



## 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<sup>[1-6]</sup>。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<sup>[7-11]</sup>, 已成功开展金属材料的加热与熔化、快速晶体生长<sup>[12-14]</sup>, 液态合金的深过冷实验<sup>[15-17]</sup>和热物理性质测定<sup>[18-21]</sup>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<sup>[22-26]</sup>, 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<sup>[27]</sup>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<sup>[28]</sup>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

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51327901, 51474175, 51522102)

**收稿日期:** 2017-11-18; **修订日期:** 2018-08-24

**通信作者:** 王海鹏, 教授, 博士; 电话: 029-88431669; E-mail: hpwang@nwpu.edu.cn

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<sup>[29]</sup>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; $\mu_0$ 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: $\mathbf{H}$ 为磁场强度; $\mathbf{J}$ 为电流密度; $\varepsilon_0$ 为真空介电常数; $\mathbf{E}$ 为电场强度; $t$ 为时间; $\mathbf{B}$ 为磁感应强度; $\sigma$ 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:

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

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<sup>[30]</sup>:

$$\mathbf{T} = -\varepsilon_0 \mathbf{E} \mathbf{E} - \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} \mathbf{B} + \frac{1}{2} \mathbf{I} \left( \varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right) \quad (5)$$

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

式中: $V$ 为体积; $\mathbf{T}$ 为麦克斯韦应力张量; $\mathbf{I}$ 为单位张量; $\mathbf{n}$ 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 $\theta$ 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( $d$ 4~6 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

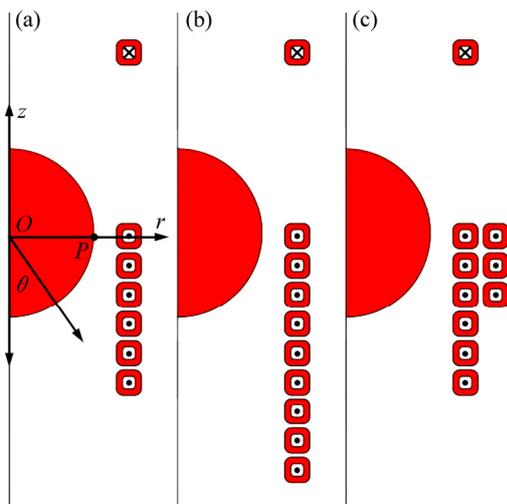


图1 线圈几何结构示意图

Fig. 1 Schematics of electromagnetic coils: (a) Single layer coil of 7 turns; (b) Single layer coil of 10 turns; (c) Double layer coil of 10 turns

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  $d5\text{ mm}$  的紫铜管绕制内径  $40\text{ mm}$  的电磁悬浮线圈，其匝间距为  $1\sim 2\text{ mm}$ ，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。

设  $n$  匝线圈悬浮质量为  $m_i$  的金属球体所需最小电流值为  $I_{n,m_i}$ ，得出质量为  $m_i$  的金属球体采用  $n$  匝与  $n-1$  匝线圈相比电流减少比值为

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

用  $\delta_n$  表征第  $n$  匝线圈引起的电流减少值：

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

针对  $10\sim 300\text{ g}$  金属样品，使用  $d4\sim 6\text{ mm}$  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  $6\text{ mm}\times 6\text{ mm}\times 1.5\text{ mm}$  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  $5\text{ mm}$  紫铜管绕制而成，内径  $40\text{ mm}$ ，悬浮线圈8匝，其谐振频率  $49\sim 61\text{ kHz}$ 。图2(a)所示为3种  $d40\text{ mm}$  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  $49\sim 61\text{ kHz}$  范围电流频率变化

