

电磁搅拌辅助激光沉积成形钛合金试验研究

钦兰云 杨 光 卞宏友 王 维 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 为了研究磁场搅拌对激光沉积钛合金组织和性能的影响,将自行设计的旋转磁场引入到激光成形系统中,并进行了钛合金沉积成形实验。考察了不同磁场参数下试样的宏观形貌和微观组织,测量了激光沉积层的显微硬度。结果显示:磁场引起激光熔池的强烈对流,使单道沉积层的表面呈现下凹状;且在一定范围内,磁场搅拌速率越快,沉积层 α 片层组织越细密,硬度越大,可达 440 HV_{0.1}。表明旋转磁场加剧了熔池的对流,从而加快了其冷却速度,细化了沉积层内的片层组织,并提高沉积层的力学性能。

关键词 激光技术; 钛合金; 电磁搅拌; 激光沉积成形; 微观组织

中图分类号 TG665 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0303004

Experimental Study on Electromagnetic Stirring Assisted Laser Metal Deposition Titanium Alloy

Qin Lanyun Yang Guang Bian Hongyou Wang Wei Ren Yuhang

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

Abstract To study the effects of magnetic field stirring on the laser metal deposition (LMD) parts, a device of rotating magnetic field is designed and introduced to the LMD processes of titanium alloy. The microstructure of the laser deposition layers is characterized and the deposition layers' microhardness is tested. The results show that the convection in the laser melting pool caused by magnetic field makes the top cross-section of single pass concave-shaped. With the higher rotating speed of magnetic field, the α lamellar is finer, and the micro-hardness of deposition layers is much harder which can be 440 HV_{0.1}. It indicates that rotating magnetic field intensifies the convection in the pool and increases its cooling speed, which leads to finer microstructures and better mechanical property.

Key words laser technique; titanium alloy; electromagnetic stirring; laser metal deposition; microstructure

OCIS codes 350.3850; 000.2170; 000.2190; 000.3110

1 引 言

目前国内外学者对于钛合金的激光沉积成形/修复已经进行了一些研究工作^[1-6],但在激光沉积钛合金的过程中,材料的熔化、凝固和冷却都是在极快的条件下进行的,沉积成形过程中物理、化学、力学和材料冶金现象极其复杂,这使得成形工件容易出现宏观变形开裂和气孔、微裂纹等内部质量缺陷,且组织为较粗大的柱状晶。而通常晶粒的大小

对金属的机械性能有很大的影响,在常温下,金属的晶粒越细小,则强度和硬度越高,同时塑性和韧性也越好。研究表明^[6-7]钛合金的组织对其性能影响很大,其特征组织(晶粒、片层集束、片层等)尺寸小,材料具有优越的力学性能。目前减少钛合金激光沉积制造熔合不良、气孔、裂纹及变形,调控组织的方法主要有:改变沉积工艺^[8]、对激光熔池施加外场搅拌^[9-10]、热处理^[11]等。其中电磁搅拌在焊接、激光

收稿日期: 2013-08-20; **收到修改稿日期**: 2013-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(51305280, 51375316)、辽宁省教育厅科学技术研究项目(L2013077)、国防基础科研项目(A3520133001)

作者简介: 钦兰云(1977—),女,博士研究生,讲师,主要从事激光沉积成形/修复方面的研究。

E-mail: qinly@sau.edu.cn

导师简介: 王 维(1957—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光沉积成形、激光再制造技术等方面的研究。

E-mail: wangw1116@sau.edu.cn

熔覆等领域已成功应用^[12-13]。德国的 Kern 等^[14]首先通过外加平行磁场,利用磁流体力来改变激光焊接熔池的流动状态,试验中发现,外加磁场时,熔池中的磁流体力可使激光焊接熔池由紊流向层流转变,改变熔池中流体的速度分布,抑制驼峰现象,提高焊接速度。许华^[15]将电磁搅拌技术引入激光熔覆硬质合金的研究中,发现电磁搅拌对熔覆层的微观组织有一定的影响,电磁搅拌能细化熔覆层中的 WC 组织,并使其分布均匀化,同时电磁搅拌能明显细化熔覆层过渡区中的树枝晶组织,并对熔覆层中的裂纹和气孔有一定的抑制作用,改善熔覆质量。Vollertsen 等^[16]等采用交变电磁场辅助 CO₂ 激光焊接铝合金,研究了磁场对熔池电磁搅拌作用的机理,结果表明,磁场强度大小对磁搅拌作用的影响明显。余本海等^[17]研究了电磁搅拌对激光熔覆 WC-Co 基合金涂层的组织结构和硬度的影响。余圣甫等^[18-19]将旋转磁场置于工件背面,在熔池中产生的电磁力使液体金属随旋转磁场进行旋转运动,加强熔池与母材及周围环境的热交换,降低凝固前沿的温度梯度,使凝固前沿的成分过冷度增大,抑制柱状晶的产生,细化焊缝金属晶粒。纪升伟^[20]对旋转磁场辅助激光熔覆技术的研究表明在磁场作用下,熔覆涂层晶粒组织被细化且分布均匀致密。但是,钛合金激光熔池内“磁-电-力”的电磁现象与熔池内流体相互作用机制更为复杂,旋转磁场作用下的钛合金组织性能变化尚未见报道。

