超声波对 BT20 钛合金激光沉积修复作用机制探究

王 维,郭鹏飞,杨 光,钦兰云,卞宏友,王 伟,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 ANSYS 有限元数值模拟和试验相结合,研究了超声波对BT20 钛合金激光沉积修复过程的作用。结果表明,超声波振幅为 0.2~0.55 μm 时,能得到成形质量较好的修复层;当超声波振幅为 0.4 μm 时,超声波对熔池的作用主要表现为超声的机械作用和热作用,而不是超声空化效应;超声的机械作用使得组织的气孔率降低,但是其机械作用不足以克服修复层晶粒外延生长的驱动力,没能阻止 β 柱状晶沿沉积方向的生长;超声的机械作用将晶粒片层组织中的 α 板条打断,而热作用使得熔池凝固速度降低,从而使 α 板条变短变粗。

关键词:激光沉积修复; 超声波; 数值模拟; BT20 钛合金; 声压

中图分类号:TG665 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2014)08-2453-07

Effect of ultrasonic on laser deposition repairing of BT20 titanium alloy

Wang Wei, Guo Pengfei, Yang Guang, Qin Lanyun, Bian Hongyou, Wang Wei, Ren Yuhang

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

Abstract: The effect of ultrasonic on laser deposition process in repaired components of BT20 titanium alloy was investigated by using finite element simulation and experimental test. The results show that when ultrasonic amplitude was 0.2-0.55 μm, the forming quality of repaired layers was better; When ultrasonic amplitude was 0.4 μm, the effect of ultrasonic on molten pool was mainly about mechanical effect and thermal effect, not ultrasonic cavitation effect. The mechanical effect declines the porosity rate of organization, but the mechanical force was less than the epitaxial growth driving force of crystalline grain in repaired layers so that the growth of β-columnar grain along the direction of deposition could not be blocked; The mechanical effect breaks the α-lath of lamellar microstructure and the thermal effect makes the solidification speed slow, as a result, the α-lath was becoming short and thick.

Key words: laser deposition repairing; ultrasonic; numerical simulation; BT20 titanium alloy; ultrasonic pressure

收稿日期:2013-12-05; **修订日期**:2014-01-10

基金项目:国家自然科学基金(51375316);辽宁省高校创新团队(LT2011004);辽宁省自然科学基金(201202173)

作者简介:王维(1957-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事激光快速成形,激光再制造技术等方面的研究。
Email: Wangw1116@sau.edu.cn

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

0 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 α 型钛合金，其强化机制主要是通过 α 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 β 稳定元素 Mo、V 有关[1]。该合金既有 α 型钛合金良好的热强性和可焊性,又有 α+β 型钛合金的工艺塑性，还具有中等的室温和高温强度和良好的热稳定性，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[2]。但是 BT20 结构零件在实际生产过程中,由于刮碰、操作失误等原因造成钛合金零件产生凹痕、裂纹、尺寸超差等质量问题,钛合金的激光沉积修复技术应运而生[3-5]。但是修复区内部存在着气孔、粗大柱状晶粒等缺陷一直制约着该项技术的发展;此外,由于熔池快速熔凝时受到超常冶金动力机超高温梯度的影响，造成修复区晶粒形态、晶体取向、晶界结构、化学成分的均匀性难以控制，给修复件内部组织和力学性能的一致性带来很大困难[6-12]。超声振动在铸造、焊接方面的应用,成功的细化了晶粒,均匀了组织,抑制了气孔的产生,并能提高材料强度、增强材料塑性[13-16],因此如何更合理、高效的在激光沉积修复技术中施加超声振动已成为各科研院所的研究热点。目前,较为成熟的工艺方法是将超声波直接耦合在修复件母材底面,实现了超声场下的激光沉积修复。

文中以修复件修复过程中导入超声波的熔池为研究对象，通过 ANSYS 有限元数值模拟与试验相结合，研究了超声波在熔池中的声场分布及变化特征,并深入分析了超声波对熔池的作用机理。该研究工作可为从修复件底部导入超声波的激光沉积修复技术提供借鉴。