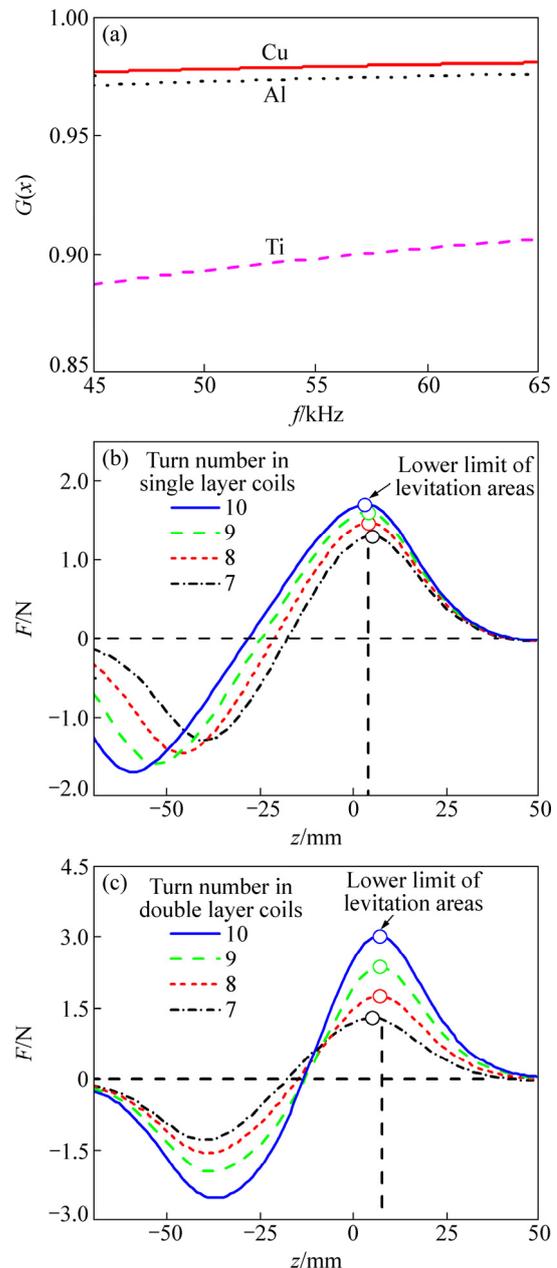


图2 电磁悬浮线圈的不同参数对悬浮力的影响

Fig. 2 Influence of various factors on levitation capacity: (a) Relationship between dimensionless function  $G(x)$ ; (b) Current frequency (levitation force distribution of single layer coils); (c) Levitation force distribution of double layer coils

对悬浮力的影响。

通过在外层增加线圈弥补单层结构线圈的不足, 以期达到提高悬浮力的目的。采用控制变量法, 改变方案一和方案二中线圈的匝数, 参数化扫描  $d40\text{ mm}$  的铜球在轴线不同位置所受的电磁力。两种方案均发现, 随着线圈匝数增多, 在悬浮区域内金属所受电磁力增大, 在远离线圈处电磁力逐渐趋近于零。单层线圈最大悬浮力在  $z$  为  $5\sim 6\text{ mm}$  处, 同时此处也是样品稳定悬浮区域的下限。与单层 7 匝相比, 单层 10 匝线圈中金属球体所受悬浮力增大约 31%, 如图 2(b)所示。在双层线圈中, 由于多增加的数匝线圈在靠近样品悬浮区域产生更强的磁场, 金属体受到的电磁力约提高了 134%。比较单层增加 3 匝与外层增加 3 匝的结果, 后者更充分利用新增线圈, 达到高效提升电磁线圈悬浮力的目的, 如图 2(c)所示。

### 2.2 线圈匝数与悬浮力的相关性

悬浮大体积金属时, 由于线圈半径增大, 在相同电流条件下必将致使磁感应强度减小。提高磁场强度的途径: 一是增加悬浮线圈匝数, 二是增大线圈电流。但是电流的增大受到电源额定功率的限制, 而线圈匝数对悬浮性能的作用则成为本研究的关键。