因此本文将电磁搅拌技术引入到 TA15 钛合金激光沉积制造试验中,以期通过调控外加磁场旋转速度来控制激光沉积层组织,为精确控制钛合金激光沉积组织和综合力学性能提供新的思路。

2 试 验

试验采用的磁场辅助激光沉积成形系统如图 1 所示,由激光器及光路传输系统、数控工作台、惰性

气氛加工室、粉末输送系统、电磁搅拌装置五部分组成。激光器为最大输出功率可达 5 kW 的 CO₂ 激光器,保护气体与载粉气体均使用高纯氩气,试验前对加工室抽真空,充氩气,保证氧气的含量(体积分数)在 1×10^{-4} 以下。试验采用的激光工艺参数:激光功率为 1.2 kW,扫描速度为 3 mm/s,Z 向单层行程为 0.2 mm。自行研制的电磁搅拌装置采用两对永磁铁磁极,每对磁极间径向距离可调,由步进电机带动转盘旋转以实现磁场的旋转,沉积试样的基板固定在磁极中间的工作台上。试验中为了研究磁场的搅拌速率对激光沉积层的影响,通过调节步进电机的脉冲频率使磁场旋转速度分别为 120、180、240、300 rad/s,而磁场强度固定为 50 mT。

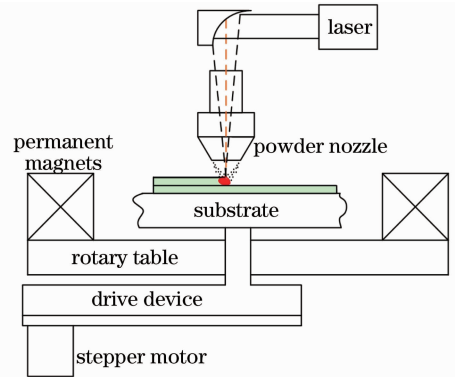


图 1 磁场辅助激光沉积成形装置示意图
Fig. 1 Schematic of laser metal deposition with magnetic fields

试验所用的基板为 TA15 合金,用砂纸打磨掉基材表面的氧化皮,用丙酮擦拭干净,单道沉积试样的长度为 15 mm。选用真空等离子旋转电极球形粉末 TA15 作为沉积材料,其粒度为 44~149 μm,粉末成分见表 1。粉末和基板经真空烘干处理后备用。采用 OLYMPUS 光学显微镜观测激光沉积层组织结构及形貌。借助 FM-700 显微硬度计测定沉积试件显微硬度,施加载荷为 0.98 N,加载保持时间 15 s。

表 1 TA15 钛合金粉末成分(质量分数,%)

Table 1 Composition of TA15 titanium alloy powder (mass fraction, %)

| Element | H | O | N | C | Si | Fe | Al | Zr | Mo | V | Ti |
|---------|-------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| Percent | 0.005 | 0.11 | 0.014 | 0.012 | 0.033 | 0.13 | 6.53 | 1.78 | 1.53 | 1.47 | Bal. |