1 试验及数值模型的建立

试验选取的设备为 5 kW CO_2 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。该套设备能够实现对激光功率、扫描速率、分层厚度、搭接率、送粉速率五个工艺参数的调整。在此基础上通过在工件上添加超声振动实现超声辅助激光沉积修复过程，其原理图如图 1(a)所示。其中换能器在超声电源的驱动下产生超声波，变幅杆与修复件通过螺纹连接耦合在一起,共同组成复合型超声变幅杆,从而使超声波传播至修复件修复表面，进而作用于熔池。ANSYS 有限元模拟采用其自身包含的声学模块，建立的数值计算模型是在实际试验过程中抽象出来的,如图 1(b)所示。

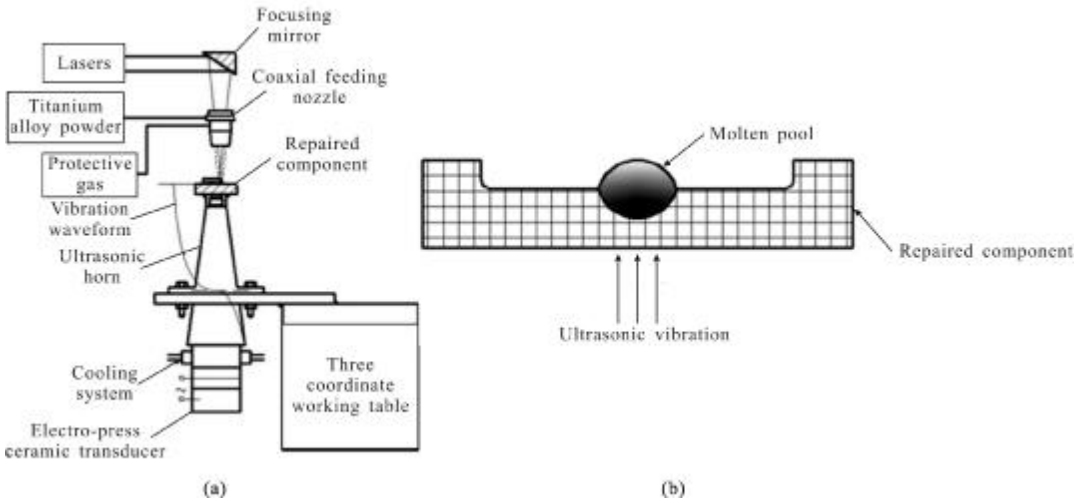


图 1 试验过程模型和数值计算模型

Fig.1 Experimental process model and numerical calculation model

2 超声波参数的确定

试验前先将 BT20 钛合金修复件表面打磨抛光，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 ℃真空环境下进行干燥处理。将

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

超声功率作为参变量进行多道修复试验，氩气作为保护气氛。其中激光功率选取1 700 W,送粉率 0.7 g/min,扫描速度 6 mm/s,分层厚度 0.3 mm,搭接率 30%,超声装置频率为 19.56 kHz，超声振动振幅为0、0.2 μm、0.4 μm、0.55 μm、0.6 μm、0.85 μm，扫描方式采用层间交错扫描,如图 2 所示,扫描路径先按黑色箭头方向沿黑色线条扫描后再按红色箭头方向沿红色线条扫描的方式,修复尺寸 16 mm×16 mm,成形层数 10。

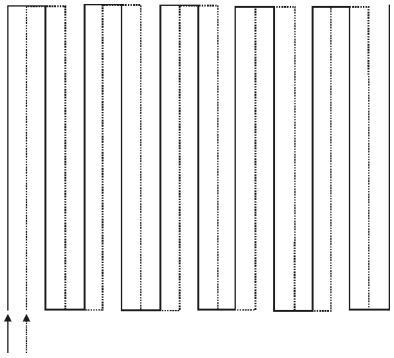
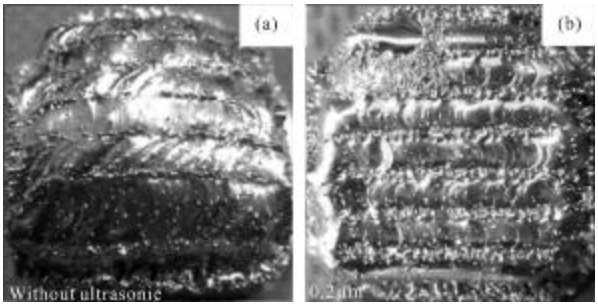


