

新的超声波振动电源控制模型设计与应用*

陈锡文^{1,2}, 李晓谦¹, 申双花³

(1. 中南大学轻合金研究院 长沙, 410083) (2. 湖南省汽车技师学院电气系 邵阳, 422001)

(3. 邵阳学院团委 邵阳, 422000)

摘要 设计了基于 BP 神经网络的超声波振动电源控制模型, 并应用到新的超声波振动电源中。在 730℃ 铝合金熔体铸造实验过程中, 新的超声波振动电源输出频率为 19.259 kHz~20.086 kHz, 超声波平均振幅为 15.93 μm, 输出功率为 1.073 kW~1.203 kW, 晶粒的平均尺寸为 143.63 μm, 晶粒尺寸大小均匀。系统仿真与实验结果表明, 使用新的超声波振动电源控制模型可以提高电源输出功率和频率的精度, 有助于超声波振动电源的稳定工作, 提高了铝合金的铸造质量。

关键词 超声波振动; 电源; 超声波辅助铸造; BP 神经网络; 电源控制模型

中图分类号 TG244; TH13.1; TB559

引言

铝合金铸造过程中引入功率超声波可以提高合金的铸造质量。超声波电源又叫超声波发生器, 能够为超声波换能器提供稳定的输出功率和谐振频率。现有的超声波铸造电源普遍存在如下问题: a. 超声波电源输出功率和频率的不稳定可导致换能器过热、磨损、老化而发生谐振漂移和抖动, 甚至损坏换能器; b. 超声波振动电源输出功率和频率的不稳定会导致熔体晶粒的大小不均匀, 降低铸造的质量, 失去超声波辅助铸造的意义。可见, 设计一个高效、可靠的控制模型对超声波振动电源的输出功率和频率进行有效控制很有必要。

1 新的超声波振动电源控制模型设计

超声波振动电源经历了电子管、晶体管和微控制单元(micro control unit, 简称 MCU)等 3 个发展阶段, 基于 MCU 的超声波振动电源在最近几年得到了较快发展^[1]。

BP 神经网络由输入层、隐含层和输出层组成, 输入层节点个数为 n , 隐含层节点个数为 p , 输出层节点个数为 m 的 BP 神经网络结构如图 1 所示^[2]。

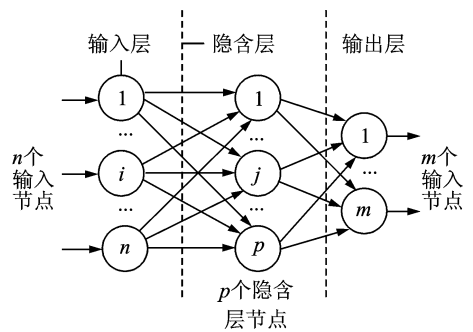


图 1 BP 神经网络结构

Fig. 1 Structure of BP neural network

1.1 新的超声波振动电源体系结构设计

将动态调整机制与智能控制方法进行有机结合, 构筑新的基于 BP 神经网络的超声波振动电源体系^[3], 其框架如图 2 所示。

1.2 控制流程

系统控制模型采集熔体的平均温度、晶粒的平均尺寸、输入电压、电流、变幅杆深入熔体的深度和前 5 s 的输出功率与频率等信息组成部分输入数据, 输入处理模块对输入数据进行拟合、相似度分析和归一化处理, 相似度小的数据作为第 2 个控制过程的训练样本输入到 BP 神经网络进行训练, 直到所有训练数据误差达到要求为止, 流程如图 3 所示^[4]。

* 国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)资助项目(C2010CB731706)