图 3 所示为 Al、Ti 在不同悬浮线圈匝数下所需最小电流、金属质量及电流减少率的变化关系。当线圈匝数增加时, 悬浮同等质量金属样品所需最小电流值减小。同时, 随总匝数增加, 在其基础上每增加一匝线圈引起的电流减少比值  $\delta$  越来越小, 增加到第 8 匝线圈时, 悬浮 Al、Ti 的电流减小量为 5%, 这是由于增加的线圈相距悬浮金属球体位置越来越远, 致使其在金属球体位置处叠加产生的磁场越来越弱, 表明在线圈总匝数较少时, 增加下端线圈匝数是提高悬浮力的有效途径, 但在线圈总匝数较多时, 不能单一地依靠增加悬浮线圈匝数提升悬浮力。Al 与 Ti 的悬浮行为不同: 一是相同匝数的线圈, 悬浮 Al 所需电流更小, 这是因为 Al 的电导率较高, 密度较小, 这两种因素促使其在线圈电流较小时产生的悬浮力足以平衡重力。二是随 Al 质量的增加, 所需电流值并没有明显增加, 而是在一定区域范围波动。而不同质量金属 Ti 的悬浮实验可以看出, 随悬浮质量增加所需要最小电流呈现先下降再趋于平缓的趋势, 这是因为质量偏小的金属 Ti 尺寸在毫米量级, 同时 Ti 的电导率较小, 施加 50 kHz 高频电流时, 致使其感应电流趋肤深度约为 1.5 mm。其趋肤深度超过样品尺寸的 1/10, 甚至与样品尺寸相当。而同样条件下, 金属 Al 的趋肤深度只有 0.25 mm。

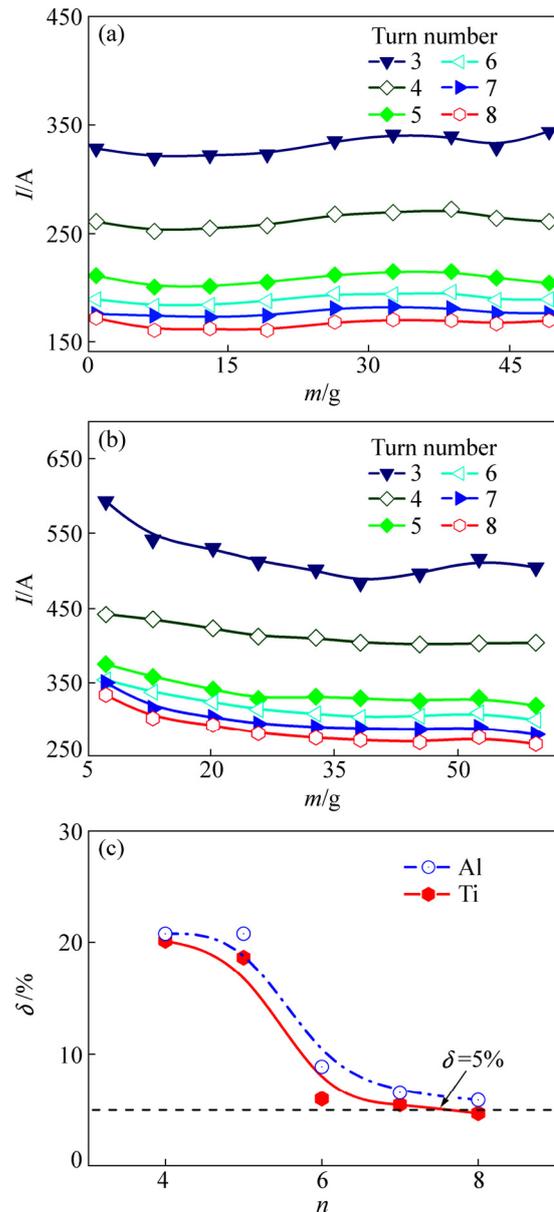


图 3 不同匝数线圈和最小悬浮电流的关系

Fig. 3 Relationship between number of turns and minimum current value: (a) Al; (b) Ti; (c) Reducing rate of current  $\delta$

