

超声波在 BT20 钛合金中的传播特性及熔池中 超声场的分布研究

杨光 郭鹏飞* 王维 钦兰云 卞宏友 王伟 项坤

(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 有限元软件数值模拟和实验相结合,研究了超声波在 BT20 钛合金修复件和熔池中的传播特性。结果表明,在变幅杆做纵向振动的前提下,当与其耦合的修复件长度小于变幅杆上纵波波长的 23% 时,修复件表面振动为纵向振动;当修复件长度大于波长的 28% 时,其表面变为弯曲振动;随着修复件长度的增加,其谐振频率也在纵波波长的 23%~28% 范围内出现跳跃并重新分布;且在两种不同类型的振动中,随着修复件长度的增加,谐振频率都出现递减的趋势;在熔池中施加频率为 19.56 kHz、振幅为 0.2 μm 的超声振动后,其内部出现周期性交替变化的正负声压,负压值可达到几十万帕。

关键词 光学制造; 激光沉积修复; 数值模拟; 超声波; 声压; 润湿

中图分类号 TG665 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.1203009

Propagation Characteristic of Ultrasonic in BT20 Titanium Alloy and Research on Distribution of Ultrasonic Field in Molten Pool of Laser Deposition Repair

Yang Guang Guo Pengfei Wang Wei Qin Lanyun Bian Hongyou
Wang Wei Xiang Kun

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

Abstract The propagation characteristic of ultrasonic in repaired components of BT20 titanium alloy and molten pool is investigated by using ANSYS finite element simulation and experimental test. Under the circumstance that the horn vibrates longitudinally, the results show that when the length of repaired component coupled with horn is less than 23% of the longitudinal wavelength, the type of ultrasonic vibration on the surface of repaired component belongs to longitudinal vibration; however, when the length of repaired component is more than 28% of longitudinal wavelength, the type of ultrasonic vibration belongs to bending vibration; With the length of repaired component increasing, resonant frequency changes a lot and redistributes when the length of repaired component is between 23% and 28% of the longitudinal wavelength. In the two different kinds of vibrations, as the length of repaired component increases, the resonant frequency declines. When ultrasonic vibration is loaded at a frequency of 19.56 kHz, with amplitude of 0.2 μm , the positive and negative acoustic pressure in the molten pool changes alternatively and the negative pressure reaches hundreds of thousands of pascals.

Key words optical fabrication; laser deposition repairing; numerical simulation; ultrasonic; acoustic pressure; wetting

OCIS codes 220.4610; 000.2190; 350.3850

收稿日期: 2013-06-14; 收到修改稿日期: 2013-08-20

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(L2011026)

作者简介: 杨光(1978—),男,工学博士,副教授,主要从事激光沉积制造方面的研究。E-mail: yangguang@sau.edu.cn

*通信联系人。E-mail: 34046298@qq.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引 言

超声场下的激光沉积修复技术是近几年在激光沉积修复技术的基础上发展起来的。激光沉积修复技术始于 20 世纪 90 年代中期,它融合了激光熔覆技术和快速成形技术二者的优点,避免了电焊中基体的热影响区大,晶粒粗大严重,机械性能低的弱点,同时弥补了电刷镀和喷涂等修复层薄的缺点,因此自出现以来受到国内外的广泛关注^[1-7]。刘洪喜等^[8]研究了在 45 号钢表面通过激光熔覆技术沉积 Ni60CuMoW 合金,发现与未经过任何处理的基体表面相比,熔覆以后的表面其抗腐蚀性能和显微硬度显著提高。但是由于在激光沉积修复过程中,材料的熔化、凝固都是在极快的条件下进行的,因沉积材料与基体材料的热物性差异以及成形工艺等因素影响,修复区内部保留较大残余应力并存在着气孔、裂纹、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^[4,9-14]。王传琦等^[15]研究了机械振动辅助激光熔覆 NiCrBSi-TiC 复合涂层中颗粒相行为特征,结果表明振动作用使得熔覆区组织细化,并使硬质相晶格的完整性提高,晶粒细化;另外,振动作用促使颗粒相均匀弥散分布于基体枝晶内和枝晶间。2005~2006 年上海交通大学邓琦林等提出了将超声场施加到激光熔覆中去,并从理论上进行了分析,但是没有实验进展的相关报道。超声振动在铸造、焊接方面的应用,成功细化了晶粒,均匀了组织,抑制了

