

横向静磁场对电磁悬浮液滴稳定性的影响

宋其晖 石万元

Influence of horizontal static magnetic field on the stability of electromagnetic levitated Cu molten droplet

Song Qi-Hui Shi Wan-Yuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **63**, 248504 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.248504

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.248504>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2014/V63/I24>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Fe-Pb 合金凝固多相体系内偏析形成过程的三维数值模拟

Three-dimensional modelling and numerical simulation on segregation during Fe-Pb alloy solidification in a multiphase system

物理学报.2014, 63(7): 076101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.076101>

稳定超疏水性表面的理论进展

Theoretical progress in designs of stable superhydrophobic surfaces

物理学报.2013, 62(14): 146801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.146801>

快速凝固 Ti-Cu-Fe 合金的相组成与组织演变规律

Phase constitution and microstructure evolution of rapidly solidified Ti-Cu-Fe alloy

物理学报.2012, 61(21): 216102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.216102>

液态结构与性质关系 III-----剩余键理论模型

Relationship between liquid structure and property III-----residual bond theoretical model

物理学报.2012, 61(18): 186106 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.186106>

# 横向静磁场对电磁悬浮液滴稳定性的影响\*

宋其晖<sup>1)</sup> 石万元<sup>1)2)†</sup>

1)(重庆大学动力工程学院, 重庆 400044)

2)(重庆大学, 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

(2014年6月22日收到; 2014年8月14日收到修改稿)

在利用电磁悬浮技术实现液滴悬浮的过程中, 液滴内部往往存在剧烈对流、外部伴随快速旋转和质心的水平位移等不稳定因素; 因此, 实现液滴的稳定悬浮是完善电磁悬浮技术的关键. 本文采用实验观测的方法, 通过U形静磁场组件对液滴所在空间施加横向静磁场, 利用高速相机记录了不同磁场强度下纯铜熔融液滴的振荡变形过程; 分析了横向静磁场对悬浮铜液滴振荡频率、振幅以及旋转的影响. 实验发现: 对于熔融前的固态铜颗粒, 若静磁场强度超过0.3 T, 铜颗粒几乎以静止状态悬浮. 熔融后, 当施加0.15 T的静磁场, 与未加静磁场时相比, 液滴俯视图轮廓线拟合出的椭圆分别与 $x$ 轴和 $y$ 轴的交点坐标之差 $R^-$ 、椭圆面积 $A$ 和椭圆长轴长度 $D_{\max}$ 的振幅分别减小了25%, 76%和60%; 随着磁场强度的继续增加, 振幅和频率继续减小, 但在静磁场强度为0.3 T时, 相比静磁场强度为0.2 T, 频率增加了1 Hz. 横向静磁场还抑制了悬浮铜液滴的旋转, 当磁场强度增加到0.53 T时, 悬浮液滴只在 $10^\circ$ 的角度范围内摆动. 这些结果表明, 施加横向静磁场能够有效提高悬浮液滴的稳定性.

**关键词:** 电磁悬浮, 静磁场, 铜液滴, 振荡

**PACS:** 85.70.Rp, 61.25.Mv, 68.03.Cd

**DOI:** 10.7498/aps.63.248504

## 1 引言

高纯材料的制备、材料在高温下物性参数的精确测量、熔融液滴的均质成核、材料在液态下与气体反应动力学等工艺过程中<sup>[1-3]</sup>, 都希望消除材料与容器壁的接触, 减少外界对主体材料的影响, 目前实现这些工艺的途径主要有电磁悬浮、静电悬浮、声悬浮、气动悬浮和落管等方法<sup>[4,5]</sup>. 其中电磁悬浮因其悬浮较为稳定、仅依靠悬浮系统在被处理材料表面产生的感应热就能使自身熔化的优点而被广泛运用. Wang等<sup>[6]</sup>以电磁悬浮为基础, 采用悬浮液滴振荡法实验测量了Ni-5 wt% Si合金液滴在1417—1994 K温度范围内的表面张力系数, 进而得到粘度、溶质扩散系数和密度等物性参数. 刘雪梅等<sup>[7]</sup>利用电磁悬浮熔炼技术精炼制备出 $\text{Sm}_3\text{Co}$ 粗晶合金. 张蜡宝等<sup>[8]</sup>在电磁悬浮下

实现了Ni-15% Sn合金的深过冷, 最大过冷度达到265 K.

电磁悬浮的核心部件是线圈, 其结构不仅影响悬浮的稳定性, 还会影响悬浮液滴稳定后的温度<sup>[9]</sup>; 最为常见的线圈(如图2所示)是由一根铜管绕制而成, 分为下部悬浮线圈和上部稳定线圈. 悬浮线圈和稳定线圈之间绕向相反, 高频电源对线圈通入交变电流后, 两线圈内部的电流流向相反, 在线圈周围产生交变磁场. 放入线圈中的金属或半导体物料在电磁感应作用下, 其表面产生感应涡流; 感应涡流与线圈产生的交变磁场相互作用, 产生电磁力. 在适当的电源频率和功率输出下, 被处理物料所受电磁力与自身重力达到平衡, 从而实现被处理物料的悬浮; 同时, 在物料表面产生的焦耳热作用下, 使被处理物料熔化<sup>[10]</sup>.