因此, 趋肤深度极大地影响了洛伦兹力在小尺寸金属体内的分布, 从而影响悬浮力的大小。

### 2.3 悬浮区域的磁场分析

从模拟结果可看到: 在没有金属样品时, 感应线圈中间部分磁场强度分布较强, 达到 0.05 T 以上。当悬浮球形金属样品时, 在金属样品与线圈的空隙之间, 其磁场强度在 0.1~0.3 T 之间。这说明金属与线圈电路之间形成耦合, 影响磁场的分布, 从而在样品中感应产生电流。

图 4(a)和(b)分别是方案一与方案二线圈的磁场分

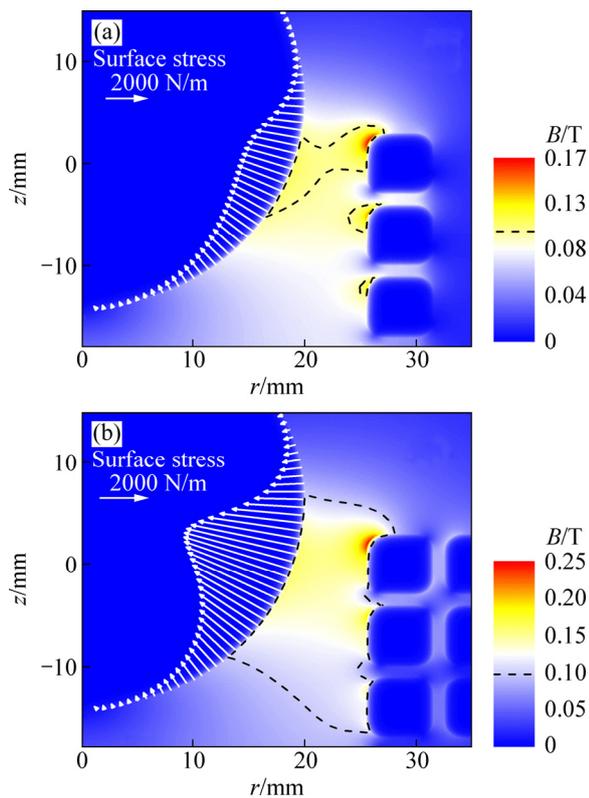


图4 不同结构线圈的磁场和表面应力分布

Fig. 4 Distribution of magnetic intensity and surface stress for different coils: (a) Single-layer coil; (b) Double-layer coil

布与表面的麦克斯韦应力张量分布图,可明显看出,金属球体及铜管内部磁场几乎为0,每一匝铜管内边的顶角处磁场强度更大,这是电流集中分布在方形截面的螺线管内侧棱角的表现。在方案一中,磁场强度 $B > 0.1$  T的区域中只存在于第1、2匝线圈的内侧边缘附近,而在方案二中,区域显著扩大至第1~3匝线圈与金属球体间隙的全部空间,同时,方案二中金属球体的表面应力张量强度分布显著大于方案一的值。这充分说明相比单层10匝线圈,悬浮力提升更受益于双层线圈外层更近的3匝线圈,双层线圈在金属球体附近产生更强的磁场,两种方案中金属球体的表面应力分布趋势基本相同,都呈现金属表面在线圈中受力不均匀的现象。由磁场的对称性可知,同一 $z$ 轴坐标的金属球体表面上各部分受力相同;设 $p$ 为应力峰值所在的点,其位置在球的赤道面附近。当 $\theta \in \{0, \theta_p\}$ ,金属表面与线圈的距离逐渐减小,金属表面的麦克斯韦应力张量逐渐增大,洛伦兹力分布增强,且悬浮力主要依靠这部分洛伦兹力提供,这为提高悬浮力指明方向。金属球体底部磁场只存在竖直分量,不存在洛伦兹力;当 $\theta \in \{\theta_p, \pi\}$ ,此部分金属表面逐渐远离主线圈,磁场较弱,金属表面应力张量趋近于0。

