

空间电磁悬浮技术的发展状况*

钟晓燕 陈佳圭

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

摘要 电磁悬浮技术是一种无容器材料处理加工技术。它具有无器壁污染、电磁搅拌均匀、可熔化较高熔点材料等优点。文章概要叙述了几十年来电磁悬浮技术的发展情况,总结了近年来国际上电磁悬浮技术在地面微重力实验和空间实验中的应用情况,简要地阐明了电磁悬浮技术的原理、数学描述及存在的问题。

关键词 电磁悬浮, 微重力, 无容器材料处理

Abstract Electromagnetic Levitation (EML) in microgravity research is a technique for containerless processing. The unique advantages of this technique have led to its steady development as a laboratory tool, and promise even wider application to a variety of studies in the future. This article describes the progress of EML in microgravity research these years. Several problems of levitation and does some theoretical analysis.

Key words electromagnetic levitation, microgravity, containerless processing

1 引言

无容器材料处理加工技术是指加工、处理材料时,用某种手段使材料与容器壁不接触,故又称为悬浮技术。它是材料科学中不可缺少的工具,对学科本身发展及应用起着极为重要的作用。空间悬浮技术是指微重力环境下的悬浮技术,而微重力环境可以通过落管、落塔、飞机、微重力火箭抛物飞行和轨道航天器飞行等方式来实现。

目前的悬浮技术主要包括电磁悬浮、光悬浮、声悬浮、气流悬浮、静电悬浮、粒子束悬浮等,其中电磁悬浮技术比较成熟。电磁悬浮技术简称 EML(electromagnetic levitation)技术。

EML 技术避免了器壁与被处理材料间的接触,因而避免了器壁污染,也避免了材料对容器的作用,因此无需考虑容器的耐温、耐蚀、化学活性、表面状态等性能。加上电磁搅拌均匀,它可用于制备高纯、高活性、放射性和高熔点材

料。空间 EML 技术消除了因重力引起的对流和器壁引起的非均匀生核,因而能提高这些材料的质量。另外,它还能用于制备某些极易偏析的合金或亚稳合金,包括一些在应用上有很大潜力的高温超导合金。

EML 技术在工程技术和基础科学方面有着非常重要的作用,可用于流体力学和其他基础学科的研究,流体和熔融材料的物理化学性质测量及过程研究,材料制备和研究。

正因为 EML 技术具有如此的优越性,世界各国的许多研究单位都对该技术给予了极大的重视。美国的 NASA、加州理工学院喷气推进实验室(JPL)、密苏里大学、Intersonics 公司、马歇尔空间飞行中心空间科学实验室、Bjorksfen 研究室、耶鲁大学、麻省理工学院、前联邦德国 Battelle 研究所、欧洲航空航天局(ESA)、日本国家航空航天发展署(NASDA)等诸多单

* 1995 年 11 月 3 日收到初稿,1996 年 1 月 12 日收到修改稿。

位都投入很大力量进行这方面的工作和研究,并取得了很大进展.

2 历史回顾

利用高频电磁场对金属进行悬浮是由 Muck 于 1923 年提出的^[1],首次的实验是由 Okress 等人于 1952 年完成^[2].随后陆续出现了许多种线圈装置,以能悬浮起更多的金属.其中值得一提的工作是 Polonis, Butter 和 Pair 等人在惰性气体中用 10—100kHz 的高频源悬浮起直径为 4.5cm 的金属小球^[3,4];Schebe 在真空中用 10kHz 的高频源悬浮起直径为 4.5cm 的金属小球^[5];Wroughton 用 400kHz 的高频源悬浮熔炼了 5—8g 的 Al, Ti, Fe, Ni 等金属^[6].

较为细致的工作是 50 年代末由 Comenetz 作出的,他利用 450kHz, 10kW 的高频源成功地悬浮起几十种 10g 左右的金属球^[7].

早期工作的特点是使用的高频源较小,而悬浮样品的尺寸较大.从理论上讲,较大的样品相对而言较易悬浮.这些实验所使用的高频源频率从几十 kHz 到几百 kHz 不等.早期的理论研究主要限于固体导体.

1963 年, Brisley 和 Thornton 完成了由同轴线圈悬浮起的固体金属球的计算. Volkov 分析

了由一个快速改变的磁场所支持的液态金属层的稳定性,并发现不稳定性在磁场边界增加最快.这些不稳定性可由足够大的表面张力或足够大的磁场平衡掉.1966 年, Piggot 和 Nix 分析了一对带有等大反向线电流悬浮的固体无限长圆柱体,计算了稳定的边界条件和加热率,并将理论分析与实验结果作了比较.他们发现悬浮力随频率增大,而且加热速率随频率增大.1975 年, Harvi 和 Stephan 完成了一个著名实验:浸在硅油中的 Na 的完全及部分悬浮.上述这些实验部分表现了金属表面的一种“皱褶”不稳定性^[8].

1975 年, Szekely 和 Nakanishi 以及 1976 年 Tarapore 和 Evans 做了如下工作:他们考虑在一个线圈中放置一个坩埚,并在湍流的情况下计算悬浮金属球的运动.