图 2 层间交错扫描路径

Fig.2 Interlayer interlaced scanning path

图 3(a)中,外观呈现中间高、四周低的“馒头状”凸起;图 3(b)、(c)、(d)中,修复层外观质量较好,表面变得较为平整,且图 3(c)的外观质量最好;图 3(e)中,修复表面呈等间距的波峰波谷状,而且修复成形高度低,表面质量较差;图 3(f)中,修复件的外观呈蜂窝状,表面质量最差,可以推测更高功率的超声振动将不能形成成形质量好的修复表面。非常明显,超声振动使得熔池发生变化最终导致修复层的表面形貌发生变化;同时可以看出随着超声功率的增大,修复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,当超声振幅超过 0.55 μm 时,外观又变得粗糙直至蜂窝状,表面质量逐渐变差。这说明一定范围的超声振幅得到较好的修复层表面形貌,超声振幅较小时起不到预期作用，较大时出现蜂窝状的表面形貌。



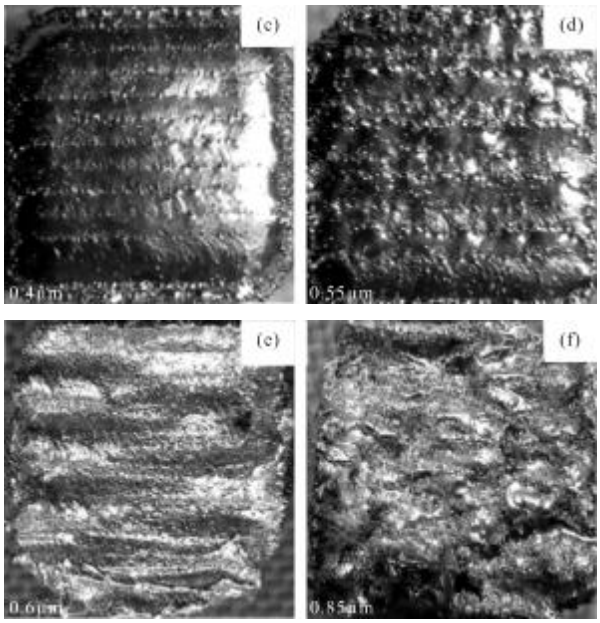


图 3 不同超声振幅下激光沉积修复层表面形貌

Fig.3 Surface morphology of laser deposition repairing layers under different ultrasonic amplitudes

3 超声波对熔池作用机理的探讨

超声波对液体的作用包括超声空化效应、超声的机械作用、超声的热作用,其中超声空化效应又包括高温效应、放电效应、发光效应、压力效应等[17],产生这些效应的根源便是液体中声场的分布及其变化所带来的影响，因此研究超声对激光沉积修复熔池的作用机理归根结底是探讨熔池中超声场的分布以及变化特征。

3.1 超声波在熔池中传播的声场模拟

根据光斑直径及试验测量可知熔池的直径为 4 mm 熔深为 0.8 mm 的不规则球体。假设熔池内熔融态金属是不可压缩的;另外,可以通过调整超声的施加位置使得振幅恒定，因此可以认为超声作用区域的振幅恒定。熔融金属密度为 4 200 kg/m^3,动力粘度为 0.044 1 Pa·s,由参考文献[18]中查得液体声速范围为 1 000~2 000 m/s,取其声速 1 500 m/s。试验过程中发现,振幅为 0.4 μm 时,能得到较理想的修复组织，故将此正弦规律变化的位移载荷施加到熔池中,图 4 为超声波频率为 19 560 Hz、振幅为 0.4 μm 时熔池内部声压随时间的变化云图。

由上图 4 可以看出,当 t=1μs 时,超声开始传入熔池,在熔池底部出现正压区;当 t=7μs 时,熔池顶

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

部出现负压区,同时熔池的底部的正压区逐渐沿熔池底部扩大;当 t=12 μs 时,熔池负压区向下移动,负压值不断升高,同时正压区向两侧移动;当 t=25~50 μs 时,正负压区弥散分布于熔池中,正负压区交替变化,因此能形成一定强度的辐射压力。

