

超声辅助钛合金激光沉积成形试验研究

钦兰云^{1,2} 王 维^{1,2} 杨 光¹

(¹沈阳航空航天大学 机电工程学院, 辽宁 沈阳 110136)
(²沈阳工业大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要 借鉴超声振动在铸造、焊接、熔覆等领域中的作用,将超声振动引入钛合金激光沉积成形系统中,利用超声作用细化晶粒,均匀组织成分,减小试件的残余应力,从而解决成形件变形开裂的难题。针对成形系统的结构特点,搭建了超声振动系统,进行了超声振动辅助钛合金沉积成形试验。通过观察沉积试件的微观组织和对试件残余应力的测试,发现超声振动使试件熔覆层中的晶粒得到细化,使功能梯度材料试件中的 TiC 硬质相弥散均匀;并且能够减小试件的残余应力。测试结果表明超声空化或机械效应可以打碎由初生枝晶交错连接形成的固态结晶网,从而细化了晶粒,同时使继续结晶时熔体得到补充,减小了枝晶间产生的拉应力;另外超声波在熔池中的搅拌声流将使硬质相运动到熔池各处,使之分布更为均匀,在一定程度上减少了相与相之间凝固收缩应力的不同而产生的凝固应力。

关键词 激光技术;激光沉积成形;超声振动;钛合金;残余应力

中图分类号 TG665 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0103001

Experimental Study on Ultrasonic-Assisted Laser Metal Deposition of Titanium Alloy

Qin Lanyun^{1,2} Wang Wei^{1,2} Yang Guang²

(¹College of Electromechanical Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning 110134, China)
(²School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China)

Abstract To solve the bottleneck problem of deformation and cracks of laser metal deposition (LMD) parts and improve their mechanical properties, ultrasonic vibration is introduced to the LMD of titanium alloy processes to refine the grain size and to reduce residual stress based on its significant effect in the fields of casting, welding and laser cladding. So the paper applies ultrasonic vibration system to fabricate the samples and analyses its effect on its macroscopical appearances, microstructure and residual stress by experiments. The results show that the cladding layers thickness and the grain size change smaller, and also the reinforcement phase TiC in functionally graded materials samples is more uniform dispersion by metallographic photos. In addition, the residual stress is reduced, which shows that cavitation and mechanical effect of ultrasound break the solid crystal net connected by primary dendrite and refine the grain, and also the melt get supplement so as to the tensile stress is reduced. On the other hand, stirring acoustic stream in the molten pool make the reinforcement phase distribution uniform to reduce the solidification stress for different interphase solidification shrinkage stresses.

Key words laser technique; laser metal deposition; ultrasonic vibration; titanium alloy; residual stress

OCIS codes 350.3850; 000.2170; 000.2190; 000.3110

1 引 言

钛合金激光沉积成形(LMD)在钛合金零件直

接制造及再制造中有广阔的应用前景,但是,由于钛合金本身的熔点较高,且在熔融状态下有较高的化

收稿日期: 2012-08-01; **收到修改稿日期**: 2012-09-02

基金项目: 辽宁省自然科学基金(201202173)和中航工业产学研专项项目(CXY2011SH16)资助课题。

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,主要从事激光快速成形,激光再制造技术等方面的研究。

E-mail: wangw1116@sau.edu.cn

学活性,易被空气中的氧、氮、碳等杂质污染,加工参数选择不当或者保护措施不到位会使零件沉积层与层之间、沉积的道与道之间产生气孔及熔合不良。另外,成形过程中,由于受零件结构及成形粉末材料等影响,激光束沿着每一层的扫描轨迹长期剧烈作用在零件上,产生的零件“热应力”、材料的相变“组织应力”、熔池“凝固收缩应力”以及这些应力与外约束应力的耦合行为、演化规律等,都与零件的变形开裂有重要关系,是制约大型金属结构件激光快速成形技术发展的一大瓶颈^[1~3]。因此有必要采取一定的措施优化组织、消除应力,改善合金的力学性能。

