匝线圈中心轴上任意取一点  $Q$ , 并在距离  $Q$  点  $l$  处线圈上取一段微元  $dl$ , 则图 3 中螺线管中心线上任一点  $Q$  点的磁感应强度  $B''$  可由公式(5)表示。

$$B'' = \mu_0 n I (\cos\gamma_2 - \cos\gamma_1) \quad (5)$$

式中:  $n$  为线圈匝数。

### 1.1.3 电磁搅拌器中心处磁感应强度

有旋时变磁场问题进行运算较为复杂<sup>[16]</sup>, 且空间中不同磁极产生的磁感应线不可交汇, 磁感应强度无法直接叠加。如公式(6)所示, 引入修正系数  $\varepsilon$  后, 电磁搅拌器中心处磁感应强度可由线圈端口中心处的磁感应强度进行计算。

$$B = B_1 + B_2 + B_3 = \mu_0 n i \frac{L}{\sqrt{(2L^2 + D^2)}} \varepsilon [\sin(\omega t) + \sin(\omega t + \delta_1) \sin(\omega t + \delta_2)] \quad (6)$$

式中:  $B_1, B_2, B_3$  为相邻磁极线圈中心的磁感应强度,  $T; i$  为激励电流的幅值,  $A; L$  为线圈长度,  $m; \varepsilon$  为激励电流的角速度大小,  $\text{rad/s}; \delta_1, \delta_2$  为不同磁极线圈中的激励电流相位。

查阅文献可知, 不同周期内电磁搅拌器中心磁感应强度与各极线圈端口中心处磁场中心强度矢量和之比, 即修正系数  $\varepsilon$  为  $0.15 \sim 0.17$ <sup>[17]</sup>。

### 1.2 熔池熔体周向流速计算方法

研究电磁搅拌过程中的一些现象需要运用 MHD 的基本规律, 而这些规律需要同时考虑流体力学和电磁学及其相互作用, 因而 MHD 过程是相当复杂的, 其基本方程组由电动力学方程组和考虑电磁力的流体力学方程组组成。

针对电磁搅拌过程的实际情况, 为了简化磁流体方程, 可做出如下基本假设:

- (1) 钛合金熔体为不可压缩且各向同性的导电流体;
- (2) 钛合金的电导率很大, 电磁过程相对较慢, 位移电流可忽略;
- (3) 熔体内无法形成电荷堆积, 体电荷密度为零;
- (4) 钛合金熔体流速远远小于光速, 因此电场对电荷的作用力忽略不计。

### 1.2.1 磁场中心熔体所受电磁力

在电磁搅拌过程中,钛合金熔池熔体处于交流时变磁场中,产生感应电流,该感应电流与合磁场相互作用产生相应的洛伦兹力。

由电磁感应定律和欧姆定律可知,在熔池中感生出的感应电流密度可用公式(7)描述。

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \sigma (\vec{v}_s + \vec{v}) \times \vec{B} \quad (7)$$

式中: $J$ 为电流密度, A/m;  $\sigma$ 为钛合金熔体的电导率, s/m;  $v_s$ 为电磁搅拌器产生的磁场旋转线速度, m/s;  $v$ 为熔体流动速度, m/s。

如图 4 所示,在熔体中任意取一小段上表面为  $ds$ 、高为  $dl$  的长方体微元。因  $v_s \gg v$ , 所以可以忽略因激光辐射和电磁力所引发的熔池内部流动对洛伦兹力的影响。因此在激光产生的微小熔池中电流密度与磁场相互作用下生成的洛伦兹力可用公式(8)计算。