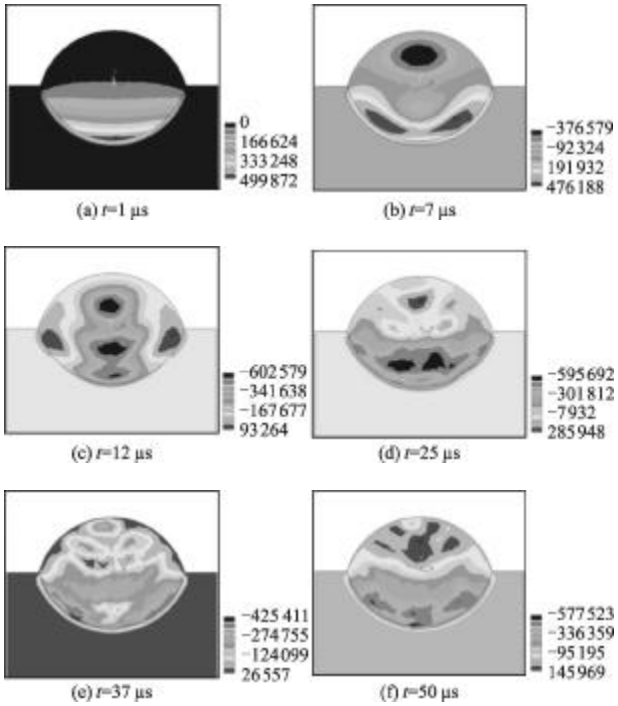


图 4 振幅为 0.4 μm 时熔池内部声压变化的计算结果

Fig.4 Calculation results of acoustic pressure in motel pool when amplitude is 0.4 μm

超声从底部传入熔池,熔池底部相当于初始声源,由于熔池中熔融金属的粘滞力和内摩擦力对超声的吸收和损耗,因此熔池内部其它部位的声压低于熔池底部中心位置的声压值,通过模拟得到熔池底部中心位置声压的变化曲线如图 5 所示。

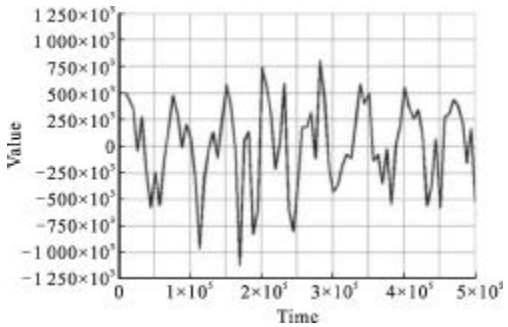


图 5 熔池底部中间位置声压随时间的变化曲线

Fig.5 Variation of acoustic pressure with time in the center of the bottom of the molten pool

由图 5 可见,随时间的变化,正负声压值出现周期性变化,负压幅值达到 -1.1×10^6 Pa,且出现的频率不高。

3.2 超声空化效应

超声波振动传播到熔池中时,液体内的声压产生交替变化,若交变声压的幅值 p_m 大于液体中的静压力 p_0,则在声压的负压相(或称稀疏相)中,负压的峰值($-p_m$)不但可以抵消静压力,还可在液体中形成局部性的负压作用区,当这一负压($-p_m+p_0$)足以克服液体分子间的结合力时,即达到了空化阈值,液体将被拉断而形成空腔,即产生空化气泡。接着在声压的正压相(或称压缩相)到来时,空化气泡产生闭合和崩溃。在闭合和崩溃的瞬间,液体间相互碰撞产生强大的冲击波,这就是所谓的超声空化效应[17,19]。超声空化效应产生的空化泡,不断的膨胀、破碎,在空化泡膨胀阶段,空化泡表面温度下降,在空化泡表面产生过冷形核。晶核通过声流效应在熔池中产生的搅拌作用分布到熔体中去,从而增加了形核率,细化了晶粒[20]。因此熔池中的声压值能否达到空化阈值,直接决定着超声空化效应的发生。

空化阈值 P_B 与液体的粘滞系数 η 的关系,可用下述经验公式近似的表示为[17]:

$$P_B \approx 0.8(\lg\eta+5)$$

根据上述公式求得熔池中熔融金属的空化阈值 $P_B\approx2.9\times10^8$ Pa,结合图 5 可知,0.4 μm 的超声振动所产生的声压值远不能达到熔融金属的空化阈值,因此不能发生空化效应。由参考文献[21]查得当甘油的体积浓度为 80%时其粘度为 0.045 86 Pa·s,由参考文献[22]查得其声速为 1 830 m/s,其粘度、声速与熔融态钛合金 BT20 相当,因此物理模拟在 80%甘油水溶液中施加 0.4 μm 的超声振动,未发现有空化泡的产生,从而说明了熔池内部未发生超声空化效应。从而说明了图 5 中数值计算结果的合理性。

