

电-磁复合场协同作用对激光熔覆层 凝固组织的调控研究

王 梁 宋诗英 胡 勇 姚建华

浙江工业大学激光加工技术工程研究中心, 浙江 杭州 310014

摘要 在激光熔覆过程中,对熔覆层凝固组织的传统调控是通过改变激光功率、扫描速度、光斑大小等参数来实现的,但此类调控方法只能改变熔覆层熔池的传热边界,调控效果有限。为了实现熔覆层熔池中传热传质行为的趋向性控制,有效调整凝固组织的形态、大小和方向,利用电-磁复合场的协同作用,产生方向、大小、频率可控的洛伦兹力,驱动或阻碍熔覆层熔池的对流运动,影响其凝固过程。仿真和实验有效证实了电-磁复合场协同作用对熔池所产生的影响力要远大于单一稳态磁场,是一种强有力的熔覆层组织调控手段,并有望提高通过激光组合增材制造的轮机高温部件的疲劳寿命和降低凝固组织的内部缺陷,将其推广应用于熔凝、合金化、焊接等其他激光加工领域。

关键词 激光技术;熔覆熔池;电-磁复合场;稳态磁场;调控

中图分类号 TG174.44 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.s103005

Regulation Research on Microstructure of Laser Cladding under Electric-Magnetic Synergistic Effect

Wang Liang Song Shiyong Hu Yong Yao Jianhua

*Research Center of Laser Processing Technology and Engineering,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China*

Abstract During the laser cladding process, the traditional methods of microstructure adjustment are to change the laser processing parameters, such as laser power, scanning speed and the size of laser beam. However, these methods only change the boundary of heat transfer of laser cladding layer, the regulation effect is limited. In order to achieve the directional control of heat and mass transfer behavior in laser cladding layer and regulate the shape, the size and the direction of the solidification microstructure effectively, one method using the synergistic effect of electric-magnetic field is proposed. This method can induce the Lorenz force, whose direction, magnitude and frequency are controllable. As a means of volume force, the controllable Lorenz force can drive or drag the convection of the molten pool, which affects the solidification process and realizes the adjustment of microstructure. In this research, the higher influence degree of electric-magnetic synergistic effect is verified numerically and experimentally. The application of this method can improve the fatigue life of the high temperature resistance of turbine parts and decrease the internal defects in the solidification microstructure. Meanwhile, this method can be not only applied in laser cladding process, but also used in laser remelting, laser alloying and laser welding process.

Key words laser technique; molten pool; electric-magnetic synergistic; steady magnetic field; regulation

OCIS codes 160.3900; 350.3390; 350.3850

1 引 言

激光熔覆技术是激光组合增材制造和激光三维打印技术的基础,目前已成功应用于军事、航天、石油、汽

收稿日期: 2015-01-05; **收到修改稿日期:** 2015-02-08

作者简介: 王 梁(1983—),男,博士研究生,主要从事激光加工技术方面的研究。E-mail: ddtwl@foxmail.com

导师简介: 姚建华(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光表面改性和激光制造等方面的研究。

E-mail: laser@zjut.edu.cn(通信联系人)

车、医疗等多项领域^[1-5]。但随着重大装备重要零部件使用条件的日益苛刻、使用环境的日益复杂以及材料科学的不断发展,人们对激光熔覆层组织及性能的调控能力提出了更高的期望和更多的要求。然而,由于熔覆过程熔池存在时间极短、多参数之间影响复杂,仅凭激光熔覆过程参数实现组织控制难度极高。现有的激光熔覆技术暴露出以下几个问题^[6-9]:1)激光工艺参数的调节只能改变熔覆层熔池的外部传热边界,无法控制熔池内部流体的运动方向,因此通过单纯调节激光工艺参数难以获得凝固组织和性能的趋向性;2)在激光熔覆的快速凝固条件下,由于熔池传热条件的不一致,熔覆层极易形成形态、大小和方向各异的不均匀凝固组织;3)熔覆层内的气孔和夹杂等微观缺陷往往难以及时排出而残留在熔覆组织中,严重影响熔覆层的质量。