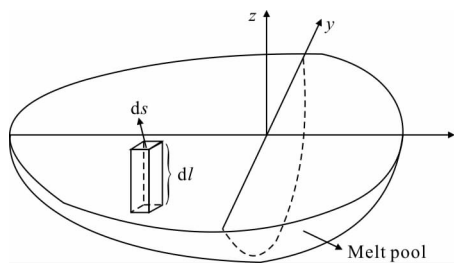


图 4 熔池内熔体微元示意图

Fig.4 Schematic of infinitesimal melts in the melt pool

$$\left| d\vec{F}_e \right| = \left| [\vec{J} ds \times \vec{B}] dl \right| = \frac{\sigma n u_0 \varepsilon L^2 i^2}{(4L^2 + D^2)} \left| \vec{v}_s \right| \cdot$$

$$[\sin(\omega t) + \sin(\omega t + \delta_1) \sin(\omega t + \delta_2)]^2 ds dl \quad (8)$$

### 1.2.2 电磁对熔体周向流速的影响

在激光熔池内,洛伦兹力对熔体流速的周向分量占主导地位,轴向和径向分量相对于周向分量可忽略不计。可知粘性流体的流体力学方程如公式(9)。

$$\rho F_\theta + \eta \left( \frac{d^2 V_\theta}{dr_m^2} + \frac{1}{r_m} \frac{dV_\theta}{dr_m} - \frac{V_\theta}{r_m^2} \right) = 0 \quad (9)$$

式中: $\rho$ 为金属密度, kg/m<sup>3</sup>;  $F_\theta$ 为钛合金熔体所受的周向力, N;  $\eta$ 为钛合金熔体的动力粘度, m<sup>2</sup>/s;  $V_\theta$ 为钛合金熔体的周向速度, m/s;  $r_m$ 为离磁场中心的距离,它受到扫描路径和熔池半径的限制,取值范围由试验确定, m。

在电磁搅拌过程中,熔体所受单位体积力可由公式(10)描述。

$$F_v = \rho F_\theta + \rho g \beta (T - T_{ref}) \quad (10)$$

式中: $g$ 为重力加速度, m/s<sup>2</sup>;  $\beta$ 为金属的热膨胀系数;  $T_{ref}$ 为参考温度。

因热浮力( $\rho g \beta (T - T_{ref})$ )对激光熔池中熔体的径向流速影响较大,而对其周向流速影响较小,故在计算熔体的周向速度时,可以忽略不计<sup>[8]</sup>。在不考虑熔池周向流速的增加对熔池内部环流影响的理想状态下,电磁作用下熔体流体周向速度可由公式(11)进行计算。

$$F_e + \eta \left( \frac{d^2 V_\theta}{dr_m^2} + \frac{1}{r_m} \frac{dV_\theta}{dr_m} - \frac{V_\theta}{r_m^2} \right) = 0 \quad (11)$$

## 2 计算结果与分析

依据以往的试验经验,将电磁搅拌器中通入频率为 15 Hz,激励电流大小分别为 40 A、50 A、60 A 的交流电,并依据表 1 中的 TA15 钛合金的物性参数进行计算。

表 1 钛合金 TA15 的物性参数

Tab.1 Property parameters of TA15 titanium alloy

Properties	Values
Density/kg · m <sup>-3</sup>	4 200
Electrical permeability/Ω · m	1.85 × 10 <sup>-8</sup>
Dynamic viscosity/m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup>	1.05 × 10 <sup>-5</sup>

由 Helmholtz 线圈制成的电磁搅拌器,在通入三相交流电后,产生一个旋转磁场。在电磁搅拌器横截面上,该磁场的磁感应强度从边缘到中心逐渐衰减,越靠近磁极磁场越强,且在磁场中心区域形成一个近似的圆形均强磁场<sup>[8]</sup>。图 5 为计算所得不

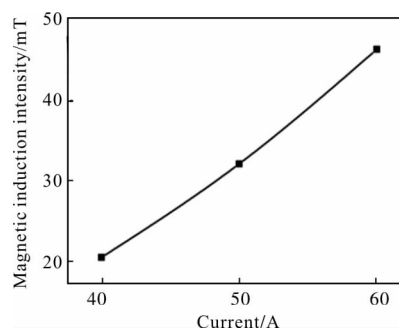


图 5 磁感应强度随激励电流变化曲线图

Fig.5 Curve of magnetic induction intensity vs current

同激励电流条件下的均强磁场的磁感应强度变化趋势。可知均强磁场的磁感应强度与激励电流大小在一定范围内呈正相关,随着激励电流的增大,磁感应强度不断增强。同时,熔体所受洛伦兹力随着磁感应强度的增大而增大。

