

# 电磁搅拌对激光熔凝 TA15 钛合金熔池凝固研究

杨 光, 赵恩迪, 钦兰云, 任宇航, 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:** 为了研究电磁搅拌作用对激光熔凝熔池凝固过程的影响, 采用有限体积法对施加磁场前后激光单道动态熔凝 TA15 钛合金过程进行三维磁-热耦合数值模拟。研究了磁场对激光熔池流场、熔凝单道及其周边基材温度分布、固液界面处温度梯度和凝固速度的影响, 并采用试验手段对模拟结果进行了验证。模拟结果表明: 电磁搅拌作用使激光熔池最大流速增加了约 20%, 对流加剧促进了熔池热交换作用, 使其最高温度下降, 固液分界面处温度梯度大幅降低, 凝固速度小幅增大, 从而有利于熔池顶部组织发生柱状晶-等轴晶转变 (CET)。试验结果显示施加磁场后熔凝层顶部有等轴晶组织生成, 且随着远离磁场中心, 电磁力增大, 等轴晶区有扩大趋势。试验结果和模拟结果一致性较好。

**关键词:** 激光熔凝; 电磁搅拌; TA15 钛合金; 有限体积法; CET 转变

**中图分类号:** TG146.2+3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2017)04-0966-07

电磁搅拌技术作为一种有效的辅助制造手段, 是通过导电液态金属切割磁感应线感生出洛伦兹力进行的非接触式搅拌。它在铸造领域得到广泛的应用, 并取得了良好的成效<sup>[1,2]</sup>。近些年, 部分学者借鉴铸造领域的成功应用经验, 将电磁搅拌技术引入焊接、激光沉积制造等涉及金属熔池凝固的领域<sup>[3,4]</sup>, 用于提高成形质量, 解决加工过程中出现的气孔和熔合不良等问题<sup>[5]</sup>。昆明理工大学刘洪喜<sup>[6]</sup>等采用旋转磁场辅助激光熔覆 Fe60, 得到细化涂层晶粒组织, 表面耐磨性显著提高。Tang<sup>[7]</sup>等通过特定示踪剂研究了磁场作用下焊接熔池内部流动, 表明当电磁频率为 10 Hz, 磁感应强度达 100 mT 以上时, 电磁能够改善焊缝。德国 BAM 实验室 Bachmann<sup>[8]</sup>等证实稳态磁场对熔池对流的抑制作用, 能够提高表面质量。依据现有的监测手段很难实现对加工过程中熔池内部温度和流速的实时监控。特别是施加磁场以后, 磁场变化和熔体流动相互作用, 使得内部的能量传输和物质流动行为更加复杂。所以很多研究者选用仿真方式研究其行为特点, 与试验相结合, 推导实际的作用机理。如浙江大学王梁<sup>[9]</sup>等利用二维的多物理场耦合模型研究表面波纹, 表明稳态磁场能够对激光熔凝层表面波纹起到抑制作用。Gatzen 等<sup>[10]</sup>在旋转磁场辅助 Ni-Al 合金激光沉积制造过程中, 激励电流越大,

熔池的对流越剧烈, 并能促进包晶反应。沈阳航空航天大学王维等<sup>[11-13]</sup>运用 ANSYS 有限元分析软件模拟了施加直流旋转磁场后定点熔凝时的电磁场、温度场和流场, 分析了电磁搅拌中激励电流对磁场及熔池的影响, 并对激光沉积钛合金组织和性能进行研究, 表明激励电流的增强能够有效促进熔池内部的对流, 经电磁搅拌能得到细化的片状组织, 提高沉积层力学性能。

已报道的文章中多为二维或者三维静态定点的熔凝仿真。二维仿真只能得到单个平面的有效数据, 不能全面反映熔池内部温度及流动情况。静态定点熔凝虽然可以使用双椭球等热源模型模仿动态熔池形貌, 但是不同激光输入功率和扫描速度等工艺参数下, 热源模型几何参数和熔池达到宏观准稳态时间不同, 过大或过小地设定相关参数和熔凝时间, 均会影响模拟结果准确性。

鉴于此, 本研究采用三维动态的磁-热双物理场耦合仿真技术, 对电磁搅拌辅助激光动态熔凝过程进行模拟, 分析电磁对激光熔池流场、温度场和固液界面处温度梯度及凝固速度的影响, 并结合柱状晶/等轴晶转变理论<sup>[14]</sup> (columnar-to-equiaxed transition, CET) 对施加磁场前后凝固组织演变机制进行研究。