目前已有国内外研究学者提出了利用静态或交变磁场调控激光焊接、激光熔覆、激光合金化等激光加工过程的方法。刘洪喜等^[10]利用旋转磁场辅助激光熔覆过程,通过复合旋转磁场,激光熔覆制备的涂层硬质相颗粒形态趋于细化和均匀分布,内部缺陷数量减少。郑启光等^[11]利用电磁搅拌技术辅助激光熔覆化纤割断刀,结果表明,电磁搅拌能消除气孔、裂纹等熔覆层缺陷,细化熔覆组织,均匀化碳化钨(WC)硬质相分布。Bachmann等^[12]将磁场与激光焊接相复合,研究了静态磁场作用下铝合金深熔焊的熔池动力学行为,并通过实验验证了计算结果。研究表明,随着静态磁场强度的增大,铝合金焊接熔池的对流被洛伦兹力所“缓冲”,使焊缝表面宽度减小,焊缝截面的“酒杯型”发生改变,而且焊接过程中的飞溅现象也得到了抑制。Gatzen等^[13-14]利用低频交变磁场控制铝合金激光送丝焊中熔池流体的运动,研究了溶质元素的分布和磁场频率及大小之间的关系,获得了溶质元素均匀分布的最优参数。Velde等^[15]对静态磁场作用下的激光合金化过程进行了熔池流体和传质效果的数值分析,其结果显示当静态磁场强度达到1T时,Marangoni对流中的主漩涡和次生漩涡被明显抑制,合金化熔池表面的对流速度降低,从而使合金化溶质元素都集中在近表浅层。但单一磁场对熔池的影响力有限且调控形式单一。本文提出一种利用电-磁复合场协同作用对激光熔覆凝固组织进行调控的方法。该方法将外加电场和磁场同时作用于激光熔覆熔池中,产生方向、大小、频率灵活可控的洛伦兹力,驱动或阻碍熔覆层熔池的对流运动,影响其凝固过程,实现对其凝固组织的调控目的。通过仿真和实验手段,揭示电-磁复合场对激光熔覆熔池温度场和流场的影响规律,获得具有趋向性生长的熔覆层组织。

2 实验方法及材料

电-磁复合场协同激光熔覆实验的装置包括:2 kW 半导体激光器,6 轴机器人,超景深三维数字显微镜,倒置式金相显微镜,高强永磁铁及2 V(500 Ah)低压大容量蓄电池组。实验装置图按照图1所示,将永磁铁放置在装满冷却介质的顺磁性容器内,并将其放置在试样两侧,为熔池区域提供外加磁场;在熔覆的同时,将直流大电流通入试样中,使其在熔池内部产生稳态电场。将经过电-磁复合场协同激光熔覆后的试样在超景深三维数字显微镜下进行表面宏观形貌的观察和轮廓高度的测量,然后将试样沿垂直于扫描方向切开,进行横截面的组织分析。金相试样的腐蚀剂为盐酸氯化铁水溶液,腐蚀时间为4~6 s。

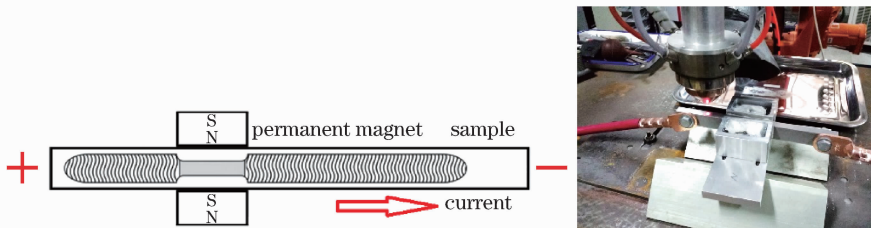


图1 电-磁复合场激光熔覆实验装置。(a)实验原理图;(b)实验装置

Fig.1 Experimental setup under electric-magnetic synergistic effect.

