

金属熔体双频电磁成形的理论和试验研究

Theoretical and Experimental Study on Dual-frequency Electromagnetic Shaping of Molten Metal

李双明^{1,2}, 郝启堂¹, 李金山¹, 寇宏超¹, 傅恒志¹, 贾均², 郭景杰²

(1 西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 西安 710072;

2 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

LI Shuang-ming^{1,2}, HAO Qi-tang¹, LI Jin-shan¹, KOU Hong-chao¹,

FU Heng-zhi¹, JIA Jun², GUO Jing-jie²

(1 State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnic University,
Xi'an 710072, China; 2 Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

摘要: 从固态金属感应加热熔化和液态金属电磁成形两个角度出发, 讨论了金属熔体双频电磁成形中的频率选择, 物理量的分布以及两种双频电磁成形的试验过程。结果表明: 小尺寸复杂形状金属熔体电磁成形的最佳频率约在超音频的范围 ($f = 10 \sim 100\text{kHz}$), 双频电磁力等物理量的分布是相应单频电磁力等物理量和与频率相关的三角函数的组合, 在一定条件下, 可简化为两个单频物理量的叠加。试验中成功地实现了双高频和高频-超音频两种双频电磁成形过程, 高频-超音频双频电磁成形的工艺要优于双高频电磁成形的工艺, 最后利用优化的双频电磁成形方案成功地实现了扁椭圆、弯月截面等复杂形状金属熔体双频电磁成形过程, 获得了无模壳双频电磁成形的复杂截面形状样件。

关键词: 感应加热; 电磁成形; 双频

中图分类号: TG391 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2002) 01-0022-003

Abstract: On the basis of different behaviors of alternative electromagnetic field for induction and electromagnetic shaping, the process of dual-frequency electromagnetic shaping of molten metal was firstly presented. The theoretical researches show that audio frequency ($f = 10 \sim 100\text{kHz}$) is suitable for dual-frequency electromagnetic shaping of small-sized molten metal and the physical parameters of dual-frequency electromagnetic shaping, such as electromagnetic force, electromagnetic pressure etc., is the combination of the physical parameters of single-frequency electromagnetic shaping. The experimental results show that the process for high-audio dual-frequency (with 350kHz and 50kHz) electromagnetic shaping is controlled prior to dual-high frequency (with 350kHz and 200kHz) electromagnetic shaping. By designing suitable induction heating and electromagnetic shaping coils, the elliptical and meniscus cross section near-net shape aluminum samples are successfully confined by high-audio dual-frequency electromagnetic shaping.

Key words: induction heating; electromagnetic shaping; dual-frequency

20 世纪 20 年代, Muck 提出了无坩埚磁悬浮金属冶炼的方法^[1], 开始利用电磁场对固液态金属进行加热熔炼。50 年代, Okress 等学者在实验室中实现了多种固态金属 (Al, Sn, Ti 等) 的磁悬浮熔炼, 并对之进行了简要的理论研究提出了电磁悬浮技术 (Electromagnetic Levitation-EML)^[2], 由于 EML 可用于一些易氧化和高熔点金属的冶炼和物理特性参数的研究, 引起世界上许多学者的广泛注意。70 年代, Getselev 利用液态金属与电磁场作用产生的电磁力来约束液态金属成形凝固, 提出了无模壳电磁铸造技术 (Electromagnetic casting-EMC)^[3], 一反传统的模壳

成形方法。由于该技术生产的铸锭具有表面质量好, 内部组织细小致密, 轧制前不剥皮等一系列优点, 瑞士、美、日等国相继将该技术应用于铝、铜等铸锭的连续铸造, 并在工业中实现了大规模自动化生产^[4,5], 但目前尚不能实现复杂截面形状铸锭的电磁铸造。如果固态金属在电磁加热熔化的同时, 又能约束成形为复杂形状, 就能实现无坩埚熔化无模壳成形, 达到无污染熔炼和成形的目的, 这对一些化学活性大、高熔点和与模壳材料起反应的金属材料来说是一种新型的冶炼和成形方法。该技术如能开发成功将是无污染环境冶炼技术的一个突破。但由于固态金属加热熔化

和液态金属电磁成形所需的电磁场频率不同, 很难将这两方面的功能统一在一个频率的电磁场中。为此, 本工作提出双频电磁成形的工艺方法, 并从原理和工艺两个方面来探讨该复杂过程实现的途径。