收稿日期: 2015-09-03; 修回日期: 2015-10-22

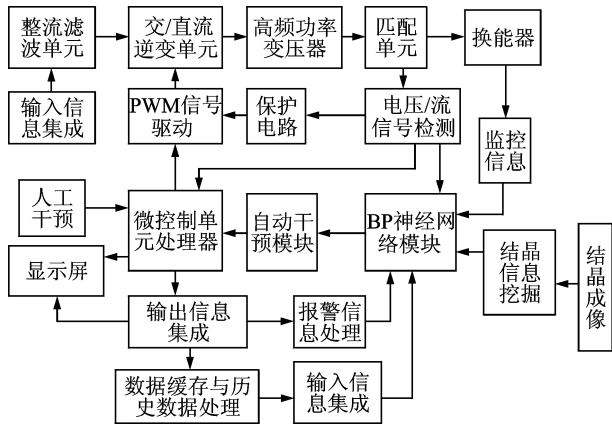


图2 基于BP神经网络的超声波振动电源框架

Fig. 2 Frame of ultrasonic vibration power supply based on BP neural network

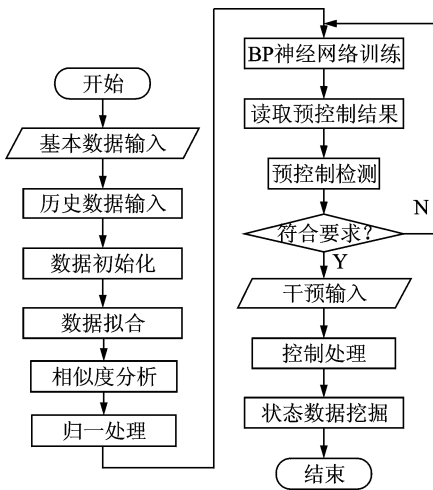


图3 新的超声波振动电源控制流程

Fig. 3 Control flow of the new ultrasonic vibration power supply

1.3 新的超声波铸造电源控制模型

将匹配电感 $L(t)$ 、熔体温度 $T_a(t)$ 、结晶平均半径 $r_{ave}(t)$ 、换能器两端电压 $U_{in}(t)$ 、换能器两端电流 I_{in} 、谐振频率 $f_{in}(t)$ 和变幅杆件插入熔体的深度 $De(t)$ 等元素组成如式(1)所示的输入向量 \mathbf{X}_{in} ，超声波电源的负载电流、电压和谐振频率组成如式(2)所示的输出变量 \mathbf{Y}_{out} 。

$$\mathbf{X}_{in} = (L(t), T_a(t), r_{ave}(t), U_{in}(t), I_{in}(t), f_{in}(t), De(t)) \quad (1)$$

$$\mathbf{Y}_{out} = (U_o(t), I_o(t), f_o(t)) \quad (2)$$

1.3.1 数据处理

跟踪电源系统状态，每 0.5 s 采样一次，180 s 共 360 个样本数据，采用差分法和对比法进行如式(3)和式(4)所示的数据预处理。

$$\begin{cases} \Delta f_{in}(t) = (1 - B_f)(1 - (B_f)^{360})f(t) \\ f_{in}(t) = \frac{f(t-2) + f(t-1)}{2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} |f(t) - f(t-1)| < \gamma_0 \\ |f(t) - f(t+1)| < \gamma_1 \end{cases} \quad (4)$$

其中： γ_0, γ_1 为人为设置的误差阈值，可根据需求设计算法得到； $f_{in}(t)$ ， $\Delta f_{in}(t)$ 分别为 0.5ts 的谐振频率和误差； $B_f = 1 - \left| \frac{f(t-1)}{f(t+1)} \right|$ 为频率校验因子。

设计输入电流 $i_{in}(t)$ 、输入电流误差 $\Delta i_{in}(t)$ 、输入电压 $v_{in}(t)$ 和输入电压误差 $\Delta v_{in}(t)$ 的数据处理模型， $f(t-1)$ ， $f(t+1)$ 和 $f(t-2)$ 分别为 0.5(t-1)，0.5(t+1) 和 0.5(t-2)s 的频率^[5]。

