

超声振动对激光熔凝熔池影响研究

王 维 岳耀猛* 杨 光 钦兰云 任宇航

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 通过数值模拟与实验相结合的方法,研究超声场对激光熔凝过程中熔池温度场、流场以及熔池形貌的影响。建立描述超声振动辅助激光熔凝过程中的声场和温度场的三维数学模型,通过有限体积法实现激光熔池中声场和温度场的耦合模拟分析,系统分析激光熔池内声场、温度场、流场的变化规律。结果表明:在超声场作用下的熔池温度略低于未施加超声场的熔池温度;流动速度增加72%,但并未改变未加超声时熔池内 Marangoni 流的环流趋势;在超声场作用下的熔池宽度增加0.5 mm、深度减小0.1 mm。通过激光熔凝实验验证数值模拟结果与实际情况基本吻合。

关键词 激光技术; 温度场; 超声场; 流场; 熔池形貌; 数值模拟

中图分类号 TG146.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1103007

Influence of Ultrasonic Vibration on Melt Pool in Laser Melting Process

Wang Wei Yue Yaomeng Yang Guang Qin Lanyun Ren Yuhang

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

Abstract The influences of ultrasonic field on temperature field, flow field and the melt pool morphology during laser melting are studied through numerical simulation and experiment. A new three-dimensional mathematical model describing the ultrasonic field and temperature field in the laser melting with ultrasonic vibration is developed. The temperature field and flow field of the laser melt pool variation are analyzed systematically by the finite volume method for coupled ultrasonic field and temperature field in laser melt pool simulation analysis. The results show that the temperature of molten pool under the effect of ultrasonic field is slightly lower than that of not applying ultrasonic field. The flow rate increases by 72%, but the effect of ultrasonic field does not change the circulation tendency of Marangoni flow without ultrasonic. The width of melt pool increases by 0.5 mm and depth reduces by 0.1 mm under the influence of ultrasonic field. It's verified that the numerical simulation results are consistent with actual situation by laser melting experiment basically.

Key words laser technique; temperature field; ultrasonic field; flow field; melt pool morphology; numerical simulation

OCIS codes 350.3850; 350.2660; 220.4610

1 引 言

功率超声具有设备简单、易于控制以及材料的循环性能好等优点,在金属材料成形过程中对于改善凝固组织,降低成形件内部缺陷具有广阔的应用前景^[1]。罗执等^[2]通过实验发现超声波在铸造 Al-5.0Cu-1.0Fe 合金过程中明显减少了缩孔、缩松等铸造缺陷,且二次枝晶间距明显减小。范阳阳等^[3]研究了基于超声振动

收稿日期: 2015-06-01; 收到修改稿日期: 2015-07-14

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: 王 维(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事激光沉积制造和修复技术等方面的研究。

E-mail: wangw1116@sau.edu.cn

*通信联系人。E-mail: 164990392@qq.com

的304不锈钢TIG焊接,结果表明焊缝结晶方式由粗大柱状晶转变为细小的树枝晶和等轴晶,晶粒度减小,熔合区组织均匀。借鉴功率超声在铸造和焊接中改善凝固组织、除气以及提高力学性能的成功应用^[4-5],陈畅源等^[6]提出了将超声场施加到激光熔覆中去,并从理论上进行了分析,但是并没有进行相关实验研究。王维等^[7]将超声引入BT20钛合金激光熔覆过程中,研究结果表明熔覆层内部气孔率下降到0.75%,晶粒尺寸减小约42%。钦兰云等^[8]搭建了超声振动系统并进行了超声辅助钛合金激光沉积成形实验研究,同样发现熔覆层晶粒得到细化,硬质相弥散均匀,且试件的残余应力明显降低。通过以上研究者研究工作发现超声振动对激光沉积制造过程确有良好的作用效果。但通过查阅文献未发现超声振动在激光沉积制造过程中细化组织,减小残余应力机理研究的相关报道。在激光沉积制造过程中伴随有传热、辐射、固化及相关结晶物理变化,这些过程的进展取决于熔池的温度场、流场的变化。由于其过程的复杂性不能通过实验进行研究,目前很多研究者通过数值模拟对传统的激光沉积制造过程熔池温度场、流场的研究以及熔池几何尺寸的影响因素做了大量工作^[9-15]:刘奇等^[11]通过数值模拟研究了在电磁搅拌作用下激光熔凝过程中熔池内部流场、温度场及熔池形貌的变化。刘振侠等^[15]利用数值分析的方法对激光熔池内的流动进行分析。为研究超声作用下激光熔凝过程中温度场、流场和熔池几何尺寸的变化提供了数值模拟的研究方法。

