

超声场下激光沉积 TA15 钛合金的组织 and 力学性能

王 维, 李新宇, 杨 光, 钦兰云, 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: 为提高激光沉积 TA15 钛合金力学性能, 采用 ANSYS 有限元动力学分析中的谐响应分析, 对超声场下激光沉积修复梯形槽底部表面振幅分布及质点振动情况进行了数值模拟, 并对模拟结果进行了实验验证, 最后对超声场下激光沉积修复试样的综合力学性能进行了实验研究。结果表明: 超声场下梯形槽底部表面各质点呈现周期性运动特点, 最大振幅在 $1.6 \mu\text{m}$ 左右, 对质点振幅进行测量, 与模拟结果吻合较好。进行了超声场下激光沉积实验, 沉积区硬度略有提高, 修复试样抗拉强度提高 3.2%, 屈服强度提高 7.1%, 超声场下显微组织进行观察发现 α 片层变短。

关键词: 超声场; 激光修复; 钛合金; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG174.44 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3559-06

Microstructures and mechanical properties of laser deposition of TA15 titanium alloy with ultrasonic treatment

Wang Wei, Li Xinyu, Yang Guang, Qin Lanyun, Ren Yuhang

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

Abstract: In order to improve the mechanical property of laser deposition TA15 titanium alloy, the harmonic response analysis of the ANSYS finite element dynamic analysis was adopted, amplitude distribution and particle vibration of the bottom surface of the trapezoidal groove surface with ultrasound were simulated, and the experiments were carried out to verify the simulation results. The comprehensive mechanics performance of laser deposition layers with ultrasound was researched by experiment test. The results show that, the points of the bottom surface of the trapezoidal groove with ultrasound presents periodic motion characteristics, and the maximum amplitude is about $1.6 \mu\text{m}$, which is in a good agreement with simulation results. The laser deposition experiment with ultrasound was carried out, and the results show that the hardness of deposition repair region increases, tensile strength of deposition repair region rises by 3.2%, yield strength improves by 7.1%, and microstructures with ultrasonic field are observed that the α lamellas become shorter.

Key words: ultrasonic field; laser repair; titanium alloy; microstructure; mechanical property

收稿日期: 2015-04-11; 修订日期: 2015-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(51305280, 51375316); 航空基金(2014ZE54020); 辽宁省教育厅优秀人才项目(LJQ2014020)

作者简介: 王维(1957-), 男, 教授, 博士, 主要从事激光沉积制造/修复方面的研究。Email: wangwei1116@sau.edu.cn

0 引言

激光沉积修复技术是一种兴起于 20 世纪 80 年代新型的先进修复技术,该技术将激光熔覆技术和快速原形制造技术相结合,通过同轴送粉系统将钛合金粉末快速送入形成的金属熔池内部,按照预定的扫描方式逐层进行材料的累积生长,可以修复任意复杂的零件^[1-3]。该技术具有成本低、加工周期短和材料利用率高等优点,具有广阔的应用前景^[4]。

激光沉积过程中修复层存在着气孔、熔合不良等缺陷,这些缺陷降低了修复件动载荷下的力学性能,成为制约该技术发展的关键问题。激光沉积修复零件的力学性能与激光沉积零件内部的显微组织密切相关,研究^[5-6]表明激光沉积修复零件内部组织晶粒、片层集束、片层等尺寸越小,修复的零件具有优越的力学性能。目前,超声处理金属熔体是提高力学性能的有效方法。刘清梅等人^[7]研究了全过程处理和结晶前超声处理对 Al-Si 共晶和过共晶合金组织的影响。赵忠兴等人^[8]通过底部导入超声方式对铝合金进行超声处理发现合金组织得到明显细化,树枝晶被打断,形成均匀的等轴晶组织或颗粒状组织。但将超声技术施加到激光沉积修复过程中的报道较少。文中基于此系统研究了如何将超声施加到激光沉积熔池内部,并对超声场下激光沉积修复的零件内部组织、拉伸性能、零件表面硬度变化进行了综合分析,为进一步提高激光沉积制造零件综合力学性能提供了一种有效手段。