图 6 为不同激励电流条件下,沿远离磁场中心方向上熔池熔体的周向增速曲线图。可知在电磁力驱动下,激光熔池内熔体的周向速度由中心向边沿逐渐增大,且随着激励电流增大,周向流速的幅度越大。在磁场中心处,周向流速基本相等。距离磁场中心 7 mm 处,相比于 40 A 时的周向流速,50 A、60 A 条件下增幅分布达 55.2%、122.6%。这是由于集肤效应在熔池中形成一个由中心向边沿逐渐增大的电流<sup>[19]</sup>。电流在均强磁场中切割磁感线,感生出与电流分布相吻合的洛伦兹力,驱使熔体的周向流速增大<sup>[8]</sup>。

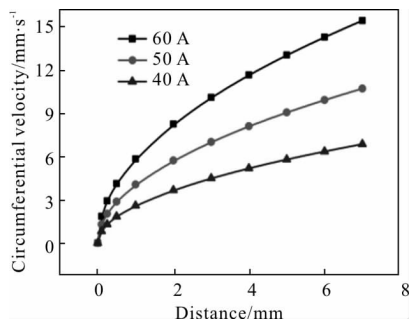


图 6 熔池周向速度分布曲线

Fig.6 Circumferential velocity distribution curves of melt pool

未施加磁场时,在熔池中  $xoy$  平面表现为由中心向边沿的径向流动(图 7(a)),在熔池横截面( $xoz$  平面)表现为对称且方向相反的环流(图 7(c))。这是由于基材表面受到激光辐射瞬间由辐射中心向四周产生一个径向温度梯度和压力梯度差,该梯度引发的表面张力梯度克服钛合金熔池熔体的内剪切力与浮力相互作用产生 Marangoni 对流。该对流驱动熔池内熔体径向流动。此时,熔池内部的主要热量传输依靠热传导进行,熔池边沿温度梯度远远大于中心处。施加磁场后,熔池内部的传能、传质过程更加复杂。在洛伦兹力的驱动下,在  $xoy$  平面熔体有周向流动趋势,流速相对于未施加磁场时增大(图 7(b))。同时,电磁力用于激光熔池熔体,引发熔质内部流场环流的增多及流速的加剧<sup>[7]</sup>(图 7(d))。

由于流速加剧使得熔池内部的主要热量传输变为由热传导和传质过程共同完成。熔体的流动加剧使得热交换效率增高,促使温度分布趋于均匀,温度梯度降低。尤其在固液分界面处,电磁力加速凝固前沿熔质的流动,有利于温度梯度的降低<sup>[9]</sup>。