(a) Schematic diagram of the experiment; (b) experimental setup

研究所选基体材料为Q345低合金钢,基体尺寸为200 mm×10 mm×20 mm,熔覆材料为Ni25合金。激光功率为1.2~1.6 kW,送粉速率为10 g/min,扫描速度为4~10 mm/s,试样内部磁场强度为0.2~0.4 T,电流密度为5 A/mm²。

3 仿真模型及结果

3.1 仿真模型的建立

在激光熔覆过程中,虽然可通过热成像仪观察熔池及试样表面的温度分布,但熔池内部的流体对流和传热状态难以用实验仪器进行观察和分析^[16],特别是在熔池区域内还附加了外加电场和磁场的条件下。为了分析电-磁复合场对熔池的影响作用,利用数值仿真的办法,揭示熔池内部传热传质行为的变化规律。

洛伦兹力和欧姆定律(微分形式)的公式分别为

$$\mathbf{F}_L = \mathbf{j} \times \mathbf{B}, \quad (1)$$

$$\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}), \quad (2)$$

式中 \mathbf{F}_L 为洛伦兹力, \mathbf{j} 为电流密度矢量, \mathbf{B} 为磁场强度矢量, σ 为电导率, \mathbf{E} 为电场强度, \mathbf{u} 为熔池内部流速。

在单纯磁场辅助激光熔覆条件下,由(1)式和(2)式可知熔池中产生的洛伦兹力是由熔池流动产生的感应电流在外磁场作用下形成的。由于熔池流速和外磁场强度的限制,由感应电流引起的洛伦兹力相对较小。在无外加电场的条件下($\mathbf{E}=0$),若磁场方向不变(静态磁场),则洛伦兹力的方向与熔池的流动方向相反,熔池的流动受到阻力,故无法控制熔池对流的趋向性。

在单纯静磁场作用的基础上,引入了外加电场 \mathbf{E} ,利用电-磁复合场的协同作用产生的洛伦兹力对熔池流体进行强有力的控制。由于 \mathbf{E} 为矢量, $\sigma \cdot \mathbf{E}$ 在宏观上的表现即为电流密度,因此可以通过对熔池通入不同方向的电流,获得不同方向的洛伦兹力(宏观上也称安培力)。因此 \mathbf{F}_L 作为熔池所受到的体积力,参与熔池流体动量方程的计算。同时,考虑熔池中浮力和固液相变的作用,在流体动量方程中添加的源项包含了洛伦兹力项、热浮力项、Darcy 项。为了兼顾数值计算结果的可靠性和计算效率,相变潜热、试样与外界环境的对流换热、与温度相关的表面张力系数以及与温度相关的材料导热系数都在仿真模型中进行了精确设定;而激光熔覆送粉过程、熔覆层表面形貌以及辐射散热等因素则暂不在仿真模型中体现。

由于仿真计算考虑了多个物理场协同作用下的激光熔覆过程,建立了包含多个非线性方程的偏微分方程组,采用多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 4.4 对该过程进行求解。

3.2 仿真结果

图 2 为在单纯静磁场和电-磁复合场作用下,激光所致熔池的流场分布图,其中激光从左至右扫描,绿色线框内为熔池区域。由图可见,在单纯静磁场作用下[见图 2(b)],熔池内部流速被整体抑制,熔池大小也有所减小。这是因为在静磁场作用下,熔池的流动方向与由感应电流产生的洛伦兹力的方向相反,故熔池的运动受到抑制。在单纯静磁场作用的基础上,在熔池区域加入轴向的稳态电场 \mathbf{E} ,由(1)式和(2)式可知电-磁复合场所形成的洛伦兹力的方向为恒稳向上。图 2(c)为洛伦兹力恒稳向上时熔池的流场分布状态。此时,熔池区域呈“失重”状态,熔池内高流速区域都趋于熔池近表层,且熔池的深度有所降低。图 2(d)为洛伦兹力恒稳向下时熔池流场的分布状态。此时,熔池区域呈“超重”状态,底部流速增加,熔池前端流速减小,流场的整体分布发生了较大变化。上述仿真结果说明电-磁复合场对激光所致熔池的调控能力要远大于单纯静磁场的影响。

4 实验结果与讨论

4.1 电-磁复合场协同作用对激光熔覆层高度的影响

利用电-磁复合场发生装置,在熔池中产生垂直于试样表面向上的洛伦兹力。由于该洛伦兹力为体积力,而重力也是体积力,但两者方向相反,此时可认为熔池处于失重状态。图 3 为在磁场强度为 0.3 T,电流密度为 5 A/mm² 的复合场条件下,激光熔覆层高度的分布结果。所测试熔覆层长度约为 40 mm,右侧虚线框内为电-磁复合场作用区,虚线框外为稳态电场。由图可见,在无电-磁复合场作用区,熔覆层高度约为 300 μm,而在电-磁复合场作用区,熔覆层高度逐渐上升,稳定在 500 μm 左右,熔覆层高度上升了约 40%。同时,在电-磁复合场作用区,熔覆层的宽度有所减小,熔覆层形貌整体呈逐渐隆起的趋势。在该类洛伦兹力与重力方向相反的复合场作用下,由于部分重力作用与洛伦兹力抵消,熔池中浮力的作用被抑制,进一步突出表面张力在熔池动力学行为中的作用,使得熔池表面的曲率增加。可以预测,电-磁复合场在熔池中提供