收稿日期: 2016-05-16

基金项目: 国家自然科学基金 (51505301, 51305280, 51375316); 辽宁省自然科学基金 (2015020118)

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, 电话: 024-89723852, E-mail: yangguang@sau.edu.cn

### 1 三维磁-热耦合有限元模拟模型

激光沉积制造过程中激光熔池“微小熔体”在激光热源的辐射下伴随着复杂的流体流动过程，在施加磁场后其内部传能、传质行为更加复杂，为了能够更好地研究熔凝过程中旋转磁场对 TA15 钛合金熔池内部混合对流和温度场变化的作用机制，研究中分别运用 ANSYS 的磁场分析模块和 Fluent 软件，实现三维动态的磁-热耦合仿真。

针对电磁搅拌过程的具体情况，为简化模拟，作出如下假设：

- (1) 由于液态金属温度远高于居里点 (760 °C)，磁导率可取为真空磁导率；
- (2) 液态金属的流速远小于光速，故电场对电荷作用的库仑力可以忽略；
- (3) 熔池内的液态金属没有自由电荷的堆积，即体电荷密度为零；
- (4) 液态金属为不可压缩且导电的 Newton 流体，熔池内流动为层流；
- (5) 液态金属内部各相同性，其热物性参数与温度呈分段线性关系。

#### 1.1 物理模型

图 1 是三相三极交流电磁搅拌器 (electromagnetic stirrer, EMS) 几何模型。首先在 ANSYS 有限元分析软件中采用 3D 谐性与瞬态分析技术对电磁场进行模拟。再将 Fluent 软件中导入尺寸为 30 mm×10 mm×5 mm 的激光熔凝用基板。基板材料为 TA15 钛合金，其部分热物性参数如表 1 所示。为实现高效精准的收敛，以 0.1 mm 为等距尺度均分网格 (图 2)。最后将磁场数据单向耦合到 Fluent 模块中使用。

#### 1.2 动态热源模型

热源模型选择是热分析过程中的关键问题。为了准确模拟三维瞬态温度场，采用动态平面高斯热源，其数学表达式为式 (1)：

$$Q_g = \frac{3\kappa P}{\pi r_0} \exp\left(-\frac{3r_d^2}{r_0}\right) \quad (1)$$

式中， $r_d = \sqrt{(x - u_0 t)^2 + y^2}$ ，其为热源有效半径内部任一点到光源中心点的距离， $u_0$  为激光沿着  $x$  轴正方向的扫描速度； $\kappa$  为吸光率； $r_0$  为激光有效光斑半径； $P$  为激光输入功率。

为了使模拟结果更加准确，必须考虑因对流和辐射而散失的热流密度  $Q_c$ 。故使用 UDF 汇编语言

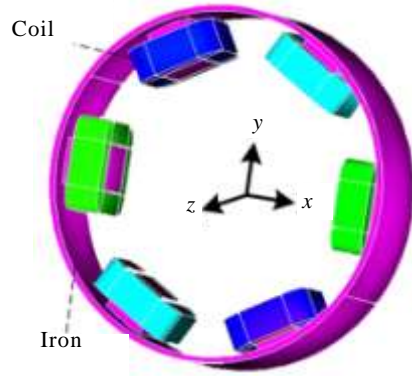


图 1 电磁搅拌器几何模型

Fig.1 Geometry model of electromagnetic stirrer

表 1 TA15 材料性能及物性参数

Table 1 Material performance and thermo physical properties

Property	Value					
Temperature/K	273	373	473	573	673	773
Thermal conductivity/W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	9.41	10.47	11.72	12.14	13.4	14.65
C <sub>p</sub> /J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	-	573	-	641	699	739
Solidus temperature/K	1877					
Liquidus temperature/K	1933					
Density/kg m <sup>-1</sup>	4200					
Surface tension coefficient/N m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	-3.5×10 <sup>-4</sup>					
Dynamic viscosity/m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	1.05×10 <sup>-5</sup>					