气孔的产生,并能较明显地消除残余应力,提高材料强度、增强材料塑性^[16-20],因此如何更合理、高效地在激光沉积修复技术中施加超声振动已成为研究热点。目前,较为成熟的工艺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。这种工艺将超声传至修复区表面,进而作用于熔池,与直接将超声作用于熔池相比,这种方法能直接作用于润湿界面,损耗更小,施加部位更加灵活且较小的超声功率就可以实现激光沉积修复。另外,通过超声变幅杆与修复件相连,容易实现,稳定性更好。

以修复件修复过程中导入超声波的润湿体系为研究对象,通过 ANSYS 有限元软件数值模拟与实验相结合,一方面研究了超声波在不同长度修复件中的传播特性,从而准确掌握不同长度修复件各个位置的振幅分布情况,以便在激光沉积修复中施加合适的振幅;另一方面研究了熔池中的声场分布及其对熔池润湿性的影响,说明了当修复区的截面为 V 字型或存在窄缝隙以及修复区为台阶时,超声场下的熔融态金属的填充能力。该研究工作可为从修复件底部导入超声的激光沉积修复技术提供借鉴。

2 模型的建立及试验过程

ANSYS 有限元软件模拟采用其自身含有的动力学分析模块和声学模块,实际实验过程如图 1(a)所示,建立的几何模型是在实际实验模型的基础上抽象出来的,如图 1(b)所示。修复件上超声的加载区域为变幅杆的顶端与修复件的结合区域,即以几何中心为圆心,10 mm 为半径的圆面。数值模拟分两个阶段:1) 超声在不同长度修复件中的传播特

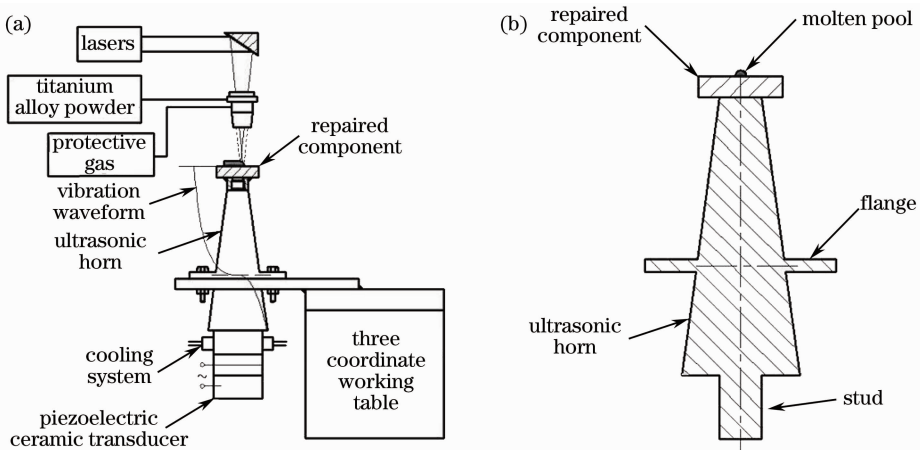


图 1 实验模型和超声波传播特性计算的几何模型。(a) 实验原理图; (b) 数值计算模型
Fig. 1 Experimental test model and geometrical model for calculation of ultrasonic propagation.
(a) Experimental principle diagram; (b) numerical simulation model