近年来, EML 技术发展更快.美国、西欧、日本都对此研究投入很大力量.对各种悬浮技术的原理、实验装置进行了大量研究,将无容器技术列入自己的发展规划.美国 NASA 中心支持的空间工程材料处理中心(CSPEM)在 1986—1987 年度报告中有 10 个专题,其中 5 个是无容器处理.从国外已发表的结果看,除了对悬浮技术和装置进行研究外,对空间无容器材料处理的研究也相当深入.比较突出的成果

表 1

时 间	装 备	实 验 内 容
1994 年 7 月	TEMPUS(德国); IML-2(NASA)	金属样品的热物理性质, 金属熔炼、冷却、晶体固化、成核
1993 年	105m 落管(美国); Marshall 空间飞行中心	Ni, Ge 等纯金属的过冷、成核
1991 年	落管; 落塔; KC-135 NASA Marshall; KC-135 NASA Johnson	EML 炉; 真空炉; 固化实验
1990 年	落管(德国)	晶体生长、固化、成核
1990 年	TEMPUS(德国); 两次 KC-135 飞行	晶体生长、成核(CaF ₂ , FeNi)
1986 年	100m 落管(美国); Marshall 空间飞行中心	Ni-Ge 合金的制备、固化等
1985 年	100m 落管(德国)	Ni-Ge 合金过冷

包括:测量材料表面张力系数和粘滞系数的技术,材料预处理的工艺流程,并积累了许多微重力条件下的实验数据.

表 1 是近 10 年来 EML 实验具体情况调查结果.

总之,从研究情况看,前期的 EML 技术重点在地面实验,如落管、落塔,但从 90 年代开始,已发展到空间应用.

3 电磁悬浮熔炼原理及问题分析

3.1 原理

当一个金属样品放置在一个通有高频电流的线圈上时,随时间变化的电磁场会在金属材料表面产生一高频涡流,这一高频电流与外磁场相互作用,导致金属样品产生一个洛伦兹力.在合适的空间配置下,该电磁力的方向与重力相反:同时,改变高频源的功率就可使电磁力与重力相等,实现电磁悬浮.同时,金属上的涡流在其上产生的焦耳热可以使金属体熔化,达到熔炼金属的目的.

电磁悬浮力可用下式表示:

$$F = W\lambda I^2 G(x)/(g\delta R_1^3),$$

式中

$$x = 2\pi R_2 [f/10^9 \rho]^{1/2},$$

$$G(x) = 1 - (3/4x)(\text{sh}2x - \sin2x) / (\text{sh}^2 x + \sin^2 x),$$

W 为样品重量, λ 为悬浮线圈的结构因数, $G(x)$ 为样品尺寸的函数, g 为重力加速度, δ 为样品密度 (g/cm^3), R_2 为样品半径 (cm), f 为频率 (Hz), R_1 为线圈尺度 (cm), ρ 为电阻率 (Ωcm), I 为悬浮线圈内高频电流的有效值 (A), 无量纲的 x 为样品半径与趋肤深度之比, 无量纲的 λ 决定于线圈形状, 样品到线圈中心的距离及 R_1 的选择. 加在线圈上的电压等于电流乘以线圈阻抗. R_1 的大小改变使电感相应变化.

以上给出的悬浮力公式有以下几个限制条件:样品为球形、均匀同质、无磁性,样品尺寸相对于磁场距离较小, x, y, z 坐标为线性.

3.2 悬浮熔炼的基本电路

悬浮熔炼的基本电路如图 1 所示.

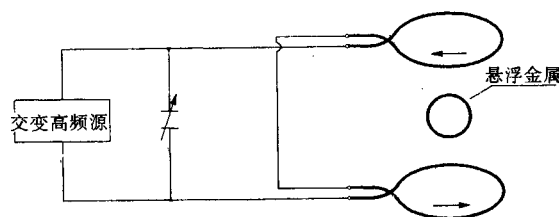


图 1 悬浮熔炼的基本电路

底部线圈提供主悬浮力,上部线圈有助于稳定,以对抗水平方向的位移.通过线圈的交变电流频率为 $10^4 - 10^5 \text{Hz}$.在这样的高频下,金属表现为一个完全导体:趋肤深度很小,金属由其表面的电磁力支撑悬浮.

另外,悬浮线圈的种类很多,限于篇幅,不再一一赘述.

3.3 悬浮线圈中电磁场的分布

(1)当悬浮线圈为圆锥形线圈时,电磁场的分布情况如图 2 所示.这时,放置在电磁场中的金属导体会在洛伦兹力的作用下由磁场强度高的区域移向磁场强度弱的区域.悬浮力与场强及场的梯度有关:梯度越大,悬浮力越强.为了悬浮,要求在竖直方向上减弱场强,使向上的悬浮力等于异体重量;为了稳定,要求增加场在径向的强度,以使回复力垂直轴向作用.