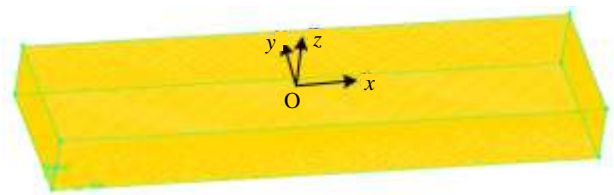


图 2 基板模型网格划分

Fig.2 Mesh model of substrate

将总热流密度  $Q$  加载到基板上表面，同时将散失的热流密度  $Q_c$  加载到基板的其他平面。

$$Q_c = h_c(T - T_{ref}) + \sigma_s \zeta (T^4 - T_{ref}^4) \quad (2)$$

$$Q = Q_g - Q_c \quad (3)$$

式中,  $h_c$  为对流及辐射边界综合热传导系数;  $\sigma_s$  为 Stefan-Boltzmann 常数;  $\zeta$  为发射率;  $T_{ref}$  为参考温度。

### 1.3 控制模型

为准确地描述激光熔凝过程中, 激光熔池内部质量、动量和能量不断变化所致的材料宏观、微观结构的变化, 采用 1 个涉及对流、扩散以及固液相变等因素的三维瞬态数学控制模型<sup>[15]</sup>, 其基本控制方程组如下所示:

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \tag{4}$$

动量方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho Uu) = \text{div}(\mu \text{grad}u) - \frac{\partial P}{\partial x} + Au_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho Uv) = \text{div}(\mu \text{grad}v) - \frac{\partial P}{\partial y} + Av_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho Uw) = \text{div}(\mu \text{grad}w) - \frac{\partial P}{\partial z} + Aw_z \\ \quad + \frac{\rho g \beta (h - h_{ref})}{c_p} \end{cases} \tag{5}$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \text{div}(\rho Uh) = \text{div}(\alpha \text{grad}h) + \frac{\partial \rho \Delta H}{\partial t} + \text{div}(\rho U \Delta H) \tag{6}$$

式中,  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为速度矢量  $U$  在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴方向上的分量;  $A$  为使方程适用于糊状区的修正系数;  $\mu$  为液相粘度系数;  $c_p$  为钛合金的比热容;  $\alpha$  为热扩散率;  $h$  为显焓;  $\Delta H$  为潜焓。

该模型加入糊状区的修正系数  $A$  ( $0 \rightarrow \infty$ ), 其值随着固相分数从 0 (液相)  $\rightarrow$  1 (固相) 增大而增大, 有效地统一固相区、液相区以及糊状区。考虑到温度造成的钛合金熔池内不同区域密度不均对浮升力的影响 (式 5), 通过焓法将对流的非稳态守恒过程进行表达 (式 6)。

## 2 模拟结果与分析

在基板上表面施加激光功率为 1.8 kW 的高能激光束, 扫描速度为 5 mm/s, 扫描路径长 20 mm (扫描时长 4 s), 分别对施加磁场 (给定 60 A、15 Hz 的励磁电流所激发, 磁场中心与基板中心重合) 和未施加磁场 2 种情况进行激光单道熔凝 TA15 钛合金数值仿真。

### 2.1 激光熔池流场分布

图 3 为施加磁场前后熔池表面速度矢量分布图 (2 s 时刻)。可见熔液在熔池表面流动方向由中心向四周呈放射状分布, 且越靠近中心, 流速越小 (图

3a)。激光熔池表面驱动液体流动的主要驱动源是 Marangoni 流, 它是由径向温度梯度引起的表面张力梯度克服粘滞力而产生的。液态金属表面张力随温度升高而降低, 熔池内温度梯度由熔池边缘指向中心, 表面张力与之相反, 在克服内摩擦力后驱使熔体由中心向四周流动。由图 3b 可见, 施加磁场后, 导电熔体切割磁感线产生一个体积力<sup>[11]</sup>, 该体积力呈逆时针周向分布且向中心不断衰减, 导致流体出现逆时针偏转, 最大流速从 0.26 m/s 增至 0.3 m/s。

图 4 为施加磁场前后熔池内最大流速随时间变化曲线。可见熔液的初始速度最小, 在短暂时间内迅速增大至峰值, 随后快速降至稳定值。当施加磁场后, 熔池达到宏观准稳态后最大流速稳定在 0.3 m/s 左右, 比未施加磁场时高近 20%, 表明电磁搅拌使得熔池内部的流动加剧。