然而, 在交变电磁场的作用下, 产生的洛伦兹

\* 国家自然科学基金(批准号: 51176210)和重庆市自然科学基金(批准号: cstc2012jjA50003)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: shiwy@cqu.edu.cn

力会导致悬浮液滴内部强烈的对流和振荡; 内部流速往往能够达到10—40 cm/s<sup>[11,12]</sup>, 且流动多为湍流. 在如此剧烈的流动下测量熔体的导热系数, 所测到的导热系数是包含了对流的有效导热系数, 并非真实的导热系数. 同样, 利用电磁悬浮法测量熔体的表面张力时也有类似的问题. 对于球形自由液滴, 液滴振动仅依靠液滴的表面张力提供恢复力, 且频谱中峰值惟一, 其表面张力可按(1)式计算<sup>[13]</sup>:

$$\sigma = \frac{3}{8}\pi m\omega_R^2, \quad (1)$$

其中,  $\sigma$  为表面张力,  $m$  为液滴质量,  $\omega_R$  为液滴的表面振动频率. 但地面环境中, 液滴在重力的作用下, 在竖直方向上被拉长而呈现为椭球形, 偏离球形, 液滴单一振动模式转变为三种振动模式, 即  $n = 0, \pm 1, \pm 2$  的振动<sup>[14]</sup>, 振动频谱中的峰值由一个分裂为多个, 即频谱中存在多个频率值, 此时, (1)式中的振动频率  $\omega_R$  需要修正, Cummings 和 Blackburn<sup>[14]</sup> 在考虑变形的情况下推导出重力环境下液滴振动频率的修正公式:

$$\omega_R^2 = \frac{1}{5} \sum_{n=-2}^{+2} \omega_{2,n}^2 - 2\omega_{tr}^2, \quad (2)$$

其中,  $n$  为振动模式,  $\omega_{2,n}$  为第  $n$  种振动模式对应应在频谱上的频率值,  $\omega_{tr}$  为液滴的质心平移运动的频率. 可见, 表面张力必须通过测量液滴的表面振荡频率来计算<sup>[15]</sup>, 而在交变电磁场作用下, 液滴外部往往存在自旋和平移运动<sup>[16,17]</sup>, 液滴的自旋可以有不同的频率和转轴; 当自旋和平移运动与表面振荡叠加在一起时, 就难以获得真实的表面振荡频率, 严重影响表面张力的测量精度. 过大的对流振荡甚至会导致液滴破裂, 使悬浮失败.

Essmann 和 Kiessiq<sup>[18]</sup> 较早发现叠加静磁场对悬浮液滴具有稳定作用. 马伟增等<sup>[19]</sup> 的理论分析也发现静磁场能够提高悬浮液滴的稳定性. 孙茂友等<sup>[20]</sup> 在直拉法单晶硅制备过程中对硅熔体施加静磁场, 发现静磁场对硅熔体内部对流具有抑制作用. Yasuda 等<sup>[21]</sup> 的实验发现: 竖直方向叠加的静磁场强度大于 1 T 时, 纯铜熔融液滴的对流、振荡以及转轴与静磁场方向垂直的自旋几乎观察不到, 但转轴与静磁场平行的自旋还残存; 10 T 时, 平移也被抑制了; 竖直方向叠加的静磁场有利于提高悬浮液滴的稳定性. Sugioka 等<sup>[22]</sup> 在考虑浮力、因表面温度梯度引起的热毛细力、电磁力的情况下, 通

过实验和模拟对比分析了竖直方向的静磁场对硅熔体导热系数测量的影响, 得出准确测量硅熔体的导热系数至少需要 4 T 的静磁场的结论.

现有研究大多采用昂贵的超导设备对悬浮液滴施加竖直方向的静磁场来抑制液滴内部的对流, 而竖直方向的静磁场对因重力引起的浮力对流影响较小, 只能通过抑制横向对流来间接影响浮力对流, 需要强度较高的静磁场. 因此, 探寻经济可行的能够有效抑制浮力对流, 从而提高电磁悬浮稳定性和改善熔融材料物性参数的测量技术显得尤为重要. 本文尝试利用 U 形静磁场组件对悬浮铜液滴施加横向静磁场, 研究横向静磁场对电磁悬浮液滴稳定性的影响, 以期完善电磁悬浮技术及其应用.