3 结果与分析

3.1 激光沉积试样的宏观形貌

图 2 为激光沉积工艺参数相同,施加不同磁场参

数下激光沉积单道 TA15 合金试样表面形貌。施加电磁搅拌以前单道沉积试样表面宏观形貌是圆弧状凸起,这是由于激光熔池存在比较大的表面张力所

致。而施加磁场作用后,沉积层顶层呈现弯月状下凹,这是因为电磁搅拌过程即为电磁场变化和流体流动相互作用的过程,熔池流体除受到一般的流体的重力、压强、粘滞力等作用外,电磁力也起着很大的作用。磁场的洛伦兹力使激光熔池产生了强迫对流,使熔池的熔体在强大的离心力的作用下,克服了表面张力和粘滞力的作用,形成了中心下凹、四周凸起的状态。而由于同轴送粉的发散性,会使熔池的四周捕获一些粉末,从而形成图示的宏观形貌。这也说明了如果磁场引起的对流过大,会引起熔池的整体对流,使单道激光沉积的表层质量变差。随着沉积层的增高,层内的温度梯度变小,激光熔池变宽,搅拌的作用使熔池粘接的粉末都处在熔池的四周,而CO₂激光器光斑能量中心高、边缘低的特点,导致被熔池边缘捕获的粉末更不容易被熔化。在多层多道加工过程中可采用适当加大道间搭接率或者同时提高激光能量密度的方法得到相对平整的表面。同时在试验中应采取适当的磁场参数将熔池的整体对流变为熔池内

的多微区对流,从而使表面宏观上比较平整。

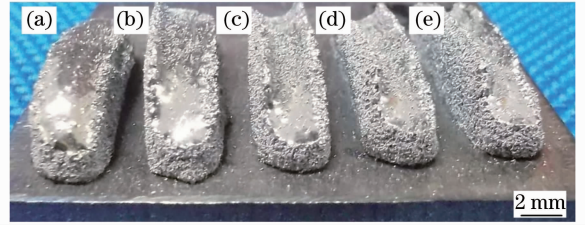


图2 不同磁场参数下激光沉积单道试样的形貌。(a) 无磁场作用;(b) 50 mT, 120 rad/s;(c) 50 mT, 180 rad/s;(d) 50 mT, 240 rad/s;(e) 50 mT, 300 rad/s

Fig. 2 Macroscopic appearances of single pass deposition layers. (a) Without magnetic field; (b) 50 mT, 120 rad/s; (c) 50 mT, 180 rad/s; (d) 50 mT, 240 rad/s; (e) 50 mT, 300 rad/s

图3为施加磁场前后激光沉积钛合金试样的宏观组织照片,清晰可见组织内粗大的外延生长特征的初生β柱状晶。可见,磁场的搅拌引起的熔体对流没有打断初生β晶粒。

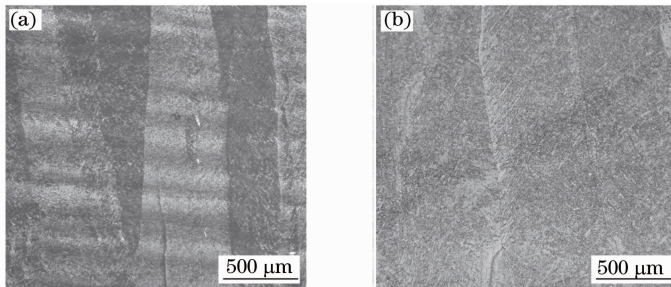


图3 激光沉积层的柱状晶组织。(a) 无磁场作用;(b) 50 mT, 240 rad/s

Fig. 3 Macrostructure of β columnar grain in laser metal deposition sample. (a) Without magnetic field; (b) 50 mT, 240 rad/s

3.2 磁场搅拌速度对激光沉积层微观组织的影响

图4所示为磁场强度为50 mT,不同搅拌速率下

垂直于激光扫描方向的沉积层截面显微组织图。由图4(a)可见,TA 15 钛合金激光沉积层具有典型的片

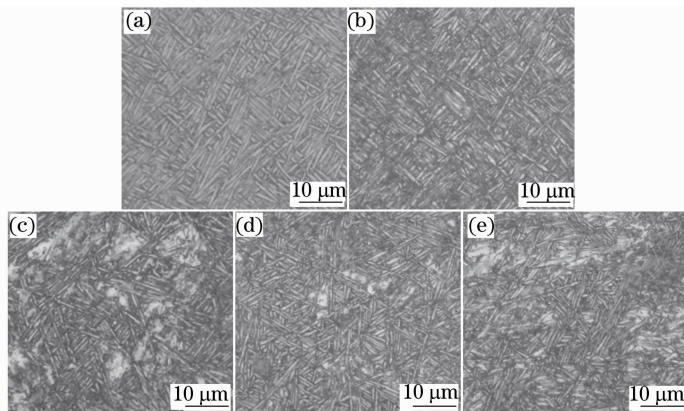


图4 不同搅拌速率下的沉积层显微组织。(a) 无磁场作用;(b) 50 mT, 120 rad/s;(c) 50 mT, 180 rad/s;(d) 50 mT, 240 rad/s;(e) 50 mT, 300 rad/s