### 2.2 熔池表面温度场分布

图 5 为施加磁场前后不同时刻温度分布。可见激光束远离起点后, 基板中的高亮度区域 (温度大于 1000 K) 呈现中间大, 尾部小的近似水滴形 (图 5b, 5d)。由相同时刻施加磁场前后温度分布对比可知, 磁场降低了熔池最高温度, 改变了基板表面温度分布的对称性。施加磁场前后, 1 s 时刻最高温度分别为 2781 和 2710 K, 4 s 时刻则分别为 2816 和 2759 K, 降低幅度达 2.6% 和 2.1%。这是因为电磁力

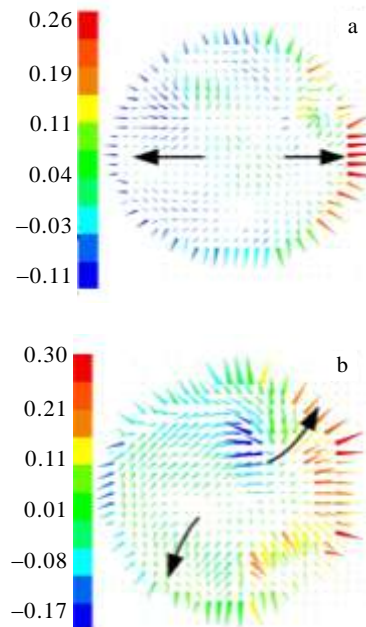


图 3 熔池表面流场分布

Fig.3 Distribution of velocity vector on melt pool surface: (a) without EMS and (b) with EMS (60 A, 15 Hz)

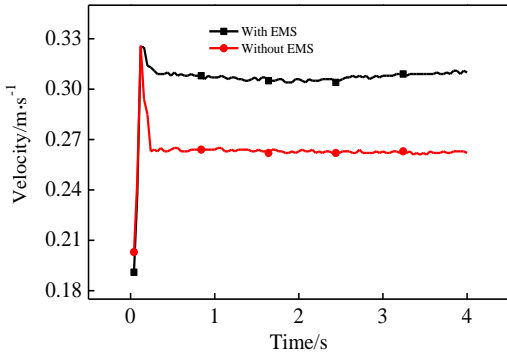


图4 熔池最大流速随时间变化曲线

Fig.4 Maximum velocity variation in melt pool with time

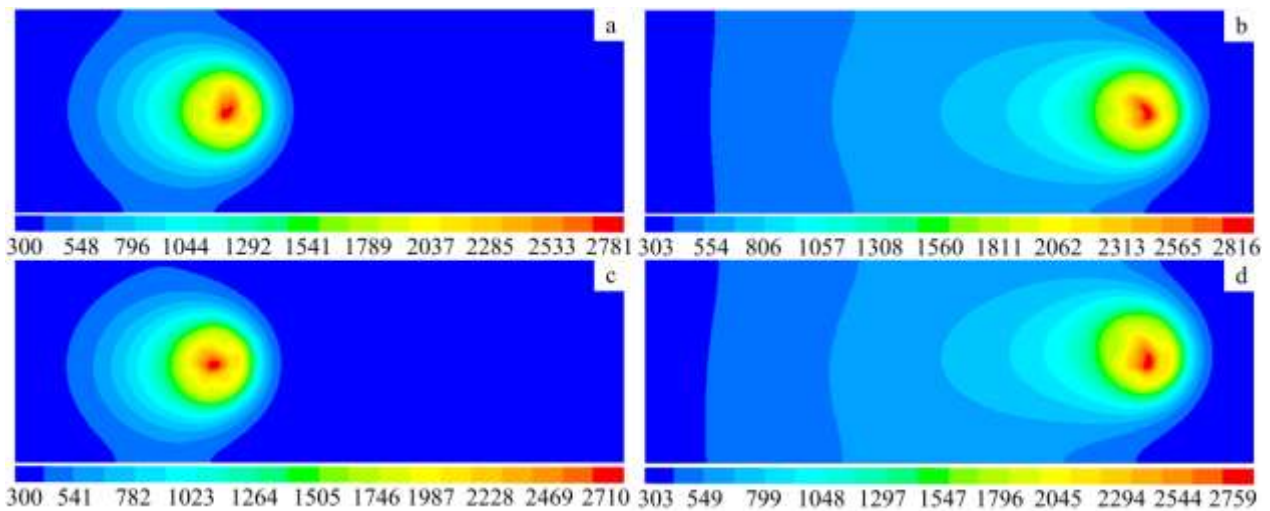


图5 熔池表面温度分布

Fig.5 Distribution of temperature in surface of melt pool: (a) without EMS (1 s), (b) without EMS (4 s), (c) with EMS (1 s), and (d) with EMS (4 s)