1 基材表面振幅分布的模拟和测量

1.1 振幅分布模拟

模拟时设定基板为 110 mm×50 mm×15 mm,基板材料为 TA15 钛合金,室温下其密度约为 4 500 kg/m³,弹性模量为 1.01×10¹⁰ Pa,泊松比为 0.34。在基板底部一端施加超声振动。变幅杆端面为圆形,直径为 20 mm,超声频率为 20 kHz,振幅为 2 μm。利用 ANSYS 软件中的动力学分析模块对该过程进行分析,模拟修复槽底部表面的振幅分布,超声施加原理见图 1(a)。

用于瞬态分析时动力学方程如公式(1):

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=\{F\} \quad (1)$$

式中:[M]为结构质量矩阵;[C]为结构阻尼矩阵;[K]

为结构刚度矩阵;{F}为随时间变化的载荷函数;{\ddot{u}}为节点加速度向量;{\dot{u}}为节点速度向量;{u}为节点位移向量。

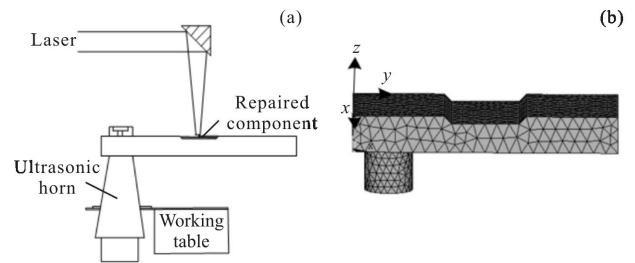


图 1 超声施加原理图及有限元网格划分

Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic field and the finite element meshing

公式(1)中{F}矩阵和{u}矩阵如下所示:

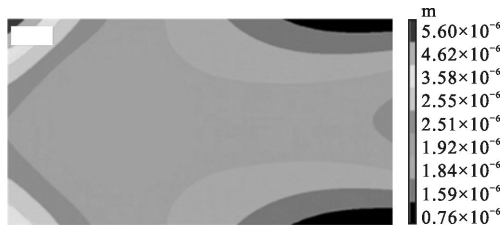
$$\begin{aligned} \{F\} &= \{F_{\max} e^{i\psi}\} e^{i\omega t} = (\{F_1\} + i\{F_2\}) e^{i\omega t} \\ \{u\} &= \{u_{\max} e^{i\varphi}\} e^{i\omega t} = (\{u_1\} + i\{u_2\}) e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (2)$$

谐响应分析的运动方程如下所示:

$$(-\omega^2[M] + i\omega[C] + [K])(\{u_1\} + i\{u_2\}) = (\{F_1\} + i\{F_2\}) \quad (3)$$

式中: ω 为激振频率; ψ 为力相位变换; φ 为位移相位变换。公式(1)是瞬态分析的一般形式,所施加的载荷可以是与时间相关的任意函数,按照求解的方法,ANSYS 允许在瞬态动力分析中包含各种非线性大变形以及塑性变形等。瞬态分析网格模型如图 1(b)所示,施加频率 20 kHz,振动周期 T 为 0.05 ms。所施加的载荷为振幅 2 μm 的周期性正弦函数,梯形槽底部底面设置位移约束为 $U_x=U_y=0$ 。标定梯形槽底部中心点在不同时刻表面振幅分布见图(2)。

