

DOI: 10.7652/xjtuxb201903017

蜂窝结构的超声波振动网络构建与应用

陈锡文¹, 李晓谦¹, 李瑞卿¹, 蒋日鹏¹, 桂卫华²

(1. 中南大学轻合金研究院, 410083, 长沙; 2. 中南大学信息科学与工程学院, 410083, 长沙)

摘要: 选择结构合理的多振动源超声波辅助铸造网络,提高超声波辅助铸造系统的工作效率和铝合金的铸造质量,解决了传统结构超声波辅助铸造系统功率超声波分布不均匀、作用面积和作用体积小、频率谱效率和功率谱效率低、辅助铸造质量差等问题。设计的蜂窝结构超声波辅助铸造网络可以根据振动源节点的层数确定节点的个数,根据铸锭尺寸确定正六边形蜂窝单元的边长,并且实时调整超声波网络的输出功率和谐振频率。选择 7 节点的蜂窝结构超声波网络和 4 节点的传统结构超声波网络,分别应用到 $\Phi 630$ mm 的 7085 铝合金铸锭辅助铸造实验与仿真过程中。与 4 节点传统超声波网络相比,7 节点蜂窝结构超声波网络的有效面积、有效体积、频率谱效率和平均覆盖概率分别增加了 22.73%、32.81%、18.71%和 0.315,平均功率谱效率与理想值的差值仅为 0.27 W/cm²,平均晶粒尺寸减小了 35.82 μ m,说明蜂窝结构超声波辅助铸造网络的工作效率和铝合金铸造质量均有提升。

关键词: 超声波振动网络;蜂窝结构;超声波辅助铸造;铸造质量

中图分类号: TB559 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)03-0117-08

Construction and Application of Vibration Network with Honeycomb Structure for Ultrasonic-Assisted Casting

CHEN Xiwen¹, LI Xiaoqian¹, LI Ruiqing¹, JIANG Ripeng¹, GUI Weihua²

(1. Light Alloy Research Institute, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A reasonable ultrasonic vibration network was designed to improve the working efficiency and casting quality of the ultrasonic-assisted casting system, hence the problems such as small working area and volume of the ultrasonic vibration network, low efficiency of frequency spectrum and power spectrum, and poor quality of casting were solved. The designed vibration network with honeycomb structure can determine the number of nodes according to the layers of the vibration network and the side length of the hexagonal honeycomb units according to the casting ingot size, and adjust the output power and resonant frequency of the vibration network in real time. Seven-node ultrasonic vibration network with honeycomb structure and four-node ultrasonic vibration network with traditional structure were selected and applied in the experiments and simulation of casting of $\Phi 630$ mm 7085 aluminum alloy ingot. Compared with the traditional four-node ultrasonic vibration network, the effective area and volume, frequency spectrum efficiency, and average coverage probability of the seven-node honeycomb vibration

收稿日期: 2018-06-17。 作者简介: 陈锡文(1974—),男,博士,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475480);国家“973 计划”资助项目(2012CB619504)。

网络出版时间: 2018-12-10 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20181206.1321.002.html>

network were increased by 22.73%, 32.81%, 18.71% and 0.315, respectively. The difference between the average efficiency of power spectrum and the desired value was only 0.27 W/cm², and the average grain size of casting is decreased by 35.82 microns. The results show that the efficiency of the ultrasonic vibration network and the quality of vibration-assisted casting are improved.

Keywords: ultrasonic vibration network; honeycomb structure; ultrasonic-assisted casting; casting quality

功率超声波产生的高温高压可以抑制铝合金熔体枝晶的增长,减小晶粒尺寸,控制空穴的形成,提高铸造质量和效率^[1-3]。

合适的超声波振动网络结构有利于超声波辅助铸造系统空间效率的提高,使铝合金熔体晶粒尺寸更加均匀,大幅度降低空穴形成的概率,输出功率和谐振频率更加稳定,因此构筑科学的超声波振动网络,提升超声波辅助铸造系统的工作效率成为铝合金铸造技术领域的研究重点^[4-8]。传统超声波辅助铸造过程中超声波振动网络的工具头之间相互独立,直径小于1 300 mm的不同规格铝合金铸锭的超声波辅助铸造过程中基本采用4杆超声波振动网络,变幅杆数目恒定,从而导致辅助铸造过程中的功率超声波分布不均匀,功率超声波的有效作用面积和作用体积受到制约。在Φ630 mm的7085铝合金铸锭的铸造过程中采用4杆超声波振动网络,有效的作用面积比例为40.6%,有效的作用体积比例为30.23%,网络空间效率低,效果不理想。

由于传统超声波振动网络的输出功率和谐振频率没有根据实际情况进行调节,超声波振动电源存在输出功率不稳定和频率失谐的情况,超声波振动辅助铸造系统工作不稳定,铝合金的铸造质量低。