表明电磁搅拌能够降低凝固前沿温度梯度,均化了温度分布。

图7为施加磁场前后固液分界面处不同深度下凝固速度变化情况。可见由于熔凝区顶部处散热方向多样,既可以向底部散热,又可以向空气中导热,因此凝固速度最大,且随着深度增加线性减小。施加磁场后的凝固速度略高于未施加磁场,但增长幅度仅有1%~5%,表明电磁搅拌对凝固界面处的凝固速度影响较小。

### 3 试验验证

TA15钛合金激光熔凝实验通过激光沉积制造系统完成,该系统包括:半导体激光器、同轴送粉器、气氛保护装置、三相三极电磁搅拌器等组成。试验装置如图8所示,将尺寸为30 mm×10 mm×5 mm的轧制基板,放置在中心的工作台上。试验采

加剧熔体内部流动,熔质热交换加快,使得最高温度下降,温度分布更均匀,有利于温度梯度的减小。

### 2.3 固液界面处温度梯度和凝固速度

图6为磁场施加前后固液分界面处温度梯度随深度变化情况对比图。可见熔凝区顶部是以具有一定热量积累的已凝固层为底,故温度梯度最小。随着远离熔池表面,界面处温度梯度呈非线性的增加,且越靠近熔池后沿底部温度梯度上升速率越大,这一结果与文献[16]一致。施加磁场后熔体传质过程增强,热对流加剧,使得温度梯度发生明显的降低,平均每毫米降低100 K,随着深度增加,温度梯度基数的增加,降幅从30%减小至6.3%。

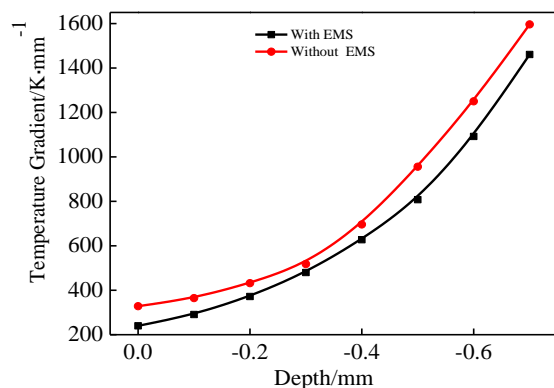


图6 固液界面处温度梯度随深度变化

Fig.6 Variation of temperature gradient with depth in solid-liquid interface

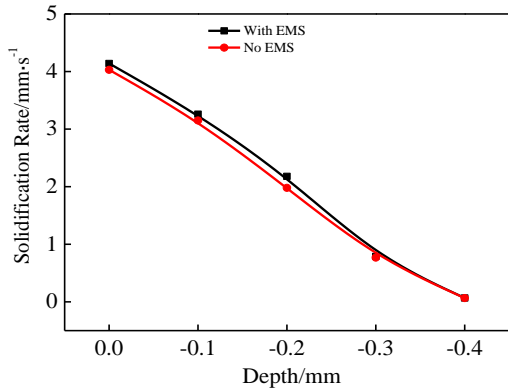


图 7 固液界面处凝固速度随深度变化

Fig.7 Variation of solidification rate with depth in solid-liquid interface

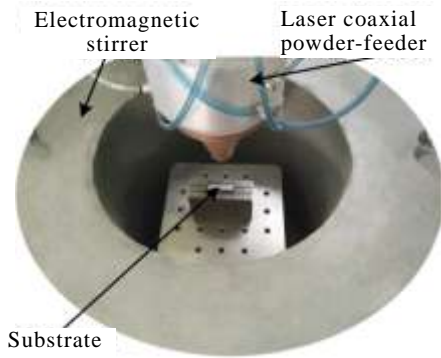


图 8 试验装置

Fig.8 Experimental device

用与模拟相同的固定激光工艺参数和电磁参数。分别在施加与未施加磁场条件下，激光束在试样表面正中位置扫描长为 20 mm 的单道。激光熔凝后采用电火花切割方法，分别在基板中心 ( $x=0$  mm) 和远离中心 ( $x=7$  mm) 的位置，沿垂直于激光扫描方向切取金相试样。试样经研磨抛光，用配比为 HF:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O=1:6:7 的腐蚀剂进行腐蚀后，采用 GX51 OLYMPUS 光学金相显微镜观察显微组织。

