

# 超声波对 BT20 钛合金激光熔覆过程的作用

王 维<sup>1</sup> 郭鹏飞<sup>1\*</sup> 张建中<sup>2</sup> 杨 光<sup>1</sup> 卞宏友<sup>1</sup> 钦兰云<sup>2</sup> 王 伟<sup>1</sup> 崔宝磊<sup>1</sup>  
蔡 滢<sup>1</sup> 王 婷<sup>1</sup> 才 磊<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 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  
<sup>2</sup> 沈阳航空航天大学 机电工程学院, 辽宁 沈阳 110136  
<sup>3</sup> 唐山松下产业机器有限公司, 河北 唐山 063020

**摘要** 超声辅助激光熔覆技术是在激光熔覆技术基础上发展起来的,将超声引入激光熔覆中可以提高激光熔覆件质量。通过在 BT20 钛合金基体上添加频率为 19.56 kHz 的超声振动,进行激光熔覆实验,并据此研究超声对激光熔覆过程的作用。结果表明,2.2 W 功率的超声振动使得熔覆层的表面平整性良好,内部组织气孔率下降到 0.75%,熔覆层晶粒尺寸减小了约 42%, $\alpha$  片层长度减小了 23.9%,但沉积生长方向的堆垛效率降低了 36.7%。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; 超声振动; BT20 钛合金; 表面平整性

中图分类号 TG665 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0803004

## Ultrasonic effect on Laser Cladding BT20 Titanium Alloy Process

Wang Wei<sup>1</sup> Guo Pengfei<sup>1</sup> Zhang Jianzhong<sup>2</sup> Yang Guang<sup>1</sup> Bian Hongyou<sup>1</sup>  
Qin Lanyun<sup>2</sup> Wang Wei<sup>1</sup> Cui Baolei<sup>1</sup> Cai Gan<sup>1</sup> Wang Ting<sup>1</sup> Cai Lei<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning 110136, China  
<sup>2</sup> School of Mechanical and Electrical Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning 110136, China  
<sup>3</sup> Panasonic Welding Systems (Tangshan) Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063020, China

**Abstract** Ultrasonic assisted laser cladding technology is developed on the basis of laser cladding technology, and the technology that ultrasonic is introduced to laser cladding can improve the quality of the cladding layer. The laser cladding experiment is done by adding ultrasound vibration with a frequency of 19.56 kHz on titanium alloy matrix of BT20. Based on the experiment the effects of ultrasound on the laser cladding process is studied. The results show that, under the condition of using 2.2 W ultrasonic vibration, the surface flatness of the cladding layer is good, the porosity rate of internal organization is dropped to 0.75%, the grain size is decreased by about 42%, the  $\alpha$ -sheet length is decreased by 23.9%, but the stacking efficiency in the direction of deposition and growth is reduced by 36.7%.

**Key words** laser technique; laser cladding; ultrasonic vibration; BT20 titanium alloy; surface flatness

**OCIS codes** 140.3390; 350.3850; 000.2170; 000.2190; 000.3110

## 1 引 言

BT20(Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V)钛合金是俄罗斯航空材料研究院于 1964 年研制成功的高 Al 当量的近

$\alpha$  型钛合金,其强化机制主要是通过  $\alpha$  稳定元素 Al 的固溶强化,同时也与加入的少量中性元素 Zr 和  $\beta$  稳定元素 Mo、V 有关<sup>[1]</sup>。该合金既有  $\alpha$  型钛合金良好

收稿日期: 2013-01-11; 收到修改稿日期: 2013-03-12

基金项目: 辽宁省高校创新团队支持计划(LT2011004)、辽宁省自然科学基金(201202173)、中航工业产学研创新工程(CXY2011SH16)、辽宁省教育厅科学技术研究项目(L2011026)