## 2.4 大体积金属的电磁悬浮实验

趋肤效应的作用使电流集中分布在导体的表面,同时紫铜管存在电阻,由于欧姆耗散而发热,所以铜管需通冷却水用以降温,合理选择较大直径的铜线作为导线可承载更大电流,采用 $d$  4~6 mm的铜管绕制电磁线圈,在线圈承载电流能力与线圈悬浮力之间达到平衡。

选择外径 $d$  4 mm紫铜管,其优点在于外径小可绕制更为密集的螺线管,根据螺线管磁场公式可知,小外径的紫铜管可产生更强的磁场。但是,实验中存在一个问题:当加载电流偏大,线圈会出现过热、铜线烧蚀现象,这是紫铜线圈流通高频电流产生大量的焦耳热,内部流通的冷却水未能有效实时降温所致。

为了增加冷却水的流通量,依据上述的数值计算结果,采用5 mm的紫铜管绕制单层线圈。由于不同质量的金属体积也在变化,所以适合的线圈尺寸也不尽相同。线圈内径为28、37和44 mm的电磁线圈,其中上端稳定线圈2匝,下端悬浮线圈8或9匝。如图5所示,利用自制不同规格的单层线圈成功悬浮了以下范围的金属,Al 10~250 g, Ti 10~160.1 g, Cu 10~561 g。

依据数值模拟结果,利用规格 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 方形铜管绕制与图1(c)中结构相同的线圈。为避免铜线之间漏电引起短路和高温金属与铜线接触,铜管外裹有耐高温套管,如图6所示,实验成功悬浮了质量高达295.1 g Al( $d=58 \text{ mm}$ )、307.8 g Ti( $d=51 \text{ mm}$ )、561 g Cu( $d=48 \text{ mm}$ )及807 g Cu( $d=56 \text{ mm}$ ),极大地提高了悬浮金属的质量。

## 3 结论

1) 实验发现对于单层线圈,随匝数增多,所需最小悬浮电流逐渐减小,但最终趋近于某一电流,这是由于增加的线圈距离金属球体越来越远,致使其在金属球体悬浮区域产生的叠加磁场越来越弱,这表明单一增加匝数,提高悬浮力十分有限。

2) 建立了单层、双层电磁感应线圈的仿真模型,分析了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金属球体电磁力的作用,发现球体表面与线圈距离越近,空间磁场越强。两种模型中金属球体的表面应力张量分布相似,方向均指向金属球体内部,随角度 $\theta$ 增加,呈现先增大再减小的趋势,但双层线圈中金属球体的表面应力张量更大。