目前国内外通过物理场来改善金属凝固组织,减少内部缺陷,提高力学性能的方法主要有电磁搅拌及超声波处理等手段。这些方法最先应用在传统的铸造领域,逐渐发展到焊接、熔覆等涉及金属熔化凝固的领域^[4~8]。超声振动是机械振动的一种,是金属凝固过程中改善组织、提高力学性能的有效方法之一。功率超声波在液态金属中传播时,其高频振动和辐射压力对媒介产生机械作用、热作用、空化作用和声流作用等,对液态金属结晶过程造成影响,

其公认的效果有细化晶粒、组织均匀化、组织净化(去气、除渣、提纯)等^[9~11]。

鉴于超声振动在金属凝固中的显著作用,本文在钛合金激光沉积成形中引入了超声振动,在原有工艺参数基础上,以期达到细化晶粒、均匀组织成分,减小试件的残余应力,从而解决制约钛合金激光沉积成形零件内部质量及变形开裂的瓶颈难题。

2 试验方法

2.1 试验装置及参数

试验系统的原理图如图1所示。所用功率超声系统为自行设计,包括超声波发生器和超声振动系统。其中超声振动系统又包含超声波换能器、载物台及支架、基板、沉积层。通过振动的载物台把超声波导入到被加工的基板上,然后再通过超声波在基板上的传播导入到熔融的熔池内。超声波连续不断的对熔池内的液态金属进行作用,从而改变熔池的结晶凝固过程。超声波发生器的功率可调,选用的数字超声波驱动电源,输入电压为220 V;最大工作点电流为1.5 A;输出频率为17~23 kHz。

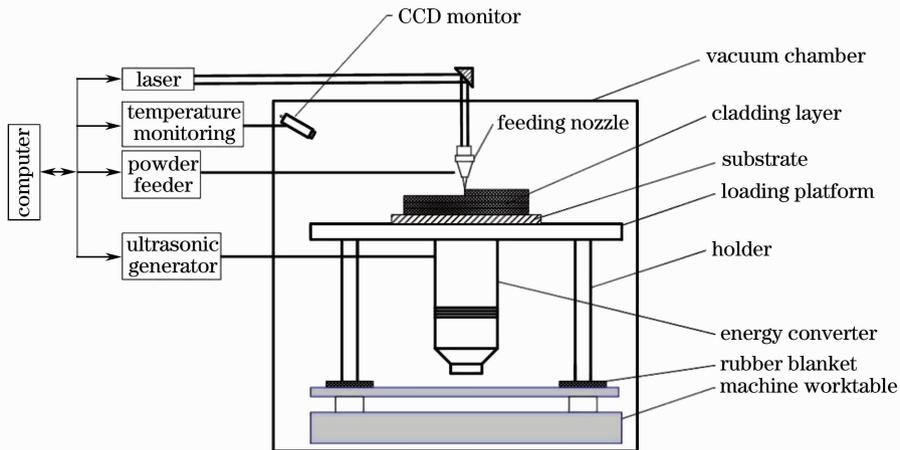


图1 实验系统原理图

Fig. 1 Schematic of experimental system

钛合金激光沉积成形系统主要由激光系统、数控系统、粉料输送系统、惰性气体动态保护系统(真空度可达 10^{-2} Pa,充纯度为99.99%的氩气,氧气体积分数小于 10^{-4})、熔池温度监测等系统组成。实验采用的激光加工工艺参数为:激光功率为2100 W,焦距为300 mm,扫描速度为2~10 mm/s,送粉速度为3 g/min,光斑直径为2.5 mm,搭接率为30%,载气压力为0.2 MPa,载气流量为3 L/min。样件检测采用OLYMPUS-DP71型光学显微镜(OM)分析涂层低倍组织,用SSX-550型扫描电镜(SEM)分析沉积层的组织。

实验用基材为TC4合金(Ti6Al4V),其化学成分如表1所示,尺寸为100 mm×55 mm×10 mm,实验前用砂纸打磨掉氧化层,用丙酮清洗去除表面油污及杂质。