设计高效可靠的超声波振动网络对提高超声波辅助铸造系统工作效率有着极其重要的意义^[9-12],借鉴蜂窝通信理论设计的新的超声波振动网络可以根据铝合金构件的尺寸确定振动工具头节点的个数^[13-16]。本文采用六边形对称机制大幅提高铸造网络的效率,结合实际情况对超声波振动网络的输出功率和谐振频率进行实时调整,使输出功率和频率稳定,功率超声波带来的高温高压恒定,故铝合金晶粒尺寸均匀,超声波辅助铸造系统的工作效率以及铸造质量提高。

1 新的超声波振动网络设计

1.1 振动网络设计

1.1.1 结构体系 蜂窝通信网络节点的分布基本

采用以6个边界节点和1个中心节点为基础区域而构筑的蜂窝通信,其中相邻的3个节点可以构成面积相等的正三角形,节点覆盖区域的面积一致,信号的强度分布与衰减的差异降低,通信的质量得到提升。蜂窝结构网络根据振动网络规模变化来确定蜂窝状超声波振动网络节点数

$$N_{\text{vnode}} = 2(L^2 + \sum_{i=1}^{L-2} i) - 1 \quad (1)$$

式中 L 为中间到边缘的六边形的层数。连接各六边形的中心点,1杆、7杆和37杆的超声波振动网络体系如图1所示。

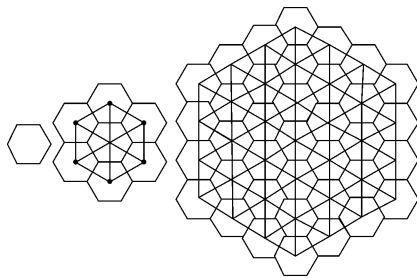


图1 基于蜂窝结构的超声波振动网络

当超声波振动网络的节点之间的连接采用硬连接时,会因为相邻节点的频率不同步而导致功率超声波的共振、抵消和失谐等异常状况的发生,各变幅杆的工作效率降低。采用“连而不接”的超声波振动网络结构,在一定程度上可以减少各杆件之间的干扰,保证各变幅杆工作的独立稳定,提高工作效率。

1.1.2 覆盖概率 参照蜂窝状移动通信网络的覆盖机制,提高超声波振动网络的有效作用空间。蜂窝结构超声波振动网络满足在二维平面内的均匀泊松点过程,其分布密度定义为 λ_B ,振动网络内任意一点都会受到3个变幅杆的作用,检测点与杆 i 的距离定义为其坐标 $R(i)$,振动网络覆盖概率为

$$P_c^A \approx P\left(\bigcap_{i=1}^7 A_i\right) \quad (2)$$

$$R(i) = e^{-\lambda_B \pi r^2} \frac{2\lambda_B \pi r}{\Gamma(i)} \quad (3)$$

式中: $i=1,2,3,\dots,7$; $r=10.5$ cm; A_i 为变幅杆 i 的

覆盖面积; $\Gamma(i)$ 为 Gamma 函数。每个蜂窝单元含 6 个边界点和 1 个中心点,7 杆振动网络共 49 个点,分布密度为 $0.015\ 73\ \text{cm}^{-2}$,杆 i 的覆盖概率为

$$P(A_i) = 1 - \int_0^{105} \int_{105}^{182} \frac{\epsilon D^{(-\epsilon-1)} e^{-\lambda_B \pi (D+\zeta)^i}}{(R(i) + \zeta)(105^{-\epsilon} - 181^{-\epsilon}) \Gamma(i)} dD d\zeta$$

(4)

式中: ζ 为以 $R(i)$ 为半径的圆面积; ϵ 为超声波变幅杆 i 所覆盖的边界到其中心距离的重尾特征, $\epsilon \in [1,3]$ 。

1.2 空间效率

1.2.1 传统超声波振动网络空间效率 在不同规格铝合金铸锭超声波辅助熔模铸造过程中,工具头底面垂直向下,将高于结晶器内熔体平均温度 $15\ ^\circ\text{C}$ 的采样点区域定义为蜂窝单元理想作用区间。传统超声波振动网络工具头底面垂直向下 $0.1\sim5.689\ \text{cm}$ 的区域采样点的平均温度比熔体的平均温度高 $15.69\ ^\circ\text{C}$,蜂窝结构超声波网络工具头底面垂直向下 $0.12\sim4.321\ \text{cm}$ 的区域采样点的平均温度比熔体的平均温度高 $15.212\ ^\circ\text{C}$,两种超声波网络垂直向下的最大距离的平均值 $5.01\ \text{cm}$ 为不同结构超声波网络的统一理想作用深度。