由于输入数据信息的波动，需要对输入数据信息进行归一处理，这里以谐振频率处理为例。设谐振频率控制的精确度要求为 95.0%，那么最高频率为 21.00 kHz，最低频率为 19.00 kHz，定义(19.00 kHz~20.00 kHz)为低频区域、(20.00 kHz~20.50 kHz)为中频区域、(20.50 kHz~21.00 kHz)为高频区域^[6]，低、中、高频的归一处理如式(5~7)所示。

$$uf_1(t) = \begin{cases} 0 & (f < 19\ 000) \\ \frac{20\ 000 - f}{200} & (19\ 000 < f < 20\ 000) \\ 1 & (f > 20\ 000) \end{cases} \quad (5)$$

$$uf_m(t) = \begin{cases} 0.5 & (20\ 000 < f < 20\ 250) \\ \frac{20\ 250 - f}{200} & (20\ 250 < f < 20\ 500) \\ 1 & (f > 20\ 500) \end{cases} \quad (6)$$

$$uf_h(t) = \begin{cases} 0.5 & (20\ 500 < f < 20\ 750) \\ \frac{20\ 750 - f}{200} & (20\ 750 < f < 21\ 000) \\ \frac{f - 20\ 750}{200} & (f > 21\ 000) \end{cases} \quad (7)$$

同理，对电源的匹配电感、熔体温度、结晶半径、电压、电流和变幅杆插入熔体深度等高、中、低参数进行归一处理^[7]。

1.3.2 随机分量误差模型设计

通过专家系统、数据预处理、智能控制和系统集成等方法处理随机分量误差，新的随机功率分量误差处理模型为

$$R_{pe}(t) = P_{max}(t) - \frac{a_{pi}}{n} \sum_{i=0}^n \frac{L_c}{L_s} U(t) I(t) \quad (8)$$

其中： $R_{pe}(t)$ 为 0.5t s 时刻的随机功率误差分量； $P_{max}(t)$ 为前 0.5t s 的最大功率； L_c 和 L_s 为目标控

制电感和标准电感(说明书标注); $U(t)$ 和 $I(t)$ 分别为第 $0.5t$ s 的电压和电流; 功率微调分量 $a_{pi} = \frac{p(t-1)}{p(t)}$; $P(t), P(t-1)$ 为在 $0.5ts$ 和 $0.5(t-1)$ s 的实时功率, 建立频率的随机分量误差模型。

$$R_{f_e}(t) = f_{\max}(t) - \frac{b_{f_i}}{360} \sum_{i=1}^{360} f(t) \quad (9)$$

其中: $R_{f_e}(t)$ 为频率误差随机分量; $f_{\max}(t)$ 为前 $0.5t$ s 内的最高频率; $b_{f_i} = \frac{f(t-1)}{f(t)}$ 为频率微调分量; $f(t-1), f(t)$ 分别为第 $0.5(t-1), 0.5t$ s 的频率。

1.3.3 输出分量预测模型设计

功率输出分量预测与输出电压、电流和实时误差有关。 $U_o(t)$ 由振幅、输入电压、角频率和时间等变量表示; $I_o(t)$ 为第 $0.5t$ s 的电流分量, 电源的功率与额定功率、实时输入功率、电压、导通率和逆变效率有关; $r_p(t)$ 为功率误差, 由最大实时功率和平均功率计算, 设计如式(13)^[2,5] 所示的功率预测模型和如式(15)所示的频率预测模型。

$$U_o(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (V_0 + \sum_{i=1}^{360} a(t) \cos(\omega t)) d(\omega t) \quad (10)$$

$$I_o(t) = \frac{4(p_0 + p_{in}(t)\eta_i)}{U_{in}(t)\alpha_i\eta_i} \quad (11)$$

$$r_p(t) = \sum_{k=1}^{180} \left(\frac{\sum_{i=1}^{360} (p_{\max}(t) + p_{ave}(t))}{360k} \right) \quad (12)$$

$$P_o(t) = r_p(t) +$$

$$\frac{2(p_0 + p_{in}(t)\eta_i) \left(\int_0^{2\pi} (v_0 + \sum_{i=1}^{180} a_i \cos(i\omega t)) d(\omega t) \right)}{U_{in}(t)\alpha_i\eta_i\pi} \quad (13)$$