方向向下的洛伦兹力时,熔池将处于超重状态,熔覆层形状将向扁平化发展。

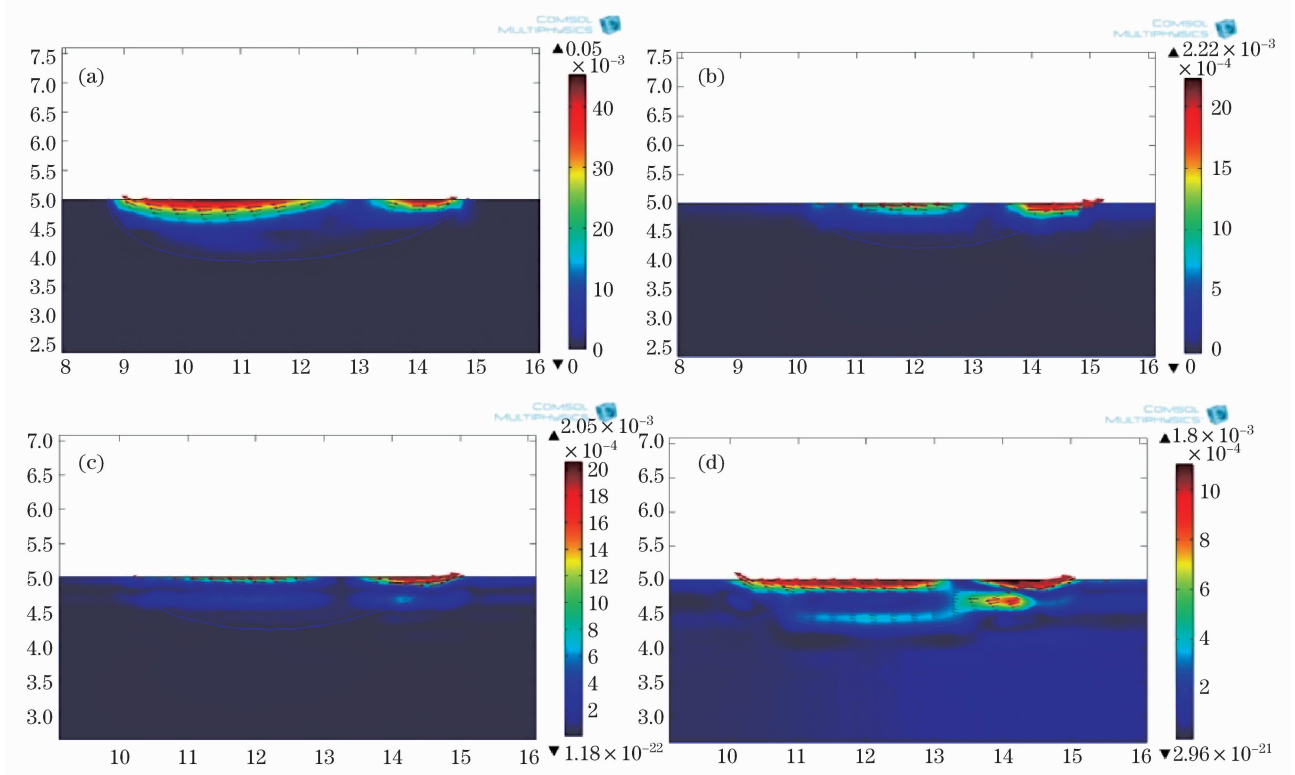


图 2 不同条件下激光熔覆熔池的流场分布。(a)无电磁场;(b)单纯静磁场;
(c)电-磁复合场(洛伦兹力方向朝上);(d)电-磁复合场(洛伦兹力方向朝下)

Fig. 2 Fluid velocity distributions of laser cladding molten pool under different conditions.