由于激光沉积制造过程的复杂性,对在不送粉情况下激光熔凝进行数值模拟研究,通过对激光扫描过程中传热、传质进行适当简化,运用数值模拟软件内的动网格技术以及凝固熔化模型短时间内激光在合金表面形成的熔池内的声场、温度场、流场进行了数值模拟,并对施加超声场前后激光熔池内温度场、流场、以及熔池形貌进行了对比分析,从而为研究超声振动在激光沉积制造过程中影响凝固组织,减小残余应力的机理研究提供理论基础,也为后续具有送粉过程的超声作用下激光沉积过程的研究打下基础。

2 数值模拟

2.1 熔池内部声学特性数值模拟边界条件

在超声振动作用下的激光熔凝熔池表面直径在4 mm左右,其尺寸较小,微小熔池所在区域的振幅可认为恒定不变,这为脱离基板,对熔池内部声学特性进行独立分析提供了可能。对于熔池内部而言,在固液交界面处,理想认为固体边界做超声正弦振动。这是一个轴对称问题,故熔池模型由二维轴对称结构来表征。即如图1所示模型中的壁面做正弦振动,通过动态层技术将由DEFINE-GRID-MOTION宏编写的自定义正弦振动函数施加到边界条件中,从而实现超声振动的加载。其中超声的频率为20 kHz,振幅为6 μm ,由超声振动频率可知,周期 T 为50 μs ,设定模拟迭代步数为1000步,为避免动网格产生负体积,时间步长设置为较小的值为1 μs 。熔池内熔液物性参数设置如表1所示。

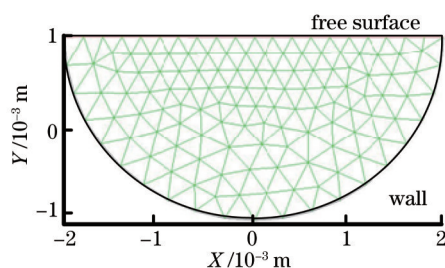


图1 网格模型

Fig.1 Mesh model

由于超声作用下激光熔凝过程中超声场和温度场的耦合问题较为复杂,根据熔凝过程中的实际情况在建立数学模型时做出如下假设:

- 1) 为了简化表面边界条件,假设生成熔池的自由表面为平面;
- 2) 激光熔池存在时间较短,忽略超声对熔池的热效应;
- 3) 被处理钛合金材料热物性参数除了比热和导热系数与温度成分段线性关系外,其他均为定值;
- 4) 工件的初始温度为300 K。钛合金的材料及热物性参数如表1所示。

表 1 材料性能及热物性参数

Table 1 Material performance and thermo physical properties

Properties	Vlues					
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 / $(kg \cdot m^{-3})$	4200					
Dynamic viscosity / $(m^2 \cdot s^{-1})$	1.05×10^{-5}					
Solidus temperature / $^{\circ}C$	1604					
Liquidus temperature / $^{\circ}C$	1660					

2.2 超声场控制方程

熔池中超声场控制方程:

$$E = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho^2 c^2} + \frac{1}{2} \rho v^2, \quad (1)$$

式中 E 为声能密度(J/m^3), P 为声压 (Pa), v 为振动速度(m/s)。

当施加超声振动时,熔池内部受到超声场纵向的辐射压力,压力大小由熔池内声能密度差决定。熔池内单位体积受到的纵向声流驱动力^[16]为

$$F_z = -\frac{\partial}{\partial z} \langle E \rangle = 2\alpha E_0 \exp(-2\alpha z), \quad (2)$$

