



search...

Label

搜索

随便看看

热门关键字: 钛 湿法冶金 镍 合金相图

简介概要

三维大体积金属材料电磁悬浮过程的精准调控

来源期刊: 中国有色金属学报2018年第11期

论文作者: 蔡晓 王海鹏 魏炳波

文章页码: 2288 - 2296

关键词: 大体积金属材料; 电磁线圈; 悬浮力; 优化设计

Key words: bulk metallic materials; electromagnetic levitation coils; levitation force; optimization design

摘要: 采用数值模拟方法建立单层和双层电磁感应线圈的仿真模型, 分析线圈几何构型对空间磁场分布、金属球体表面的麦克斯韦应力张量分布和线圈悬浮性能的作用规律。选取Al和Ti两种金属作为实验对象, 研究线圈匝数、金属质量与最小悬浮电流之间的本征关系。设计多种用于大体积金属无容器处理的电磁悬浮线圈, 并实现直径10~50 mm的三种球状金属在空气中的悬浮加热。利用优化设计的线圈成功悬浮Al、Ti和Cu三种不同密度的典型金属, 其中悬浮起质量高达807 g的纯铜。

Abstract: Containerless processing technique of bulk metals is of great importance not only in fundamental sciences, such as materials science and liquid physics, but also for the development of advanced materials. Due to the small size of levitated samples, novel materials research and its industrial application are seriously restricted. Therefore, a numerical model of single-layer coil and double-layer coil was established to analyze the effect of the coil structure on the distribution of magnetic field, the surface pressure and the levitation capability. Besides, the relationship among number of turns, metal mass and the minimum value of levitation current were investigated experimentally. Meanwhile, various electromagnetic levitation coils were designed to increase the levitation force, which were used to perform containerless processing of bulk metallic materials. Three kinds of spherical bulk metals are successfully levitated and heated by the designed coils, whose diameters range from 10 to 50 mm. Electromagnetic levitation of 807 g copper has been successfully achieved by greatly enhancing the levitation force through the optimized geometric structure of the coil.

添加到收藏

相关论文

- 三维多级结构V₂O₅锂离子阴极材料的研究进展
- 模糊PID控制在电磁悬浮平台中的应用
- 纳米金属Ni粉的电爆炸法制备与表征
- 磁悬浮球的鲁棒控制器设计
- 基于混沌粒子群算法的结构可靠性优化设计
- 土钉支护的优化设计
- 液压机分配阀芯驱动凸轮升程曲线优化设计
- 精铜的化学清洗提纯
- 大挤压比铝型材挤压过程的数值模拟
- 用真空温压技术制备纳米金属铜块体材料

相关知识点

- 磁悬浮原理
- 磁悬浮起源
- 生物医学金属材料(biomedical metallic materials)
- 中国具有完全自主知识产权的永磁悬浮列车
- 时间域电磁法ATEM正演模拟算法优化设计
- 路线优化设计过程
- 磁悬浮
- 大型车辆铝型材挤压分流模的优化设计
- 采矿环境再造多学科优化设计实例
- 硫化矿电位调控浮选实验
- 舰船结构钛合金的优化设计

详情信息展示

DOI: 10.19476/j.ysxb.1004.0609.2018.11.15

三维大体积金属材料电磁悬浮过程的精准调控

蔡 晓, 王海鹏, 魏炳波

(西北工业大学 应用物理系, 西安 710072)

摘要: 采用数值模拟方法建立单层和双层电磁感应线圈的仿真模型, 分析线圈几何构型对空间磁场分布、金属球体表面的麦克斯韦应力张量分布和线圈悬浮性能的作用规律。选取Al和Ti两种金属作为实验对象, 研究线圈匝数、金属质量与最小悬浮电流之间的本征关系。设计多种用于大体积金属无容器处理的电磁悬浮线圈, 并实现直径10~50 mm的三种球状金属在空气中的悬浮加热。利用优化设计的线圈成功悬浮Al、Ti和Cu三种不同密度的典型金属, 其中悬浮起质量高达807 g的纯铜。