其中: v_0 为输入的标准电压; $a(t)$ 为 $0.5t$ s 的振幅, 单位为 μm , 超声波辅助铸造中以 $10 \sim 15 \mu m$ 为最佳振幅区; $P_o(t)$ 为第 $0.5t$ s 的输出功率; $p_{\max}(t)$ 为前 $0.5t$ s 的最大功率; $p_{ave}(t)$ 为前 $0.5t$ s 的平均功率; ω 为角频率; $p_{in}(t), U_{in}(t)$, 为 $0.5t$ s 的输入功率和电压^[8]; p_0 为额定功率; η_i, α_i 为 $0.5t$ s 的逆变效率和导通率。

$$r_f(t) = \frac{1}{360} \sum_{i=1}^{360} f_h(t) + \frac{1}{2k} \sum_{m=1}^k r_{fave}(t) \quad (14)$$

$$f_0(t) = r_f(t) +$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{360} (f_0(t-1) + f_{ave}(t) + f_{\max}(t) + r_f(t))}{1080} \quad (15)$$

其中: $f_0(t-1)$ 为 $0.5(t-1)$ s 时刻的电源输出频率; $f_{ave}(t)$ 为电源前 $0.5t$ s 时段内的平均输出频

率; $r_f(t)$ 为 $0.5t$ s 时刻的频率误差; $f_h(t)$ 为前 $0.5t$ s 内最高频率误差; $r_{fave}(t)$ 为前 $0.5t$ s 内平均频率的误差。

2 模型仿真

2.1 训练与测试网络结构

仿真分为训练和测试两个阶段, 在进行训练之前, 需要收集有代表性的训练样本, 建立如图 4 所示的基于 BP 神经网络的超声波振动电源控制模型结构。

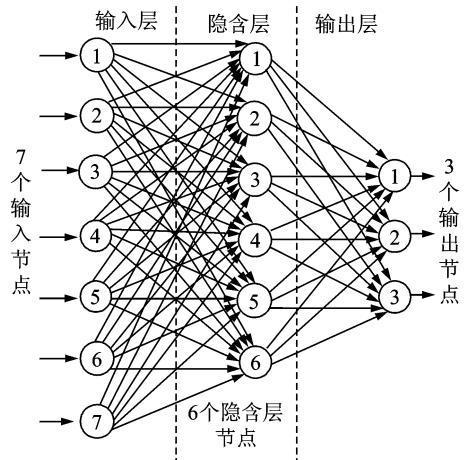


图 4 基于 BP 神经网络的电源控制模型结构

Fig. 4 Structure of power supply control model based on BP neural network

2.2 模型仿真

新的超声振动电源控制模型是一个不断调整参数、对比输出结果的过程, 通过对电源控制模型进行 10 个时段的模拟仿真, 每 0.5 s 为一个信息采样时间片, 每 180 s 为一个训练时间段, 10 个训练时段共 1800 s, 3600 个数据采样, 获得谐振频率仿真结果的平均误差为 3.641% , 最大误差为 3.71% , 最小误差为 0.43% , 平均精确度为 96.359% , 达到设计的预期目标要求。另外, 功率仿真分析的平均误差为 5.55% , 最大误差为 14.11% , 最小误差为 2.76% , 精确度控制在 94.45% , 基本达到设计要求^[9]。最优的两次功率和频率仿真输出结果如图 5, 6 所示。