式中

$$E_0 = \frac{1}{2} \rho v_0^2, \quad (3)$$

式中 α 为熔池内熔液对声波的吸收系数, $\langle E \rangle$ 为声能量密度的平均值(J/m^3), E_0 为熔池底部固液交接面处声场能量的密度值(J/m^3), v_0 为基板表面的振动速度(m/s),由于熔池深度较小,其值采用 OFV-503 光学头与 OFV-2500 控制器组成的单点式激光测振仪由基板表面测得。测量时光学头与基板长度方向相垂直且保持一定距离,通过显示器读取基板中心点振动速度并进行记录,为减小测量误差,每次改变超声驱动电源功率,测量相应 5 组数据并取平均值,得到基板表面振动速度随功率的变化曲线如图 2 所示。数值模拟采用的基板振动速度为实验中超声波发生器功率为 600 W 时对应的速度。

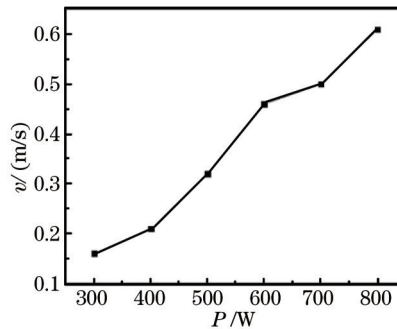


图 2 速度变化曲线

Fig.2 Velocity variety curve

通过 FLUENT 提供的 UDF 将热流密度载荷边界^[17-18]以及声波驱动力作为源项施加到数学模型中进行计算。

3 计算结果与分析

3.1 声场分布特征

一个周期内熔池动压模拟结果云图如图 3 所示。可见熔池内部动压随超声的作用逐渐发生变化,在 $T/4$ 时,由于距离熔池边界起振时间较短,声波能量最先由熔池底部传入,在底部形成高压区,随着声波的继续传播,动压高压区向上转移,在横向已存在压力梯度,随时间推移,在熔池中部出现低压区,高压区开始向周

围扩散,最终在时间 T 时,高压区慢慢消失在熔池边缘处。模拟过程中熔液密度为定值,由动压定义可知其与速度的平方成正比,也就是动压值的大小表征该处速度的大小。由一个周期内的声压最大值的变换可知,熔池内液体速度最大值在一个周期内呈对称环状变化。