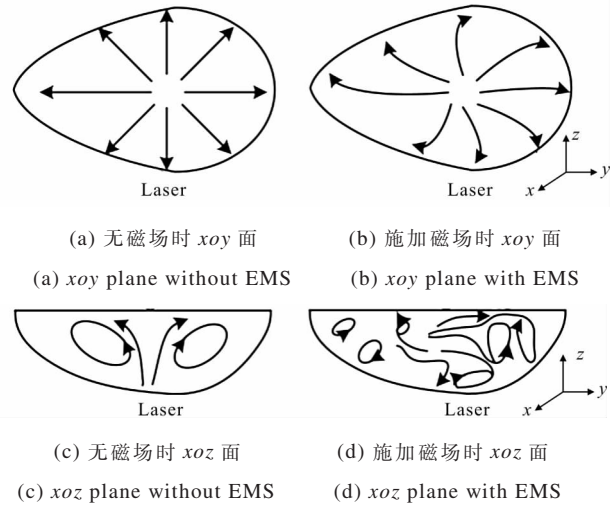


图 7 激光熔池流场分布示意图

Fig.7 Distribution of flow fields of laser pool

在激光熔凝过程中,熔池内温度梯度( $G$ )和凝固速度( $R$ )可分别由公式(12)和公式(13)进行表达<sup>[18]</sup>。

$$G = \frac{2k(T - T_{ref})}{\kappa P} \quad (12)$$

$$R = v_f \cdot \cos \varphi \quad (13)$$

式中: $k$ 为 TA15 的导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $\kappa$ 为材料的吸光率;  $P$ 为激光功率,  $W$ ;  $v_f$ 为激光扫描速度,  $m/s$ ;  $\varphi$ 为扫描速度与凝固速度的夹角。

凝固组织生长形态与温度梯度和凝固速度的比值( $G/R$ )有关。随着  $G/R$  的减小,固液界面处凝固前沿通常经历从平界面到柱状胞晶,再到柱状晶,最后到等轴晶的转变<sup>[20]</sup>。由公式(13)可知,  $v_f$  和  $\varphi$  一定的条件下,外加磁场难以对激光熔池的凝固速度产生影响。同时,随着熔池深度增加,  $\varphi$  从  $0^\circ$  向  $90^\circ$  增大,故凝固速度不断减小,且固液界面处温度梯度随熔池深度增加而不断增大<sup>[21]</sup>,所以在熔池顶部  $G/R$  值最小,最容易产生等轴晶。可预期,若加入电磁搅拌以后,在磁场中心处熔池顶部有等轴晶生成,则随着远离磁场中心,电磁力增大,温度梯度减小,  $G/R$  减小,促使等轴晶区域不断扩大,等轴晶数量增多。

### 3 试验验证

如图 8 所示,激光熔凝试验在半导体激光加工系统上进行,并采用自制的电磁搅拌装置,将基板放置在磁场正中位置。试验采用的主要激光加工参数:激光功率 1.8 kW,激光束束斑直径 3.0 mm,激光束扫描速度 5 mm/s。主要电磁参数:激励电流 60 A,频率 15 Hz。选用厚 5 mm 的 TA15 钛合金热轧退火板材作为试验基材,其名义化学成分是 Ti-6.5 Al-1 Mo-2 Zr-1 V,其主要成分含量如表 2 所示。机械加工成尺寸为 30 mm×10 mm×5 mm 的基板,经砂纸打磨、丙酮清洗后备用。施加磁场前后在基板上表面正中位置熔凝 20 mm 的单道。沿着激光扫描的垂直方向,使用线切割分别在磁场中心处( $x=0$  mm)和远离磁场中心处( $x=7$  mm)的位置截取金相试样。经研磨抛光后,用配比为 HF:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O =1:6:7 的腐蚀剂进行腐蚀。采用 GX51 OLYMPUS 光学金相显微镜观察熔池横截面的显微组织。

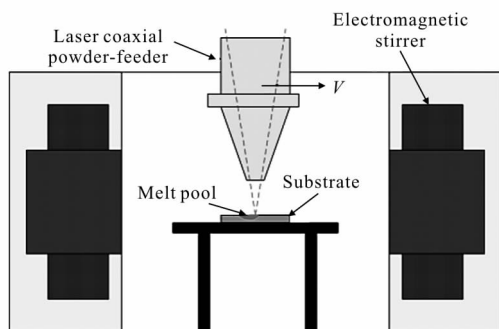


图 8 试验装置剖面示意图

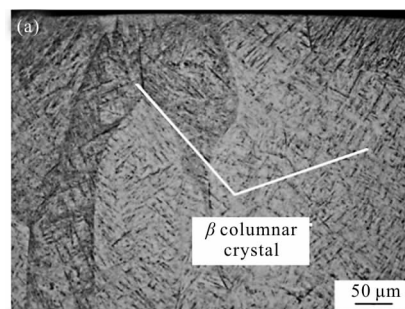
Fig.8 Cross-section diagram of experimental device