图 2(a)为 $t=0.005$ ms 时刻梯形槽底部表面振幅分布云图,图 2(b)为 $t=0.025$ ms 时刻梯形槽底部表面振幅分布云图,图 2(c)为 $t=0.05$ ms 时刻梯形槽底部表面振幅分布云图。由图可知,当变幅杆在基板表面产生振动时候,振动沿着四周开始向外传播,当 $t=0.005$ ms 时,由于超声变幅杆距离梯形槽底部左边界较近,振动首先传达至左边界,随后反向运动,与正向传播的振动发生叠加,导致左界振幅经叠加后较大,而梯形槽底部右侧由于超声还未完全传播至此,振幅较小。随着超声振动的继续进行,当 $t=0.025$ ms 时,超声振动基本达到基板右边界,遇到边界便反射回来,当 $t=0.05$ ms 时,梯形槽底部右边界超声振动经叠加也呈现出边界较大情形。



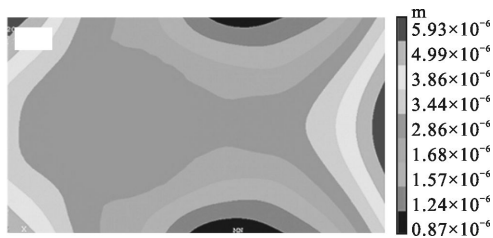
(a) $t=0.005$ ms 梯形槽底部表面振幅分布

(a) Amplitude distribution of the bottom surface of the trapezoidal groove at $t=0.005$ ms



(b) $t=0.025$ ms 梯形槽底部表面振幅分布

(b) Amplitude distribution of the bottom surface of the trapezoidal groove at $t=0.025$ ms



(c) $t=0.05$ ms 梯形槽底部表面振幅分布

(c) Amplitude distribution of the bottom surface of the trapezoidal groove at $t=0.05$ ms

图 2 不同时刻梯形槽底部表面振动情况

Fig.2 Amplitude distribution of the bottom surface of the trapezoidal groove at different times

图 3 为梯形槽底部中心处质点在一个周期内随时间变化情况,最大振幅将达到 $1.6 \mu\text{m}$,且呈现周期性运动特点。

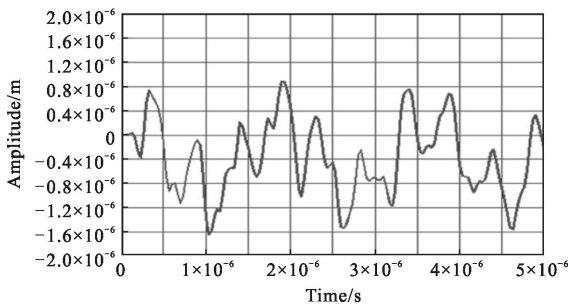


图 3 梯形槽底部表面质点振幅随时间变化曲线

Fig.3 Amplitude change curves of the bottom surface of the trapezoidal groove surface node over time

1.2 基材表面振幅分布的测量

采用 OFV-5000 单点式激光测振仪对基板表面振幅进行测量,在室温时其测量精度为 10 nm ,测量误差为 5% ,测量时激光测振仪激光与被测件之间要有一定的距离,调整焦距后,使激光测振仪后面的信号显示器的信号尽量趋于稳定。激光测振仪与基板方向夹角为 90° ,测试点取梯形凹槽底部等分的 3 个点,点间距为 10 mm ,实验测量如图 4 所示。

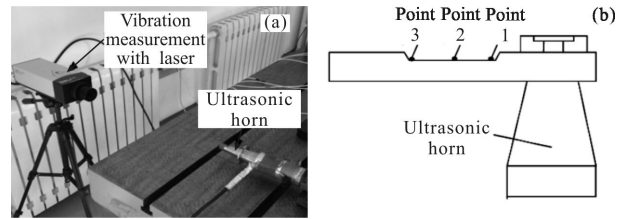


图 4 振幅测试及质点位置示意图

Fig.4 Amplitude test and schematic diagram of point position

超声的施加方式与模拟时施加的方式相同,通过激光测振仪以及示波器测量试件每个位置点的响应振幅并记录数据。为减小测量误差,对每个测量点振幅值捕捉 5 次,取平均值。表 1 为超声激励频率为 20 kHz 时,基板表面平均响应振幅的测量数据。