作者简介: 王 维(1957—),男,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

\* 通信联系人。E-mail: 34046298@qq.com

的热强性和可焊性,又有  $\alpha+\beta$  型钛合金的工艺塑性,还具有中等的室温和高温强度及良好的热稳定性,因此常用来制造飞机隔框、壁板等工作温度较高、受力较复杂的重要结构零件<sup>[2]</sup>。但由于 BT20 本身难于加工、成形工艺复杂、生产周期长、材料利用率低等缺点,严重制约了其在航空航天领域的广泛应用。作为一种新型的先进制造技术<sup>[3-5]</sup>,激光熔覆技术诞生于 20 世纪 80 年代,到 90 年代中期,就成为快速成形领域的研究热点和发展方向,可广泛应用于复杂零件的直接制造和修复,具有广阔的应用前景<sup>[6-8]</sup>。该技术能够近净尺寸成形,后期仅需少量机加工即可成形,对于 BT20 而言,能大大降低制造成本,使得零件制造周期大幅缩短,制造速率得到极大提升<sup>[5]</sup>。但是在激光熔覆成形过程中存在着气孔、裂纹、粗大柱状晶粒等缺陷;另外,由于激光熔覆成形过程中冷却速度快,成形件中会保留较大残余应力。加工过程中形成的缺陷和残余应力降低了成形件的力学性能,甚至会

引起成形件的宏观开裂。

超声振动在铸造领域的应用,成功地细化了晶粒、均匀了组织、抑制了气孔的产生并能较明显地减少内部组织残余应力、提高材料强度、增强材料塑性<sup>[9-12]</sup>。目前,如何更合理、高效地在激光熔覆中施加超声振动已成为各科研院所的研究热点。本文在激光熔覆设备基础上添加超声振动装置,将频率为 19.56 kHz 的超声振动引入到 BT20 的熔覆过程中,进而研究超声振动对 BT20 激光熔覆过程的影响。

### 3 超声辅助激光熔覆技术的实现

实验选取的设备为 5 kW CO<sub>2</sub> 横流激光器、三维数控工作台和本课题组自行研制的圆筒式真空箱、载气式送粉装置以及同轴送粉喷嘴。该套设备能够实现激光功率、扫描速率、分层厚度、搭接率、送粉速率 5 个工艺参数的调整。在此设备的基础上通过在工件上添加超声振动实现超声辅助激光熔覆过程,其原理图如图 1 所示。

从图 1 可以看出在激光熔覆过程中,工件连同变幅杆随工作台一起运动,激光光束及同轴送粉喷嘴静止;工件基体的超声振动是通过变幅杆传递给基体的,基体的振动方向是纵向上下振动,正好与待熔覆表面垂直。

实验前先将 BT20 钛合金工件表面打磨抛光,以便去除表面氧化皮层并增加其表面光洁度,然后用丙酮对其做进一步的清洗处理,对于 BT20 钛合金球形粉末则在 120 °C 真空环境下进行干燥处理。将超声

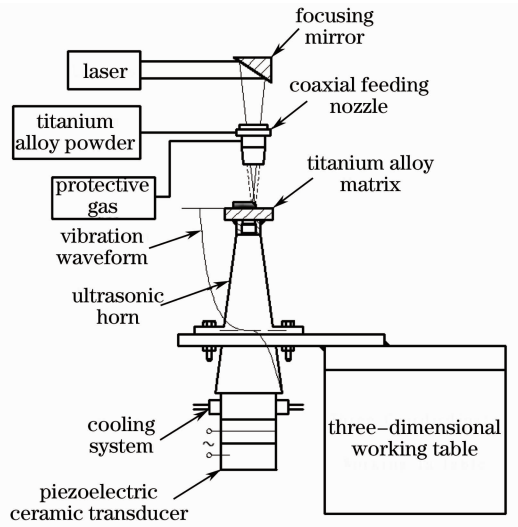


图 1 超声辅助激光熔覆过程原理图

Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic assisted laser cladding process