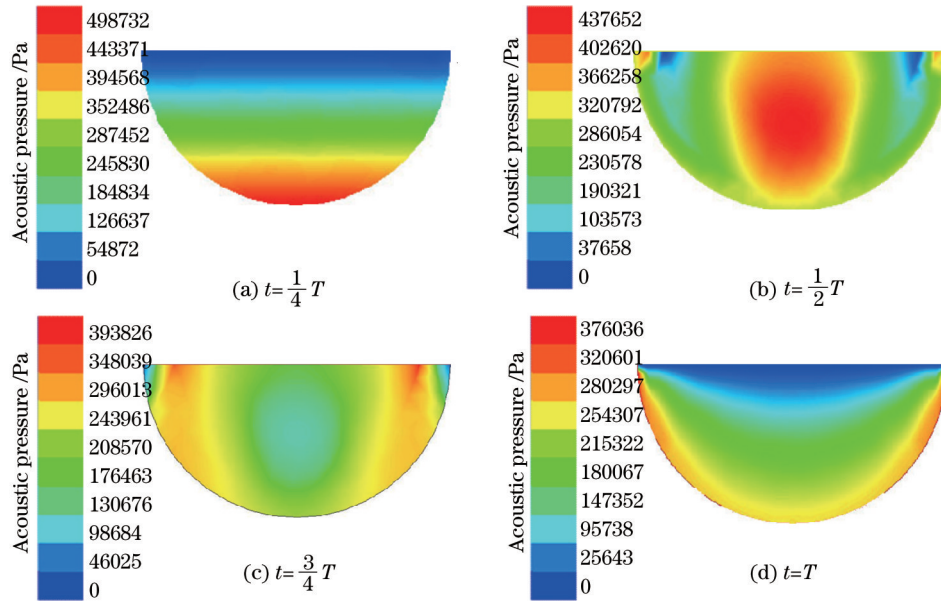


图3 一个周期内熔池动压分布图

Fig.3 Distributions of dynamic pressure in the melt pool over one period

3.2 温度场分布特征

以一定速度向前运动的高能密度激光束辐照在基材上,达到钛合金的液相线温度 $1660\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,基材表面开始熔化并形成液态熔池,经过约 1 s 的时间,熔池形貌基本达到稳定状态。为了使数值模拟结果更加接近实际,更具可靠性,设定激光光斑照射时间为 1 s ,通过计算得到施加超声和未施加超声场下的温度场分布,如图4所示。

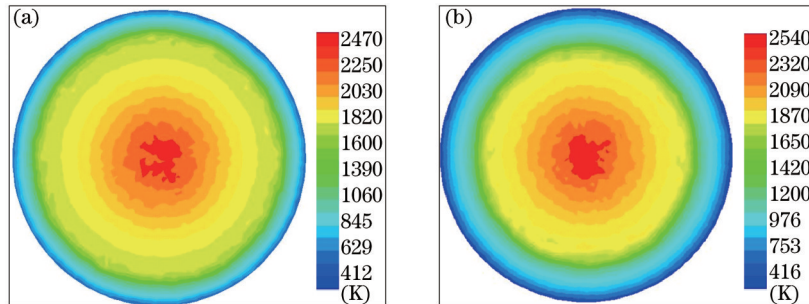


图4 熔池表面温度场分布图。(a) 施加超声;(b) 未施加超声

Fig.4 Distributions of temperature field in melt pool. (a) With ultrasonic; (b) without ultrasonic

由图4(b)未施加超声的熔池温度分布图可知,激光熔池内的最高温度达到 $2240\text{ }^{\circ}\text{C}$,激光熔池面积约为 7.543 mm^2 ,由图4(a)可知施加超声的熔池面积增大,约为 9.616 mm^2 ,熔池内的最高温度有所降低,为 $2170\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度沿熔宽方向的平均变化减小了 $47.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$,可知温度梯度变小。这是因为超声驱动力的施加,促进了熔池内部熔液的流动,进而加速了熔化区与未熔区的能量传递以及熔池内的热量向空气中辐射,从而使最高温度有所降低。 1 s 内施加超声和未施加超声熔池内的最高温度变化曲线如图5所示。

由图可见,施加超声后的熔池温度基本一直低于未施加超声的熔池内的温度。在 0.3 s 之前由于激光辐照,能量累积,温度都呈急剧上升趋势。说明此阶段熔池内温度场尚未达到稳态,超声振动的施加促进了热量由熔化区向未熔化区的扩散,加速未熔化区的熔化。随着热量累积,熔池温度逐渐围绕一定值波动,在波动阶段的熔池内,超声施加促进了熔池内环流的流动,加速热量向基体传递,促进了基板温度场的均匀化,熔池存在时间短,能量传递有限,因此熔池内施加超声的最高温度略低于未施加超声的最高温度。