表 1 振幅测试数据

Tab.1 Data of amplitude

No.	Frequency/kHz	Test frequency /kHz	Amplitude/m
Point 1	20	20	1.54×10^{-6}
Point 2	20	19.6	1.32×10^{-6}
Point 3	20	20.3	1.27×10^{-6}

模拟的最大振幅为 $1.6 \mu\text{m}$,实验测得的最大振幅为 $1.54 \mu\text{m}$,两者数值之间比较接近,表明可以将超声施加在基板表面,为进一步实验提供基础。

2 实验

在将超声引入基板的基础上,进行激光沉积修复 TA15 钛合金实验。实验系统主要由激光器及光路传输系统、数控工作台、惰性气氛保护室、粉末输送系统四部分组成,见图 5。激光器为最大输出功率可达 5 kW 的 CO_2 激光器,实验时激光功率为 1700 W ,光斑直径 3 mm ,搭接率为 45% 。保护气体与载粉气体均为高纯氩气,实验前对加工室抽真空,充氩气,

保证氧气的含量(体积分数)在 0~50 ppm 以内。实验参数如表 2 所示。超声发生装置选用 TJS-3000 智能数控超声发生器,发射频率 20 kHz,输出功率 600 W,振幅 6 μm 。

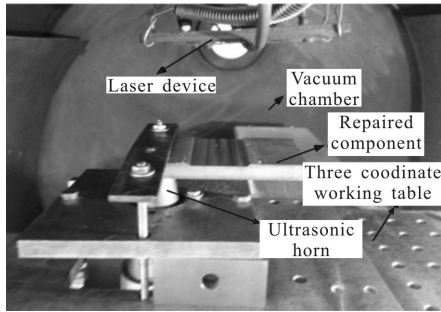


图 5 超声辅助沉积修复实验装置

Fig.5 Deposition repair experiment device with ultrasonic

表 2 激光沉积修复工艺参数

Tab.2 Process parameters of laser deposition repair

Scanning speed V_s /mm \cdot s $^{-1}$	Powder feed rate V_f /rad \cdot s $^{-1}$	Layer thickness/mm	Scanning interval /mm	Scanning mode	Layers	Repair size /mm 2
3	0.7	0.3	3	Y	10	110 \times 50

实验中采用多层多道沉积方式对 TA15 钛合金锻造基材(110 mm \times 50 mm \times 15 mm)进行修复,实验样件采用修复梯形凹槽的方法制备,预置槽深分别为 1.5 mm 和 3 mm。实验前用砂纸打磨掉待修复表面的氧化皮,用酒精擦拭干净,试验采用 CRIMS 型电子万能试验机。用线切割切制标准拉伸样件,金相样件采用拉伸样件制备。试样表面均经研磨抛光后用 Kroll(HF:HNO $_3$:H $_2$ O=2:6:10)试剂进行腐蚀 30~45 s,采用 OLYMPUS 光学显微镜观测激光沉积修复组织结构及形貌。实验采用 HX-1000 维氏硬度计测试修复件表面显微硬度,测试面需要抛光处理,实验施加压力为 0.98 N,持续时间 10 s。

3 结果与分析

3.1 超声场下激光沉积修复 TA15 合金的组织

图 6 为激光沉积区域的显微形貌图,其放大倍数分别为 1 000 倍。修复层显微形貌均由粗大的针状 α +片层 β 转变组织+片状 α 相转变组成。当施加超声后, α 相析出量增多,且未施加超声组织中 α 片层较长,而施加超声之后, α 片层变短。利用 Image-plus

图像分析软件分析得到,未施加超声 α 片层平均长度 8.2 μm ,施加超声后 α 片层长度约为 5.6 μm ,即平均长度减小了 31.7%。这是由于超声场产生的搅拌作用使初生 β 晶的溶质富集减轻, α 层片析出的驱动力减少,进而使得初生 β 相需要在更大的过冷度下才会发生 α 片层的析出,而过冷度的增大也导致了形核率的增大,最终使析出的 α 片层变短。