表 2 TA15 钛合金化学成分

Tab.2 Compositions of TA15 titanium alloy

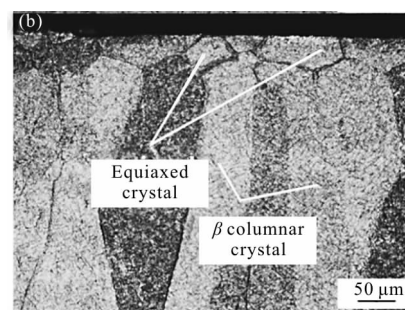
Element	Al	Mo	V	Zr	Ti
Mass fraction	5.5%~7.1%	0.5%~2.0%	0.8%~2.5%	1.5%~2.5%	Bal.

图 9 为施加磁场前后不同位置处熔池宏观组织。可见未施加磁场时熔池中部和顶部组织均为外延生长的  $\beta$  柱状晶(图 9(a)),在不同位置处的熔池中部组织均为外延生长的  $\beta$  柱状晶,顶部组织有等轴晶生成,且远离磁场中心处(图 9(c))的等轴晶



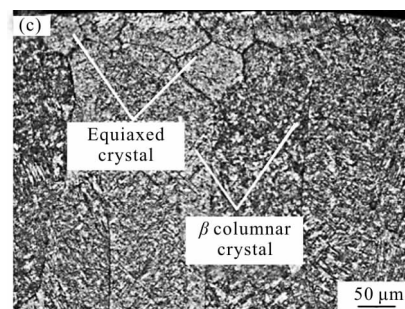
(a) 无磁场( $x=0$  mm)

(a) No EMS( $x=0$  mm)



(b) 施加磁场( $x=0$  mm)

(b) With EMS( $x=0$  mm)



(c) 施加磁场( $x=7$  mm)

(c) With EMS ( $x=7$  mm)

图 9 熔池宏观组织

Fig.9 Macrograph of melt pool

数量略多于磁场中心处(图 9(b))。由于凝固初期(图 10(a))在凝固生长过程中排除溶质使得在狭窄区域造成局部成分过冷,无法形成枝晶,只能形成柱状晶。又因界面处流动性较差,晶体沿散热的相反方向生长,未施加磁场时形成沿着界面法线方向生长的  $\beta$  柱状晶(图 10(b))。 $G/R$  是选择凝固组织生长形态的重要控制参数。柱状晶/等轴晶转变理论<sup>[22]</sup>(Columnar-to-Equiaxed Transition, CET)指出,在凝固界  $G/R$  越小,越有利于达到 CET 临界条件,从而促使柱状晶向等轴晶转变。从凝固界面底

部到顶部,温度梯度逐渐减小,凝固速度逐渐增大,即  $G/R$  值减小。所以施加磁场后熔体流速增强,热散失和热交换频率加大,熔池顶部温度梯度减小, $G/R$  值进一步减小,且顶部散热方向的多样性,均易于形成等轴晶(图 10(c))。同时,随着激光束远离磁场中心,熔池中熔体所受电磁力逐渐增大,周向流动加剧,内部温度梯度有减小趋势, $G/R$  值相对更小,更有利于等轴晶区的扩大,与分析结果相吻合。