(a) No electric-magnetic field; (b) only magnetic field; (c) electric-magnetic field (Lorenz force up);
(d) electric-magnetic field (Lorenz force down)

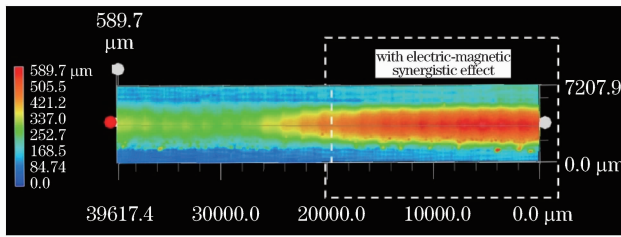


图 3 熔覆层高度分布结果

Fig. 3 Coloring height scanning result of the cladding surface

4.2 洛伦兹力方向垂直于基体表面时的激光熔覆层组织

利用电-磁复合场协同激光熔覆装置,在熔覆层熔池内部产生垂直于试样表面恒稳向上的洛伦兹力,其对熔覆层底部凝固组织的影响(横截面)如图 4 所示,从图中可以看出电-磁复合场协同作用可影响熔覆层熔池的原有对流形式。在复合场协同作用下[见图 4(a)],熔覆层近基体界面上有大片垂直于界面生长的柱状晶,且柱状晶的长度较长;在单一磁场作用下[见图 4(b)],熔覆层近基体界面的柱状晶的长度减小,分布数量减少,其余部位仍为均匀的等轴晶;无复合场协同作用下[见图 4(c)],熔覆层近基体界面的柱状晶分布与图 4(b)中的类似,其余大部分区域为等轴晶。该现象说明电-磁复合场对熔池的影响作用要远大于单一磁场的影响作用,这是因为复合场的协同作用使得在熔池内部形成垂直于试样表面恒稳向上的洛伦兹力,熔池内高流速区域都趋于熔池近表层,无法将高温的熔体带入到熔池底部,从而提高了熔池内部的温度梯度。同时,处于较低温度的基体为熔覆层凝固过程中的主要导热边界,从而在近基体界面上形成大片定向生长的柱状晶。

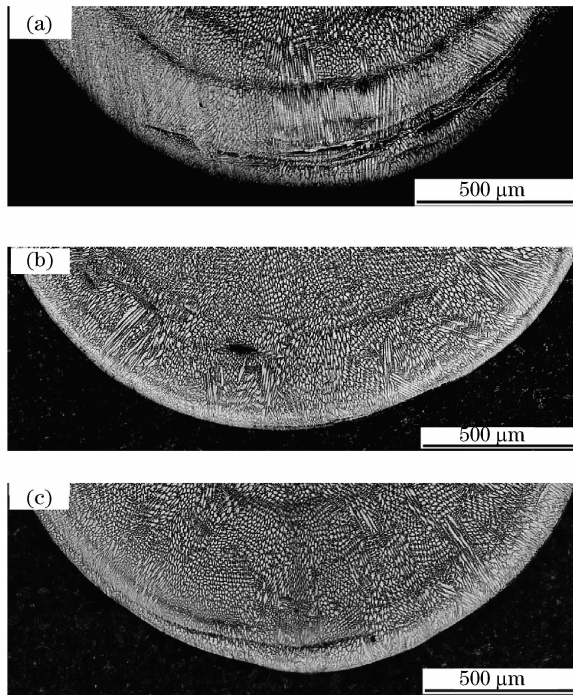


图 4 洛伦兹力方向垂直于基体表面时的激光熔覆层组织。(a)复合场协同作用;(b)单一磁场作用;(c)无复合场协同作用
Fig. 4 Microstructures of the laser cladding layer when the Lorenz force is perpendicular to the substrate surface.