1 固态金属双频加热熔化和电磁成形的原理

图 1 为金属熔体双频电磁成形工艺的示意图, 其原理是在加热感应圈中通高频电流, 感应圈中金属试样就会在表面感应出涡流, 产生焦耳热使试样熔化, 涡流与感应圈中的电磁场作用, 产生电磁压力 P_{m1} 约束熔化的液态金属在非接触下初步成形, 最终熔化的液态金属在下成形感应圈电磁压力 P_{m2} 作用下成形为近终零件形状。对一定截面尺寸的金属材料来说, 双频电磁成形工艺的关键是在金属熔体表面上获得足够大的电磁压力使之与金属熔体的静压力、表面张力相平衡以获得理想的金属熔体形状。由于金属熔体双频电磁成形是一个非常复杂的过程, 涉及到如何选择不同频率的电磁场、线圈的配置形式(电磁场的配置形式)以及如何计算双频电磁成形下电磁力的大小和分布等一系列问题。

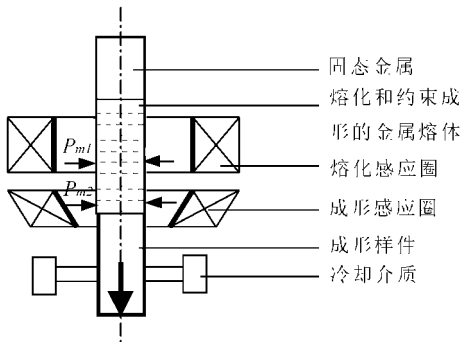


图 1 液态金属双频电磁成形工艺的示意图

Fig. 1 Sketch of dual-frequency electromagnetic shaping of liquid metal

在双频电磁成形过程中, 固态金属加热熔化的电磁场频率可根据感应加热原理来选取。而液态金属电磁成形频率的选择主要是考虑电磁力和电磁压力要尽可能全部作用于液态金属中, 不因电磁场频率造成的集肤效应而使小尺寸液态金属内电磁力和电磁压力发生相互抵销现象^[6]; 其次是考虑到电磁搅拌作用, 中频 ($f = 1 \sim 10\text{kHz}$) 电磁场能提供足够大的电磁压力, 但同时伴随着较大的电磁搅拌, 液态金属成形的稳定性难以保证。综合这两个方面, 可认为小尺寸复杂形状的液态金属电磁成形频率范围可能在高频下限频率 ($f = 100 \sim 200\text{kHz}$) 和介于中频和高频之间的超音频 ($f = 10 \sim 100\text{kHz}$) 之间。基于上述原

则, 在试验中采取双高频 (350 和 200kHz) 和超音频 (350 和 50kHz) 两种试验方案, 350kHz 电磁场用来快速加热熔化固态金属, 而 200kHz 和 50kHz 频率的电磁场用来约束金属熔体成形为复杂形状, 并探讨不同频率电磁场中复杂形状金属熔体的电磁成形稳定性。

2 金属熔体电磁成形的形状及双频电磁成形的物理量分布

金属熔体在电磁场中无模壳成形为何种形状, 主要取决于金属熔体表面上力的平衡式^[7], 即:

$$\rho gh = \frac{1}{2\mu} B \cdot B^* + \kappa \Psi + \rho(v \cdot v) \quad (1)$$

方程 (1) 左边为熔体的静压力, 右边分别为作用在熔体上的电磁压力、表面张力、流动冲击力。其中符号 ρ , v , P , j , B , g , h , B^* , κ , Ψ 分别为金属熔体的密度, 流速, 压力, 电流密度, 磁感应强度, 重力加速度, 熔体高度, 磁感应强度的共轭复数, 熔体表面曲率, 表面张力系数。如果熔体中的流速较小 (磁雷诺数远小于 1), 方程式 (1) 就可简化为熔体的静压力、电磁压力和表面张力三个力的平衡。因此要获得所设计的电磁成形形状首先要研究如何计算双频电磁压力、电磁力等双频物理量的大小和分布问题。