关键词: 大体积金属材料; 电磁线圈; 悬浮力; 优化设计

文章编号: 1004-0609(2018)-11-2288-08

中图分类号: O441.3

文献标志码: A

悬浮无容器处理实验技术因能提供超洁净环境而被广泛应用于空间科学实验、实现深过冷、亚稳材料制备、快速凝固理论研究等领域^[1-6]。其中电磁悬浮方法有着悬浮力强且悬浮过程稳定性的特点, 其原理为: 加载高频交变电流的电磁线圈周围空间产生特定分布的电磁场, 由于电磁感应在金属样品内部产生涡流, 涡流与磁场相互作用产生洛伦兹

力，从而平衡重力而实现悬浮。随着空间悬浮实验的发展和材料物理研究领域的拓展，发展大体积悬浮实验方法成为人们关注的重要问题，探索大体积金属材料电磁悬浮优化设计方法则成为解决这一问题的关键。

电磁悬浮线圈的几何构型对金属材料的悬浮特性有十分重要的作用，典型的悬浮线圈由上下反绕的两部分空心铜导管绕制而成，下端线圈产生主悬浮力，上端线圈作用在于悬浮控制。到20世纪50年代，人们将电磁悬浮原理发展成为悬浮实验技术^[7-11]，已成功开展金属材料的加热与熔化、快速晶体生长^[12-14]，液态合金的深过冷实验^[15-17]和热物理性质测定^[18-21]等研究，由于已有悬浮实验主要开展基础研究加之悬浮方法自身缺乏优化，现有电磁悬浮大多只能悬浮质量为0.5~2 g的样品，以求达到样品的稳定悬浮与温度的灵活控制。克量级的样品对于研究悬浮凝固微观组织结构、液态合金的物理性质、过冷能力检测等研究完全可以胜任，但由于样品尺寸限制，悬浮凝固金属材料的力学、电学和磁学等性质研究十分困难，从而使得电磁悬浮与新材料的研发很难融于一体，更无法将悬浮制备的材料广泛加工成工业产品。因此，优化电磁悬浮实验并实现大体积金属的电磁悬浮显得尤为必要。

大体积金属电磁悬浮势必需要直径更大、排列更密的线圈、更大的电流、更大的频率、更大的磁场强度，但是，直径更大与排列更密互为矛盾，排列更密与更大电流互为矛盾，更大磁场与直径更大也互为矛盾，这些矛盾的存在正是当前电磁悬浮的实验多集中在实现质量为克量级样品悬浮的根源，为此，人们设法设计更为复杂的电磁线圈来实现更重样品的电磁悬浮。采用冷坩埚技术可实现千克级金属的电磁熔炼^[22-26]，借助多种类型的电磁场(直流、高频和脉冲等)进一步对微观凝固组织进行调控，改善其力学性能。SAGARDIA等^[27]提出一种施加不同频率电流的叠加线圈来悬浮大体积金属的方法，通过空间叠加多频磁场在金属球体表面产生均匀压力的方式达到克服表面张力不足的目的，成功悬浮了1 kg铝，该设计为半包围状，悬浮样品被包围在线圈之中，限制了实时测量，无法实现熔化液态金属的落滴凝固。PESTEANU等^[28]建立一种电磁悬浮系统，在前后左右4个方向的磁芯缠绕紫铜线圈，分成两对，紫铜线圈通以不同频率的电流，在金属样品的侧面产生方向相反的电磁力，成功悬浮熔化了28.6 g铝合金，实现了悬浮能力的大幅提升，仍然不能实现上百克样品的悬浮实验。能否通过探索线圈匝数、电流、频率等关键参数之间的关系从而优化设计线圈几何构型，建立结构灵巧、便于悬浮凝固实验的电磁悬浮实验方法再次成为空间科学工作者关注的焦点。