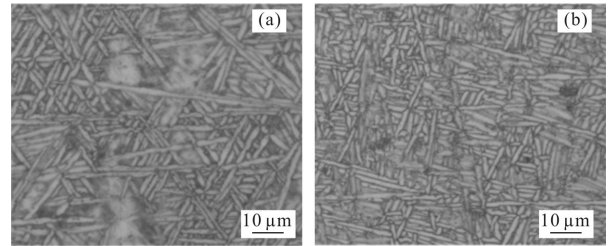


图 6 激光沉积修复区光学显微组织照片(a) 未施加超声振动;(b) 施加超声振动

Fig.6 OM microstructures of the laser deposition repairing sample (a) without ultrasonic (b) with ultrasonic

3.2 超声振动对修复件拉伸性能的影响

如图 7 所示,在板状拉伸试样上预制长为 34.05 mm 的梯形凹槽,槽中心位于拉伸试样的标距中心部位,图 7 中分别为为修复 1.5 mm 槽深的断口位置、修复

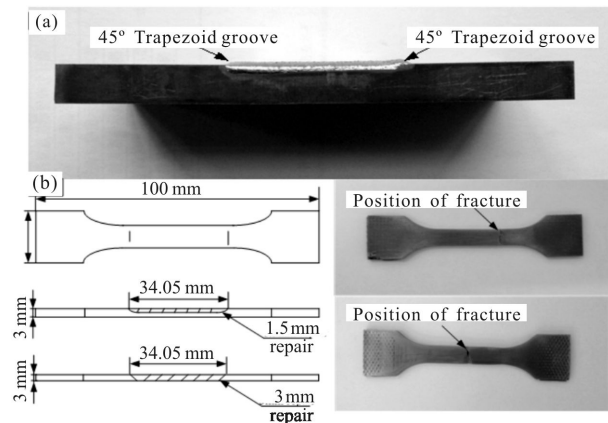


图 7 槽修复形貌及修复拉伸试样照片

Fig.7 Morphology of groove repairment and photos of laser deposition repairing tensile samples

3 mm 槽深的断口位置。图 8 为拉伸断口 SEM 照片,为典型的韧窝特征的延性断口,属于韧性断裂。表 3 为槽修复试样经激光沉积修复后的室温静载拉伸性能试验结果。1# 试样修复槽深为 1.5 mm,未施加超声;2# 试样修复槽深为 1.5 mm,施加超声;3# 试样为修复槽深为 3 mm,未施加超声;4# 试样修复槽深

为 3 mm,施加频率约为 20 kHz 超声。从屈服角度分析,施加超声后的屈服强度在一定程度上均有所提高,其中,修复槽深为 1.5 mm 时,屈服强度提高 4.3%,修复槽深为 3 mm 时,屈服强度提高 7.1%;从抗拉强度角度分析,修复槽深 3 mm,抗拉强度略有提高,提高了 3.2%。可见超声可以提高修复试件的屈服、抗拉强度,改善修复试件的拉伸性能。

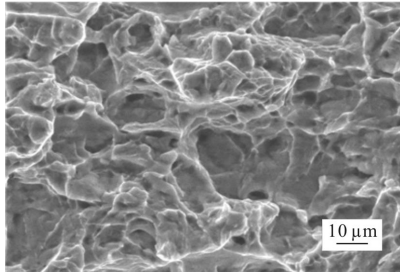


图 8 拉伸试样断口形貌

Fig.8 Fractography of tensile sample

表 3 拉伸试验结果

Tab.3 Results of tension test

No.	Yield strength $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	Tensile strength σ_b/MPa	Reduction $\psi/\%$	Elongation $\delta/\%$
1#	922	925	18	8.9
2#	955	955	21	9.2
3#	945	970	19	9
4#	975	975	20	9