Fig. 4 Microstructures of laser deposition layers under different stirring speeds. (a) Without magnetic field; (b) 50 mT, 120 rad/s;(c) 50 mT, 180 rad/s;(d) 50 mT, 240 rad/s;(e) 50 mT, 300 rad/s

状 β 转变近 α 钛合金网篮状组织; 图 4(b) 中片状 α 组织变得细小; 而图 4(c)~(e) 中 α/β 亚晶界破碎形成网篮组织和初生 α 相, 片层组织分布细密。使用金相定量分析方法得出片层组织中 α 片层长度与片层厚度如表 2 所示。可以发现随着搅拌速率的提高, 熔池

内熔体对流加剧, 对熔池熔体的搅拌也加速进行, 从而使熔池温度场和溶质分布趋向均匀, 加快了熔池冷却速度, 沉积层组织由粗大片层组织向细小片层组织转变, α 片层长度减小, 厚度变化不大, 因此 α 片层直径比明显减小, 片层组织变得细密均匀。

表 2 不同磁场搅拌速率下沉积层 α 片层组织参数

Table 2 Size of the α lamellar under different stirring speeds

| α lamellar size | Electromagnetic stirring speed / (rad/s) | | | | |
|---------------------------|------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | 0 | 120 | 180 | 240 | 300 |
| Length / μm | 6.2~9.8 | 4.1~6.8 | 3.6~5.8 | 3.4~4.8 | 2.9~4.6 |
| Thickness / μm | About 0.5 | 0.4~0.5 | 0.4~0.5 | 0.4~0.5 | 0.4~0.5 |

图 5 是施加电磁搅拌作用前后激光沉积区扫描电镜(SEM)照片, 清晰可见粗大柱状晶内部的 α/β 片层组织。施加磁场强度为 50 mT, 磁场旋转速度

为 240 rad/s 时, 片层组织更加细密, 且 α 片的长度明显减少。

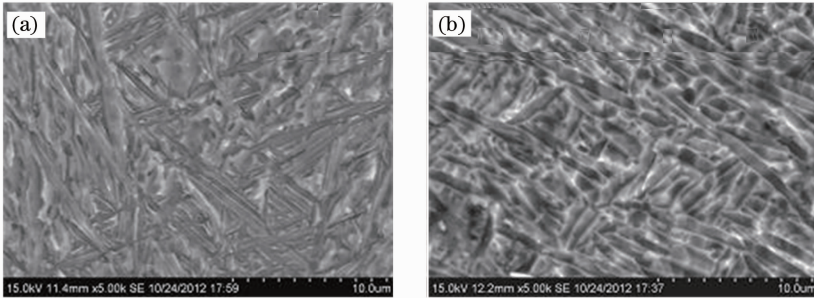


图 5 激光沉积区 SEM 照片。(a) 无磁场作用; (b) 50 mT, 240 rad/s

Fig. 5 SEM photos of laser deposition layers with different magnetic fields. (a) Without magnetic field; (b) 50 mT, 240 rad/s

3.3 激光沉积成形试样的显微硬度

图 6 为不同磁场速率下激光沉积层的显微硬度分布曲线(横坐标为至基材距离)。可见施加磁场搅拌作用后, 激光沉积层的硬度有所增加, 且随着搅拌速率的提高, 硬度也稍有提高。这是因为随着磁场搅拌速率的增大, 加剧了激光熔池的对流, 对流作用不仅使熔池内的温度场趋于均匀, 同时加速了熔体和空气的热交换以及熔体与基底之间的热传导, 从而加快

了熔体的冷却速度, 冷却速度加快使沉积层内片层组织细化, 组织细化致使其显微硬度提高。当磁场强度为 50 mT, 搅拌速率为 240 rad/s 时, 激光沉积层硬度值波动较小, 平均显微硬度约为 440 HV_{0.1}。