性；2) 超声在熔池中的传播特性。超声的传播特性主要考虑不同长度修复件表面振动类型，而熔池主要考虑其内部声压值的变化。

其中，变幅杆材料采用 H59 黄铜，修复件材料为 BT20 钛合金，修复区亦是利用 BT20 钛合金粉末通过激光沉积得到，其材料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数表

Table 1 Material parameters table

Parameters material	Modulus of elasticity / (10^{11} Pa)	Poisson's ratio	Density / (kg/m^3)	Acoustic speed / (m/s)
H59	1.05	0.34	8500	3450
BT20	1.10	0.33	4505	5170

为了研究不同修复件长度对超声传播特性的影响，同时避免修复件的厚度和宽度对超声的传播造成影响，修复件厚度和宽度应尽量小，分别取为 10 mm 和 30 mm。其中频率为 19.56 kHz 的超声波在黄铜变幅杆中传播时的纵波波长 λ 为 176 mm (在实际应用中由于效果相似，通常把频率大于 15 kHz 的声波称为超声波)，实验选取了 8 种不同尺寸的修复件，其尺寸参数如表 2 所示。

表 2 修复件的尺寸参数

Table 2 Dimension parameters of repaired components

No.	Thickness /mm	Width /mm	Length /mm
1	10	30	20
2	10	30	30
3	10	30	40
4	10	30	50
5	10	30	60
6	10	30	70
7	10	30	80

到 ANSYS 有限元分析软件中，然后对振动系统进行动力学分析，设定变幅杆固定法兰处所有自由度为零并根据超声波发生电源的调频范围及变幅杆的振动类型，从模态分析中提取所需振型，变幅杆和不同长度修复件构成的振动系统的相对位移云图如图 2 所示。

由图 2 可见，振动系统在某个谐振频率下共振，其中变幅杆做纵向振动，修复件的振动在其厚度方向。图 2(a) 中修复件呈红色，其表面相对位移均匀；图 2(b) 中修复件的几何中心位置附近呈黄棕色，表明此区域相对位移减小；图 2(c) 中中间位置呈绿色，说明表面相对位移最小值接近于零，整个表面的相对位移不再均匀；图 2(d) 中修复件表面颜色由红色变为蓝色后又变为红色，说明中间经历了两次相对位移为零的点，即存在两个波节，至此，修复件出现弯曲振动，因此振动类型是由修复件长度与 $(40/176.38)\lambda \sim (50/176.38)\lambda$ 的关系决定的，即以 $0.23\lambda \sim 0.28\lambda$ 为界，当修复件长度小于 0.23λ 时，修复件表面振动为纵向振动；当修复件长度大于 0.28λ 时，其表面变为弯曲振动，且随着修复件长度的递增，波腹的数量有增加的趋势。

3 实验结果与讨论

3.1 试件表面声场分布的模拟结果

首先利用三维建模软件 UG 进行建模，将其导入

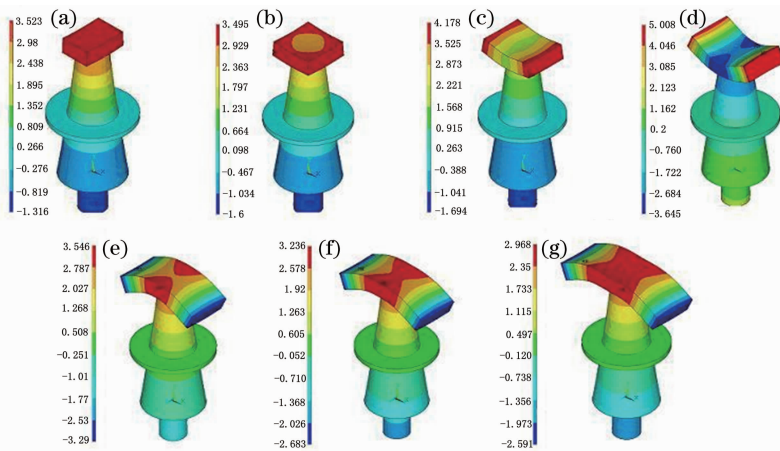


图 2 振动系统的相对位移云图。(a) 1 号修复件；(b) 2 号；(c) 3 号；(d) 4 号；(e) 5 号；(f) 6 号；(g) 7 号
Fig. 2 Relative displacement cloud chart of vibration system. (a) No. 1 repaired component; (b) No. 2; (c) No. 3; (d) No. 4; (e) No. 5; (f) No. 6; (g) No. 7