传统超声波振动网络工具头直径为 $10\ \text{cm}$,其变幅杆的作用如图 2 所示。

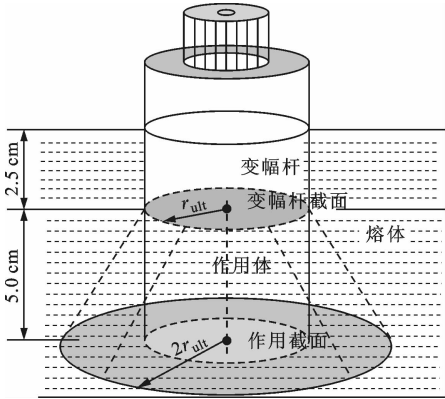


图 2 传统超声波振动网络变幅杆作用示意图

综合前面的分析, n 个变幅杆组成的超声波振动网络的理想作用面积和作用体积为

$$S_{\text{nor}} = 4n\pi r_{\text{ult}}^2$$

(5)

$$V_{\text{nor}} = 3n\pi r_{\text{ult}}^2 h$$

(6)

式中: r_{ult} 为工具头的半径; h 为工具头底面到作用面的距离。

设定传统 4 杆超声波振动网络中工具头的半径为 $5\ \text{cm}$,结合式(5)和式(6)得到超声波作用的面

积和体积分别为 $1\ 256\ \text{cm}^2$ 和 $4\ 710\ \text{cm}^3$,7085 铝合

金铸锭的截面积为 $3\ 115.665\ \text{cm}^2$,截面积作用效率为 40.3% 。本文设定超声波辅助铸造的理想作用深度为 $5\ \text{cm}$,那么其理想的作用体积为 $15\ 578.325\ \text{cm}^3$,此时铸造体积作用效率为 30.23% 。

1.2.2 蜂窝结构超声波振动网络空间效率分析 对 7085 铝合金铸锭采用 7 个超声波变幅杆构筑了基于蜂窝结构的超声波振动网络,如图 3 所示。蜂

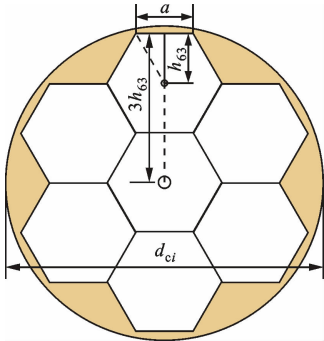


图 3 基于蜂窝状的 2 层超声波振动网络

窝六边形单元的边长为 a 、面积为 $S_6 = 3a^2 \sqrt{3}/2$,振动网络的层数为 L ,铸锭的直径为 d_{ci} , $h_{63} = d_{ci}/(4L - 1)$,于是有 $a = 2\sqrt{3}d_{ci}/3(4L - 1)$, L 层的蜂窝状超声波振动网络截面积和体积为

$$S_{\text{HCL}} = \frac{2\sqrt{3}d_{ci}^2}{(4L - 1)^2} N_{\text{vnod}}$$

(7)

$$V_{\text{HCL}} = \frac{10\sqrt{3}d_{ci}^2}{(4L - 1)^2} N_{\text{vnod}}$$

(8)

振动网络蜂窝单元个数与铸锭的尺寸、网络层数有密切的关系,其工具头前端六边形柱体可以根据铸锭尺寸和网络层数进行更换。用于 7085 铝合金铸锭的 2 层蜂窝结构的单元边长 $a = 103.92\ \text{mm}$,其工具头的三视图如图 4 所示。

蜂窝结构超声波振动网络工具头的理想工作深度采用统一理想作用深度,取 $5\ \text{cm}$,2~6 层的蜂窝结构超声波振动网络的作用截面积、作用体积和效率对比如表 1 所示。随着蜂窝单元层数的增加,振

表 1 不同层数蜂窝状超声波振动网络的效率

层数	节点数	面积/ cm^2	体积/ cm^3	效率/ $\%$
2	7	1 964.09	9 820.45	63.04
3	19	2 158.87	10 794.35	69.29
4	37	2 260.88	11 304.40	72.56
5	61	2 323.17	11 615.85	74.56
6	91	2 365.07	11 825.35	75.91
7	127	2 395.16	11 975.82	76.95
8	169	2 417.81	12 089.05	77.60

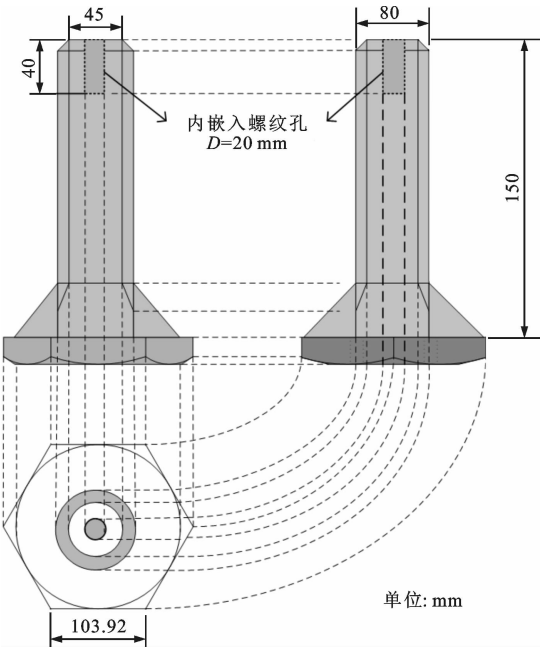


图 4 蜂窝结构超声波振动网络工具头的构造

动网络的作用截面积和体积不断增大,工作效率也逐步提高,但提高速率放缓。

1.3 输出功率与谐振频率

1.3.1 输出功率 变幅杆在辅助铸造过程中做简谐振动,变幅杆 i 的平均作用力和即时响应速度分别为 F_{iave} 和 V_{iave} ,同时有 $T=2\pi/f$,则基于振幅与频率的变幅杆 i 的负载为