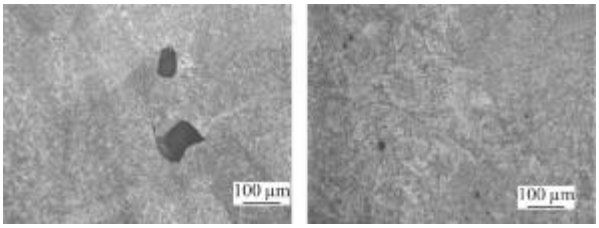
3.3 超声的机械作用

在不改变激光工艺参数的前提下,分别通过施加 0.4 μm 超声振动和不施加超声振动两种方式进行激光沉积修复试验。修复完成后用线切割机床沿垂直激光扫描方向将修复件切开,进行打磨抛光处理,观察其断面气孔率情况,如图 6 所示。

由图 6 可见,未施加超声振动的修复件断面气孔较大,而施加超声振动后的断面气孔明显变小。利

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

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%,这是因为超声的高频振动及辐射压力可在熔池熔融金属中形成有效的搅拌和流动,能显著减弱液体的表面张力及摩擦力,能够起到去除熔融金属中气体的作用。从侧面说明了图 4 的数值计算结果的可靠性。



(a) 未施加超声振动　　(b) 施加超声振动

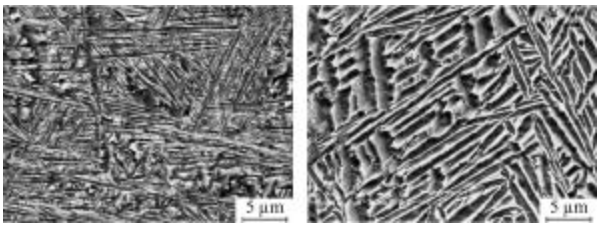
(a) Without ultrasonic vibration　　(b) With ultrasonic vibration

图 6 气孔率对比图

Fig.6 Porosity comparison chart

3.4 超声的热作用

利用 SEM 在放大 3 000 倍的情况下观察其显微组织如图 7 所示,观察结果显示,激光沉积修复 BT20 钛合金得到的初生 β 晶粒内组织为大量不同取向相互交叉的发达魏氏 α/β 片层组织。



(a) 未施加超声振动　　(b) 施加超声振动

(a) Without ultrasonic vibration　　(b) With ultrasonic vibration

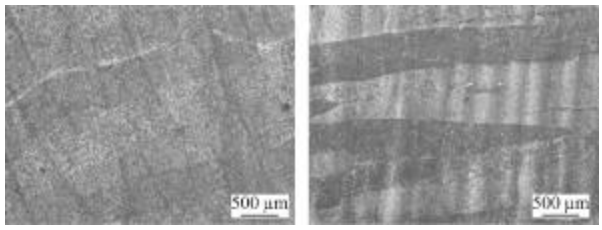
图 7 α/β 片层组织对比图

Fig.7 α/β lamellar microstructure comparison chart

由图 7 可知,未施加超声的组织中 α 板条细而长;而施加超声后,α 板条明显变粗变短,利用 Image-plus 图像分析软件分析得到,未施加超声的长度 α 板条平均长度约为 7.4 μm,平均厚度约为 0.5 μm,而施加超声后的 α 板条平均长度约为 4.5 μm,平均厚度约为 0.9 μm,即平均长度减小了 39.2%,平均厚度增加了 80%。这是由于高频振动及辐射压力将长 α 板条打断,使其变短;另外熔池熔融金属对超声的吸收及内摩擦损耗,在一定时间内的超声连续作用下,将超声能量转化为热能,可使熔池中的声场区域产生温升,从而降低了熔池的凝固速度,使得 BT20 钛合金晶粒内部的 α/β 片层组织有足够长的时间长大,因此 α 板条变短变粗。