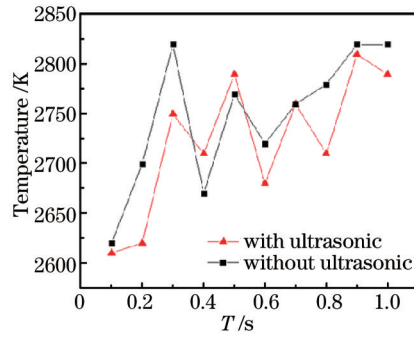


图5 温度变化曲线

Fig.5 Temperature distribution

3.3 流场分布特征及熔池形貌变化

施加超声前后熔池内部液体流动矢量图如图6所示,激光熔凝过程中熔池内部受到表面张力、浮力以及重力的作用,其中表面张力起主要作用^[19]。在熔池内部熔液由中间流向边缘,形成 Marangoni 流。由图 6(b)可见超声场的施加促进了熔池内部熔液的流动,但并未改变未加超声时熔池内 Marangoni 流的总体趋势。说明熔池内部由于功率超声在纵向声压密度梯度的作用,形成的声流促进了 Marangoni 流的流动,流速最大值由未施加超声场时的 0.0542 m/s 增大为 0.0936 m/s,增加了 72%,且两者叠加促进了熔液流向熔池边缘,熔池中动压最大值的对称环状变动与环流状态吻合,同时将激光照射的热量沿流动方向带向熔池外缘,使熔池向横向扩展,但熔池的深度减小。通过查看液体组分曲线判断施加超声前后熔池深度以及宽度的变化,熔深及熔宽方向的液体组分变化曲线如图 7 和 8 所示。

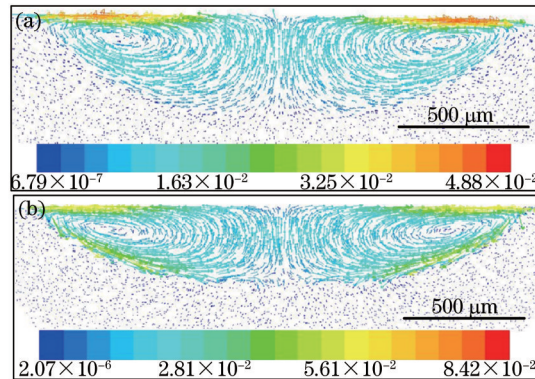


图6 熔池内流场分布图。(a) 未施加超声; (b) 施加超声

Fig.6 Distributions of flow field in melt pool. (a) Without ultrasonic; (b) with ultrasonic

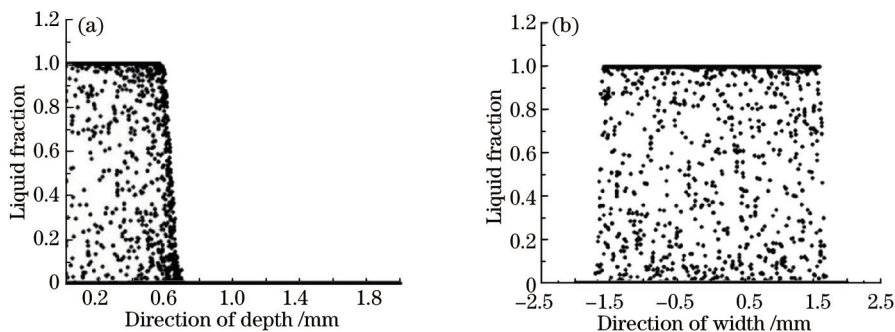


图7 施加超声熔池液体组分变化曲线。(a) 熔深方向; (b) 熔宽方向

Fig.7 Liquid fraction variety curves in melt pool with ultrasonic. (a) Direction of depth; (b) direction of width

由纵向以及横向液体组分曲线可得,施加超声作用下熔池宽度为 3.5 mm,深度为 0.7 mm,未施加超声下的熔池宽度为 3 mm,深度为 0.8 mm,因此在超声振动的作用下熔池变宽、变浅。

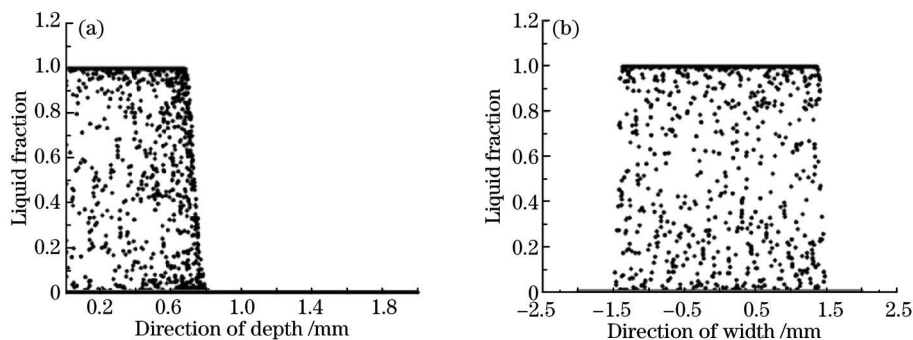


图8 未施加超声熔池液体组分变化曲线。(a) 熔深方向; (b) 熔宽方向

Fig.8 Liquid fraction variety curves in the melt pool without ultrasonic. (a) Direction of depth; (b) direction of width