从模态分析中提取所需振型相对应的谐振频率,研究其随修复件长度的变化而变化的规律,其曲线分布图如图 3 所示。

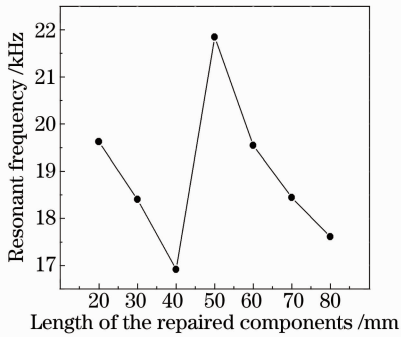


图 3 不同修复件长度的振动系统谐振频率分布图
Fig. 3 Distribution of resonant frequencies of vibration system with different lengths of the repaired components

由图 3 可以看出,随着修复件长度的增加,谐振频率下降,且 4 号修复件的谐振频率突然升高,后又随修复件长度的增加,谐振频率下降。即当修复件长度小于 0.23λ 时,随修复件长度的增加,谐振频率下降,这是由于随着修复件长度的增加,振动系统的质量增加,从而导致谐振频率下降;当修复件长度越

过 0.28λ 时,谐振频率出现跳跃并重新分布。同样的,随修复件长度的增加,谐振频率下降。

3.2 熔池中声场分布的模拟结果

由修复件中位移场的计算结果可见,对于修复件的长度较小时(小于 0.23λ),其表面为较均匀的纵向振动,可以认为位移振幅恒定;而对于修复件长度较大时(大于 0.28λ),修复区位置直接影响位移振幅的大小,这里可以通过调整加载位置使得修复区的位移振幅较为均匀。因此,此时假设熔池所处位置的位移振幅恒定。根据光斑直径假设熔池直径为 4 mm 的半球。熔融态 BT20 钛合金的密度为 4200 kg/m^3 ,动力粘度为 $0.0441 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,由文献[21]中查得液体声速范围为 $1000\sim 2000 \text{ m/s}$,取其声速为 1500 m/s 。实验过程中发现,振幅为 $0.2 \mu\text{m}$ 时,能得到成形质量较好的修复区,如图 4 所示。其中图 4(b)的表面较平整,成形质量较好,将其用线切割机床切开,并观察其内部组织如图 5 所示。其中图 5(b)中气孔缺陷明显变小。故将此正弦规律变化的位移载荷施加到熔池中,图 6 为超声波频率为 19.56 kHz 、振幅为 $0.2 \mu\text{m}$ 时熔池内部声压随时间的变化云图。