图 9 为施加磁场前后磁场中心处熔凝道宏观组织。可见施加磁场前后，熔池底部和中部组织均为沿着熔池边缘法线方向外延生长的  $\beta$  柱状晶。这是因为固液两相区的动力学黏度较大，造成分界面处流动性较弱，散热以沿着界面法线方向为主。在晶体长大过程中，晶体凝固生长并排除溶质，在凝固前沿的固液界面处溶质浓度升高，产生局部的成分过冷区，又因冷区狭窄无法形成枝晶，只能形成柱状晶。图 10 为施加磁场前后熔池顶部的宏观组织。

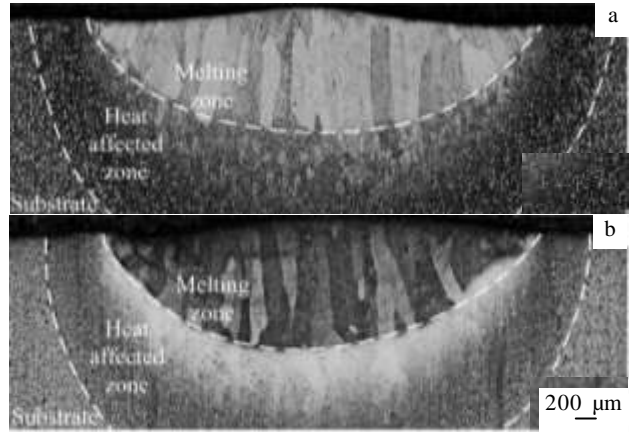


图 9 激光熔凝道宏观照片

Fig.9 Macrographs of laser-melting TA15 titanium alloy: (a) without EMS ( $x=0$  mm) and (b) with EMS ( $x=0$  mm)

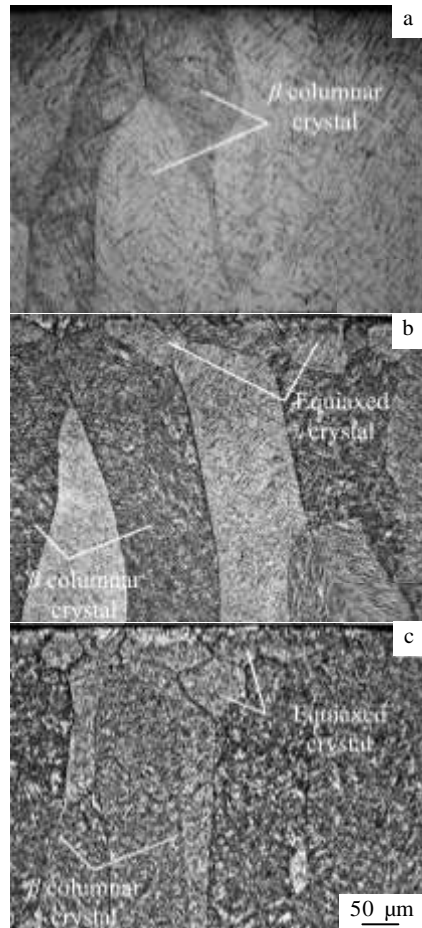


图 10 熔池顶部宏观组织

Fig.10 Macrographs at the top melt pool: (a) without EMS ( $x=0$  mm), (b) with EMS ( $x=0$  mm), and (c) with EMS ( $x=7$  mm)

未施加磁场时,柱状晶继续生长至顶层(图10a)。施加磁场后,熔池顶部均出现等轴晶,随着远离磁场中心,等轴晶数量增多(图10b,10c)。

温度梯度( $G$ )与凝固速度( $R$ )的比值( $G/R$ )是凝固组织生长形态选择的重要形状控制因子<sup>[17]</sup>。根据凝固CET理论,生长前沿的温度梯度越小,凝固速度越大(即 $G/R$ 值越小),越容易满足CET临界条件,从而促进快速凝固组织由粗大的 $\beta$ 柱状晶向等轴晶组织转变。由模拟结果可知,从激光熔池底部到顶部,温度梯度逐渐降低,凝固速度逐渐增大,所以熔池顶部容易发生CET转变。未施加磁场时,凝固组织内未出现等轴晶,表明TA15钛合金激光快速熔凝时,不能满足CET转变的临界条件,与文献[18]中结果一致。当施加磁场后,温度梯度大幅度下降, $G/R$ 相比于未施加磁场时更小,存在等轴晶生长区间,有利于等轴晶的生成。随着远离磁场中心,洛伦兹力逐渐增大,内部流动进一步加剧,温度梯度进一步降低,促使等轴晶增多。