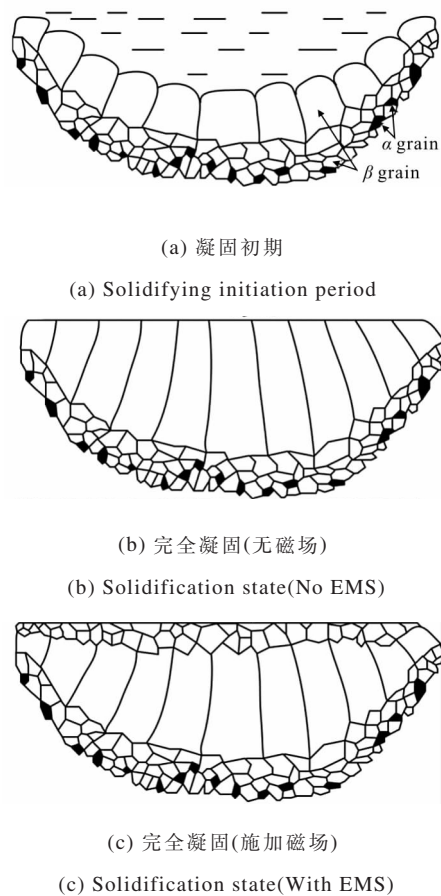


图 10 TA15 激光熔池凝固组织生长示意图

Fig.10 Schematic of melt pool solidification process of TA15

## 4 结论

(1) 建立了电磁搅拌作用下激光熔池的磁流体力学数学模型,并基于该模型计算了电磁搅拌器中心处均强磁场的磁感应强度,发现在电流频率为 15 Hz 时,随着激励电流的增加,磁感应强度在一定范围内线性增强。

(2) 电磁搅拌作用使得 TA15 钛合金激光熔池

内熔体作周向流动,其周向流速在磁场中心处近似为零,但随着远离磁场中心而呈线性增大趋势。当电流频率一定时,周向流速随着激励电流的增加而增大,相比于 40 A 时的周向流速,50 A、60 A 条件下增幅分别达 55.2%、122.6%。

(3) 试验结果表明,未施加磁场前,熔池凝固后组织为外延生长的  $\beta$  柱状晶。施加激励电流为 60 A、频率为 15 Hz 所激发的磁场后,激光熔凝熔池中部组织为  $\beta$  柱状晶,顶部组织有等轴晶生成。且距离磁场中心越远,顶部等轴晶组织越多。这是因为随着远离磁场中心、熔体所受磁场力增大,加剧了熔池的周向流动,从而导致凝固界面前沿温度梯度减小, $G/R$  值减小,凝固界面前沿更多区域满足 CET 转变条件,熔池顶部等轴晶数量增多,与分析结果一致性。

## 参考文献:

- [1] Jin Wenzhong, Li Sufang, Li Tingju, et al. Study on vacuum casting technology of high temperature alloy ingot under complex electromagnetic field [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, 44(6): 1546–1549. (in Chinese)  
金文中,李素芳,李廷举,等.复合电磁场作用下高温合金锭的真空熔铸技术研究[J].稀有金属材料与工程,2015,44(6): 1546–1549.
- [2] Wu Xiaofeng, Zhang Guangan, Wu Fufa. Microstructural characteristics of  $Mg_2Si/Al$  composite under different superheat and electromagnetic stirring [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, 44(3): 576–580.
- [3] 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 TranRer*, 2013, 60(60): 309–321.
- [4] Gatzen M, Tang Z, Vollertsen F. Effect of electromagnetic stirring on the element distribution in laser beam welding of aluminium with filler wire [J]. *Physics Procedia*, 2011, 12 (1): 56–65
- [5] Cai Chuanxiong, Liu Hongxi, Jiang Yehua, et al. Effects of alternating magnetic field on microstructure and wear resistance of laser cladding Fe based composite coatings [J]. *Tribology Journal*, 2013, 33(3): 229–235. (in Chinese)  
蔡川雄,刘洪喜,蒋业华,等.交变磁场对激光熔覆 Fe 基复合涂层组织结构及其耐磨性的影响[J].摩擦学学报,2013,33(3): 229–235.