## 2 实验装置

图 1 为实验装置示意图, 实验选取深圳双平电源有限公司生产的 SPG30-B 型高频电源, 额定功率为 30 kW, 振荡频率为 50—200 kHz, 输出电流为 7—70 A. 其实际最大输出功率与线圈匝数、半径及负载等有关. 而核心部件线圈如图 2 所示: 采用内径为 6 mm 的紫铜管绕制, 铜管表面缠绕耐高温绝缘胶布; 悬浮线圈为 3 匝, 从下往上直径依次为 12, 14, 16 mm, 相邻匝紧密相贴; 稳定线圈为 2 匝, 紧密相贴, 直径都为 16 mm; 悬浮线圈和稳定线圈间距为 4 mm. 磁铁采用绵阳西磁科技有限公司定制的钕铁硼 U 形静磁场组件, 该组件能够在其 U 形空间产生 0—0.94 T 的横向静磁场, 通过调整线圈与磁铁的相对位置, 来改变施加在悬浮物料上的横向静磁场强度. 实验使用的高速相机为 HG-100 K Camera, 配备 MotionXtra HG-100 K system 软件. 实验材料选取北京中金研新材料科技有限公司出售的纯度为 99.9999% 的紫铜圆柱颗粒, 颗粒直径为 6 mm, 高为 8 mm. 实验在空气环境中完成, 必然存在氧化, 本文通过铜颗粒实验前后质量差来确定氧化程度, 采用精度为 0.01 g 的电子天平称量, 实验前后铜颗粒的质量分别为 1.91 和 1.92 g, 质量差只有 0.01 g; 因此, 可以认为氧化只发生在铜液滴很浅的表层.

实验中, 电源实际输出功率为 10 kW, 频率为 154 kHz, 电流为 55 A. 循环水泵以 2 L/min 的速率向线圈铜管通入循环冷却水, 从而带走铜管表面所产生的焦耳热, 实现铜管温度的恒定; 铜颗粒熔融时, 表面界面变化明显且熔化瞬间完成, 所以每次

实验的拍摄时间点都选取铜颗粒开始熔化时刻作为拍摄触发时间点, 以保证每次所拍摄的照片都处于铜颗粒熔化后的相同时间段, 高速相机的拍摄频率为 250 fps. 实验结束后立即用 HT20 特斯拉计 (误差为  $\pm 2\%$ ) 测量实验过程中液滴中心所在位置的横向静磁场强度, 并以此作为该组实验过程中施加的横向静磁场强度.

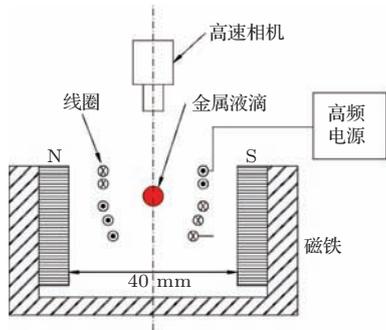


图1 实验装置示意图



图2 线圈实物图

本文的所有实验采用同一支线圈, 控制电源输出恒定, 通过改变磁铁在竖直方向上的位置来改变施加在铜液滴所在空间的横向静磁场强度, 分别做了以下 6 组对比实验: 横向静磁场强度为 0, 0.15, 0.24, 0.3, 0.42, 0.53 T. 实验反复操作了 3 次, 以保证实验的可重复性.

### 3 数据处理方法

以悬浮铜液滴俯视图作为分析对象, 通过自编的图像处理软件识别出俯视图中铜液滴的轮廓线, 然后对该轮廓线进行最佳椭圆拟合, 通过拟合出的椭圆提取如图 3 中的如下特征参数:  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R^-$ ,  $A$ ,  $D_{\max}$ ,  $\theta$ . 它们的定义如下: 图 3 中椭圆假定为液滴拟合出的轮廓线, 以该椭圆中心作为坐标原点, 建立直角坐标系, 椭圆与  $x$  轴正半轴的交点坐

标即为  $R_x$ , 椭圆与  $y$  轴正半轴的交点坐标作为  $R_y$ ,  $R^- = R_x - R_y$ , 椭圆面积为  $A$ , 椭圆长轴的长度为  $D_{\max}$ , 椭圆长轴与  $x$  轴正半轴之间的夹角为  $\theta$ , 长轴经过第一象限时,  $\theta$  为正, 经过第四象限时,  $\theta$  为负, 即  $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ .

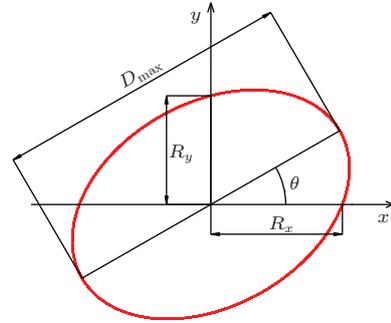


图3 测量参数的定义

这样定义的意义在于: 悬浮铜液滴不仅存在界面振荡, 还伴随质心的水平位移, 研究液滴的振荡变形需要消除质心水平位移的影响. 本文中各参数的参考点都是液滴的中心, 即参考点在空间的位置坐标并不固定, 当液滴发生水平位移时, 参考点也随之变化, 但始终为液滴中心. 这样, 在研究液滴振荡变形时, 就消除了液滴水平位移带来的干扰. 结合图 3 可以看出:  $R^-$  是为了确定液滴边界轮廓的振荡情况; 在重力作用下, 液滴在竖直方向上被拉长, 又在黏性力和表面张力作用下收缩, 从而引起俯视图中液滴面积的变化, 因此, 定义面积  $A$  是为了描述液滴在竖直方向上的振动; 而  $D_{\max}$  是为了描述液滴的水平振动;  $\theta$  的定义是为了确定液滴的旋转情况, 当液滴沿顺时针方向旋转时,  $\theta$  值逐渐减小. 当液滴沿逆时针方向旋转时,  $\theta$  值逐渐增加.

## 4 实验结果与分析

### 4.1 未加横向静磁场情况

实验发现, 在不加横向静磁场的情况下, 熔化前, 铜颗粒主要表现为质心上下左右晃动, 但没有旋转. 随着铜表面感应涡流产生的热量不断积累, 温度不断升高, 液滴开始熔化, 俯视图中的铜颗粒边界由方形迅速转变为椭圆形. 实验过程中拍摄的铜液滴熔化后的照片如图 4 所示, 液滴界面出现剧烈的蠕动, 液滴外形存在伸缩拉长现象, 长短轴分明. 同时伴随着液滴质心的水平位移, 位移达到 1 mm.