$$P_{iaf}(t) = \frac{\int_0^T F_{iave} V_{iave} \cos(ft) \cos(ft + \phi) dt}{T} \quad (9)$$

$$V_{iave} = 2 \int_0^{360} a_i(t) f_i(t) dt \quad (10)$$

$$F_{iave} = 2m_i \int_0^{360} (f_i(t) - f_i(t-1)) dt \quad (11)$$

式中: $a_i(t)$ 为变幅杆 i 在 t 时刻的振幅; $f_i(t)$ 和 $f_i(t-1)$ 为变幅杆 i 在 t 和 $t-1$ 时刻的频率; m_i 为变幅杆 i 的质量; ϕ 为相移。

正常分量的负荷预测是振动电源电力负荷预测的核心部分,其负荷预测模型如下

$$P_g(t) = \prod_{h=600}^{760} P_s \sigma_{tem_al}(t) + \frac{1}{360} \sum_{i=1}^{360} \int_0^6 u_i(t) di \quad (12)$$

$$\sigma_{tem_al}(t) = \frac{T_{al}(t) - T_{al}(t-1)}{730} \quad (13)$$
$$-0.05 < \sigma_{tem_al}(t) < 0.05$$

式中: $P_g(t)$ 为 300 s 内正常负荷预测; $u_i(t)$ 为变幅杆 i 在 t 时刻的电压; P_s 为额定功率; $\sigma_{tem_al}(t)$ 为熔体 t 时刻的温度影响因子; T_{al} 为熔体温度。

参照 Box-Jenkins 方法,设计基于历史负荷的预测模型如下

$$P_{hisi}(t) = P_a(t-1) - \sum_{t=1}^{t-1} \frac{a(t)R(t)I^2(t)}{t} \quad (14)$$

式中: $P_{hisi}(t)$ 表示基于历史负荷的预测值; $P_a(t-1)$ 为 $t-1$ 时刻前的负荷平均值; $R(t)$ 为 t 时刻电源的内阻; $I(t)$ 为 t 时刻电流; $a(t)$ 为 t 时刻前的负荷修正系数,取值区间为 0.9~1.1。

设定前面 4 个方面的作用比例均为 25%,得到 n 杆蜂窝状超声波振动网络的负荷为

$$P_{avn}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n [P_{iaf}(t) + P_{gi}(t) + P_{hisi}(t) + P_i(t)]}{4} + \delta_n(t) \quad (15)$$

$$\delta_n(t) = P_{avn}(t-1) - P_{avn}(t-2) \quad (16)$$

式中 n 表示变幅杆节点的个数。

用于 7085 铝合金超声波辅助铸造系统的电源设定频率为 20 kHz,电源每 1 s 采样一次,每 3 min 为一个时间片,得到变幅杆 i 的输出功率为

$$P_{io}(t) = r_{ip}(t) + \frac{2(P_s + P_{iin}(t)\eta)(\int_0^{2\pi} (v_{is} + \sum_{t=1}^{180} a_i(t) \cos(i\omega_i t)) d\omega_i)}{U_{in}(t)\alpha\eta\pi} \quad (17)$$

$$r_{ip}(t) = \frac{\sum_{t=1}^{180} (P_{imax}(t) + P_{iave}(t))}{180k} \quad (18)$$

式中: $P_{iin}(t)$ 、 $P_{io}(t)$ 分别为杆 i 在 t 时刻的输入、输出功率; $P_{imax}(t)$ 、 $P_{iave}(t)$ 分别为 t 时刻前的最大、平均输出功率; ω 为角频率; v_{is} 为杆 i 的输入电压; η 、 α 为逆变效率、导通率。

1.3.2 谐振频率 超声波振动网络变幅杆的谐振频率分析从超声波振动电源基本输入数据、历史谐振频率和谐振频率预测几个方面进行,180 s 时的振动网络变幅杆 i 的谐振频率为

$$f_{i0}(t) = r_{if}(t) + \frac{\sum_{t=1}^{360} (f_{iave}(t-1) + r_{if}(t))}{360} \quad (19)$$

$$r_{if}(t) = \frac{1}{360} \sum_{t=1}^{360} f_{ih}(t) + \frac{1}{2t} \sum_{i=1}^t r_{ifave}(t) \quad (20)$$

式中: $f_{iave}(t)$ 为变幅杆 i 前 0.5 t 时段内的平均输出频率; $r_{if}(t)$ 为 t 时刻的频率误差; $f_{ih}(t)$ 为前 t 时段内最高频率误差; $r_{ifave}(t)$ 为前 t 时段内平均频率的