3 实验

实验验证的主要目的是探讨新的振动电源控制方法对电源的稳定工作和铸造质量提高是否有帮助。

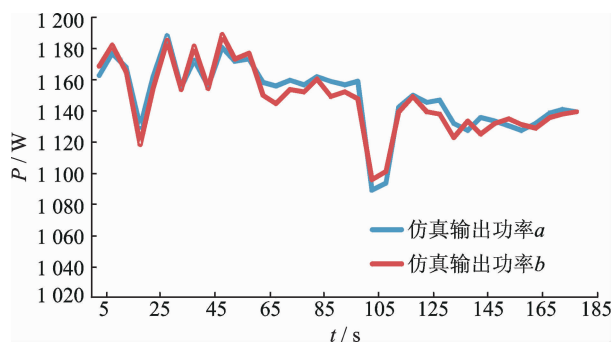


图 5 功率控制仿真结果

Fig. 5 Result of simulation by power control

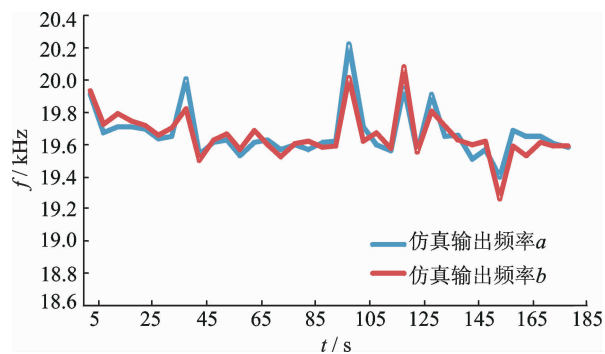


图 6 频率控制仿真结果

Fig. 6 Result of simulation by frequency control

3.1 实验设备与材料

嵌入新的超声波振动电源控制模块的第 3 代 1.2 kW/20 kHz 可编程 MCU 超声波振动电源(即新的超声波振动电源),其外观如图 7 所示。

图 8 所示的超声辅助波铸造实验装置由压电陶瓷换能器(piezoelectric transducer,简称 PTZ)、钛合金变幅杆、温度控制记录仪、坩埚、可调位移装置、K 型热电偶、Buehler 研磨机、ADAM 数据采集模块、Leica 台式金相显微镜、7050 铝合金^[10]等组成。

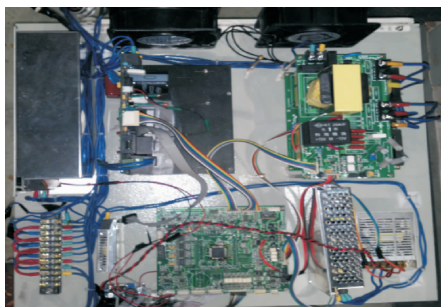


图 7 新的超声波振动电源结构

Fig. 7 Structure of new ultrasonic vibration power supply

3.2 实验方案

1) 应用新的超声波振动电源进行超声波辅助

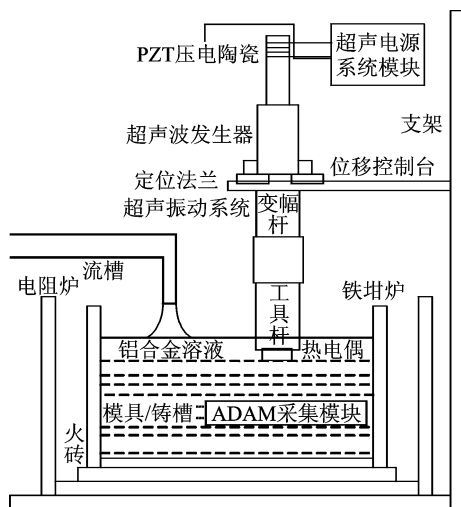


图 8 超声波辅助铸造实验装置

Fig. 8 Apparatus of ultrasonic aided casting experimental

铸造实验,采集熔体温度、变幅杆插入熔体深度、匹配电感、结晶平均半径、输出功率和频率等信息^[11],并进行金相切片。

步骤 1:对水加热并且恒温在 90℃,进行超声波辅助铸造实验,采集电源输出数据。

步骤 2:注入 7050 铝合金熔体,加热并保持在 635℃左右,实验每 3 min 为 1 次循环,循环 10 次,共 30 min,每 0.5 s 采集一次电源输出数据。

步骤 3:再将熔体加热到 730℃,重复步骤 2。

2) 应用不带控制模块的振动电源,对 90℃水溶液、635℃铝合金熔体和 730℃铝合金熔体重复以上实验。

3.3 电源输出结果

新的超声波振动电源在 90℃水溶液、635℃铝合金熔体和 730℃铝合金熔体铸造环境中进行了测试,平均输出功率、频率、精度等数据如表 1 所示。电源状态跟踪^[12]如图 9 所示。结果表明,新电源的输出功率和频率稳定,控制精度高。