由于电磁场是交变电磁场, 可用时谐电磁场来表示 (表现为三角函数形式), 同样感应出的交变电流也可以用三角函数来表示, 则两者相互作用的电磁力可表示为:

$$\begin{aligned} f = & \frac{\mu}{2} [(\hat{J}_1 \times \hat{H}_1) \sin(\omega t - \frac{\pi}{4}) \sin(-\omega t) \\ & + (\hat{J}_2 \times \hat{H}_2) \sin(\omega t + \varphi - \frac{\pi}{4}) \\ & \sin(-\omega t - \varphi) + (\hat{J}_1 \times \hat{H}_2) \sin(\omega t - \frac{\pi}{4}) \\ & \sin(-\omega t - \varphi) + (\hat{J}_2 \times \hat{H}_1) \\ & \sin(\omega t + \varphi - \frac{\pi}{4}) \sin(-\omega t)] \quad (2) \end{aligned}$$

方程 (2) 中, \hat{J} , \hat{H} 分别代表电流密度和磁场强度的幅值, 下标 1 和 2 分别代表两个不同频率的电磁场, φ 为两交变电磁场的相位差, t 为时间。将方程 (2) 中的三角函数展开后, 可发现除了第一和第二项中有常数项外, 其余都是与两频率 (2ω , 2ω , $\omega + \omega$, $\omega - \omega$) 有关的三角函数项。因此双频电磁成形的电磁力分别是由两单独频率电磁场产生的电磁力和与两频率有关的改变方向和大小电磁力的叠加。同样电磁压力等双频物理量也分别是由各自单频电磁场产生的物理量和与两频率有关的改变方向和大小物理量

的叠加。如两交变电磁场的频率 (ω, ω) 数值较大, 它们共同周期时间 (交流一周) 比流体机械性的弛豫时间 ($t = \rho L^2 / 2\pi\eta$, 其中 L 为流体特征长度, η 为流体的粘度系数) 短时, 双频电磁成形的电磁力一周时间内作用于金属熔体的平均体积力为两单独频率电磁场产生的平均体积力之和。这样双频问题就可以转化为单频问题进行分析计算。由于双频电磁成形可利用不同的单频电磁场组合来获得, 因而比单频电磁成形具有更大的设计空间和调节余地。

3 双频电磁成形的试验过程

试验中对双频电磁成形线圈之间的配置方式进行了研究^[8], 最后选择了图 1 的上下配置双频线圈形式。图 2a, b 分别是高频-超音频和双高频两种双频电磁成形成态的对比。

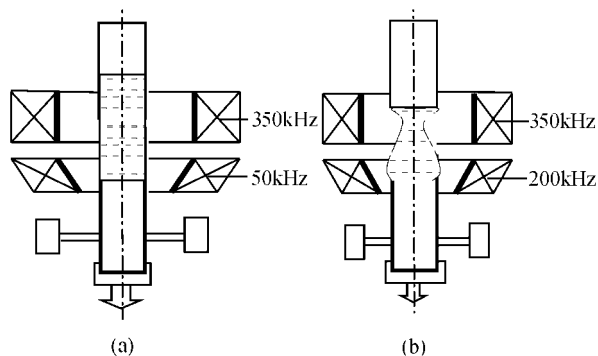


图 2 高频-超音频

(a) 和双高频 (b) 电磁成形过程对比

Fig. 2 Comparing the processes of high-audio

(a) and dual-high (b) frequency electromagnetic shaping

造成这两种双频电磁成形成态不同的原因是不同频率电磁场产生的加热能量和电磁压力有差异。根据固态金属感应加热原理可知^[9], 试样单位面积上的加热密度为:

$$q = \int_0^{\delta} \frac{I^2}{\sigma} dx = \frac{1}{2\mu^2 \sigma \delta} B_s^2 \quad (3)$$

其中: $\delta = (\pi f \mu \sigma)^{-1/2}$ 为集肤层厚度, σ 为液态金属的电导率, B_s 为液态金属表面上的磁感应强度, x 为液态金属的深度, 其它符号意义同前。从 (3) 式可知, 在产生相同加热能量 q (熔化液柱高度相同) 的条件下, 由于 50kHz 电磁场的集肤层厚度是 200kHz 的 2 倍, 结果导致 50kHz 电磁场作用在金属熔体表面上的 B_s^2 也是 200kHz 的 2 倍, 产生的电磁压力也是后者的 2 倍, 这样图 2a 中能被 50kHz 电磁场产生的电磁压力所支撑的液柱高度也就很难被 200kHz 电磁场产生的电磁压力所支撑, 结果 200kHz 电磁场所支撑的液