沉积材料为球形TC4粉、Ti粉末和 Cr_3C_2 粉末;将基板和粉末在真空干燥机中、150 °C条件下干燥10 h。实验分为两部分:1)单道沉积试验:振动系统谐振起始频率为19 kHz;采用单一料仓送TC4粉末;2)多层多道试验:谐振起始频率为19.2 kHz;将TC4粉及Ti和 Cr_3C_2 混合粉末(两者质量比为1.8832,符合原位生成TiC化学方程式)分别放入

送粉器的两个料仓,通过控制不同粉仓的送粉速率,使各熔覆层组分按一定规律改变,Cr₃C₂ 的质量分数从第一层的 8.16% 增至最后一层为 20%^[12]。试件底面尺寸为 60 mm×20 mm,成形层数为 10 层,

扫描方式采用层间正交栅格扫描,此方式得到的试件力学性能上无明显的方向性,且有助于热应力的降低^[13]。

表 1 TC4 合金成分(质量分数,%)

Table 1 Composition of Ti6Al4V alloy (mass fraction, %)

Elements	Al	V	Fe	O	Si	Ti	Others
Percent	5.5~6.8	3.5~4.5	≤0.30	≤0.20	≤0.15	Bal	0.40

2.2 残余应力测试

采用小孔法来测试成形件顶部表面的残余应力。测试前对成形件表面进行抛光处理,以保证应变片能紧密地贴于其上。标准应变计相对于小孔的分布如图 2 所示。小孔中心到应变片中心距离为 3 mm,以减小孔边变形的影响。按照图 3 分布测试点,采用钻盲孔进行残余应力测量,孔径为 2 mm,孔间距为 20 mm。测试采用 BA120-1CA-ZKY 电阻应变计及相应的胶水贴片进行应力测试。用 XL2101B3 型静态电阻应变仪测量释放的应变。钻孔结束待读数稳定,每隔 5 min 读取 1 次应变仪读数,取几次数据的平均值作为测试结果。实验测得的应变数据,采用通孔的 Kirch 解推导出的公式计算残余应力^[14]。公式中涉及到释放系数 A、B 的计

算,其中包括材料的弹性模量 E 和泊松比 μ ,计算时取 $E=120\text{ GPa}$, $\mu=0.34$ 。

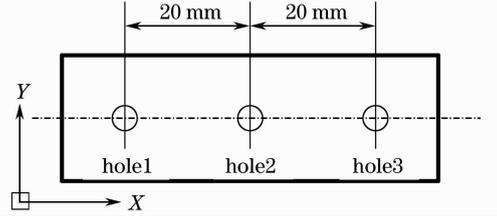


图 3 测试点位置

Fig. 3 Test points position

3 结果与分析

3.1 沉积层的宏观形貌

图 4(a)、(b)分别为扫描速度 $v=2.5\text{ mm/s}$ 下的普通激光沉积成形和施加超声的激光沉积成形的单道沉积层的横截面形貌。熔覆材料为球形 TC4 粉末,基材为 TC4。对比图 4(a),(b)可知,施加超声振动使单道熔覆组织高度明显减小,熔凝层的熔池底部热影响区形状比较平缓,但对熔池宽度影响不大。表明在超声振动作用下熔池内对流更强烈,使激光束能量分布更均匀。单道沉积高度受超声振动的影响显著,这是由于振动作用使粉末与基体之间发生强烈的弹性碰撞引起的,而熔池捕捉粉末的能力是一定的。

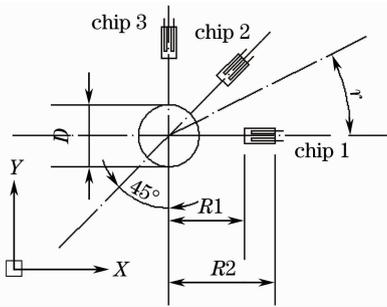


图 2 应变片粘贴示意图

Fig. 2 Sketch map of the strain gauge position

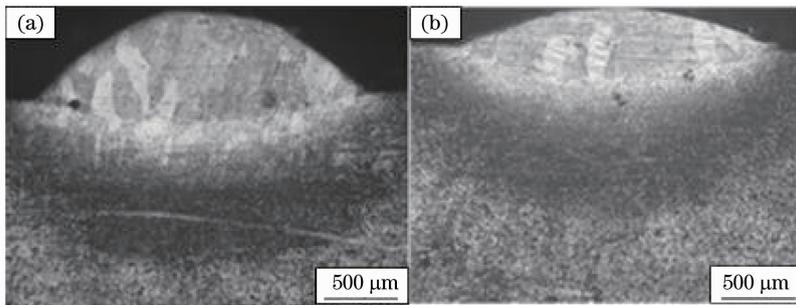


图 4 单道沉积层横截面低倍显微组织。(a)激光沉积成形;(b)施加超声的激光沉积成形

Fig. 4 Macroscopical appearances of cladding layers cross-section. (a) LMD;