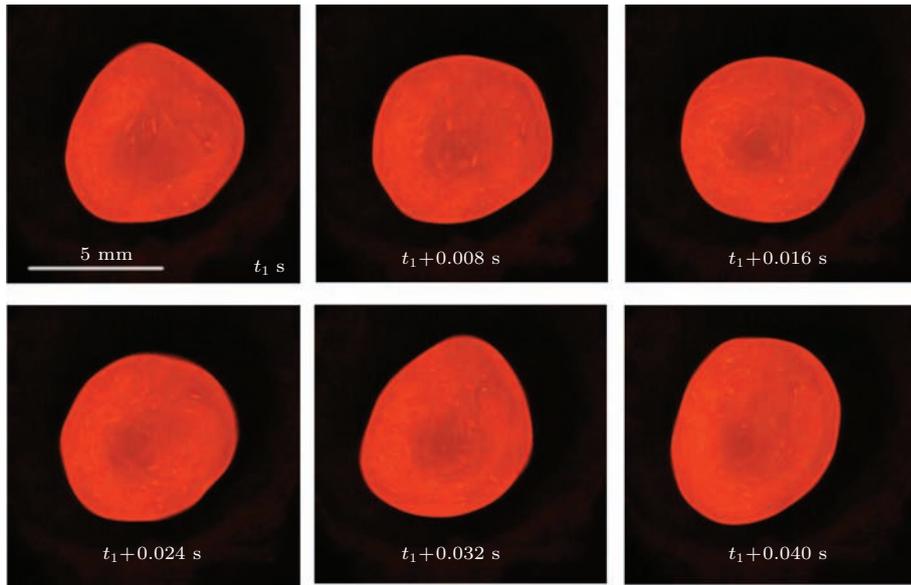


图4 (网刊彩色) 未加静磁场时铜液滴俯视图

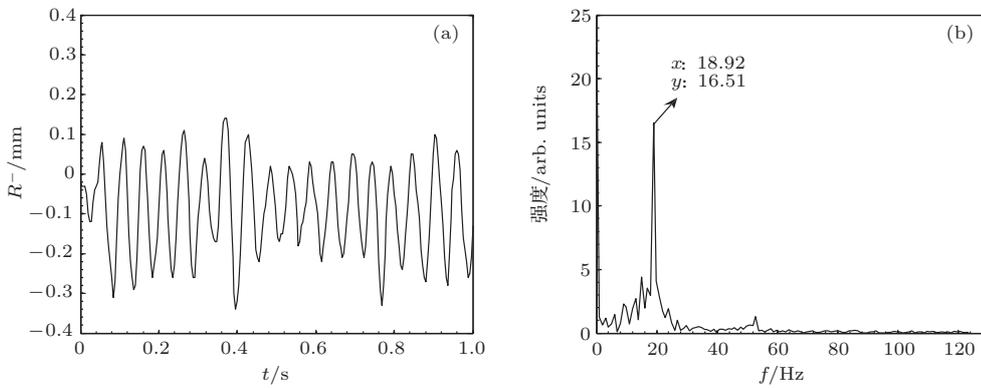


图5 (a)  $R^-$  随时间的变化; (b)  $R^-$  频谱

实验数据显示, 在未加静磁场时, 液滴外形振荡幅度大, 频率高. 如图5(a)所示,  $R^-$  的振幅达到了0.4 mm. 将  $R^-$  随时间的变化曲线进行傅里叶变换, 得到的频谱图如图5(b), 图中主峰对应的横坐标即为振动最为剧烈的模式所对应的振荡频率. 可以看出, 在不加横向磁场的情况下,  $R^-$  振荡频率为18.92 Hz. 用同样的处理方式得出  $A, D_{\max}$  的振幅和频率, 面积  $A$  的振幅达到了  $2.3 \text{ mm}^2$ , 长轴长度  $D_{\max}$  的振幅为1 mm, 频率都为18.92 Hz. 表明在未加静磁场时, 铜液滴外形振动十分剧烈.

实验图像经椭圆拟合得出的  $\theta$  随时间的变化情况如图6所示. 可以看出, 图中  $\theta$  值存在三种变化, 分别为  $\theta$  随时间连续减小,  $\theta$  随时间连续增加,  $\theta$  发生瞬时突变.  $\theta$  随时间连续减小说明液滴在该时间段沿顺时针旋转,  $\theta$  随时间连续增加说明液滴在该时间段沿逆时针旋转, 而  $\theta$  的瞬时突变可能由两种原因引起: 1) 当椭圆长轴沿逆时针旋转跨越  $90^\circ$

或者椭圆长轴沿顺时针旋转跨越  $-90^\circ$  时会引起  $\theta$  的瞬时突变; 2) 因液滴振动引起椭圆长短轴互换导致  $\theta$  的瞬时突变. 由此可得出, 在未加横向磁场时, 液滴旋转方向并不固定, 在不同的时间可能沿不同的方向旋转.

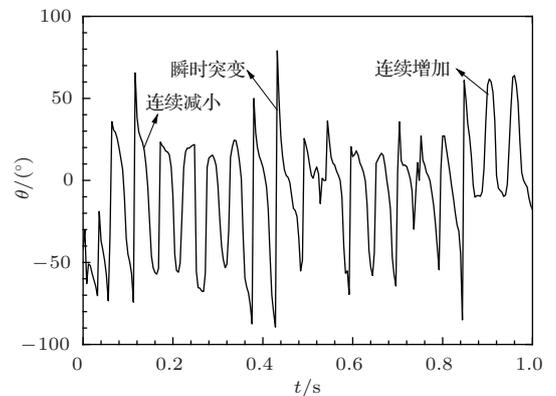


图6  $\theta$  随时间的变化

### 4.2 加横向静磁场的情况

实验发现, 施加横向静磁场后, 铜液滴表现出以下特征: 熔化前, 铜颗粒质心的上下左右晃动相比未施加横向磁场时明显减弱, 当施加的静磁场强度大于0.3 T时, 悬浮的固态铜颗粒几乎处于静止状态, 直到液滴开始融化, 这种静止状态被瞬间打破. 图7为静磁场强度为0.42 T时, 实验过程中拍摄的铜液滴照片. 与未施加静磁场情况相比, 液滴外形的波动减小、界面的振荡减弱、没有明显的伸缩拉长、轮廓更接近圆形.

施加不同磁场强度作用下, 振动的振幅和频率有所不同. 图8为不同磁场强度下,  $R^-$ ,  $A$  和  $D_{\max}$  振幅的变化情况. 可以看出: 在未加横向静磁场时(0 T),  $R^-$ ,  $A$  和  $D_{\max}$  的振幅分别为0.4 mm,  $2.1 \text{ mm}^2$  和 1 mm; 当向液滴空间施加0.15 T的横向静磁场后, 液滴  $R^-$ ,  $A$  和  $D_{\max}$  的振幅分别减小到0.3 mm,  $0.5 \text{ mm}^2$  和 0.4 mm. 减小的比例分别为25%, 76% 和 60%. 随着横向静磁场强度继续加大, 各参数振幅继续减小, 但减小幅度逐渐减弱. 当静磁场强度达到0.53 T时,  $R^-$ ,  $A$  和  $D_{\max}$  的振幅分别减小到0.1 mm,  $0.18 \text{ mm}^2$  和 0.15 mm.