功率作为参变量进行多道熔覆实验,氩气作为保护气氛。其中激光功率选取为 1700 W,送粉率为 0.7 g/min,扫描速度为 6 mm/s,分层厚度为 0.3 mm,搭接率 30%,超声装置频率为 19.56 kHz,超声电源电流选取 0、0.01、0.1、0.2 A,对应的超声功率为 0、2.2、22、44 W,扫描方式采取层间交错扫描(图 2),熔覆尺寸为 16 mm×16 mm,成形层数为 10。

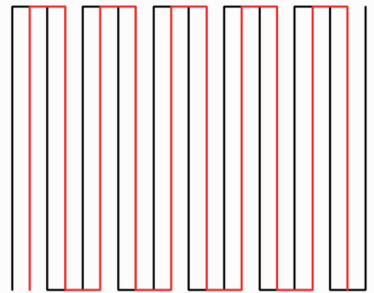


图 2 层间交错扫描路径

Fig. 2 Interlayer interlaced scanning path

### 3 超声振动对熔覆层表面平整性的影响

图 3 显示的是不同超声功率下所获得的熔覆层表面形貌。

图 3(a)中,熔覆层外观呈现中间高、四周低的馒头状凸起;图 3(b)中,熔覆层外观质量较好,表面变得较为平整;图 3(c)中,熔覆表面呈等间距的波峰波谷状,而且熔覆成形高度低,这是熔池由于超声空化效应而受到扰动造成熔融液体飞溅后凝固的结果,表面平整性较差;图 3(d)中,熔覆块的外观呈蜂

窝状,这是由于超声振动扰动熔池造成液体飞溅的作用随超声功率的增加变得愈加强烈,熔池瞬时凝固的结果,表面平整性最差。随着超声功率的增大,熔覆层外观形貌逐渐由馒头状凸起变得均匀平整,表面平整性逐渐变好,当功率超过 2.2 W 达到 22 W

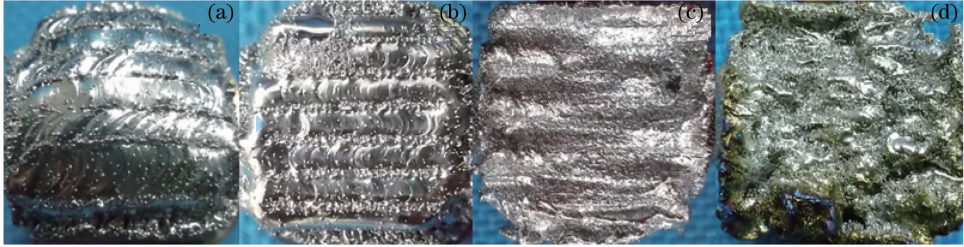


图 3 不同超声功率下的激光熔覆层表面形貌。(a) 未施加超声振动;(b) 2.2 W;(c) 22 W;(d) 44 W

Fig. 3 Surface morphology of laser cladding parts under different ultrasonic powers.

(a) Without ultrasonic vibration; (b) 2.2 W; (c) 22 W; (d) 44 W

实验过程中发现最优超声功率为 2.2 W,在不改变其他工艺参数的前提下,分别通过施加 2.2 W 超声振动和不施加超声振动两种方式进行熔覆实验,熔覆块尺寸为 16 mm×16 mm,成形层数均为

时,外观又变得粗糙直至蜂窝状,表面平整性逐渐变差。合适功率的超声振动促进了熔池内各组分的运动,提高了熔融金属的流动性,从而提高了熔覆层表面平整性。

16。熔覆完成后用线切割机沿垂直于激光扫描方向将熔覆块切开,进行打磨抛光处理,观察其断面情况,如图 4 所示。

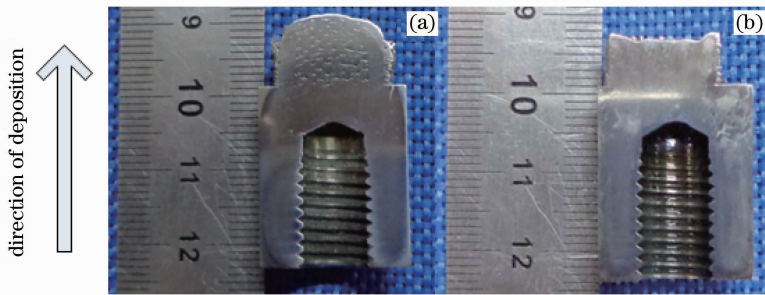


图 4 熔覆断面对比图。(a) 未施加超声振动;(b) 施加超声振动

Fig. 4 Cladding section comparison. (a) Without ultrasonic vibration; (b) with ultrasonic vibration