(a) Electric-magnetic synergistic effect; (b) only magnetic field; (c) no electric-magnetic field

4.3 洛伦兹力方向垂直于试样纵截面时的激光熔覆层组织

在对熔覆层熔池内部产生垂直于试样纵截面的恒稳洛伦兹力后,熔覆层表面的等轴晶形态发生了一定的变化。图 5 为处于复合场协同区域中的熔覆层近表层横截面组织。图 6(a)为处于复合场协同区域中的平行于试样表面的熔覆层表层组织,图 6(b)为无协同作用的熔覆层表层组织。结合图 5 的熔覆层横截面组织,可以判断图 6(a)和(b)中的组织虽都为等轴晶,但在熔池流体受到定向恒稳洛伦兹力的驱动作用下,处于电-磁复合场协同作用区域的等轴晶的生长方向出现趋向性,其中某一侧的枝晶生长较快,而其他方向的枝晶无明显变化;在无协同作用下的组织则为无方向性的等轴晶,其各向枝晶的长度基本相等。这是因为在电-磁复合场的作用下,熔池流场在定向洛伦兹力驱动下发生改变,使得迎流侧和背流侧枝晶尖端的成分温度不等,造成迎流侧的枝晶生长较快,背流侧的枝晶生长较慢^[17-19]。等轴晶形态所发生的变化证实了复合场协同作用对熔池流体产生的方向性驱动。

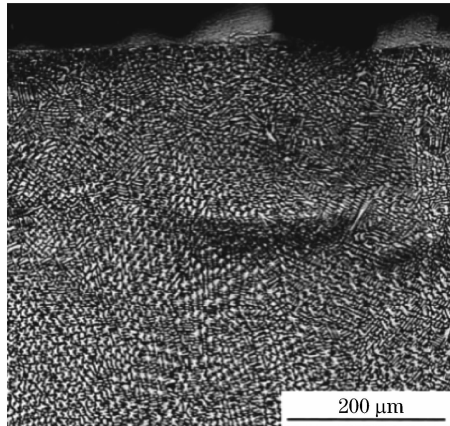


图 5 洛伦兹力方向垂直于试样纵截面时的激光熔覆层近表层横截面组织

Fig. 5 Near surface microstructure of the laser cladding layer when the Lorenz force is perpendicular to the longitudinal section of the specimen

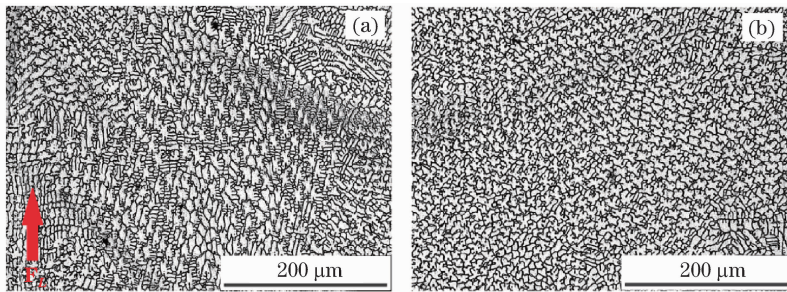


图 6 平行于基体表面的熔覆层表层组织。(a)复合场协同作用;(b)无复合场协同作用

Fig. 6 Near surface microstructures of the laser cladding layer paralleling to the substrate surface.

(a) With electric-magnetic synergistic effect; (b) without electric-magnetic synergistic effect

5 结 论

1) 由于外部电场和外部磁场的同时加入,激光熔覆熔池内形成了电-磁复合场的协同作用,可在熔池内部形成大小、方向和频率灵活可调的洛伦兹力,其对熔池流场的调控能力要高于单纯静磁场的影响能力。仿真及实验结果表明,当由电-磁复合场所形成的洛伦兹力恒稳向上时,熔池内高流速区域都趋于熔池近表层,且熔池的深度有所降低,同时熔覆层的高度有所上升;

2) 当电-磁复合场所形成的洛伦兹力方向垂直于基体表面向上时,熔池底部的对流呈由基体向熔池表面趋向性流动,熔池底部的过冷区扩大,从而在近基体界面上形成柱状晶的数量和长度都要大于无电磁场作用场合和仅静态磁场作用场合;

3) 当电-磁复合场所形成的洛伦兹力方向垂直于试样纵截面时,熔覆层熔池表层流体受到定向恒稳洛伦兹力的驱动,使得熔覆层表层等轴晶的生长方向出现趋向性,其迎流侧的枝晶生长较快,背流侧的枝晶生长较慢。