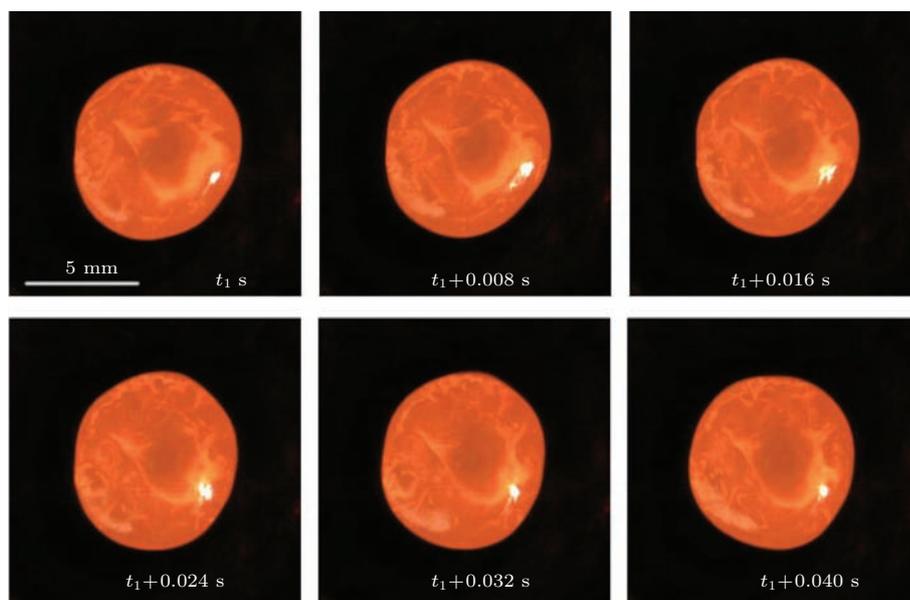


图7 (网刊彩色) 静磁场强度为0.42 T时铜液滴俯视图

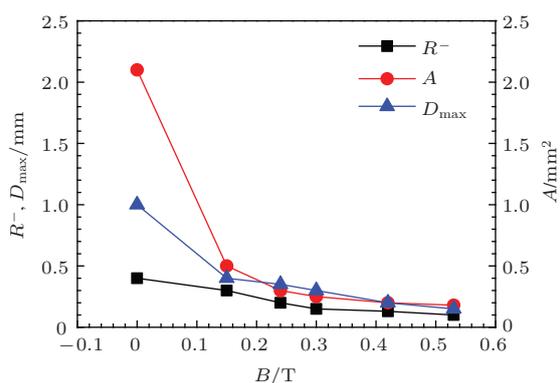


图8  $R^-$ ,  $A$  和  $D_{\max}$  振幅随磁场强度的变化

振幅减小的原因在于: 由电磁场理论可知, 导体切割磁感线运动, 导体会受到与运动方向相反的洛伦兹力的作用; 因此, 铜液滴内部的流动只要切割水平方向的磁感线, 就会受到洛伦兹力的阻碍作

用, 浮力对流的流动方向正好与静磁场方向垂直, 洛伦兹力的阻碍作用最为显著; 液滴内部的流动是一个循环流动, 当竖直方向的流动受到抑制时, 水平方向的对流也间接地受到抑制; 另外, 黏性力也是阻碍液滴内部流动的重要因素. 面积  $A$  的振幅减小的原因在于:  $A$  的变化是由液滴在竖直方向上的振动引起, 振动的实质是液滴内部的流动, 而横向静磁场能够有效抑制竖直方向上的流动, 因此面积  $A$  对横向静磁场敏感就不足为奇了.

改变横向静磁场强度, 由  $R^-$ ,  $A$  和  $D_{\max}$  的数值随时间的变化曲线, 经傅里叶变换得到其频谱中主峰对应的频率值(如图9所示). 从图9可见, 三条线重合, 即在相同磁场强度情况下, 不同参数得出的振动频率值相同. 这主要是因为液滴各方向的振荡并不是独立的, 该频率是液滴振荡的一

个综合频率. 在未加横向静磁场时, 振动频率达到 18.92 Hz; 当向液滴所在空间施加 0.15 T 横向静磁场时, 振动频率减小到了 15.44 Hz; 横向静磁场强度加到 0.24 T 时, 频率继续减小, 但减小幅度减小, 频率减小到 14.87 Hz. 值得注意的是, 在横向静磁场强度加到 0.3 T 时, 振动频率为 14.96 Hz, 相比 0.2 T, 频率增加了 1 Hz, 水平位移也比 0.2 T 时大. Yasuda 等<sup>[21]</sup>的实验也发现铜液滴在 0.2—0.4 T 的静磁场强度作用下, 铜液滴的水平位移和振动会加强, 而且出现的范围与线圈结构和材料尺寸有关, 具体的原因目前还不清楚. 继续增大磁场强度, 频率继续减小.