(b) LMD with ultrasonic vibration

3.2 沉积层的微观组织

图 5 为施加超声振动作用多层多道沉积试验的样件照片。图 6 为样件沉积层中部微观组织,图 7 为图 6 中黑色枝晶状组织的谱线,能谱成分分析(EDS)结果为 Ti, C, Cr, Al 质量分数分别为 89.29%, 8.36%, 1.70%, 0.65%, 基本可确定为 TiC 相。随着沉积材料 Cr_3C_2 粉末含量增高, TiC

相含量从沉积层中部到表面逐渐增高, TiC 形状也由“鱼骨”样变化为“小球”状。图 6(a)为未施加超声振动作用时沉积层组织中类似鱼骨状的不发达的枝晶 TiC 相,平均长度为 $110\ \mu\text{m}$;而施加了超声振动后,这种鱼骨状的组织结构 TiC 相明显减小如图 6(b)所示,平均长度为 $50\ \mu\text{m}$ 。



图 5 梯度材料试件

Fig. 5 Photo of the functionally graded materials sample

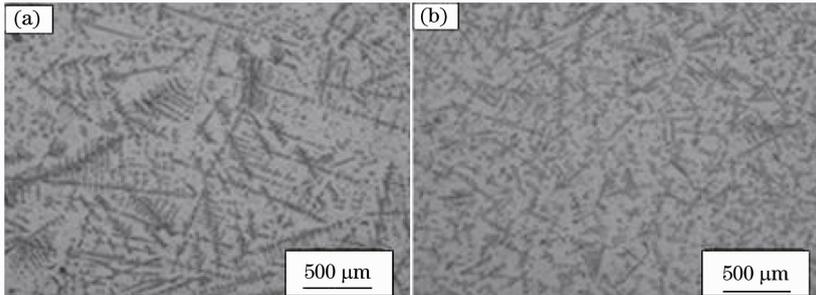


图 6 试件中部沉积层微观组织[75%(TC4)+25%(Cr_3C_2 +Ti)]。(a)无超声振动;(b)有超声振动

Fig. 6 Microstructure of the middle cladding layers [75%(TC4)+25%(Cr_3C_2 +Ti)]. (a) Without ultrasonic vibration; (b) with ultrasonic vibration

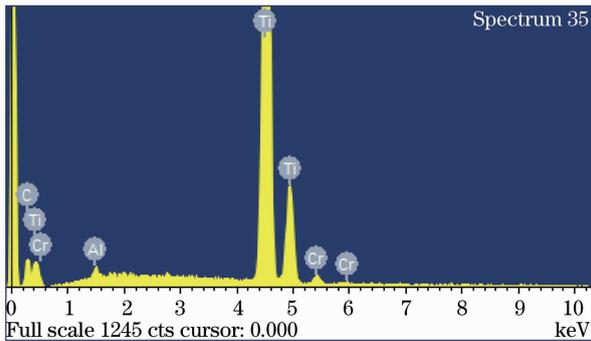


图 7 沉积层黑色枝晶状组织谱线

Fig. 7 EDS of black dendrite

图 8 为试件顶部[70%(TC4)+30%(Cr_3C_2 +Ti)]沉积层组织的 SEM 对比图,图 8 中黑色颗粒状组织的能谱成分分析结果为 Ti, C, Cr, Al 的质量分数分别为 87.48%, 8.92%, 3.22%, 0.38%, 断定其为 TiC 相。图中 TiC 呈现多种形态,有球状、棒状和不发达枝晶状,这是因为看似球状的 TiC 实际上是多面体,多面体的棱角处曲率半径小,溶质的梯