由图 4 可以看出,在成形层数相同时,施加超声振动的熔覆块的高度明显低于未施加超声振动的熔覆块;实验中测得未施加超声的激光熔覆块的平均高度约为 8.73 mm,而超声辅助激光熔覆块的平均高度约为 5.53 mm,由此可以看出超声的添加使得沉积生长方向的堆垛效率降低了 36.7%。

在相同工艺参数条件下,超声振动会加速热量的传导,使得真正用于熔化粉末的热量减少;另外,超声振动会加速熔覆过程中熔覆层表面残余粉末的反弹<sup>[13]</sup>。因此,在相同工艺参数条件下,超声辅助激光熔覆技术在沉积生长方向的堆垛效率低于未施加超声振动的激光熔覆技术。

蚀剂成分(体积比)为 2HF:6HNO<sub>3</sub>:100H<sub>2</sub>O。用光学显微镜进行观察,放大 100 倍,如图 5 所示。

由图 5 可以看出,未施加超声时的气孔呈规则的椭球形,而施加超声后气孔明显变小;利用 Image Pro Plus 图像分析软件测量其气孔率(气孔面积/图幅面积),可以测得未施加超声时的气孔率为 2.4%,而施加超声后的气孔率为 0.75%,由此可以看出超声振动能有效地抑制气孔。超声振动使得熔融金属中溶解的气体进入低气压区的空化泡内形成大气泡而自然上浮,从而抑制了凝固时气孔的产生。

纵截面熔覆层组织为贯穿多个层的  $\beta$  柱状晶,加入超声后的组织其柱状晶的长度未有明显变化,但横截面上的晶粒变化明显,经腐蚀得到其金相组织如图 6(a)和(b)所示,其放大倍数为 50 倍。

#### 4 超声振动对熔覆层内部组织的影响

将打磨抛光后的纵截面用腐蚀剂进行腐蚀,腐



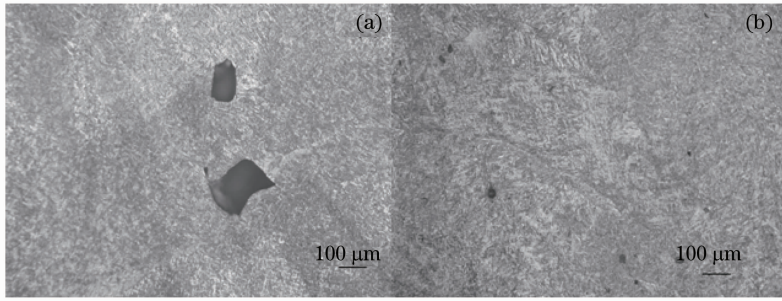


图 5 气孔率对比图。(a) 未施加超声振动；(b) 施加超声振动

Fig. 5 Porosity comparison. (a) Without ultrasonic vibration; (b) with ultrasonic vibration

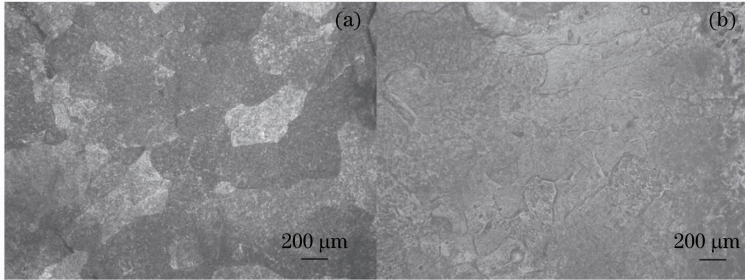


图 6 晶粒细化对比图。(a) 未施加超声振动；(b) 施加超声振动

Fig. 6 Contrast of grain refinement. (a) without ultrasonic vibration; (b) with ultrasonic vibration