3.4 旋转磁场对激光沉积组织影响机理

根据磁流体动力学原理, 当导电流体在磁场中运动时, 在流体内部产生电流, 感应电流与磁场相互作用产生电磁力, 电磁力将驱动流体流动, 对熔池产生电磁搅拌作用, 电磁搅拌作用将加强熔池内液体金属的传热和对流, 使熔池内的温度场和溶质均匀化^[14, 21-22]。因此磁场对激光沉积层组织和力学性能的影响, 主要是通过磁场对激光熔池的搅拌而产生的。旋转磁场产生的电磁搅拌使熔池产生强烈的混合对流, 使熔池的过冷度加大, 冷却速度加快, 进而使沉积层凝固时的片层组织尺寸减小, 而片层组织的细化使沉积层的显微硬度有所提高。

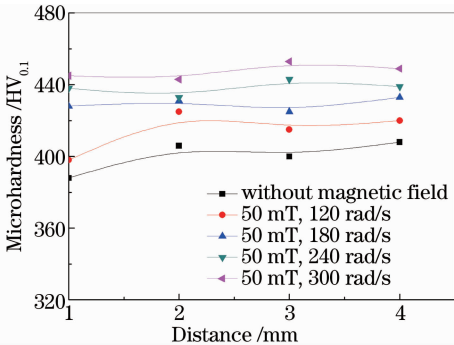


图 6 不同磁场速率下激光沉积层显微硬度值分布

Fig. 6 Microhardness distributions of deposition layers under different magnetic field speeds

4 结 论

1) 采用相同激光工艺参数, 在磁场洛伦兹力作

用下,激光沉积单道 TA15 钛合金的截面形貌呈现弯月面;磁场施加前后,激光沉积组织均为贯穿多个沉积层的粗大原始 β 柱状晶,表明电磁搅拌对激光沉积的外延生长组织特征没有影响。

2) 当磁场强度固定时,提高磁场的搅拌速率可促使 TA15 激光沉积层网篮组织中 α 片层长径比减小,片层组织排列紧密,使沉积层显微硬度得到提高,其平均显微硬度约为 440 HV_{0.1}。

3) 旋转磁场的搅拌加剧了熔池内的混合对流,使熔池的冷却速度加快,这是沉积层片层组织细化和显微硬度提高的主要原因。

参 考 文 献

- Xue Lei, Chen Jing, Zhang Fengying, *et al.*. Laser rapid repair of the aircraft components of titanium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2006, 35(11): 1817-1821.
薛蕾,陈静,张凤英,等.飞机用钛合金零件的激光快速修复[J].*稀有金属材料与工程*, 2006, 35(11): 1817-1821.
- Bian Hongyou, Yang Guang, Li Ying, *et al.*. Grouping parallel scan path generating method of metal laser deposition shaping[J]. *J Mechanical Engineering*, 2013, 49(11): 142-147.
卞宏友,杨光,李英,等.金属激光沉积成形分组平行扫描路径生成方法[J].*机械工程学报*, 2013, 49(11): 142-147.
- Xi Mingzhe, Gao Shiyou. Heat-treated microstructures and mechanical properties of TA15 titanium alloy fabricated by laser rapid forming[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0103007.
席明哲,高士友.激光快速成形 TA15 钛合金热处理组织及其力学性能[J].*中国激光*, 2012, 39(1): 0103007.
- Jiang Hua, Tang Haibo, Fang Yanli, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of solidified ultra-fine columnar grain Ni-based superalloy DZ408 by laser melting deposition manufacturing [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0203004.
姜华,汤海波,方艳丽,等.激光熔化沉积 DZ408 镍基高温合金微细柱晶显微组织及性能[J].*中国激光*, 2012, 39(2): 0203004.
- Dong Ling, Yang Xichen, Zhang Haiming, *et al.*. Path generation for repairing damaged parts of free form surfaces in laser remanufacturing [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(7): 0703007.
董玲,杨洗陈,张海明,等.自由曲面破损零件激光再制造修复路径生成[J].*中国激光*, 2012, 39(7): 0703007.
- He Ruijun, Wang Huaming. Microstructure features of laser deposited Ti-6Al-2Zr-Mo-V alloy [J]. *J Aeronautical Materials*, 2009, 29(6): 18-22.
贺瑞军,王华明.激光熔化沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 钛合金组织特征研究[J].*航空材料学报*, 2009, 29(6): 18-22.
- Wang Xiangming, Liu Wenting. Design and Application of Aircraft Structure of Titanium Alloy [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010. 14.
王向明,刘文廷.飞机钛合金结构设计与应用[M].北京:国防工业出版社,2010. 14.
- Wang Huaming, Zhang Shuquan, Wang Xiangming. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(12): 3204-3209.
王华明,张述泉,王向明.大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战[J].*中国激光*, 2010, 36(12): 3204-3209.
- Chen Changyuan, Deng Qilin, Song Jianli. Influence of Ni content and ultrasonic vibration to cracks in process of laser cladding [J]. *J Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2005, 37(11): 44-48.