4 超声在激光沉积修复中的应用展望

超声场下的激光沉积修复技术是在激光沉积修复技术的基础上发展起来的,这里借鉴了超声在铸造及焊接中的应用,能成功的抑制气孔的产生、细化晶粒、均匀组织。但是由于激光沉积修复熔池的体积小(直径为 4 mm 的熔滴),存在时间短(约为 0.5 s)等特点,过大的超声振幅会使得熔池的振动加剧,难以形成质量较好的修复层,如图 3(f)所示。另外,与铸造和焊接工艺不同的是,激光沉积修复技术中超声振动是从修复件底部施加进去的,熔池的两侧没有壁面加以约束,处于自由状态;而铸造中有型腔的约束,焊接中有焊缝两侧的壁面约束,均能对熔池有一定的限制作用,且都是从熔融液体上端面施加超声,对于较大功率的超声振动在保证良好的成形效果的前提下能起到细化晶粒的作用。图 8 所示为激光沉积修复中 β 柱状晶的成长情况。



(a) 未施加超声　　(b) 施加超声

(a) Without ultrasonic　　(b) With ultrasonic

图 8 β 柱状晶粒的长度对比图

Fig.8 Comparison of length of β-columnar grain

由图 8 可知,超声振动没能阻止 β 柱状晶沿沉积方向的生长,说明在保证成形效果的前提下,超声振动不足以克服修复层晶粒的外延生长的驱动力,即没能细化晶粒。因此如何在增加超声振幅的前提下,既能保证成形性又能细化晶粒应当成为当前各科研院所研究的主流方向。

5 结　论

(1) 超声波振幅为 0.2~0.55 μm 时,能得到成形

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

质量较好的修复层；

(2) 超声波振幅为 0.4 μm 时，超声波对熔池的作用主要表现在其机械作用和热作用，而不是超声空化效应；

(3) 超声的机械作用使得组织的气孔率降低，但是其机械作用不足以克服修复层晶粒外延生长的驱动力，没能阻止 β 柱状晶粒沿沉积方向的生长；超声的机械作用将晶粒片层组织中的 α 板条打断，而热作用使得熔池凝固速度降低，从而使 α 板条变短变粗。

参考文献：

[1] Zhang Xiaohong, Lin Xin, Chen Jing, et al. Effects of heat treatment on the microstructures and mechanical properties of TAl5 titanium alloys by laser solid forming [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(1): 142-147. (in Chinese)
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.

[2] Xi Mingzhe, Gao Shiyou. Heat-treated microstructures and mechanical properties of TA15 titanium alloy fabricated by laser rapid forming [J]. Chinese Journal of Laser, 2012, 39 (1): 0103007-1-0103007-6. (in Chinese)
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): 0103007-1-0103007-6.

[3] Yu Xinnian, Sun Fuquan, Liu Xinyu, et al. Research on laser cladding repairing for defect on titanium alloy surface [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, (16): 116-118. (in Chinese)
于新年, 孙福权, 刘新宇, 等. 钛合金表面缺陷的激光修复修复研究[J]. 航空制造技术, 2011, (16): 116-118.

[4] Zheng Lijuan, Li Juan, He Dachuan, et al. Analysis on temperature field of multi-path laser cladded and microstructure of coatings layer [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(S1): 52-57. (in Chinese)
郑丽娟, 李燕, 何大川, 等. 激光多道熔覆温度场及熔覆层组织分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S1): 52-57.

[5] Lin Yinghua, Chen Zhiyong, Li Yuehua, et al. Microstructure and hardness characteristic of in-situ synthesized TiB coating by laser cladding on TC4 titanium alloy [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(10): 2694-2698. (in Chinese)
林英华, 陈志勇, 李月华, 等. TC4 钛合金表面激光熔覆原位制备 TiB 陶瓷涂层的微观组织特征与硬度特性[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2694-2698.

[6] Wang Huaming, Zhang Shuquan, Wang Xiangming. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components [J]. Chinese Journal of Laser, 2009, 36(12): 3204-3209. (in Chinese)
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 (邀请论文)[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3204-3209.

[7] Yan Zhangong, Lin Feng, Yan Yongnian, et al. Overview Of direct metal rapid prototyping and manufacturing technologies [J]. Chinese Journal Of Mechanical Engineering, 2005, 41 (11): 1-7. (in Chinese)
闫占功, 林峰, 颜永年, 等. 直接金属快速成形制造技术综述[J]. 机械工程学报, 2005, 41(11): 1-7.