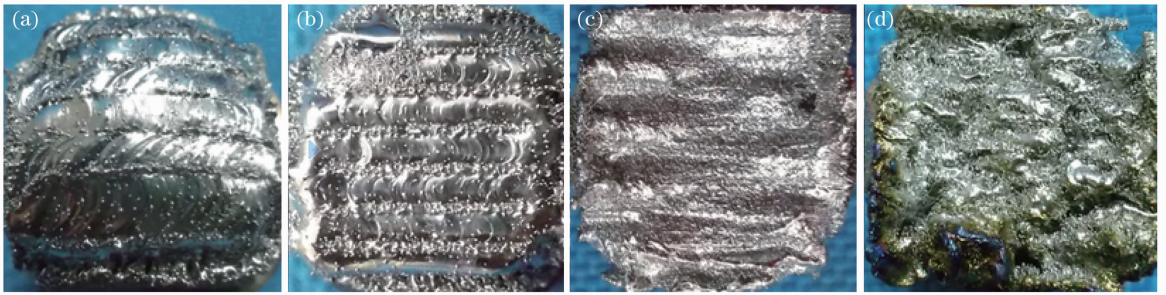


图 4 不同超声振幅下的修复层表面形貌。(a) 未施加超声振动;(b) $0.2 \mu\text{m}$;(c) $0.6 \mu\text{m}$;(d) $0.85 \mu\text{m}$
Fig. 4 Surface morphology of laser cladding parts under different ultrasonic amplitudes. (a) Without ultrasonic vibration; (b) $0.2 \mu\text{m}$; (c) $0.6 \mu\text{m}$; (d) $0.85 \mu\text{m}$

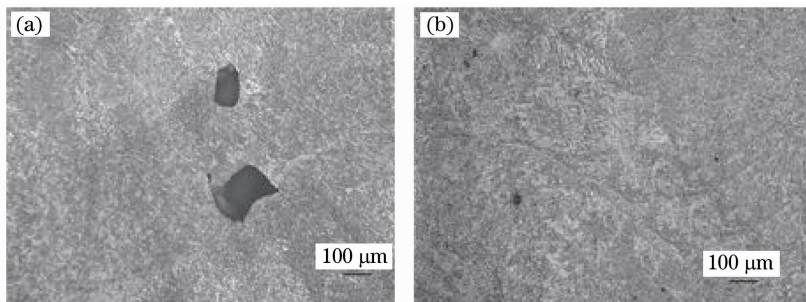


图 5 内部组织对比图。(a) 未施加超声振动;(b) $0.2 \mu\text{m}$
Fig. 5 Internal organization comparison chart. (a) Without ultrasonic vibration; (b) $0.2 \mu\text{m}$

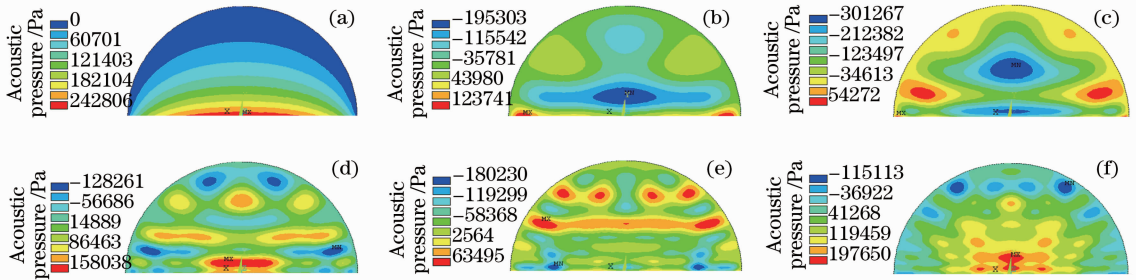


图 6 振幅为 $0.2 \mu\text{m}$ 时熔池内部声压变化的计算结果。(a) $t=1 \mu\text{s}$; (b) $t=7 \mu\text{s}$; (c) $t=12 \mu\text{s}$; (d) $t=22.6 \mu\text{s}$; (e) $t=37 \mu\text{s}$; (f) $t=50 \mu\text{s}$

Fig. 6 Calculation results of acoustic pressure in motel pool when amplitude is $0.2 \mu\text{m}$. (a) $t=1 \mu\text{s}$; (b) $t=7 \mu\text{s}$; (c) $t=12 \mu\text{s}$; (d) $t=22.6 \mu\text{s}$; (e) $t=37 \mu\text{s}$; (f) $t=50 \mu\text{s}$