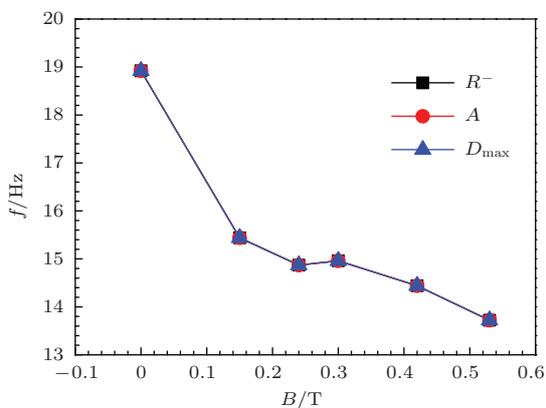


图9 (网刊彩色) 液滴俯视图中  $R^-$ , A 和  $D_{max}$  的振荡频率随磁场强度的变化

分析频率减小的原因为: 未加横向静磁场时, 内部流动剧烈, 振动复杂, 振动频率比较大; 随着横向静磁场强度加大, 液滴内电磁搅拌作用受到抑制, 对流的驱动力减小, 振荡复杂程度减弱, 振荡频率减小.

在地面环境中, 利用电磁悬浮方法测量液滴表面张力时, 往往因液滴内部受到电磁搅拌作用引起剧烈的对流、振动和旋转的影响而得不到准确的表面振动频率, 施加横向静磁场正好能够抑制液滴内的电磁搅拌作用, 使液滴更加稳定, 在这样的情况下利用 (2) 式计算的振动频率更接近液滴的固有频率, 从而有助于提高表面张力的测量精度.

实验发现, 对液滴施加横向静磁场,  $\theta$  的变化连续、平滑, 且变化幅度减小, 瞬时突变消失. 如图 10 所示, 当横向静磁场强度达到 0.53 T 时, 液滴只是在  $-5^\circ$ — $5^\circ$  之间摆动, 表明液滴的旋转得到很好的抑制.

分析其原因为: Yasuda 等<sup>[21]</sup>的实验表明, 叠

加静磁场, 能够有效抑制转轴与磁场方向垂直的旋转, 而对转轴与磁场方向平行的旋转, 即使静磁场强度大于 1 T, 旋转依然存在. 地面环境中, 铜液滴在重力的作用下, 液滴在竖直方向上被拉长, 其旋转轴不可能为水平方向. 即其转轴主要沿竖直方向, 对铜液滴施加横向静磁场, 磁场方向与液滴旋转转轴垂直, 因此, 液滴的旋转被很好地抑制.

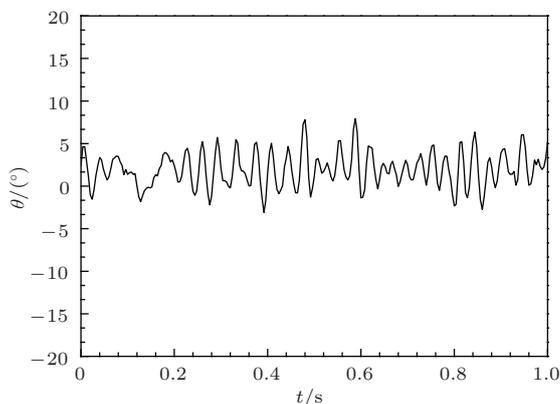


图10 静磁场强度为 0.53 T 时  $\theta$  随时间的变化

## 5 结 论

实验观测了 0—0.53 T 横向磁场强度作用下静磁场对电磁悬浮铜液滴的振荡和旋转的影响, 得到如下结论.

1) 熔融前, 横向静磁场减弱了铜颗粒的上下晃动和水平偏移. 当磁场强度超过 0.3 T 时, 铜颗粒几乎以静止状态悬浮, 表明静磁场对固体金属颗粒悬浮具有很好的稳定作用.

2) 熔融后, 当向悬浮铜液滴施加 0.15 T 横向静磁场, 相比未施加静磁场时,  $R^-$ , A 和  $D_{max}$  的振幅分别较小了 25%, 76% 和 60%; 随着横向静磁场强度的增加, 振幅和频率继续减小, 但减小的幅度逐渐减小.

3) 施加横向静磁场后, 悬浮液滴的旋转受到抑制. 当磁场强度增加到 0.53 T 时, 悬浮铜液滴只是在平均  $10^\circ$  左右的角度范围内摆动.

这些结果表明, 横向静磁场能够有效抑制电磁悬浮液滴内的电磁搅拌作用, 从而减弱液滴内部对流、外部旋转和质心的水平运动, 进而提高悬浮液滴的稳定性, 有助于改善表面张力等物性参数的测量技术.