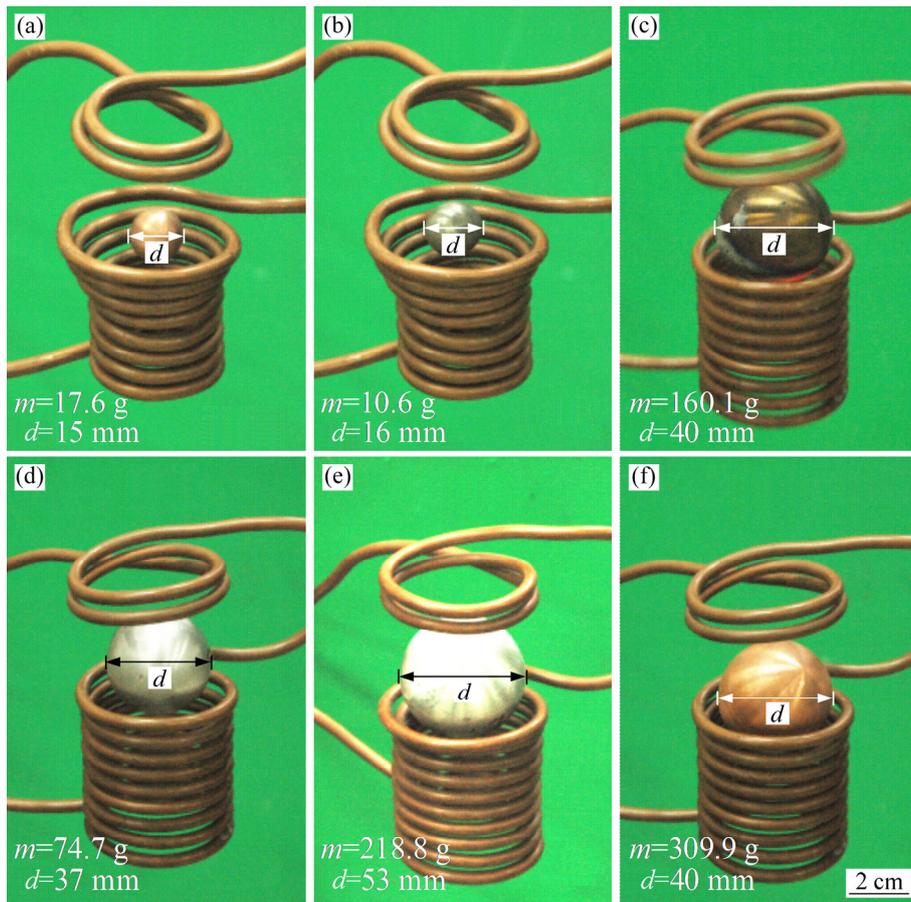


图 5 单层线圈悬浮金属实物图

Fig. 5 Photographs of different metals levitated by single-layer coils: (a) Cu 17.6 g; (b) Ti 10.6 g; (c) Ti 160.1 g; (d) Al 74.7 g; (e) Al 218.8 g; (f) Cu 309.9 g

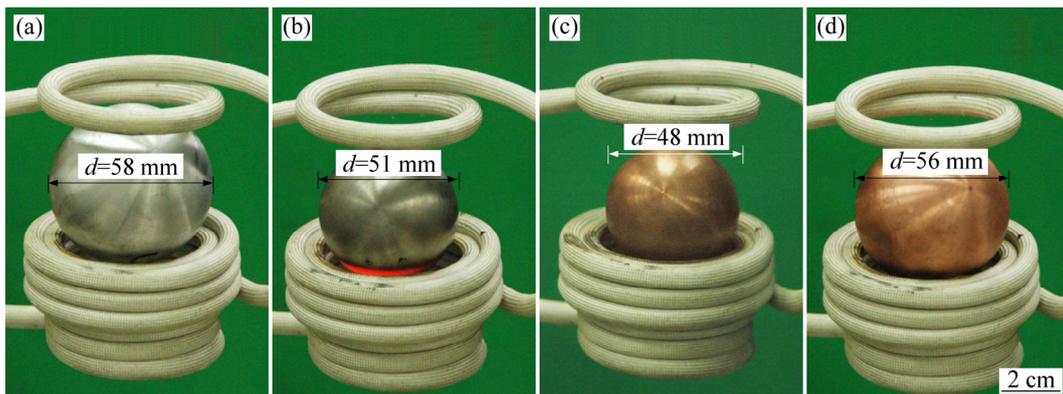


图 6 双层线圈悬浮金属实物图

Fig. 6 Photographs of different metals levitated by double-layer coils: (a) Al 295 g; (b) Ti 307 g; (c) Cu 561 g; (d) Cu 807 g

3) 分析了  $d = 40 \text{ mm}$  的铜球在多种构型线圈的数值模拟结果, 相比于单层 7 匝线圈, 单层 10 匝线圈的悬浮力增加了 31%, 而双层 10 匝线圈的悬浮力增加了 134%。因此, 与相同匝数的单层线圈相比, 双层线圈能更有效地提高悬浮区域的磁场强度, 进而为金

属球体提供更大的悬浮力。

4) 实验采用  $d = 4\sim 6 \text{ mm}$  的圆铜管绕制不同内径的单层电磁感应线圈和  $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$  的方铜管绕制双层电磁感应线圈, 成功实现了包括 Al、Ti 大体积金属及高达 807 g 金属 Cu 的电磁悬浮无容器处理。