图 6(a)为 $t=1 \mu\text{s}$ 时熔池内部声压的分布云图。此时,超声波开始由修复件表面传入熔池,压力梯度为正,声波逐渐向熔池内部传播。图 6(b)~(f)显示了熔池内部声压的变化过程。随着时间的推移,熔池内部出现负压区,且负压区域逐渐变大,负压区域位置不断上移,压力值也不断升高,越过 $12 \mu\text{s}$ 后,负压面积又逐渐变小,同时出现了弥散分布的断点状正压区。

超声波振动传播至熔池内部时,熔池内的声压产生交替变化,当熔池的局部处于负压区的稀疏相时,若负压峰值能够克服分子间的结合力,即达到熔融态金属的空化阈值,液体将被拉断形成空腔,从而形成空化泡,在随之而来的正压区压缩相的压力作用下,空化泡会急速闭合、崩溃;在崩溃过程中产生了瞬态的极大的高温高压,并产生强大的冲击波,这就是所谓的空化效应。从空化效应产生的过程可以看出,负压的大小是形成空化效应的重要条件^[22]。

图 7 为超声波频率为 19.56 kHz 、振幅为 $0.2 \mu\text{m}$ 时修复件表面的润湿界面的声压随时间的变化曲线。

由图 7 可知,润湿界面可以产生 $1.8 \times 10^5 \text{ Pa}$ 以上的正压和 $-1.6 \times 10^5 \text{ Pa}$ 以上的负压,而且负压出现的频率很高。这样强的声负压,通过与声正压的交互作用,应该可以产生比较强的空化效应。

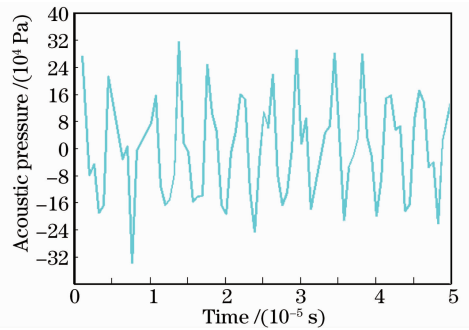


图 7 润湿界面的声压随时间的变化曲线
Fig. 7 Variation of acoustic pressure with time at wetting interface

3.3 超声波振型的观察及谐振频率的测量和润湿实验

利用 TJS-D 超声波数字控制驱动电源驱动换能器进行工作,通过调节操作电位器使振动系统在谐振频率下共振。利用等效替代法,在试件表面均匀的铺上银白色球形粉末,施加超声振动数秒后,观察修复件表面粉末的分布情况,如图 8 所示。

由图 8 可见,图 8(a)~(c)中修复件表面未发现存有银白色球形粉末,这是超声振动将修复件表面的粉末反弹掉的结果;而(d)~(h)中修复件表面粉末存留区域沿长度方向呈带状分布,这是由于修复件表面出现了振幅为零的区域,即波节。这个实验结果与图 2 所示的计算结果是吻合的。

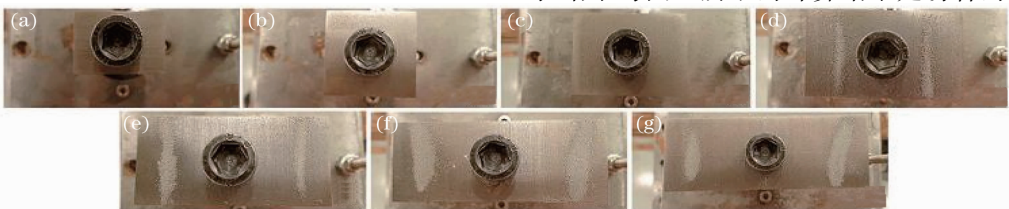


图 8 修复件表面振型的物理模拟。(a) 1 号修复件;(b) 2 号;(c) 3 号;(d) 4 号;(e) 5 号;(f) 6 号;(g) 7 号
Fig. 8 Physical simulation of acoustic model of repaired components surfaces. (a) No.1 repaired component; (b) No.2; (c) No.3; (d) No.4; (e) No.5; (f) No.6; (g) No.7