参 考 文 献

- Shepeleva L, Medres B, Kaplan W D, *et al.*. Laser cladding of turbine blades[J]. Surf Coat Technol, 2000, 125(1): 45-48.
- Xu Xiangyang, Chen Guangnan, Liu wenjin. Advanced direct laser fabrication technology and modern aeronautic equipment repair[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2004, 3: 28-30.
徐向阳, 陈光南, 刘文今. 先进的激光直接制造技术与现代航空装备维修[J]. 航空维修与工程, 2004, 3: 28-30.
- Flanagan A, O'connor T. Medical device coating by laser cladding: US, 8221822 [P]. 2012-7-17.
- Baldrige T, Poling G, Foroozmehr E, *et al.*. Laser cladding of Inconel 690 on Inconel 600 superalloy for corrosion protection in nuclear applications[J]. Opt Laser Eng, 2013, 51(2): 180-184.
- Wang Huaming. Research progress on laser surface modifications of metallic materials and laser rapid forming of high performance metallic components[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2002, 23(5): 473-478.
王华明. 金属材料激光表面改性 with 高性能金属零件激光快速成形技术研究进展[J]. 航空学报, 2002, 23(5): 473-478.
- Wang Xinlin, Qi Haibin, Shi Shihong. Study on crack control of layer during laser cladding sealing surface of petrochemical valves[J]. Laser Technology, 2002, 26(5): 359-363.
王新林, 漆海滨, 石世宏. 激光熔覆石化阀门密封面熔覆层裂纹控制的研究[J]. 激光技术, 2002, 26(5): 359-363.
- Alam M M, Kaplan A F H, Tuominen J, *et al.*. Analysis of the stress raising action of flaws in laser clad deposits[J]. Mater Des, 2013, 46: 328-337.
- Tobar M J, Alvarez C, Amado J M, *et al.*. Morphology and characterization of laser clad composite NiCrBSi-WC coatings on stainless steel [J]. Surf Coat Technol, 2006, 200(22): 6313-6317.
- Wang Hongyu, Zuo Dunwen, Lu Yingyan, *et al.*. Crack causes and control of MCrAlY coating of Ni-base alloy laser cladding[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2008, 28(6): 57-60.
王宏宇, 左敦稳, 陆英艳, 等. 镍基合金激光熔覆 MCrAlY 涂层基体裂纹的成因与控制 [J]. 航空材料学报, 2008, 28(6): 57-60.
- Liu Hongxi, Ji Shengwei, Jiang Yehua. 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.
- Xu Hua, Zheng Qiguang, Ding Zhouhua, *et al.*. Study on laser cladding hard alloy with electro magnetic stirring[J]. Laser Technology,

- 2005, 29(5): 449–451.
- 许 华, 郑启光, 丁周华, 等. 电磁搅拌辅助激光熔覆硬质合金的研究[J]. 激光技术, 2005, 29(5): 449–451.
- 12 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]. Int J Heat Mass Transfer, 2013, 60: 309–321.
- 13 Gatzen M, Tang Z. CFD-based model for melt flow in laser beam welding of aluminium with coaxial magnetic field[J]. Phys Pro, 2010, 5: 317–326.
- 14 Gatzen M, Tang Z, Vollertsen F, *et al.*. X-ray investigation of melt flow behavior under magnetic stirring regime in laser beam welding of aluminum[J]. J Laser App, 2011, 23(3): 032002.
- 15 Velde O, Gritzki R, Grundmann R. Numerical investigations of Lorentz force influenced Marangoni convection relevant to aluminum surface alloying[J]. Int J Heat Mass Transfer, 2001, 44(14): 2751–2762.
- 16 Cheung N, Larosa M A, Osório W R R, *et al.*. Numerical Simulation and Experimental Analysis of Laser Surface Remelting of AISI 304 Stainless Steel Samples[J]. Mater Sci, 2010, 636: 1119–1124.
- 17 Lu Y, Beckermann C, Ramirez J C. Three-dimensional phase-field simulations of the effect of convection on free dendritic growth[J]. J Cryst Growth, 2005, 280(1): 320–334.
- 18 Asta M, Beckermann C, Karma A, *et al.*. Solidification microstructures and solid-state parallels: Recent developments, future directions [J]. Acta Mater, 2009, 57(4): 941–971.
- 19 Li D, Li R, Zhang P. A cellular automaton technique for modelling of a binary dendritic growth with convection[J]. Appl Meth Model, 2007, 31(6): 971–982.

栏目编辑: 张 雁