- [6] Wang Wei, Liu Qi, Yang Guang, et al. Effects of electromagnetic stirring on microstructure and hardness of laser deposited repair parts of BT20 titanium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, 44(1): 194–198. (in Chinese)  
王维, 刘奇, 杨光, 等. 电磁搅拌对 BT20 钛合金激光沉积修复件组织和硬度的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(1): 194–198.
- [7] Wang Wei, Liu Qi, Yang Guang, et al. Numerical simulation of electromagnetic field, temperature field and flow field in a laser molten pool under electromagnetic stirring [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 0202007. (in Chinese)  
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.
- [8] Wang Wei, Liu Qi, Yang Guang, et al. Electromagnetic field simulation and verification of electromagnetic stirring assisted laser deposition of titanium alloys [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2666–2671. (in Chinese)  
王维, 刘奇, 杨光, 等. 电磁搅拌辅助钛合金激光沉积修复的电磁场模拟与验证 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2666–2671.
- [9] Chen Xingrun, Zhang Zhifeng, Xu Jun, et al. Numerical simulation of electromagnetic field, flow field and temperature field in semi-solid slurry prepared by electromagnetic stirring [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(5): 937–945. (in Chinese)  
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): 937–945.
- [10] Wang Liang, Hu Yong, Song Shiyang, et al. Study on the suppression of surface waviness of laser melted layer by using a steady magnetic field [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(11): 1103005. (in Chinese)  
王梁, 胡勇, 宋诗英, 等. 稳态磁场辅助对激光熔凝层表面波纹的抑制作用研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1103005.
- [11] Barman N, Kumar P, Dutta P. Studies on transport phenomena during solidification of an aluminum alloy in the presence of linear electromagnetic stirring [J]. *J Mater Process Technol*, 2009, 209(18–19): 5912–5923.
- [12] Gerald Tennyson P, Kumar P, Lakshmi H, et al. Experimental studies and phase field modeling of microstructure evolution during solidification with electromagnetic stirring [J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2010, 20(z3): 774–780.
- [13] Wei L, Lin X, Wang M, et al. A cellular automaton model for the solidification of a pure substance [J]. *Appl Phys A*, 2011, 103(1): 123–133.
- [14] Jia Ruigao, Xue Qingzhong. Electromagnetics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. (in Chinese)  
贾瑞皋, 薛庆忠. 电磁学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [15] Grant I S, Phillips W R. Electromagnetism [M]. Beijing: People's Education Press, 1982. (in Chinese)
- [16] Mao Bin, Zhang Guifang, Li Aiwu. Theory and Technology of Electromagnetic Stirring for Continuous Casting [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012. (in Chinese)  
毛斌, 张桂芳, 李爱武. 连续铸钢用电磁搅拌的理论与技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
- [17] Xue Xiong. Research on manufacturing technology of rotating magnetic field assisted laser deposition of titanium alloys [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2016. (in Chinese)  
薛雄. 旋转磁场辅助钛合金激光沉积制造技术研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016.
- [18] Huang Y J, Zeng X Y, Hu S F, et al. Microstructure and interface in laser induction hybrid cladding of Ni-based coating [J]. *Appl Surf Sci*, 2009, 255(7): 3940–3945.
- [19] Zhen Zisheng, Mao Weimin, Hong Tao, et al. Effects of electromagnetic stirring parameters on the microstructure of semi-solid AZ91D Mg alloy [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2003, 25(4): 341–370. (in Chinese)  
甄子胜, 毛卫民, 洪涛, 等. 电磁搅拌工艺参数对半固态 AZ91D 镁合金组织的影响 [J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(4): 341–370.
- [20] Liu Hongxi, Cai Chuanxiong, Jiang Yehua, et al. Influence of alternating magnetic field on macroscopic morphology and microstructure evolution of Fe based composite coating by laser cladding [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2402–2410. (in Chinese)  
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.
- [21] Li Yanmin, Liu Zhenxia, Yang Haiou, et al. Temperature field measurement and numerical simulation in laser cladding process [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2003, 39(5): 521–525. (in Chinese)  
李延民, 刘振侠, 杨海欧, 等. 激光多层涂敷过程中的温度场测量与数值模拟 [J]. 金属学报, 2003, 39(5): 521–525.
- [22] Tan Hua. Temperature measurement and microstructure control in laser rapid forming process [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003. (in Chinese)  
谭华. 激光快速成形过程温度测量及组织控制研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2003.