- 陈畅源,邓琦林,宋建丽. Ni 含量及超声振动对激光熔覆中裂纹的影响[J].*南京航空航天大学学报*, 2005, 37(11): 44-48.
- Qin Lanyun, Wang Wei, Yang Guang. Experimental study on ultrasonic-assisted laser metal deposition of titanium alloy [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0103001.
钦兰云,王 维,杨 光.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.
- Zhang Xiaohong, Lin Xin, Chen Jing, *et al.*. Effects of heat treatment on the microstructures and mechanical properties of TA15 titanium alloys by laser solid forming [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 40(1): 142-147.
张小红,林 鑫,陈 静,等.热处理对激光立体成形 TA15 合金组织及力学性能的影响[J].*稀有金属材料与工程*, 2011, 40(1): 142-147.
- Ambrosy G, Berger P, Huegel H, *et al.*. The use of electromagnetic body forces to enhance the quality of laser welds [C]. *SPIE*, 2003, 5120: 596-599.
- Lindenau D, Ambrosy G, Berger P, *et al.*. Effects of magnetically supported laser beam welding of aluminum alloys [C]. *20st International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*. Jacksonwile, USA, 2001.
- Kern M, Berger P, Hugel H, *et al.*. Magneto-fluid dynamic control of seam quality in CO₂ laser beam welding [J]. *Welding Journal*, 2000, 79(suppl): 72-78.
- Xu Hua. Investigation on Laser Cladding Hard Alloy and Laser Cladding Hard Alloy with Electromagnetic Stirring [D]. Wuhan: Huangzhong University of Science and Technology, 2005. 1-25.
许 华.激光熔覆硬质合金及电磁搅拌辅助激光熔覆硬质合金的研究[D].武汉:华中科技大学,2005. 1-25.
- Vollertsen F, Thomy C. Magnetic stirring during laser welding of aluminum [J]. *J Laser Applications*, 2005, 18(1): 28-34.
- Yu Benhai, Hu Xuehui, Wu Yu'e, *et al.*. Study of the effect and mechanism of electromagnetic stirring on the microstructures and hardness of laser cladding WC-Co based alloy coating [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(10): 2672-2677.
余本海,胡雪惠,吴玉娥,等.电磁搅拌对激光熔覆 WC-Co 基金涂层的组织结构和硬度的影响及机理[J].*中国激光*, 2010, 37(10): 2672-2677.
- Yu Shengfu, Zhang Youzhou, Lei Yi, *et al.*. Mechanisms of rotational magnetic field stirring of laser welded non-magnetic alloy for laser welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 27(3): 109-112.
余圣甫,张友寿,雷 毅,等.非磁性合金激光焊旋转磁场搅拌机理[J].*焊接学报*, 2006, 27(3): 109-112.
- Yu Shengfu, Zhang Youzhou, Xie Zhiqiang, *et al.*. The influence of rotating magnetic field on the microscopic structure of welded metal by laser welding [J]. *J Huazhong University of Science and Technology*, 2005, 33(12): 24-27.
余圣甫,张友寿,谢志强,等.旋转磁场对激光焊缝金属显微组织的影响[J].*华中科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(12): 24-27.
- Ji Shengwei. Microstructure and Properties of Composite Coatings by Rotating Magnetic Field-Assisted Laser Cladding [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012. 1-10.
纪升伟.旋转磁场辅助激光熔覆复合涂层的组织与性能[D].昆明:昆明理工大学,2012. 1-10.
- Kern M. Gas and Magneto-Hydrodynamic Measures Influencing the Seam Quality in Laser Beam Welding [D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 1999. 1-30.
- Zhang Xinge, Wang Qun, Li Liqun, *et al.*. Research status of external electric or magnetic field supported laser welding [J]. *Materials Review*, 2009, 23(5): 39-42.
张新戈,王 群,李俐群,等.电、磁场辅助激光焊接的研究现状[J].*材料导报*, 2009, 23(5): 39-42.