本文作者旨在研究电磁悬浮线圈匝数、样品质量与最小悬浮电流之间的关系，利用数值模拟方法建立单层和双层电磁线圈的仿真模型，分析线圈几何构型对空间磁场分布、表面的麦克斯韦应力张量分布和线圈悬浮性能的作用，达到实现百克量级金属材料电磁悬浮的目的。

1 数值模拟与实验方法

1.1 大体积金属电磁线圈的数值模拟

根据对四极场的电磁学分析，金属球体在电磁线圈中所受悬浮力计算公式^[29]为

$$F = \frac{3}{2} \pi \mu_0 I^2 R^3 G(x) A(z) \quad (1)$$

$$G(x) = 1 - \frac{3}{4x} \frac{\sinh 2x - \sin 2x}{(\sinh x)^2 + (\sin x)^2} \quad (2)$$

式中： $A(z)$ 是与线圈结构相关的函数； $G(x)$ 是与趋肤深度相关的无量纲函数； I 是交变电流； R 为金属球体样品半径； μ_0 为真空磁导率。

从式(1)可看出，理论上若加载电流足够大，任意质量的金属球体均可以实现悬浮，但实际的感应加热装置对不同几何构型的电磁线圈均存在可加载的最大电流值，所以优化线圈结构是提高悬浮力更为有效的途径。在数值模拟中预设典型电流值为600 A、电流频率35 kHz。

根据麦克斯韦方程组计算线圈周围空间的磁场分布：

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \end{cases} \quad (3)$$

式中： H 为磁场强度； J 为电流密度； ε_0 为真空介电常数； E 为电场强度； t 为时间； B 为磁感应强度； σ 为金属电导率。

数值计算中，金属球体所受电磁力可通过如下两种方式计算：

1) 获取金属球体中电流分布及磁场分布，对金属中的洛伦兹力进行体积分：

$$F = \int (J \times B) dV \quad (4)$$

2) 根据动量守恒定律，把悬浮金属球体作为一个封闭系统，利用麦克斯韦电磁应力张量在金属表面进行面积分，

可获得金属球体表面应力分布和总电磁力^[30]：

$$T = -\epsilon_0 EE - \frac{1}{\mu_0} BB + \frac{1}{2} I \left(\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right) \quad (5)$$

$$F = \oint n \cdot T dS \quad (6)$$

式中：V为体积；T为麦克斯韦应力张量；I为单位张量；n为表面单位法向量；S为表面积。

为了简化电磁线圈分析模型，做如下假设：1) 忽略线圈螺旋线的倾斜角、端部导线、上端与下端线圈连接导线对磁场的影响，每匝线圈用相同截面的圆环近似；2) 假设电磁感应线圈呈轴对称结构；3) 假设悬浮金属样品为正球体，在二维轴对称条件下建立电磁线圈的几何模型。

金属在高频交变电磁场的趋肤效应十分明显，以铜为例，电流频率为20~200 kHz，趋肤深度约为0.5~0.16 mm。所以线圈及金属球体表层部分的物理量变化很大，对金属球体的边界有必要进行更为细致地网格划分。实验中系统地建立了多个尺寸与实验线圈相符的仿真模型，改变其下端线圈的匝数、金属球体的位置，进行参数化扫描计算，分析金属球体所受电磁力变化。

提出如下感应线圈的优化设计实验方案：如图1所示，选择d 40 mm的铜球作为悬浮实验对象，图1(a)所示为初始线圈结构，上端稳定线圈1匝，下端悬浮线圈共6匝，线圈内径为50 mm。方案一如图1(b)所示，在下端悬浮线圈底部增加1~3匝线圈。方案二如图1(c)所示，在下端线圈外层增加1~3匝线圈。方案一和二之间不同点在于增加多匝线圈的位置，以及线圈半径。为方便分析计算，对不同构型线圈建立统一对照体系，即以金属球心(点O)为原点设置角度参量q表征金属球体表面不同位置，P为金属球体表面的某一点，设线圈轴线为r=0，下部从上至下数第一匝线圈的中心为z=0，建立r-z直角坐标系。