表 1 新电源的平均输出功率和频率

Tab. 1 Output of average power and frequency by new power supply

新电源	P/kW	f/kHz
90℃水溶液	1.180 1	19.993
635℃铝合金熔体	1.136 1	18.731
730℃铝合金熔体	1.144 3	19.636
精度/%	96.1	97.3

3.4 新电源对铸造质量的影响

分别使用无控制模块的 MCU 超声波电源和新的超声波振动电源对 730℃铝合金进行铸造实



图 9 新电源状态跟踪

Fig. 9 Status tracking of new power supply

验^[13]。取体积为 1cm³ 的抽样切块各 3 个、共 6 个并进行标号。切块经过粗磨、细磨、精磨、抛光、酒精清洗、Keller 试剂腐蚀和洗净后风干等处理, 在显微镜下获得切块的金相与表面成像对比如图 10 和图 11 所示。通过计算^[14]获得不同的超声波辅助铸造环境中晶粒尺寸如表 2 所示。采样的金相和表面

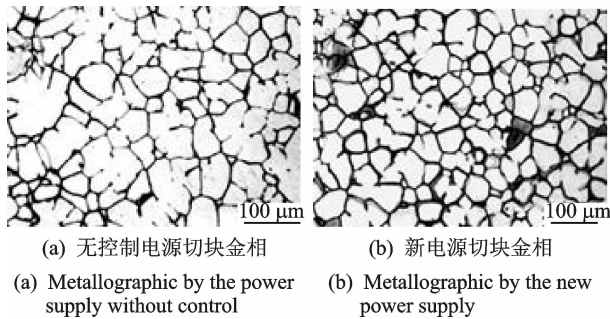


图 10 不同超声波辅助铸造切块金相

Fig. 10 Metallographic by different ultrasonic assisted casting

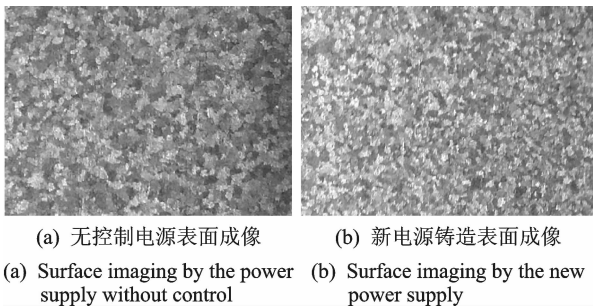


图 11 不同电源的超声辅助铸造表面成像

Fig. 11 Surface imaging by ultrasonic assisted casting with different power supply

表 2 不同电源对晶粒尺寸的影响

Tab. 2 Effects of grain size by different power supply

位置	MCU 电源	新电源
左块	176.31	146.23
中间	175.34	136.06
右块	199.12	156.65
平均	183.59	144.98
误差/%	23.78	20.59

成像表明,随着新电源的采用,晶粒大小变得均匀,合金的铸造质量提高^[15]。

4 结 论

1) 新的超声波振动电源控制模型能够很好地嵌入到超声波振动电源中。系统仿真和实验验证表明,新电源的输出功率和频率在可控范围内,达到设计要求。

2) 在 90℃ 水溶液、635℃ 铝合金熔体和 730℃ 铝合金熔体超声波辅助铸造实验过程中,熔体的形核率增加,晶粒的平均尺寸显著减小、大小均匀,辅助铸造的质量提高。

3) 新的超声波振动电源控制方法还存在很多不足,随着负荷的加大,电源输出功率、频率的随机抖动明显,振动电源在满载情况下功率、频率稳定控制问题值得进一步研究。

4) 获得最优的控制方法是很难的,应不断改进、寻优。

参 考 文 献

[1] 黄全振,吕宽洲,李恒宇,等. 基于 IIR 结构的自适应滤波振动主动控制方法[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(3): 439-446.
Huang Quanzhen, Lü Kuangzhou, Li Hengyu, et al. Adaptive filtering active vibration control method based on IIR structure [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(3):439-446. (in Chinese)

[2] 黄凯. 基于神经网络的动态匹配超声波铸造电源的研究[D]. 长沙:中南大学,2011.