由图 6(a)可以看出,未施加超声振动的  $\beta$  晶粒呈等轴状,利用图像分析软件分析得出其晶粒尺寸为  $243\sim 357\ \mu\text{m}$ ;由图 6(b)可以看出,施加超声振动的组织中大晶粒内部出现了小晶粒的晶界,测得其晶粒尺寸为  $145\sim 203\ \mu\text{m}$ ,与未施加超声振动时的晶粒相比其晶粒尺寸减小了约 42%。

利用扫描电镜(SEM)观察其显微组织(图 7),

观察结果显示,激光熔覆 BT20 钛合金得到的初生  $\beta$  晶粒内组织为大量不同取向相互交叉的发达魏氏  $\alpha/\beta$  片层组织。经测量分析,未施加超声的熔覆层的  $\alpha$  片层平均长度约  $7.4\ \mu\text{m}$ ,而施加超声的熔覆层  $\alpha$  片层的平均长度约为  $5.6\ \mu\text{m}$ ,相比未施加超声时的长度减小了约 23.9%,使得片层组织更加细小,组织更均匀。

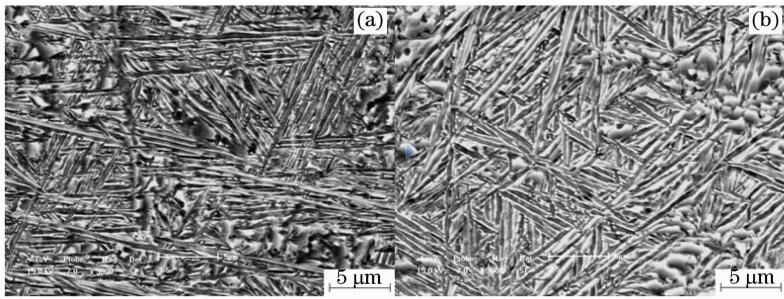


图 7  $\alpha/\beta$  片层组织对比图。(a)未施加超声振动；(b)施加超声振动

Fig. 7 Comparison of  $\alpha/\beta$  lamellar microstructure. (a) Without ultrasonic vibration; (b) with ultrasonic vibration

## 5 超声振动对激光熔覆作用机理的探讨

根据实验结果结合超声在铸造和焊接领域的作用原理,对超声辅助激光熔覆过程的作用机理作尝试性探讨,认为超声的促进作用可能通过以下两个方面实现。

1) 超声的机械效应。存在于熔池中的微气核空化泡在超声作用下,当声压达到一定值时便会生长和崩溃,一方面加速熔池中气体的溢出,另一方面产生的冲击波可以破碎待结晶晶粒的晶界,从而增大形核率;超声在熔池中传播时,振幅衰减使液体从振源处开始形成一定的声压梯度,导致液体流动,当声压幅值超过一定数值时,在液体内部会形成一个

流体的喷射,从而形成声流<sup>[14]</sup>。在声流的作用下,晶界被打碎,从而使得晶粒细化。这种超声空化效应和声流搅拌作用共同破碎了原有晶界,使形核率增大,从而细化了晶粒,均匀了组织。

2) 超声的热效应。在熔覆过程中,超声振动直接作用于待熔覆表面,进而作用于熔池,该振动对熔池的凝固及熔池与待熔覆表面之间的结合产生了影响。超声振动能增加熔池与待熔覆表面的润湿性,使得液-固界面分子发生相互渗透,使得它们之间的结合更紧密<sup>[14,15]</sup>,从而使熔覆表面平整;超声是一种能量波,它的引入显著加快了热传导过程,增强了熔透性<sup>[16]</sup>,同时使得熔池凝固过程中的温度分布更加均匀,晶粒的长大更加均匀。

## 6 结 论

1) 超声振动对激光熔覆过程有一定的促进作用;