4 实验验证

实验采用德国 IPG 公司生产的 6 kW 光纤激光器,在钛合金材料表面进行激光熔凝。超声场由 TJS-3000 智能数控超声波发生器激发,通过变幅杆传入基板熔池中。实验基板为 200 mm × 40 mm × 10 mm 的 BT20 锻件。基板使用前,表面经砂纸打磨处理,擦拭乙醇,去除氧化层。熔凝表面调整在激光聚焦透镜的正离焦面上,激光功率为 2000 W,超声波发生器功率为 600 W,单点停留时间为 1 s。分别进行施加超声振动和不施加超声振动的激光熔凝实验,实验装置如图 9 所示。

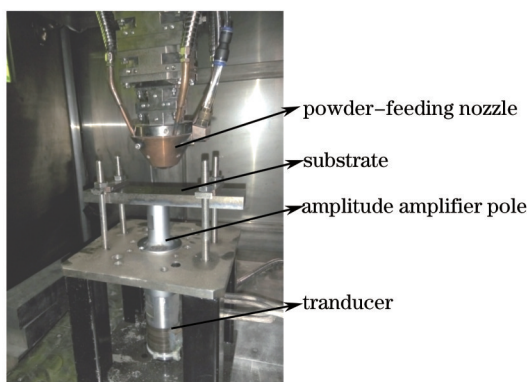


图9 实验装置

Fig.9 Experimental device

激光熔凝后沿熔池中心对称切取金相试样,试样表面经研磨抛光后用腐蚀液(HF:HNO₃:H₂O=2:6:100 体积比)腐蚀 30~45 s。采用 OLYMPUS 光学显微镜观测激光熔池,并用 Image-Pro Plus 软件测量熔池的宽度与深度。

图 10 所示为施加超声和未施加超声场下 1 s 时刻的模拟和实验熔池对比图。由图可知,由于超声对熔池是纵向驱动作用,加速了熔池环流流速的增加,但妨碍了热量向熔池深度方向的传递。同等时间内激光能量传递是一定的,从而导致超声场下的熔池相对未施加超声下的熔池变宽变浅,宽度 W 增加约 0.5 mm,深度 D 减小约 0.1 mm。由于模拟过程条件的假设导致模拟结果与实际实验测量的结果有一定的误差,但是最大误差不超过 10%,可知数值模拟具有参考意义。

5 结 论

采用数值模拟与实验相结合的方法研究超声振动对激光熔凝熔池温度场、流场以及熔池形貌的影响,揭示超声振动作用下激光熔池内部的变化规律:

- 1) 施加超声后,在超声驱动力的作用下,加速了熔池内部熔液流动,流速增加约 72%,有利于熔池内部气体溢出,减少内部气孔缺陷,且促进热量的传输,从而使熔池温度降低,温度梯度减小,进一步均化熔池温度场;
- 2) 通过激光熔凝实验验证与数值模拟结果的对比,表明在超声场的作用下,熔池形貌发生变化,熔池宽度增加约 0.5 mm,深度减小约 0.1 mm,有利于提高粉末吸收率,增强熔池的润湿铺展行为。数值模拟结果与