实验中记录下各组修复件的谐振频率并与模拟结果进行比较,如表 3 所示。

表 3 谐振频率的模拟值与实测值比较

Table 3 Contrast between simulation values and measured values of resonant frequencies

No.	Simulation resonant frequency /kHz	Measured resonant frequency /kHz	Error /%
No. 1	19.623	19.742	0.6
No. 2	18.403	19.724	7
No. 3	16.918	17.173	1.5
No. 4	21.843	20.502	6
No. 5	19.544	19.171	1.9
No. 6	18.443	17.569	4.7
No. 7	17.611	16.961	3.7

由表 3 可知,数值模拟和实际实验结果误差在 10% 以内,表明有限元数值模拟结果与实际实验结果能较好地符合。

鉴于 BT20 钛合金熔池存在时间短(约 0.5 s),温度高(1680 °C 以上),而且易氧化变质,考虑用其它物性参数相当的液体替代。由文献[23]查得当甘油的体积浓度为 80% 时,其粘度为 0.04586 Pa·s,由文献[24]查得其声速为 1830 m/s,其粘度、声速与熔融态钛合金 BT20 相当,因此润湿实验的物理

模拟采用 80% 甘油水溶液。为避免液滴由于重力作用而产生铺展润湿,因此待液滴在重力作用下充分润湿后,再施加振幅为 0.2 μm 的超声振动,施加时间为 0.5 s,观察液滴铺展润湿程度,实验结果如图 9 所示。用图像分析软件 Image-Pro Plus 分析得出液体的铺展面积增加了 17.2%,说明液滴发生一定程度的铺展润湿,这个试验结果与图 7 所示的计算结果是吻合的。

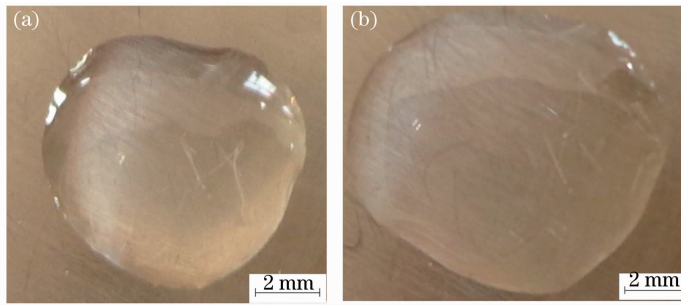


图 9 甘油水溶液在修复件表面的润湿实验。(a)未施加超声波;(b)施加超声波

Fig. 9 Wetting of glycerol aqueous solution on surface of repaired component. (a) Without ultrasonic; (b) with ultrasonic

4 结 论

当修复件长度小于变幅杆上纵波波长的 23% 时,修复件表面振动为纵向振动;当修复件长度大于波长的 28% 时,其表面变为弯曲振动;随着修复件长度的增加,其谐振频率也在纵波波长的 23% ~ 28% 范围内出现跳跃并重新分布;且在两种不同的振动中,随着修复件长度的增加,谐振频率都出现递减的趋势;利用等效替代法观察了修复件表面的振型并测量了实际谐振频率,最后进行了润湿实验,其结果均能和有限元数值模拟结果较好地符合,从而初步说明了有限元数值模拟结果的可靠性。

参 考 文 献

1 Lin Xin, Xue Lei, Chen Jing, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of laser forming repaired Ti-6Al-4V alloy

component [J]. *China Surface Engineering*, 2009, 22 (1): 19-24.

林鑫,薛蕾,陈静,等.激光成形修复 Ti-6Al-4V 钛合金零件的组织与性能[J]. *中国表面工程*, 2009, 22(1): 19-24.

2 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.