2) 2.2 W 功率的超声使得熔覆层表面平整性良好,随着功率的增加,表面平整性逐渐变差;

3) 2.2 W 功率的超声使熔覆层内部组织气孔率下降到 0.75%,组织晶粒尺寸减小了 42%, $\alpha$  片层的长度减小了 23.9%,但沉积生长方向的堆垛效率降低了 36.7%。

## 参 考 文 献

- 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.
- Xi Mingzhe, Gao Shiyu. 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.
- Yang Sen, Zhong Minlin, Zhang Qingmao, *et al.*. New technique to rapidly manufacture metal parts with laser [J]. *Laser Technique*, 2001, 25(4): 254-257.  
杨森, 钟敏霖, 张庆茂, 等. 激光快速成型金属零件的新方法[J]. *激光技术*, 2001, 25(4): 254-257.
- Wang Wei, Cai Lei, Yang Guang, *et al.*. Research on the coaxial powder feeding nozzle for laser cladding[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0403003  
王 维, 才磊, 杨光, 等. 激光熔覆同轴送粉喷嘴研制[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0403003.
- 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.
- Song Jianli, Li Yongtang, Deng Qilin, *et al.*. Research progress of laser cladding forming technology[J]. *Chinese J Mechanical Engineering*, 2010, 46(14): 29-39.  
宋建丽, 李永堂, 邓琦林, 等. 激光熔覆成形技术的研究进展[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(14): 29-39.
- Tian Wei, Xu Bo, Liao Wenhe. Fast process planning technology of laser cladding for green remanufacturing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(11): 111401.  
田威, 许波, 廖文和. 激光熔覆绿色再制造快速工艺规划技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(11): 111401.
- 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.
- Huang Jinri, Xue Liqin, Mu Guanghua, *et al.*. Effect of ultrasonic casting on alloy[J]. *J 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.
- Li Junwen, Momono Tadashi. Effect of application time of ultrasonic vibration on the structure of ingots [J]. *Foundry Technology*, 2004, 25(1): 44-46, 49.  
李军文, 桃野正. 超声波振动处理时间对铸锭组织的影响[J]. *铸造技术*, 2004, 25(1): 44-46, 49.
- Zhao Zhongxing, Mu Yugang, Zhou Guangying, *et al.*. The effect of ultrasonic vibration on crystallizing process of casting alloy[J]. *J Shenyang Institute of Technology*, 1997, 16(3): 9-13.  
赵忠兴, 穆玉刚, 周广英, 等. 超声振动对铸造合金结晶过程的影响[J]. *沈阳工业学院学报*, 1997, 16(3): 9-13.
- Huang Xiaowei, Xi Juntong, J L Lebrun, *et al.*. Influence of processing parameters on geometric characterizations of laser cladding forming 316L stainless steel [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(7): 071404.  
黄小伟, 刁俊通, J L Lebrun 等. 工艺参数对激光熔覆成形 316L 不锈钢形状的影响规律[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(7): 071404.
- Zhang Ping, Ma Lin, Liang Zhijie. Experimental investigation of ultra-assisted electrode sparkles depositing process [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(3): 37-40.  
张平, 马琳, 梁志杰. 超声振动对电火花表面强化的作用[J]. *焊接学报*, 2011, 32(3): 37-40.
- Yang Yunmeng. Research on Mechanism of Ultrasonic Field for Aluminum Alloy Solidification [D]. Changsha: Central South University, 2009. 2-7.  
杨运猛. 超声场对铝合金凝固作用机制试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009. 2-7.
- Zhiwu Xu, Jiuchun Yan, Baoyou Zhang, *et al.*. Behaviors of oxide film at the ultrasonic aided interaction interface of Zn-Al alloy and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/6061Al composites in air[J]. *Material Science and Engineering A*, 2006, 415(1-2): 80-86.
- Zhang Chunlei, Wu Minsheng, Du Jinglei, *et al.*. Improving weld quality by arc-excited ultrasonic treatment [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2001, 6(5): 475-478.