## 致谢

实验和分析过程中得到吕鹏、杨尚京、吴宇昊、罗志聪、陈克萍和李明星等同事的帮助，在此一并致谢。

## REFERENCES

- [1] ROYER Z L, TACKES C, LESAR R, NAPOLITANO R E. Coil optimization for electromagnetic levitation using a genetic like algorithm[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(21): 214901.
- [2] HEINTZMANN P, YANG F, SCHNEIDER S, LOHOFER G, MEYER A. Viscosity measurements of metallic melts using the oscillating drop technique[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(24): 32–252.
- [3] YUAN C C, YANG F, KARGL F, HOLLAND-MORITZ D, SIMEONI G G, MEYER A. Atomic dynamics in Zr-(Co,Ni)-Al metallic glass-forming liquids[J]. *Physical Review B*, 2015, 91(21): 214203.
- [4] WANG F, ESKIN D, CONNOLLEY T, MI Jia-wei. Influence of ultrasonic treatment on formation of primary Al<sub>3</sub>Zr in Al-0.4Zr alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(5): 977–985.
- [5] 王磊, 胡亮, 杨尚京, 魏炳波. 静电悬浮条件下液态锆的热物理性质与快速枝晶生长[J]. *中国有色金属学报*, 2018, 28(9): 1816–1823.
- WANG Lei, HU Liang, YANG Shang-jing, WEI Bing-bo. Thermophysical properties and rapid dendritic growth of liquid zirconium under electrostatic levitation condition[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2018, 28(9): 1816–1823.
- [6] 冀焕明, 罗天骄, 杨院生. AZ80 镁合金低压脉冲磁场半连续铸造过程的数值模拟和实验研究[J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(3): 468–476.
- Ji Huan-ming, LUO Tian-jiao, YANG Yuan-sheng. Numerical simulation and experimental research of low voltage pulsed magnetic field DC casting of AZ80 magnesium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(3): 468–476.
- [7] SONG Qi-hui, SHI Wan-yuan. Influence of horizontal static magnetic field on the stability of electromagnetic levitated Cu molten droplet[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(24): 248504.
- [8] SPITANS S, BAAKE E, NACKE B, JAKOVICS A. Numerical Modeling of Free Surface Dynamics of Melt in an Alternate Electromagnetic Field. Part II: Conventional Electromagnetic Levitation[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2016, 47(1): 522–536.
- [9] HOLMES L M. Stability of magnetic levitation[J]. *Journal of Applied Physics*, 1978, 49(6): 3102–3109.
- [10] BAKHTIYAROV S I, SIGINER D A. Electromagnetic Levitation Part I: Theoretical and Experimental Considerations[J]. *FDMP: Fluid Dynamics & Materials Processing*, 2008, 4(2): 99–112.
- [11] OKRESS E C, WROUGHTON D M, COMENETZ G, BRACE P H, KELLY J C R. Electromagnetic levitation of solid and molten metals[J]. *Journal of Applied Physics*, 1952, 23(5): 545–552.
- [12] LÜ P, WANG H P. Observation of the transition from primary dendrites to coupled growth induced by undercooling within NiZr hyperperitectic alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2017, 137: 31–35.
- [13] RODRIGUEZ J E, KREISCHER C, VOLKMAN T, MATSON D M. Solidification velocity of undercooled Fe-Co alloys[J]. *Acta Materialia*, 2017, 122: 431–437.
- [14] LUO S B, WANG W L, XIA Z C, WEI B. Liquid phase separation and subsequent dendritic solidification of ternary Fe<sub>35</sub>Cu<sub>35</sub>Si<sub>30</sub> alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(10): 2762–2769.
- [15] ALGOSO P R, HOFMEISTER W H, BAYUZICK R J. Solidification velocity of undercooled Ni-Cu alloys[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(14): 4307–4318.
- [16] LÜ P, WANG H P. Direct formation of peritectic phase but no primary phase appearance within Ni(83.25)Zr(16.75) peritectic alloy during free fall[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 22641.
- [17] DEMMEL F, HENNET L, BRASSAMIN S, NEUVILLE D R, KOZAILY J, KOZA M M. Nickel self-diffusion in a liquid and undercooled NiSi alloy[J]. *Physical Review B*, 2016, 94(1): 014206.
- [18] CHATHOTH S M, DAMASCHKE B, SAMWER K, SCHNEIDER S. Thermophysical properties of Si, Ge, and Si-Ge alloy melts measured under microgravity[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(7): 071902.
- [19] EGRY I, LOHOFER G, MATSON D. EML processing measurement techniques[J]. *High Temperature Materials and Processes*, 2008, 27(6): 389–399.
- [20] SCHMITZ J, HALLSTEDT B, BRILLO J, EGRY I, SCHICK M. Density and thermal expansion of liquid Al-Si alloys[J]. *Journal of Materials Science*, 2012, 47(8): 3706–3712.
- [21] AMINI S, KALAANTARI H, MOJGANI S, ABBASCHIAN R. Graphite crystals grown within electromagnetically levitated metallic droplets[J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(20): 7123–7131.
- [22] 吴志刚, 胡锐, 高中堂, 张铁邦, 李金山. Ni-20Cr-18W 高温合金近液相线熔体处理温度场模拟及参数优化[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(6): 1434–1440.
- WU Zhi-gang, HU Rui, GAO Zhong-tang, ZHANG Tie-bang, LI Jin-shan. Temperature field simulation and process parameter optimization for near liquidus melt treatment of Ni-20Cr-18W superalloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(6): 1434–1440.
- [23] YANG Y H, CHEN R R, GUO J J, DING H S, SU Y Q. Experimental and numerical investigation on mass transfer induced by electromagnetic field in cold crucible used for directional solidification[J]. *International Journal of Heat and*