3 Jiang Wei, Hu Fangyou, Han Li. The applied research on the repair of airplane leaf blade by laser cladding [J]. *New Technology & New Process*, 2007, (12): 57-59.

姜伟,胡芳友,韩莉.激光熔覆技术在飞机叶片修复中的应用研究[J]. *新技术新工艺*, 2007, (12): 57-59.

4 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.

5 F G Arcella, F H Froes. Producing titanium aerospace

- components from powder using laser forming[J]. JOM, 2000, 52(5): 28-30.
- 6 Wang Maocai, Zhang Jie. Powder metallurgy repair & remanufacturing of high temperature alloy bucket [J]. China Surface Engineering, 2010, 23(1): 80-86.
王茂才, 张杰. 高温合金叶片粉末冶金修复再制造[J]. 中国表面工程, 2010, 23(1): 80-86.
- 7 Wang Wei, Cai Lei, Yang Guang, *et al.*. Research on the key parameters of power-feeding nozzle for laser cladding forming[J]. Laser & Optoelectronic Progress, 2013, 50(2): 021402.
王维, 才磊, 杨光, 等. 激光熔覆成形送粉喷嘴关键参数的探究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 021402.
- 8 Liu Hongxi, Wang Chuanqi, Zhang Xiaowei, *et al.*. Improving the corrosion resistance and mechanical property of 45 steel surface by laser cladding with Ni60CuMoW alloy powder [J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 228: S296-S300.
- 9 Yan Zhangong, Lin Feng, Qi Haibo, *et al.*. Overview of direct metal rapid prototyping and manufacturing technologies [J]. Chinese J Mechanical Engineering, 2005, 41(11): 1-7.
闫占功, 林峰, 齐海波, 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.
- 10 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.
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.
- 11 Zhong Minlin, Ning Guoqing, Liu Wenjin. Research and development on laser direct manufacturing metallic components [J]. Laser Technology, 2002, 26(5): 388-393.
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(5): 388-393.
- 12 Zhang Anfeng, Li Dichen, Lu Bingheng. Research progress in laser direct metal rapid prototyping technology [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2007, 30(5): 68-74.
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(5): 68-74.
- 13 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.
徐滨士, 董世运, 朱胜, 等. 再制造成形技术发展展望[J]. 机械工程学报, 2012, 48(15): 96-105.
- 14 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.
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.
- 15 Wang Chuanqi, Liu Hongxi, Zhou Rong, *et al.*. Characteristic behaviors of particle phases in NiCrBSi-TiC composite coating by laser cladding assisted by assisted by mechanical vibration [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(2): 221-228.
王传琦, 刘洪喜, 周荣, 等. 机械振动辅助激光熔覆 NiCrBSi-TiC 复合涂层中颗粒相行为特征[J]. 金属学报, 2013, 49(2): 221-228.
- 16 Huang Jinri, Xue Liqin, Mu Guanghua, *et al.*. Effect of ultrasonic casting on alloy [J]. Journal of 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.
- 17 Li Junwen, Tao Yezheng. 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.
- 18 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.
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.
- 19 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, 习俊通, 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.
- 20 Qin Lanyun, Wang Wei, Yang Guang. Experiments 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.
- 21 Ma Dayou, Shen Hao. Handbook of Acoustics [M]. Beijing: Science Press, 1983, 142-151.
马大猷, 沈豪. 声学手册 [M]. 北京: 科学出版社, 1983, 142-151.
- 22 Xu Zhiwu, Yan Jiuchun, Wang Changsheng, *et al.*. Propagation characteristic of ultrasonic in AlMMCs and its effect on wetting behavior of liquid filler [J]. Transactions of the China welding institution, 2010, 31(12): 5-8.
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.
- 23 Li Jianhua, Chen Zikuan. Application of BP neural network to viscosity prediction of aqueous glycerol solution [J]. Computer Simulation, 2009, 26(2): 193-268.
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.
- 24 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.
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.

栏目编辑:张腾