误差。变幅杆 i 在 t 时刻的频率为

$$f_i(t) = a_i(t) \sin\left(\frac{2f_i(tL_d + h\cos\alpha)}{c}\right) + r_{if}(t)$$

(21)

式中: c 为超声波的传播速度; L_d 为被测点到变幅杆 i 的中心距离。经 Hilbert 变换,得到 t 时刻 7 变幅杆超声波网络的谐振频率

$$f_i(t) = \frac{\sum_{i=1}^7 [f_i(t-1) + f_i(t-2)]}{14} + r_i(t)$$

(22)

$$r_i(t) = f_n(t-1) - f_n(t-2)$$

2 新的超声波振动网络仿真分析

2.1 振动网络覆盖分析

考虑各向同性和各向异性路径的损耗对超声波振动网络覆盖概率的影响,仿真参数如表 2 所示。当阈值为 3 dB 时,杆 i 所处的 small cell 网络覆盖概率受到同性路径损耗的影响增大,杆 i 的覆盖概率随之下降,但是相邻杆 j 的覆盖概率却随之上升。

表 2 超声波振动网络仿真参数

参数	数值
杆 i 功率 P_i	0.25 kW
变幅杆数 N_u	7
测试点数 N_{Tnode}	2
杆 i 最大覆盖半径 ψ_i	15 cm
杆 i 最小覆盖半径 ν_i	5 cm
杆 i 损耗长度 θ_i	1 mm
频率复用因子 δ	3

若路径的损耗指数均值为 SIR 阈值 T_{sir} ,则 $T_{sir} \leq 14$ dB 时各向同性路径的损耗被忽略,各向异性路径损耗覆盖概率降低, $T_{sir} \geq 15$ dB 时各向同性路径损耗的覆盖概率降低,各向异性路径损耗的覆盖概率上升,测试点的综合覆盖概率均值为 0.819,较传统超声波网络覆盖概率增加 0.326,仿真曲线如图 5 所示。

2.2 功率谱密度仿真分析

蜂窝结构振动网络采用 7 振动源,每杆作用面积 $S_{Hu} = 2\sqrt{3}d_{cr}^2/(4L-1)^2$,传统振动网络采用 4 振动源,每杆作用面积 $S_{Gu} = 4\pi r_{ult}^2$,蜂窝结构和传统结构超声波振动网络功率谱密度分析模型分别为

$$P_{Hc}(j) = \int_0^{\pi/4} \frac{P_j(t)(\sin\beta + \cos\beta)}{S_{Hu}} d\beta$$

(23)

$$P_{Gc}(i) = \int_0^{\pi/4} \frac{d_i(t)P_i(t)\cos\alpha}{d_i(t-1)S_{Gu}} d\alpha$$

(24)

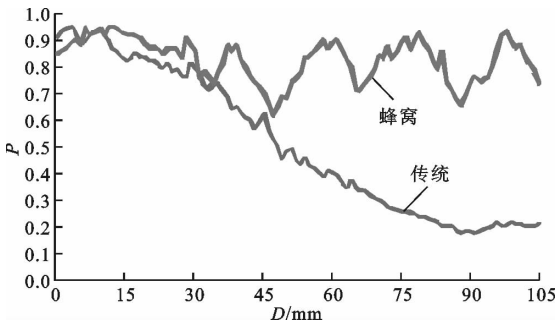


图 5 蜂窝网络与传统网络覆盖概率对比

功率谱密度仿真以 7085 铝合金辅助铸造为背景,7 杆蜂窝结构和 4 杆传统结构振动网络每个振动源的额定功率均为 250 W,MATLAB 环境下功率谱密度仿真曲线如图 6 所示。

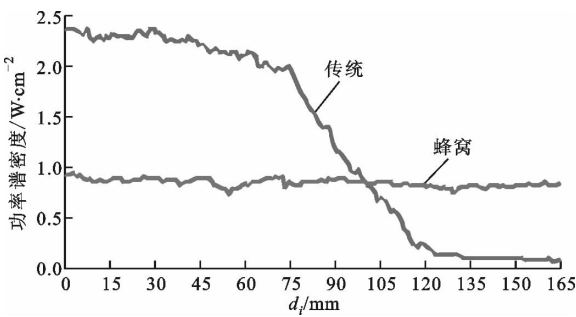


图 6 不同振动网络的功率谱密度仿真对比

蜂窝结构振动网络的功率谱密度为 $0.741 \sim 0.912 \text{ W/cm}^2$,与理想值 0.556 W/cm^2 更加接近,拥有 63.04%的作用面积,做功分布均匀,工作效率和可靠性得到提升。传统结构振动网络的功率谱密度为 $0.07 \sim 2.33 \text{ W/cm}^2$,有效作用面积比例仅为 17.61%。

2.3 频率跟踪仿真

频率跟踪仿真分析思路和负荷仿真分析的思路一致,根据蜂窝单元谐振频率判断超声波振动网络产生失谐、共振的条件。基于蜂窝状超声波振动网络工作效率较常规的超声波振动网络有所提高,MATLAB 环境下的超声波振动网络谐振频率仿真曲线如图 7 所示。