柱高度就从图 2a 中液柱高度下降为图 2b 的形式, 这种电磁成形的液柱表面形状非垂直, 稳定性很差, 控制较难, 难以获得所需的近终形状截面样件。而图 2a 高频 (350kHz) 与超音频 (50kHz) 双频电磁成形表面呈垂直状态, 非常稳定, 控制比较容易。大量的试验结果表明: 双频电磁成形方案中超音频 50kHz 电磁成形的稳定性要明显优于高频 200kHz 电磁成形的稳定性, 这也说明了小尺寸金属熔体电磁成形最佳频率应在超音频的范围 ($f = 10 \sim 100\text{kHz}$), 而非高频的下限 ($f = 100 \sim 200\text{kHz}$) 范围。图 3 是利用高频-超音频双频电磁成形方案获得的铝圆形截面 ($\Phi_{20\text{mm}}$) 样件。

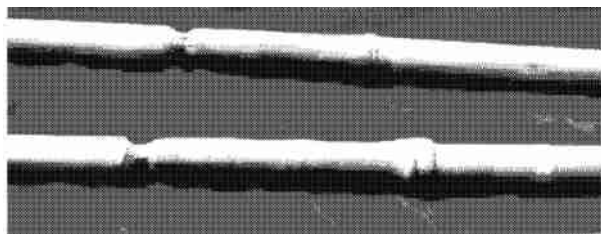


图 3 高频-超音频双频电磁成形的铝圆形截面样件

Fig. 3 Circular cross section aluminum sample confined by high-audio dual-frequency electromagnetic shaping

为了实现复杂形状金属熔体的电磁成形, 在试验中根据金属电磁成形的形状分析和双频物理量的分布为单频物理量的叠加等关系, 通过分别设计加热熔化线圈和电磁成形线圈 (截面形状, 高度, 匝数等) 来调整两者产生的电磁场, 满足简单形状固态料棒感应加热熔化和简单形状金属熔体在电磁场中无模壳成形为复杂形状的目的。图 4a 是圆形截面 ($\Phi_{20\text{mm}}$) 铝棒无接触加热熔化后无模壳约束成形为扁椭圆截面的样件, 而图 4b 是板状 ($6\text{mm} \times 30\text{mm}$) 铝板料感应加热熔化后无模壳约束变形为弯月截面的样件, 这两种电磁成形试验充分说明了复杂形状金属熔体的无模壳电磁成形是完全可能的。

4 结论

(1) 双高频和 高频-超音频两种双频电磁成形方案中, 高频-超音频双频电磁成形的稳定性要明显优于双高频电磁成形的稳定性, 同时也说明了小尺寸的液态金属电磁成形最佳频率应在超音频的范围 ($f = 10 \sim 100\text{kHz}$), 而非高频下限范围 ($f = 100 \sim 200\text{kHz}$)。

(2) 双频电磁成形物理量分别是由单频电磁成形

(下转第 28 页)

参考文献

- [1] M D Huda, M S J Hashmi and M A Ei-Baradie. MMCs: Materials manufacturing and mechanical properties [J]. Key Engineering Materials, 1995, 104-107 (Part I): 37—64.
- [2] D J Lloyd. Particle reinforced aluminum and magnesium matrix composites [J]. International Materials Reviews, 1994, 39 (1): 1—23.
- [3] M Taya and R J Arsenault. A Comparison between a Shear Lag Type Model and an Eshelby Type Model in Predicting the Mechanical Properties of a Short Fiber Composite [J]. Scripta Metallurgica, 1987, 21: 349—354.
- [4] V M Karbhari and D J Wilkins. An Engineering Modification to the Shearlag Model as Applied to Whisker and Particulate Reinforced Composites [J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1991, 25: 707—712.
- [5] 姜传海, 王德尊, 姚忠凯. 加载情况下 SiC_w/Al 复合材料中基体的实际承载系数 [J]. 复合材料学报, 2000, 17 (3): 42—45.
- [6] T W Clyne and P J Withers. An Introduction to Metal Matrix Composites [M]. New York, USA: Cambridge University Press, 1993: 322—334.
- [7] 姜传海, 王德尊, 张文龙, 姚忠凯. SiC_w/Al 复合材料中 SiC_w 的空间取向函数 [J]. 理化检验, 1999, 35 (10): 435—438.
- [8] E P Papadakis. Ultrasonic Velocity and Attenuation—Measurement Methods with Scientific and Industrial Applications [M]. New York, USA: Academic Press, 1976: 1285—1292.
- [9] R J Arsenault. Strengthening of Aluminum Alloy 6061 by Fiber and Platelet Silicon Carbide [J]. Materials Science and Engineering, 1984, 64: 171—181.