## 4 结 论

1) 施加电磁搅拌后,熔池表面及内部熔体的流动性增强,流速增幅达20%,热传递加快,使得熔池温度分布更均匀。

2) 旋转磁场导致固液界面处温度梯度大幅度降低,最大降幅达30%;而对凝固速度影响较小,增幅仅为1%~5%。

3) 激光熔池底部和中部组织均为外延生长的 $\beta$ 柱状晶。施加磁场后熔池内部对流加剧,固液分界面处温度梯度下降,凝固速度上升,有利于CET转变,熔池顶部组织出现等轴晶,且距离磁场中心越远,等轴晶数量越多;未施加磁场时,无等轴晶生成。试验结果与模拟结果吻合较好。

### 参考文献 References

- [1] Li J, Wang T M, Xu J *et al. Materials Science and Technology*[J], 2011, 27(3): 676
- [2] Jin Wenzhong(金文中), Li Sufang(李素芳), Li Tingju(李廷举) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(6): 1546
- [3] Tennyson P G, Kumar P, Lakshmi H *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2010, 20(S3): 774
- [4] 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
- [5] Kobryn P A, Moore E H, Semiatin S L *et al. Scripta Materialia*[J], 2000, 43(4): 299
- [6] 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
- [7] Tang Z, Gatzten M. *Physics Procedia*[J], 2010, 5: 125
- [8] Bachmann M, Avilov V, Gumenyuk A *et al. International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2013, 60: 309
- [9] Wang Liang(王梁), Hu Yong(胡勇), Song Shiyong(宋诗英) *et al. Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2015, 42(11): 69
- [10] Gatzten M, Tang Z, Vollertsen F *et al. Physics Procedia*[J], 2011, 12: 56
- [11] 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
- [12] 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): 40
- [13] Wang Wei(王维), Liu Qi(刘奇), Yang Guang(杨光) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(1): 194
- [14] Lin Xin(林鑫), Li Yanmin(李延民), Wang Meng(王猛) *et al. Science China: Technological Sciences*(中国科学:技术科学)[J], 2003, 33(7): 577
- [15] Liu Zhenxia(刘振侠). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003
- [16] Li Yanmin(李延民), Liu Zhenxia(刘振侠), Yang Haiou(杨海欧) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2003, 39(5): 521
- [17] Huang Y J, Zeng X Y, Hu Q W *et al. Appl Surf Sci*[J], 2009, 255(7): 3940
- [18] Liu Bin(刘彬), Fang Yanli(方艳丽), Li An(李安) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(6): 1005

## Effect of Electromagnetic Stirring on Melt Pool Solidification of Laser Melting TA15 Titanium Alloy

Yang Guang, Zhao Endi, Qin Lanyun, Ren Yuhang, 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 melt pool solidification, a three-dimensional magnetic-thermal coupling numerical simulation was conducted on the process of single-pass laser melting TA15 titanium alloy with and without the magnetic field based on the finite volume method. The influences of electromagnetic field on temperature field, flow field, temperature gradient and solidification rate were analyzed. Then the numerical simulations were verified by experiments. The results of numerical simulation show that the maximum melt pool flow velocity increases by 20%, and it promotes the heat exchange, which decreases the highest temperature of melt pool and the temperature gradient on solid-liquid interface, and increases the solidification rate slightly; thus columnar-to-equiaxed transition at the top of melt pool appears. The experiment results indicate some equiaxed grains are generated at the top of melt layer with the magnetic field. Electromagnetic force is enlarged with an increase in the distance from magnetic field center, and the equiaxed grain zone shows an expanding tendency. The numerical simulations are in good agreement with the experimental results.

**Key words:** laser melting; electromagnetic stirring; TA15 titanium alloy; finite volume method; columnar-to-equiaxed transition

---

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