结果显示,各变幅杆的负荷和谐振频率变化趋势一致,频率的变化范围为 $17.91 \sim 19.81 \text{ kHz}$,受铸造环境的变化而变化,仿真结果和理想值之间的误差在可控范围内。传统振动网络频率的变化范围为 $18.86 \sim 20.09 \text{ kHz}$,由于蜂窝网络频率的变化范围大于传统超声波振动网络,平均值小于传统网络的谐振频率,因此晶粒会更加均匀,铝合金熔体空穴存在的数量、规模较改进之前减少。

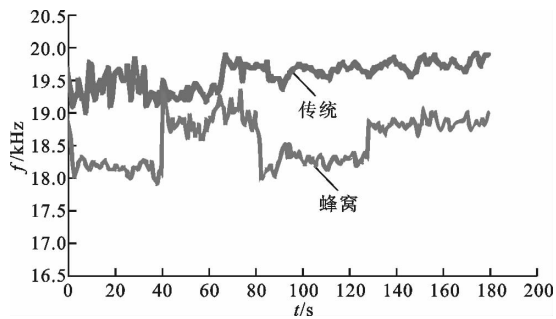


图7 不同振动网络的频率仿真对比

3 实验

3.1 实验设备与材料

实验装置由第4代可编程MCU超声波振动电源、PTZ压电陶瓷换能器、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、AD-AM数据采集模块、Leica台式金相显微镜、7085铝合金、Keller腐蚀剂、铝钛硼细化剂、 $\Phi 650$ mm铁坩埚等组成,如图8所示。

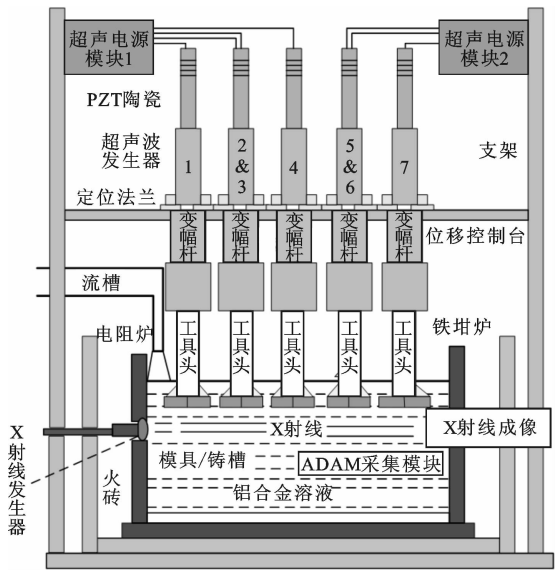


图8 超声波辅助铸造实验装置

3.2 实验方案

在新的超声波振动网络环境中进行超声波辅助铸造实验,采集超声波振动电源的输出功率、谐振频率、铝合金熔体的温度、变幅杆探入熔体深度等信息,并进行金相切片,获取晶粒尺寸。具体实验步骤如下。

步骤1:构筑由2个超声波振动电源输出、直径为630 mm的7变幅杆超声波振动网络环境,做好实验前准备;

步骤2:注入铝合金熔体,加热并且保持在700

~735℃,单元数据采集时间为0.5 s,数据采集循环时间为180 s,循环20次,共1 h的超声波辅助铸造实验,采集数据信息;

步骤3:分别对普通、智能和基于蜂窝的超声波振动网络重复步骤2。

3.3 效率分析

3.3.1 覆盖分析 传统超声波网络没有对变幅杆的位置进行调整,其对7085铝合金铸锭辅助铸造的工具头分布如图9所示,单元之间最小、最大距离分别为199.7、282.42 mm。

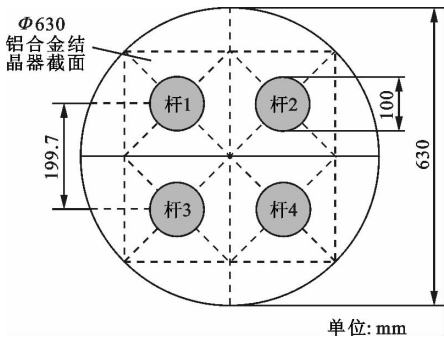


图9 传统4杆超声波振动网络节点分布

设计的蜂窝结构超声波振动网络单元的层数、数量以及工具头的尺寸都根据铝合金铸锭的尺寸确定,在7085铝合金铸造过程中构筑7个节点的超声波振动网络,工具头的分布如图10所示。节点之间的距离固定为181 mm,理论距离为179.98 mm,蜂窝单元边缘之间的距离为1.02 mm,尽管工具头之间有距离,但是边缘的超声波作用使得两个蜂窝单元的振动网络呈现连接状态,从而构筑网络之间连接,但蜂窝单元之间没有“连而不接”状态。