实验结果相吻合,数值模拟结果具有一定的参考意义。

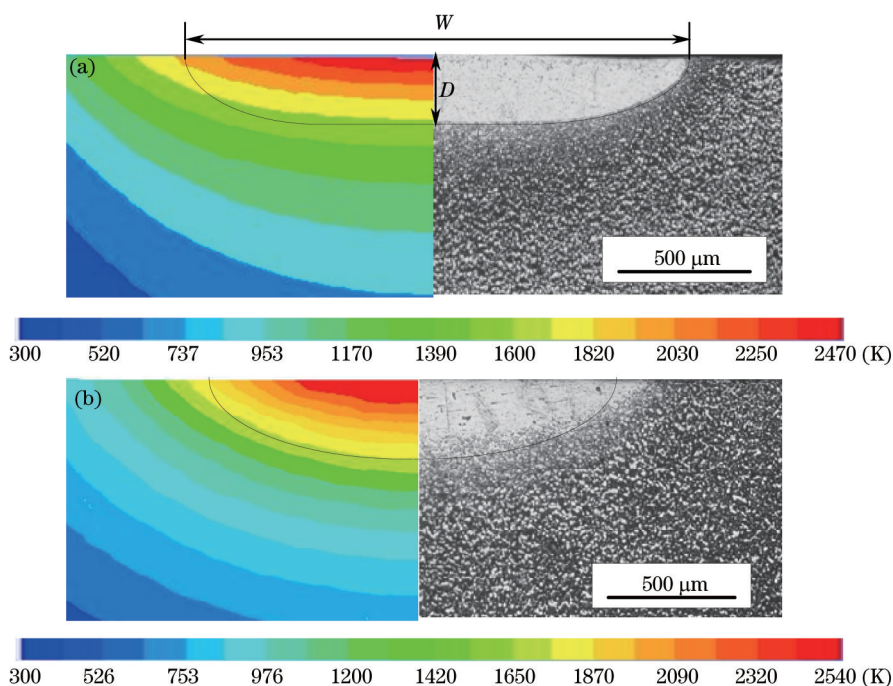


图 10 模拟熔池和实验熔池对比图。(a) 施加超声;(b) 未施加超声

Fig.10 Comparison of simulation and test of melt pool. (a) With ultrasonic; (b) without ultrasonic

参 考 文 献

- 1 Zhao Junwen, Wu Shusen, Mao Youwu, *et al.*. Investigation and application of power ultrasonic vibration in metallic materials forming[J]. Materials Review, 2008, S1(22): 189-193.
赵军文, 吴树森, 毛有武, 等. 功率超声振动在金属材料成形中的研究及应用[J]. 材料导报, 2008, S1(22): 189-193.
- 2 Luo Zhi, Luo Zhaohui, Zheng Chengkun, *et al.*. Effect of ultrasonic vibration on the microstructure of casting Al-5.0Cu-1.0Fe alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2015, 35(3): 334-336.
罗 执, 罗照辉, 郑成坤, 等. 超声波对铸造 Al-5.0Cu-1.0Fe 合金微观组织的影响[J]. 特种铸造及有色金属, 2015, 35(3): 334-336.
- 3 Fan Yangyang, Sun Qingjie, Yang Chunli, *et al.*. TIG welding of the stainless steel 304 based on the ultrasonic vibration[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2009, 30(2): 91-94.
范阳阳, 孙清洁, 杨春丽, 等. 基于超声振动的 304 不锈钢 TIG 焊接[J]. 焊接学报, 2009, 30(2): 91-94.
- 4 Huang Jinri, Xue Liqin, Mu Guanghua, *et al.*. Effect of ultrasonic casting on alloy[J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 1996, 11(4): 29-33.
黄金日, 薛立勤, 穆光华, 等. 超声波对铸造合金组织和机械性能的影响[J]. 湖北工学院学报, 1996, 11(4): 29-33.
- 5 Xu Z W, Yan J C, Zhang B Y, *et al.*. Behaviors of oxide film at the ultrasonic aided interaction interface of Zn-Al alloy and Al2O3/6061Al composites in air[J]. Material Science and Engineering A, 2006, 415(1): 80-86.
- 6 Chen Changyuan, Deng Qilin, Song Jianli, *et al.*. The influence of ultrasonic vibration on the process of laser cladding[J]. Electromachining & Mould, 2005, (3): 37-39.
陈畅源, 邓崎琳, 宋建丽, 等. 超声振动对激光熔覆过程的影响[J]. 电加工与模具, 2005, (3): 37-39.
- 7 Wang Wei, Guo Pengfei, Zhang Jianzhong, *et al.*. Ultrasonic effect on laser cladding BT20 titanium alloy process[J]. Chinese J Laser, 2013, 40(8): 0803004.
王 维, 郭鹏飞, 张建中, 等. 超声波对 BT20 钛合金激光熔覆过程的作用[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0803004.
- 8 Qin Lanyun, Wang wei, Yang Guang, *et al.*. Experimental study on ultrasonic-assisted laser metal deposition of titanium alloy[J]. Chinese J Laser, 2013, 40(1): 0103001.
钦兰云, 王 维, 杨 光, 等. 超声辅助钛合金激光沉积成形试验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0103001.
- 9 Zhu Rundong, Li Zhiyong, Li Xiaoxi, *et al.*. Simulation and experimental verification of laser cladding temperature field for Al-Cu