收稿日期: 2000-11-17

作者简介: 姜传海 (1963-), 男, 博士后, 现从事复合材料及 X 射线分析工作, 联系地址: 上海交通大学材料学院 X 光分析室 (200030)。

(上接第 24 页)

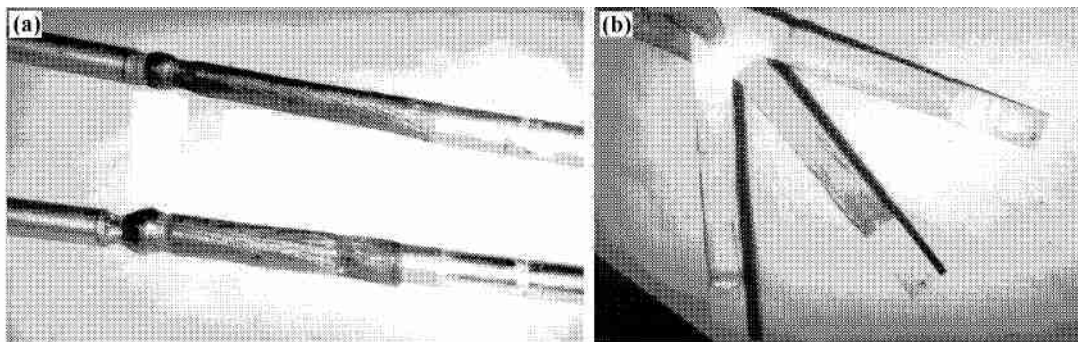


图 4 高频-超音频双频电磁成形的扁椭圆形样件 (a) 和弯月截面样件 (b)

Fig. 4 Elliptical (a) and meniscus (b) cross section aluminum sample confined by high-audio dual-frequency electromagnetic shaping

物理量和与两频率有关的改变方向和大小物理量叠加组合而成。如它们共同周期时间比流体机械性的弛豫时间短时, 双频电磁成形的物理量就为两个单独频率电磁场产生的物理量叠加之和, 双频问题就可转化为单频问题进行分析计算。

(3) 利用高频-超音频双频电磁成形方案成功地实现了扁椭圆和弯月截面复杂形状的金属熔体双频电磁成形, 说明利用双频电磁成形这门技术来获得完全无污染熔炼和成形的复杂形状构件是可能的。

参考文献

- [1] Muck O. German Patent: No. 422004, 1923, 10: 30.
- [2] Okress E C, et al. Electromagnetic levitation of solid and molten metals [J]. J Appl Phys, 1952, 23 (5): 525.
- [3] Getselv Z N. Casting in an electromagnetic field [J]. J Metals, 1971, 23 (10): 38.
- [4] Li B Q, Evans J W, Cook D P. An improved mathematical model for electromagnetic casters and testing by a physical model [J]. Metall Trans B, 1991, 21B: 121.
- [5] Vives C, Ricou R. Experimental study of continuous electromagnetic casting of aluminum alloys [J]. Metall Trans B, 1985, 16B: 377.
- [6] 沈军, 陈光, 李建国, 傅恒志. 板状坯件的电磁约束成形 [C]. 材料研究与应用新进展 (下卷). 北京: 化学工业出版社, 1999, 939.
- [7] Lavers J D. Computational methods for the analysis of molten metal electromagnetic confinement systems [J]. ISIJ International, 1989, 29 (12): 993.
- [8] 李双明. 金属熔体的双频电磁成形过程研究 [D]. 西北工业大学博士学位论文, 1999.
- [9] Sneyd A D, Moffatt H K. The fluid dynamics of the levitation melting process [J]. J Fluid Mech, 1982, 117 (1): 45.
- 基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目 (59995440); 航空基金资助项目 (97H53099)
- 收稿日期: 2000-08-15
- 作者简介: 李双明 (1971-), 男, 工学博士, 主要从事新型金属材料的冶炼和成形研究工作, 联系地址: 西北工业大学凝固技术国家重点实验室 (710072)。