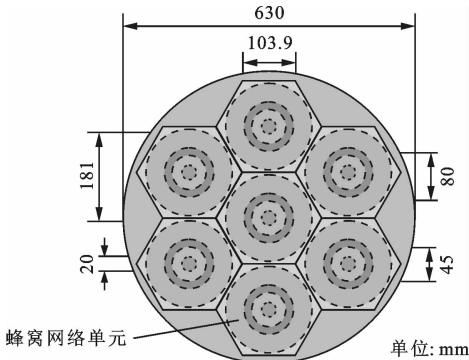


图10 2层7节点蜂窝结构超声波振动网络节点分布

结合前面的仿真分析,从各向同性和各向异性两个方面来分析振动网络的路径损耗,定义阈值为2.95 dB。功率超声波在超声波辅助铸造过程中可以对铝合金熔体的局部温度和压力产生影响,比熔

体平均温度高 15 ℃ 的采样点区域为频率覆盖区域。在超声波辅助铸造过程中温度的获取比频率的获取更加方便,沿着相邻变幅杆 i 和 j 之间的路径检测熔体温度,即可判断振动网络的覆盖概率。蜂窝网络的覆盖概率随着检测点与振动源中心点的距离增大而下降,但至相邻节点路径中点后振动网络覆盖概率又有所上升,平均为 0.79,传统结构振动网络覆盖概率随着检测点与振动中心的距离增大而降低,在 90 mm 时为 0.2,当距离达到 150 mm 时仅为 0.021。这是由于传统超声波振动网络没有对工具头进行改进,相邻振动单元之间的最短距离为 199.7 mm,存在覆盖盲区,导致其平均覆盖概率仅为 0.475。图 11 的实验结果显示,传统结构的振动网络覆盖概率远低于蜂窝结构振动网络。

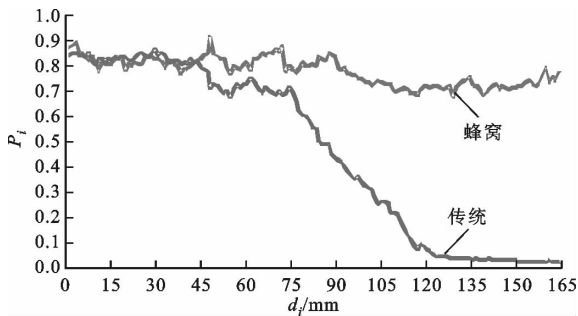
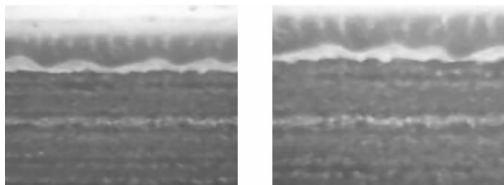


图 11 超声波振动网络单位负荷覆盖概率实验结果

3.3.2 功率超声波作用分析 使用图 7 所示的 X 射线采集模块,获取超声波振动网络辅助铸造过程中多个工具头平面正下方 2.5~7.5 cm 的扁薄圆柱形流体的 X 射线成像,图 12 结果显示蜂窝结构超声波振动网络温度分布均匀,效率高于传统超声波振动网络。



(a) 蜂窝结构网络 (b) 传统结构网络

图 12 铝合金熔体 X 射线成像

3.3.3 频率谱效率分析 单位面积的振动源个数 $N_{\text{unit}} = \lambda_B$, 得到单位面积内频率谱效率

$$\Omega(\lambda_u, \nu_i, \epsilon_i, \tau_i, \theta_i) = \lambda_B \Lambda(\lambda_u, \nu_i, \epsilon_i, \tau_i, \theta_i) \quad (25)$$

$$\Omega(\lambda_u, \nu, \epsilon, \tau, \theta) =$$

$$\frac{1}{2} \int_1^{315} \int_{316}^{630} \frac{(\beta-2)^{\tau-1} e^{-(\beta-2)/\theta} [1 - (1+z)^{-4}] \epsilon \rho \lambda_B}{\Gamma(\tau) \theta^{\tau} (\nu^{-\epsilon} - \varphi^{-\epsilon}) z \Theta \lambda_B} \cdot$$

$$\left\{ 1 + (\pi \Theta \lambda_B)^{1/42} \left[\Gamma \left(\frac{\epsilon \pi \theta}{2} \Theta \lambda, \psi^2 \right) \right] \right\} dz d\beta \quad (26)$$

式中

$$\Theta = -1 + (1+z)^{-8} + 6z^{1/3} B_0^b \left(\frac{1}{3}, 2, \frac{10}{3} \right) \quad (27)$$

$$B_0^b \left(\frac{1}{3}, 2, \frac{10}{3} \right) = \int_0^{b^{-10/3}} (1-t)^{23/3} dt \quad (28)$$

$$\Gamma(-y, x) = \int_x^\infty \frac{e^{-t} - \sum_{i=0}^{49} (-1)^i t^i / i!}{t^{y+1}} dt \quad (29)$$