- Mass Transfer, 2017, 114(Supplement C): 297–306.
- [24] CHEN H, JIE J C, FU Y, MA H J, LI T J. Grain refinement of pure aluminum by direct current pulsed magnetic field and inoculation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(5): 1295–1300.
- [25] CHEN R R, YANG Y H, FANG H Z, YANG Y, WANG Q, GUO J J, DING H S, SU Y Q, FU H Z. Glass melting inside electromagnetic cold crucible using induction skull melting technology[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 121(Supplement C): 146–152.
- [26] 刘 政, 张嘉艺, 余昭福. 电磁场作用下中铝合金熔体流动的混沌特征的仿真与分析[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(11): 3026–3032.
- LIU Zheng, ZHANG Jia-yi, YU Zhao-fu. Simulation and analysis on chaotic characteristic of flow in Al alloy melt under electromagnetic field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(11): 3026–3032.
- [27] SAGARDIA S R, SEGSWORTH R S. Electromagnetic levitation melting of large conduction loads[J]. Ieee Transactions on Industry Applications, 1977, IA-13(1): 49–52.
- [28] PESTEANU O, BAAKE E. New method and devices for electromagnetic drip- and leakage-free levitation melting[J]. ISIJ International, 2012, 52(5): 937–938.
- [29] 魏炳波, 杨根仓. 高频电磁悬浮熔炼的设计与实践[J]. 航空学报, 1988, 9(12): 589–597.
- WEI Bing-bo, YANG Gen-cang. Design and practice of high frequency electromagnetic levitation melting[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1988, 9(12): 589–597.
- [30] 郭硕鸿. 电动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 180–185.
- GUO Shuo-hong. Electrodynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 180–185.

## Precise control of electromagnetic levitation for 3-D bulk metallic materials

CAI Xiao, WANG Hai-peng, WEI Bing-bo

(Department of Applied Physics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**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.

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

**Foundation item:** Projects(51327901, 51474175, 51522102) supported by the National Natural Science Foundation of China

**Received date:** 2017-11-18; **Accepted date:** 2018-08-24

**Corresponding author:** WANG Hai-peng; Tel: +86-29-88431669; E-mail: hpwang@nwpu.edu.cn

(编辑 王 超)