[8] Li Huaixue, Gong Shuili, Sun Fan, et al. Development and application of laser additive manufacturing for metal component [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, (20): 25-31. (in Chinese)
李怀学, 巩水利, 孙帆, 等. 金属零件激光增材制造技术的发展及应用[J]. 航空制造技术, 2012, (20): 25-31.

[9] Zhong Minlin, Ning Guoqing, Liu Wenjin. Research and development on laser direct manufacturing metallic components[J]. Laser Technology, 2002, 26(10): 388-393. (in Chinese)
钟敏霖, 宁国庆, 刘文今. 激光熔覆快速制造金属零件研究与发展[J]. 激光技术, 2002, 26(10): 388-393.

[10] Zhang Anfeng, Li Dichen, Lu Bingheng. Research progress in laser direct metal rapid prototyping technology[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2007, 30(50): 68-74. (in Chinese)
张安峰, 李涤尘, 卢秉恒. 激光直接金属快速成形技术的研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2007, 30(50): 68-74.

[11] Xu Binshi, Dong Shiyun, Zhu Sheng, et al. Prospects and developing of remanufacture forming technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48 (15): 96-105. (in Chinese)
徐滨士, 董世运, 朱胜, 等. 再制造成形技术发展与展望[J]. 机械工程学报, 2012, 48(15): 96-105.

[12] Chen Jing, Yang Haiou, Li Yanmin, et al. The research on two kinds of creaking behavior and mechanism of cladding in rapid laser forming process [J]. Applied Laser, 2002, 22(3): 300-304. (in Chinese)
陈静, 杨海欧, 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.

[13] Huang Jinri, Xue Liqin, Mu Guanghua, et al. Effect of

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

ultrasonic casting on alloy[J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 1996, 11(4): 29-33. (in Chinese)
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.

[14] Li Junwen, Momon tadashi. Effect of application time of ultrasonic vibration on the structure of ingots [J]. Foundry Technology, 2004, 25(1): 44-46, 49. (in Chinese)
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.

[15] Zhao Zhongxing, Mu Yugang, Zhou Guangying, et al. The effect of ultrasonic vibration on crystallizing process of casting alloy [J]. Journal of Shenyang Institute of Technology, 1997, 16(3): 9-13. (in Chinese)
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.

[16] Huang Xiaowei, Xi Juntong, Lebrun J L, et al. Influence of processing parameters on geometric characterizations of laser cladding forming 316L stainless steel [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48 (7): 071404-1-071404-6. (in Chinese)
黄小伟, 习俊通, Lebrun J L, 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): 071404-1-071404-6.

[17] Feng Nuo. Ultrasonic Handbook [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1999. (in Chinese)
冯若. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999.

[18] Ma Dayou, Shen Hao. Handbook of Acoustics [M]. Beijing: Science Press, 1983: 142-151. (in Chinese)
马大猷, 沈壕. 声学手册 [M]. 北京: 科学出版社, 1983: 142-151.

[19] Xu Zhiwu, Yan Jiuchun, Wang Changsheng, et al. Propagation characteristic of ultrasonic in AlMMC s and its effect on wetting behavior of liquid filler [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2010, 31(12): 5-8. (in Chinese)
许志武, 闫久春, 王昌胜, 等. 超声波的传播特性及其对钎料润湿行为的影响[J]. 焊接学报, 2010, 31(12): 5-8.

[20] Yang Yunmeng. Experimental research on the effect of ultrasonic on solidification of aluminum alloy[D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese)
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.

[21] Li Jianhua, Chen Zikuan. Application of BP neural network to viscosity prediction of aqueous glycerol solution [J]. Computer Simulation, 2009, 26(2): 193-268. (in Chinese)
李建华, 陈自宽. BP 神经网络在甘油水溶液粘度预测中的应用[J]. 计算机仿真, 2009, 26(2): 193-268.

[22] Liu Yanfeng, Liu Zhuqin. Study on the relationship between sound velocity and the concentration of glycerol solution based on ultrasonic [J]. Information Technology, 2011(12): 126-130. (in Chinese)
刘艳峰, 刘竹琴. 基于超声波研究甘油溶液中声速与浓度的关系[J]. 信息技术, 2011(12): 126-130.

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com