不同振动网络的频率谱效率对比如图 13 所示。

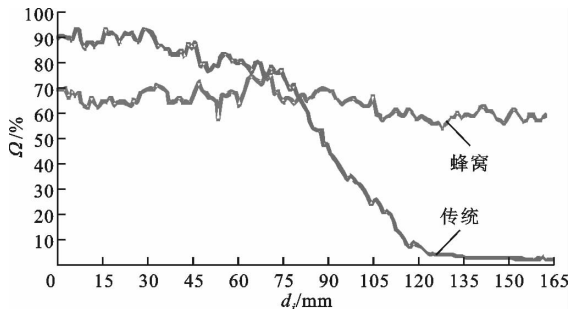


图 13 不同振动网络的频率谱效率对比

实验结果显示:蜂窝结构振动网络频率谱效率与单位分形有密切的关系,频率谱效率区间为 55.53%~78.12%,频率谱效率稳定;传统结构网络的频率谱区间为 2.72%~94.12%,距离变幅杆的中心点 75 mm 时效率锐减,至 120 mm 时仅为 2.72%;蜂窝网络的频率谱效率高于传统网络。

3.4 振动网络对铸造质量的影响

分别采用传统网络和蜂窝网络进行 730 ℃ 铝合金铸造实验,沿图 14 所示的位置 $C_1 \sim C_8$ 切 8 刀,获得体积为 1 cm³ 的铝合金切块,编号为 B1~B4。切块经过打磨、抛光、酒精清洗、Keller 试剂腐蚀和风干等处理,两种网络辅助铸造切块的金相组织对比如图 15 所示。

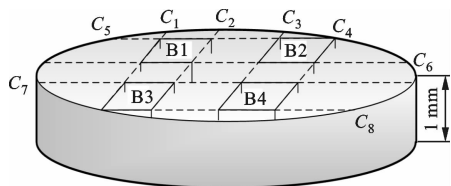
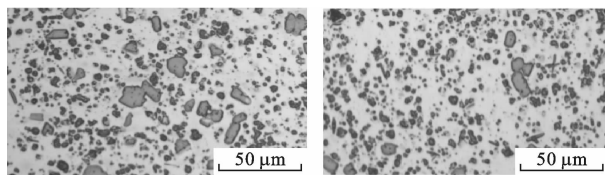


图 14 采样切块获取示意图



(a) 传统网络 (b) 蜂窝网络

图 15 不同网络辅助铸造的金相组织对比

不同振动网络环境下晶粒尺寸如表 3 所示。由表 3 和图 15 可以看出,蜂窝振动网络环境下晶粒均匀,铸造质量提升。

表 3 不同网络对晶粒尺寸的影响

位置	晶粒尺寸/ μm	
	传统网络	蜂窝网络
B1	176.31	146.23
B2	175.34	136.06
B3	173.29	143.15
B4	199.12	156.65
平均	181.05	145.23

4 结 论

(1)蜂窝网络频率谱效率高于传统网络。蜂窝网络的频率谱效率区间为 55.53%~78.12%,不同检测点的频率谱变化小,工作稳定,而传统网络频率谱效率区间为 2.72%~94.72%,且随着测试点与振动中心距离的增大迅速减小,振动网络作用效率快速降低。

(2)蜂窝网络体积作用效率随网络层数的增加而增加,当层数为 2 时体积作用效率为 63.04%,当层数为 8 时体积作用效率达到 77.6%,其单元模块的边长也随着网络层数和铸锭尺寸的改变而改变,作用体积从 9 820.45 cm³ 变化为 12 089.05 cm³,体积作用效率逐步提高。

(3)蜂窝网络功率谱密度区间为 0.741~0.912 W/cm²,传统网络功率谱密度区间为 0.07~2.33 W/cm²,蜂窝网络功率谱密度更加稳定,而传统网络的功率谱密度高开低走,作用面积有限。

(4)7085 铝合金蜂窝结构超声波振动网络辅助铸造实验中形核率增加,平均晶粒尺寸为 145.23 μm ,比传统网络辅助铸造的平均晶粒尺寸 181.05 μm 减小 35.82 μm ,铸造质量提升。

基于蜂窝结构的超声波振动网络构建方法还存在诸多不足,随着熔体温度的下降,电源的输出功率、频率会产生随机抖动,稳定控制问题值得研究。另外,最优的超声波振动网络结构是不存在的,需要在理论与实践的结合过程中不断改进与寻优。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 陈强,李伟华,吴婷,等. 数值积分函数对超声波流量计精度的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46 (9): 21-29.

CHEN Qiang, LI Weihua, WU Ting, et al. Influence of numerical integration on error of ultrasonic flow meter [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(9): 21-25.

[5] 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.

[6] 钟建华,齐乐华,李妙玲,等. 利用人工神经网络的偏光下热解炭织构类型识别 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(7): 46-49.

ZHONG Jianhua, QI Lehua, LI Miaoling, et al. Automatic classification of pyrocarbon texture under polarized light microscope based on artificial neural network [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(7): 46-49.

[7] 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: 45-51.

[8] 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: 19-35.

(下转第 142 页)