1.2 大体积金属的电磁悬浮实验设计

采用额定功率为30 kW的高频感应加热设备，绕制线圈的铜管有圆形截面(d4~6 mm)和方形截面 (6 mm×6 mm×1.5 mm)两种规格，悬浮金属球形样品Ti(99.0%)、Cu(99.9%)和Al(97.0%)由不同直径的金属棒材切削成球形。使用d5 mm的紫铜管绕制内径40 mm的电磁悬浮线圈，其匝间距为1~2 mm，上端稳定线圈2匝，下端悬浮线圈8匝。选取不同质量的Al、Ti作为悬浮对象，通过改变下端悬浮线圈的匝数，测定采用不同匝数线圈时悬浮同一金属所需最小电流，所需电流越小，则线圈的悬浮能力越强。

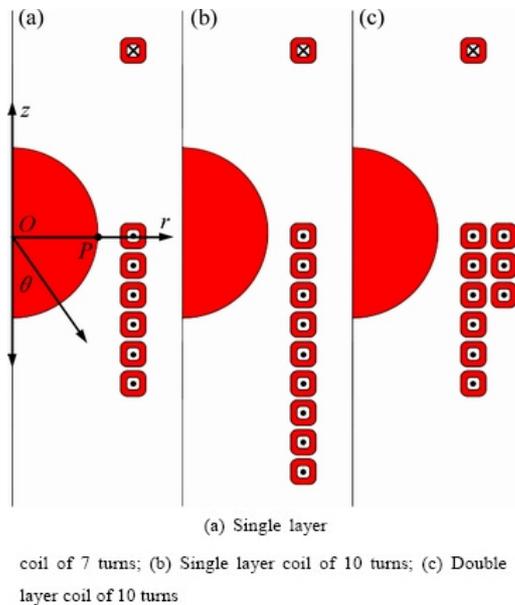


图1 线圈几何结构示意图

Fig. 1 Schematics of electromagnetic coils

设n匝线圈悬浮质量为 m_1 的金属球体所需最小电流值为

$$I_{n,m_1}$$

得出质量为 m_1 的金属球体采用n匝与n-1匝线圈相比电流减少比值为

$$\delta_{n,m_1} = \frac{I_{n-1,m_1} - I_{n,m_1}}{I_{n-1,m_1}} \quad (7)$$

用 δ_n 表征第n匝线圈引起的电流减少值:

$$\delta_n = \bar{\delta}_{n,m_1} \quad (8)$$

针对10~300 g金属样品, 使用d4~6 mm圆形截面的紫铜管绕制不同类型的线圈。为提高线圈的悬浮能力, 利用规格为6 mm×6 mm×1.5 mm的方形铜管绕制双层线圈以实现更大质量样品的悬浮。

2 结果与讨论

2.1 电磁悬浮线圈结构优化分析

匝数是电磁悬浮线圈结构的一个重要参数, 改变电磁悬浮线圈匝数的同时意味着高频感应电路的谐振频率也随着电感的变化而发生变化。从式(1)和(2)可看出, 频率对悬浮力的作用体现在无量纲函数 $G(x)$ 中。实验中所用的一种悬浮线圈由直径5 mm紫铜管制而成, 内径40 mm, 悬浮线圈8匝, 其谐振频率49~61 kHz。图2(a)所示为3种d 40 mm金属球体的 $G(x)$ 随频率的变化关系。在谐振频率范围内, 3种金属的 $G(x)$ 随频率增加均缓慢增大, 但增幅很小。其中Ti的 $G(x)$ 变化率最大, 为1.25%。所以可以把此区间的 $G(x)$ 作为一个常数处理, 忽略49~61 kHz范围电流频率变化对悬浮力的影响。