度大,扩散速度快,故棱角处的晶体生长速度比平面处大,逐渐长成棒状和不发达枝晶状。显然施加超声振动后组织中的 TiC 晶粒明显细化,施加振动作用前后 TiC 晶粒平均尺寸为 $2.5\ \mu\text{m}$ 和 $1.5\ \mu\text{m}$ 。施加超声振动试件的熔覆层中,原位生成的 TiC 增强相均匀弥散在熔覆层里;而无超声作用的试件中 TiC 组织分布的均匀性则要差一些。

对比超声作用前后试件的微观组织,发现在沉积成形过程中施加超声振动所得到的沉积层组织与未施加超声振动的施加沉积组织有显著不同,原本较长的枝晶被打碎,晶粒得到细化,分布更为均匀。这是因为在沉积过程中,正在长大的枝晶网会被熔体空化泡闭合时产生的高温高压击碎,并分散到熔体的各个部分形成均匀分布的小晶核,从而增加了晶核数,细化了晶粒。另外超声波在熔池中的搅拌声流将使硬质相运动到熔池各处,使之分布更为均匀。熔覆组织成分的均匀分布,对试件的综合机械性能有很大影响,如果分布不均匀直接影响其使用性能和寿命,成

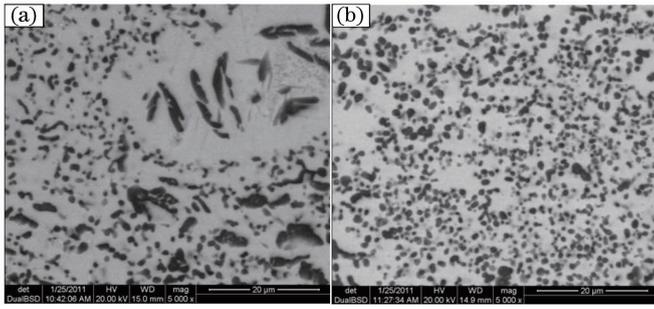


图 8 试件顶部沉积层微观组织。(a)无超声振动;(b)有超声振动

Fig. 8 Microstructure of the top cladding layers. (a) Without ultrasonic vibration; (b) with ultrasonic vibration

分之间的变应力为零件的变形开裂埋下隐患。

3.3 残余应力对比

为了便于分析超声振动对试件残余应力的影响,把相同激光加工参数所得试件的残余应力值绘制成曲线图。图 9 和图 10 分别为三组试件 X 方向残余应力 σ_x 和 Y 方向残余应力 σ_y 的对比曲线,其中 P 和 V 分别为激光功率和扫描速度。由图 9,图 10 可知,无论是施加超声振动与否,沉积件沿 X、Y 方向的残余应力具有类似的分布规律。在相同激光加工

加参数下,有超声振动的试件在两个方向上的残余应力均较无振动时有所减小。可见超声振动的空化或机械效应打碎了由初生枝晶交错连接形成的固态结晶网,使继续结晶时熔体得到补充,减小了枝晶间产生的拉应力。另外超声振动使沉积层组织成分均匀分布,在一定程度上减少了相与相之间凝固收缩应力的不同而产生的凝固应力;且超声振动对均匀熔池温度场的作用,在一定程度上也减小了试件的应变及热应力。