- alloy on AZ91D magnesium alloy surface[J]. *Surface Technology*, 2014, 43(6): 88–89.
- 朱润东,李志勇,李晓锡,等. AZ91D 镁合金表面激光熔覆 Al-Cu 合金的温度场模拟与验证[J]. *表面技术*, 2014, 43(6): 88–89.
- 10 Hao M Z, Sun Y W. A FEM model for simulating temperature field in coaxial laser cladding of Ti6Al4V alloy using an inverse modeling approach[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 64: 352–360.
- 11 Wang Wei, Liu 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 Laser*, 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.
- 12 Kumar A, Roy S. Effect of three-dimensional melt pool convection on process characteristics during laser cladding[J]. *Computational Materials Science*, 2009, 46(2): 495–506.
- 13 Toyserkani E, Khajupour A, Aorbin S F. 3-D finite element modeling of laser cladding by powder deposition: Effect of powder feed rate and travel speed on the process[J]. *J laser Appl*, 2003, 15(3): 153–161.
- 14 Mozafari A, Fathi A, Khajepour A, *et al.*. Optimal design of laser solid freeform fabrication system and real-time prediction of melt pool geometry using intelligent evolutionary algorithms[J]. *Applied Soft Computing*, 2013, 13(3): 1505–1519.
- 15 Liu Zhenxia. Modeling and Numerical Simulation on Laser Remelting and 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.
- 16 Xie Enhua, Li Xiaoqian. Acoustic streaming phenomenon during ultrasonic sonication on melt[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2009, 31(11): 1425–1429.
- 谢恩华, 李晓谦. 超声波熔体处理过程中的声流现象[J]. *北京科技大学学报*, 2009, 31(11): 1425–1429.
- 17 Zhang Ping, Ma Lin, Zhao Junjun, *et al.*. The heat source model of the numerical simulation in the laser cladding[J]. *Surface Engineering of China*, 2006, 19(5): 161–164.
- 张 平, 马 琳, 赵军军, 等. 激光熔覆数值模拟过程的热源模型[J]. *中国表面工程*, 2006, 19(5): 161–164.
- 18 Wang Wei, Liu Qi, Yang Guang, *et al.*. A numerical simulation for fluid flow and temperature field in the molten pool of laser cladding on titanium alloy[J]. *Applied Laser*, 2014, 34(5): 385–394.
- 王 维,刘 奇,杨 光,等. 钛合金激光熔凝熔池流场及温度场的数值模拟[J]. *应用激光*, 2014, 34(5): 385–394.
- 19 Zeng Dawen, Xie Changsheng. A numerical simulation for two dimensional quasi-state fluid flow field and temperature field in the molten pool of laser cladding[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1999, 35(6): 604–610.
- 曾大文, 谢长生. 激光熔覆熔池二维准稳态流场及温度场的数值模拟[J]. *金属学报*, 1999, 35(6): 604–610.

栏目编辑: 张浩佳