造成上述现象的原因是因为在修复区存在 β/α 界面层,该界面层起着阻碍滑移的作用,而超声的作用能促使 β/α 界面层进一步转变为 $\alpha+\beta$ 转变组织,使材料的屈服强度升高,另一方面分析这可能也与超声作用后 α 片层变短有关。

3.3 超声振动对修复件硬度的影响

为了测量的准确性,采用分区测硬度的方法,即把测试表面分为基材区,热影响区,修复区 3 个部分,每个部分测试 3 个点(如图 9 所示)。

TA15 基材硬度约为 320 HV_{0.1} 左右,沉积层硬度保持在(410~440)HV_{0.1} 之间,大概是基材的 1.3~1.4 倍。修复件硬度的整体分布为:修复区硬度最高,热影响区次之,基材区最低。

但是在修复区域内,施加超声试件的硬度明显

高于未施加超声振动试件,这是由于超声场产生的搅拌作用,使 α 片层析出的驱动力减少,最终使析出的 α 片层变短,沉积层显微硬度有所提高,促使在修复区内施加超声硬度值要比未施加超声硬度值高 90 HV_{0.1} 左右。槽深为 3 mm 的梯形槽修复后表面硬度要高一些,这可能是由于超声作用时间较长, α 片层更短所致。

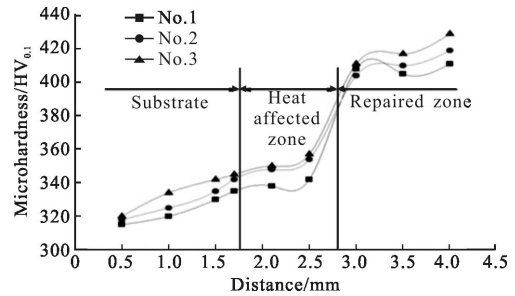


图 9 激光沉积修复件硬度分布

Fig.9 Micro-hardness distribution of laser deposition repairing samples

4 结 论

(1) 文中采用 ANSYS 有限元动力学中的谐响应分析,建立了超声场下质点运动的数学模型,对基板表面振幅分布及质点运动进行模拟;

(2) 对基板表面质点振幅进行测量,与模拟结果进行比较,两者吻合较好,表明可将超声振动引入到基板表面;

(3) 实验结果表明,施加超声后修复区 α 片层变短,抗拉强度和屈服强度略有提高,分别提高了 3.2% 和 7.1%,对修复区显微硬度进行测量,修复区显微硬度较基材区显微硬度提高了 28%。

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 Journal of Lasers*, 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[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3204-3209.

[2] Song Jianli, Li Yongtang, Deng Qilin, et al. Research of laser cladding forming technology[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(14): 29-31. (in Chinese)
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): 29-31.

- [3] 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, 孙凡, 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.
- [4] Huang Weidong, Lin Xin. Research progress in laser solid forming of high performance metallic component [J]. *Materials China*, 2010, 29(16): 12-29. (in Chinese)
黄卫东, 林鑫. 激光立体成形高性能金属零件研究进展[J]. *中国材料进展*, 2010, 29(16): 12-29.
- [5] He Ruijun, Wang Huaming. Microstructure features of laser deposited Ti-6Al-2Zr-Mo-V alloy [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2009, 29(6): 18-22. (in Chinese)
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.
- [6] Xi Mingzhe, Gao Shiyu. Research on tensile properties of inconel718 superalloy fabricated by laser rapid forming process [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39 (3): 0303004-1-0303004-6. (in Chinese)
席明哲, 高世友. 激光快速成形 Inconel718 超合金拉伸力学性能研究 [J]. *中国激光*, 2012, 39 (3): 0303004-1-0303004-6.
- [7] Liu Qingmei, Gong Yongyong, Hou Xu, et al. Influence of side ultrasonic treatment on solidification characterization of Al-Si eutectic alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, 17(2): 308-312. (in Chinese)
刘清梅, 龚永勇, 侯旭, 等. 侧部导入超声处理对共晶 Al-Si 合金凝固特性的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17 (2): 308-312.
- [8] 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.