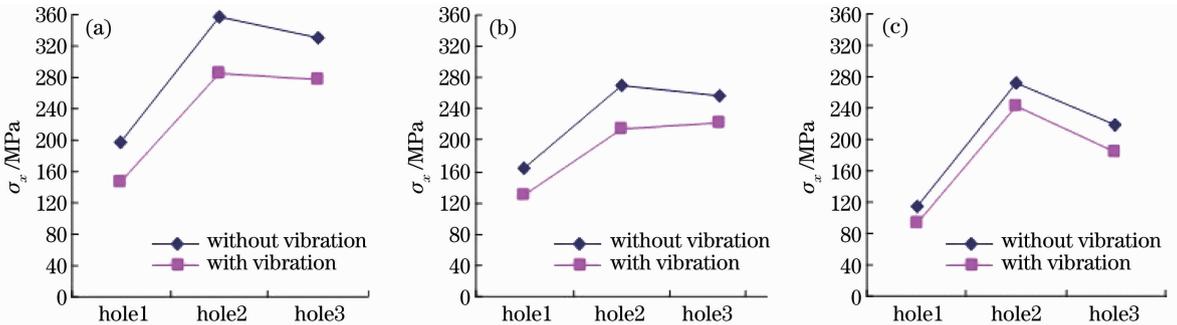


图 9 试件 X 方向残余应力对比。(a) $P=2100\text{ W}$, $V=4\text{ mm/s}$; (b) $P=2100\text{ W}$, $V=6\text{ mm/s}$; (c) $P=2100\text{ W}$, $V=8\text{ mm/s}$

Fig. 9 Residual stress contrast curve of specimens at X direction. (a) $P=2100\text{ W}$, $V=4\text{ mm/s}$; (b) $P=2100\text{ W}$, $V=6\text{ mm/s}$; (c) $P=2100\text{ W}$, $V=8\text{ mm/s}$

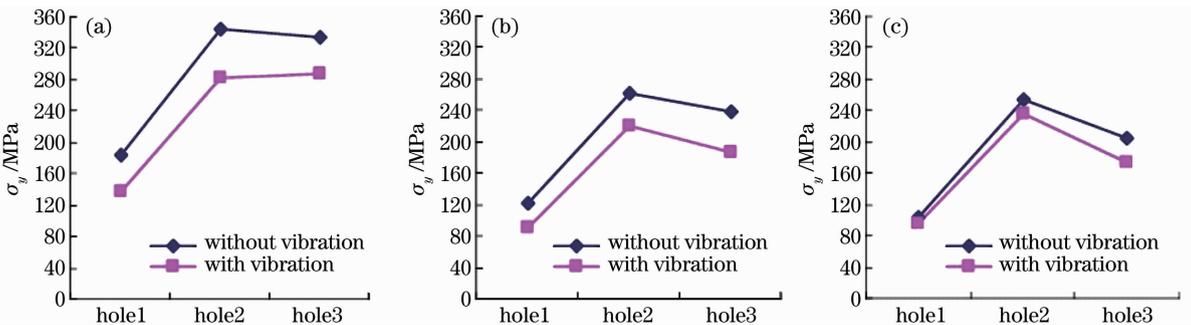


图 10 试件 Y 方向残余应力对比。(a) $P=2100\text{ W}$, $V=4\text{ mm/s}$; (b) $P=2100\text{ W}$, $V=6\text{ mm/s}$; (c) $P=2100\text{ W}$, $V=8\text{ mm/s}$

Fig. 10 Residual stress contrast curve of specimens at Y direction. (a) $P=2100\text{ W}$, $V=4\text{ mm/s}$; (b) $P=2100\text{ W}$, $V=6\text{ mm/s}$; (c) $P=2100\text{ W}$, $V=8\text{ mm/s}$

横向对比图 9,图 10 可知,相同激光功率下,随着扫描速度的提高,有超声振动和无超声振动试件表面残余应力都有减小的趋势。这是因为在相同的激光功率密度下,当扫描速度增大时激光比能量变小,对已成形的沉积层热影响小,熔覆层局部变形小,因此残余应力有所下降。但随着扫描速度的增大,超声振动减小试件残余应力的效果上逐渐下降。这是因为当扫描速度过大时,熔池熔凝过快,导致超声振动对均匀熔池温度、均匀各组织成分的有效时间变短,在减小残余应力的能力上有所下降。

4 结 论

在借鉴超声振动在铸造、焊接、熔覆等领域中的细化晶粒、均匀组织成分、减小残余应力作用的基础上,把超声振动装置引入钛合金激光沉积成形系统中,并从试验试件的内部组织及成形件残余应力两方面,分析了超声振动对沉积层的影响。并得出如下结论:

- 1) 施加超声振动可使 TC4 单道沉积层的沉积高度显著减小,熔池的底部更加平缓;
- 2) 分析沉积层的微观组织发现,超声效应可以打碎枝晶,使梯度试件沉积层晶粒细化,强化相 TiC 颗粒分布更加均匀;
- 3) 在超声振动作用下,相同激光功率下、不同扫描速度下试件的残余应力均有下降趋势,但随扫描速度的增加,作用在熔池上的有效振动时间减少,超声振动对残余应力减小的能力降低;
- 4) 超声机械效应、声流效应引起的熔池对流和空化效应引起的冲击波是细化沉积层晶粒、均匀化组织从而减小残余应力的主要原因。

参 考 文 献

- 1 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*, 2009, **36**(12): 3204~3209
- 2 Chen Jing, Yang Haiou, Li Yanmin *et al.*. The research on two kinds of cracking behavior and mechanism of cladding in rapid laser forming process [J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(3): 300~304
陈 静,杨海鸥,李延民等. 激光快速成形过程中熔覆层的两种开裂行为及其机理研究[J]. *应用激光*, 2002, **22**(3): 300~304
- 3 Wang Junwei, Chen Jing, Liu Yanhong *et al.*. Research on microstructure of TC17 titanium alloy fabricated by laser solid

- forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 847~851
王俊伟,陈 静,刘彦红等. 激光立体成形 TC17 钛合金组织研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 847~851
- 4 Chen Zhikun, Liu Min, Zeng Dechang. Research on formation causes and elimination methods of the laser cladding cracks[J]. *Laser Journal*, 2009, **30**(1): 55~56
陈志坤,刘 敏,曾德长. 激光熔覆裂纹的产生原因及消除方法探究[J]. *激光杂志*, 2009, **30**(1): 55~56
- 5 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研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2672~2677
- 6 Qin Lei. Design and Research of Ultrasonic Impacting Equipment for Relieving Welding Residual Stress [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008. 1~20
秦 雷. 消除焊接残余应力的超声冲击设备的设计与研究[D]. 沈阳:东北大学, 2008. 1~20
- 7 Guan Jianjun, Song Tianmin, Zhang Guofu *et al.*. The effect of mechanical vibration on solidification of weld pool metal [J]. *Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology*, 2001, **21**(4): 51~54
管建军,宋天民,张国福等. 机械振动对焊接熔池金属凝固过程的影响[J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2001, **21**(4): 51~54
- 8 Cheng Yuan. The Research on Welding Stress, Deformation and Vibration to Eliminate [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 1999. 21~32
程 源. 焊接应力、变形及其振动消除研究[D]. 大连:大连理工大学, 1999. 21~32
- 9 Chen Changyuan, Deng Qilin, Song Jianli. Influence of Ni content and ultrasonic vibration to cracks in process of laser cladding[J]. *Journal of 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
- 10 Li Junwen, Tao Yezheng, Fu Ying. Effect of ultrasonic power on density and refinement in aluminum ingot [J]. *China Foundry*, 2007, **56**(2): 152~154
李军文,桃野正,付 莹. 超声波功率对铸锭内的气孔及组织细化的影响[J]. *铸造*, 2007, **56**(2): 152~154
- 11 Chen Changyuan, Deng Qilin, Song Jianli. The influence of ultrasonic vibration on the process of laser cladding [J]. *Electromachining & Mould*, 2005, (3): 37~40
陈畅源,邓琦林,宋建丽. 超声振动对激光熔覆过程的影响[J]. *电加工与模具*, 2005, (3): 37~40
- 12 Yang Guang. Fabrication of Ti Matrix FGM Using Laser Metal Deposition Technique [D]. Shenyang: Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, 2010. 56~70
杨 光. 钛基功能梯度材料激光快速成形技术研究[D]. 沈阳:中国科学院沈阳自动化研究所, 2010. 56~70
- 13 Long Risheng, Liu Weijun, Bian Hongyou *et al.*. Effects of scanning methods on thermal stress during laser metal deposition shaping [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, **43**(11): 74~81
龙日升,刘伟军,汴宏友等. 扫描方式对激光金属沉积成形过程热应力的影响[J]. *机械工程学报*, 2007, **43**(11): 74~81
- 14 Lu Caishan. Measure of Residual Stress [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1991
陆才善. 残余应力测试[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1991