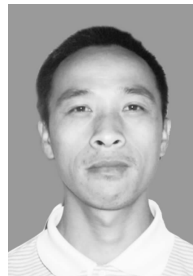
[3] 张立华,朱彪. 7050 铝合金施加超声铸造的数值模拟[J]. 机械工程材料, 2013, 37(1):85-92.
Zhang Lihua, Zhu Biao. Numerical simulation for 7050 aluminum alloy cast with ultrasonic treatment [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2013, 37(1):85-92. (in Chinese)

[4] 聂广. 25kHz 超声铸造振动系统设计及实验研究[D]. 长沙:中南大学, 2013.

[5] 陈锡文. 基于神经网络的电力负荷预测方法研究及软件开发[D]. 长沙:中南大学, 2009.

[6] 李晓谦,李开晔,陈铭. 超声振动对 7050 铝合金熔体冷却时间及凝固组织的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2011, 16(2):249-254.
Li Xiaoqian, Li Kaiye, Chen Ming. Effect of ultrasonic vibration on cooling time and solidification structure

- of 7050 aluminum alloy melt[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2011, 16(2):249-254. (in Chinese)
- [7] 崔莹, 李晓谦. 超声对 7050 铝合金显微组织及溶质固溶度的影响[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2012, 43(9):3420-3425.
Cui Ying, Li Xiaoqian. Effects of ultrasonic on microstructures and solid solubility of main solute elements in aluminum alloy 7050[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2012, 43(9): 3420-3425. (in Chinese)
- [8] 赵利平, 郭继保. 基于遗传算法控制的电液伺服系统试验研究[J]. *振动、测试与诊断*, 2011, 31(6): 803-807.
Zhao Liping, Guo Jibao. Electro-hydraulic servo system based on genetic algorithm controlling[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2011, 31(6): 803-807. (in Chinese)
- [9] 张立华, 张晓明. 超声功率对半连续铸造 7050 铝合金晶粒细化的影响[J]. *机械工程材料*, 2009, 33(9): 54-56.
Zhang Lihua, Zhang Xiaoming. Effect of ultrasonic power on grain refinement in semi continuous casting of 7050 aluminum alloy[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2009, 33(9): 54-56. (in Chinese)
- [10] 严鲁涛, 杨志鹏, 高飞, 等. 振动试验中削波信号功率谱密度补偿[J]. *振动、测试与诊断*, 2015, 35(4): 690-696.
Yan Lutao, Yang Zhipeng, Gao Fei, et al. Power spectral density compensation algorithm for signal clipping in vibration test[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2015, 35(4): 690-696. (in Chinese)
- [11] 蒋日鹏. 超声场对高强铝合金凝固过程的影响规律与作用机理研究[D]. 长沙:中南大学, 2014.
- [12] Andreas N, Andreas S. Surface properties in ultrasonic vibration assisted turning of particle reinforced aluminum matrix composites[J]. *Procedia CIRP*, 2014, 13:125-130.
- [13] Steinwolf A. Shaker random testing with low kurtosis: review of methods and application for sigma limiting[J]. *Shock and Vibration*, 2010, 17: 219-231.
- [14] Lai Jianping, Jiang Rongpiao, Liu Huashan, et al. Influence of cerium on microstructures and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. *Journal of Central South University*, 2012, 19(4): 869-874.
- [15] Zhang Lihua, Yu Jun, Zhang Xiaoming. Effect of ultrasonic power and casting speed on solidification structure of 7050 aluminum alloy ingot in ultrasonic field[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2010, 17(3): 431-436.



第一作者简介:陈锡文,男,1974年4月生,博士。主要研究方向为机械设计与自动化、汽车电子技术。曾发表《汽车电气系统故障诊断与维护》(北京:高等教育出版社,2015)等论著。

E-mail: chenxiwen001@qq.com

通信作者简介:李晓谦,男,1958年2月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为大型构建复杂工艺制造。

E-mail: meel@csu.edu.cn