## 参考文献

- [1] Chang F E, Jian Z Y 2005 *Foundry Technol.* **26** 918 (in Chinese) [常芳娥, 坚曾运 2005 铸造技术 **26** 918]
- [2] Wang Y Q, Li L, Zhou J X, Li X J, Wang H Z 2008 *Metallurg. Anal.* **28** 16 (in Chinese) [王永清, 李雷, 周金香, 李小佳, 王海舟 2008 冶金分析 **28** 16]
- [3] Ozawa S, Koda T, Adachi M, Morohoshi M, Watanabe M, Hibiya T 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 034907
- [4] Wei B B, Yang G C 1988 *Acta Aeronaut. Astron. Sin.* **9** 589 (in Chinese) [魏炳波, 杨根仓 1988 航空学报 **9** 589]
- [5] Li G, Gao Y P, Sun Y N, Chi Z H, Liu R P 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3412
- [6] Wang H P, Cao C D, Wei B 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 4062
- [7] Liu X M, Liu G Q, Li D P, Wang H B, Song X Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 098102 (in Chinese) [刘雪梅, 刘国权, 李定朋, 王海滨, 宋晓艳 2014 物理学报 **63** 098102]
- [8] Zhang L B, Dai F P, Xiong Y Y, Wei B B 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 419 (in Chinese) [张蜡宝, 代富平, 熊予莹, 魏炳波 2006 物理学报 **55** 419]
- [9] Royer Z L, Tackes C, LeSar R, Napolitano R E 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 214901
- [10] Zhong X Y, Chen J G 1996 *Physics* **25** 565 (in Chinese) [钟晓燕, 陈佳圭 1996 物理 **25** 565]
- [11] Bojarevics V, Pericleous K 2003 *ISIJ Int.* **43** 890
- [12] Hyers R W 2005 *Meas. Sci. Technol.* **16** 394
- [13] Rayleigh L 1879 *Proc. R. Soc. London* **29** 71
- [14] Cummings D L, Blackburn D A 1991 *J. Fluid Mech.* **224** 395
- [15] Ozawa S, Morohoshi K, Hibiya T, Fukuyama H 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 014910
- [16] Bullard C, Hyers R W, Abedian B 2005 *IEEE Trans. Magn.* **41** 2230
- [17] Egry I, Giffard H, Schneider S 2005 *Meas. Sci. Technol.* **16** 426
- [18] Essmann U, Kiessiq H 1979 *Mat. Res. Bull.* **14** 1139
- [19] Ma W Z, Ji C C, Li J G 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2233 (in Chinese) [马伟增, 季诚昌, 李建国 2002 物理学报 **51** 2233]
- [20] Sun M Y, Wan Q, Qin F 1991 *Rare Metals* **15** 61 (in Chinese) [孙茂友, 万群, 秦福 1991 稀有金属 **15** 61]
- [21] Yasuda H, Ohnaka I, Ninomiya Y, Ishii R, Fujita S, Kishio K 2004 *J. Crystal Growth* **260** 475
- [22] Sugioka K, Tsukada T, Fukuyama H, Kobatake H, Awaji S 2010 *Int. J. Heat Mass Transfer* **53** 4228

# Influence of horizontal static magnetic field on the stability of electromagnetic levitated Cu molten droplet\*

Song Qi-Hui<sup>1)</sup> Shi Wan-Yuan<sup>1)2)†</sup>

1) (College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

2) (Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

( Received 22 June 2014; revised manuscript received 14 August 2014 )

## Abstract

For an electromagnetically levitated (EML) molten droplet, there usually exist some unstable factors, such as internal fluid convection, quick spin and horizontal displacement and so on. As a result, stabilizing the droplet is very important for EML technology. In this paper, a horizontal static magnetic field is imposed on an EML Cu droplet through a U-shaped static magnetic component. The shape oscillation of a Cu droplet is recorded continuously under different magnetic field intensities using a high speed camera. The effects of static magnetic field on the oscillation frequency, amplitude and spin angle of the droplet are analyzed from the recorded data of droplet shape. The result shows that when the strength of the static magnetic field exceeds 0.3 T the solid Cu is levitated statically without any spin and horizontal movement. For molten Cu droplet, its amplitudes of the  $R^-$ ,  $A$  and  $D_{\max}$  are reduced by 25%, 76% and 60% respectively when a static magnetic field with 0.15 T is imposed. With the increase of magnetic field strength the amplitude and frequency of oscillation decrease continuously. However, when the intensity of the static magnetic field is 0.3 T, its frequency is 1 Hz higher than that when the intensity of the static magnetic field is 0.2 T. Finally, the result indicates that the horizontal static magnetic field can inhibit the spin of the levitated droplets. For instance, when the strength of the magnetic field is 0.53 T the droplet spins are within a very narrow angle of  $10^\circ$ , which is quite smaller than in the case without static magnetic field. These results exhibit that the imposed horizontal static magnetic field can effectively improve the stability of electromagnetic levitated droplet.

**Keywords:** electromagnetic levitation, static magnetic field, Cu droplet, oscillation

**PACS:** 85.70.Rp, 61.25.Mv, 68.03.Cd

**DOI:** 10.7498/aps.63.248504

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51176210) and the Natural Science Foundation of Chongqing, China (Grant No. cstc2012jjA50003).

† Corresponding author. E-mail: [shiw@y@cqu.edu.cn](mailto:shiw@y@cqu.edu.cn)