在图 2 中,线圈上下放置,电流有一相位差,用这种方法可以在两个线圈间获得一个最小场强 A 点,使得在两线圈的导体上的力总指向这一位置,导致稳定悬浮.因为悬浮力与场强及场强梯度有关,导线的加热与场强有关,所以通过增加场的梯度同时减弱场强来降低加热率是可行的.在线圈系统中,这一点可在磁场梯度大而磁场较弱处增大电流来实现.由经验发现,下部的圆锥形线圈,当圆锥顶角为 30° 时,稳定性最好.

(2)当悬浮线圈为理想化的二维悬浮装置时,电磁场的分布情况如图 3 所示. P, Q 两处为携带等量电流的平行导线, P', Q' 分别为 P, Q 两处的镜像电流.

这个具有特殊外形的理想化二维悬浮装置是由 Sneyd 和 Moffatt 于 1981 年提出的。它由两个相位相等且平行的线电流来悬浮圆柱体。

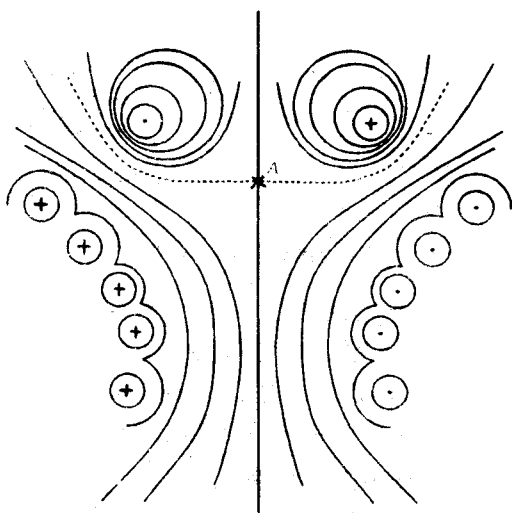


图 2 圆锥形线圈电磁场分布

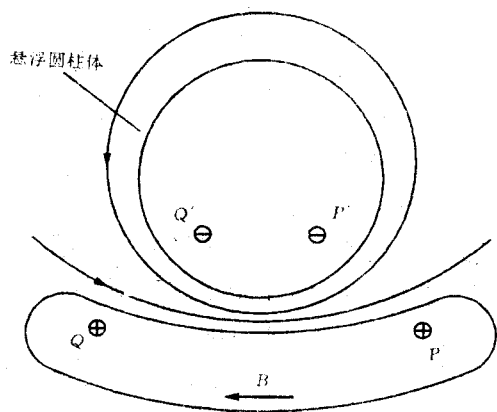


图 3 理想化的二维悬浮装置的电磁场的分布

3.4 悬浮的稳定性

多年来,在悬浮熔炼中碰到的最大困难是保持悬浮小球的稳定性。相对来说,液态金属的稳定性比固体金属的情况要复杂得多。总的说来,稳定性包括静态稳定性和动态稳定性。静态稳定性来源于电磁力、重力、表面张力等;动态稳定性来源于这些力引起的振动。

当然,通过改变线圈功率来略微减小这些振动是可能的。

具体来看,悬浮的稳定性是一个非常复杂

的问题,又是一个关系到整个悬浮系统质量优劣的最重要因素,悬浮稳定性的完整的分析应包括势阱函数、电动力学及流体力学的分析。

3.5 温度控制及测量

3.5.1 温度控制

温度控制由材料性质、悬浮系统特性及样品的热损耗决定。材料质量或密度越大,电导越高,在线圈中悬浮位置越低,场强越大,被加热程度越大。降低功率也可以使样品在线圈中的位置降低,且对温度影响相同。

悬浮样品的温度控制是悬浮熔炼技术中的难题,目前使用的方法有以下几种:

(1) Rony 提出,为了长时间在真空中悬浮金属样品,悬浮力和温度不可能用一个旋钮同时控制。为了更好地控制,悬浮与加热熔炼应分别进行,例如用高频电磁场实现样品的悬浮,而用较低频率的方式(如电弧、电子束)加热样品。

(2) 在高频下利用分离方法致冷样品来建立一个热稳定状态,可以用液 He、液 H₂ 来致冷。

(3) 依靠调整样品质量及能量输入来实现温度控制。

(4) Okress 等人提出,在悬浮时固化熔化样品,同时通过控制能量增加和喷气冷却的方法来提高样品的质量。

可以通过把样品移至磁场梯度大而磁场较弱处来降低加热速率^[9-13]。

3.5.2 温度测量

一般说来,进行温度测量是非常困难的。困难在于:(1)温度测量时会带来污染;(2)被测量的温度太高,很多探测器受到限制;(3)被测量的系统是非封闭系统。

目前人们正尝试用光学探测器、双色探测器来进行温度测量。在温度测量的实验中,准确的温度测量要依靠高水平的探测器和准确的散热数据。

4 悬浮系统的理论分析和数学表述

要进行悬浮实验,数学分析是至关重要的

一环,它是实验的依据。

悬浮系统完整的数学表述应包括势阱函数,电动力学中的麦克斯韦方程,流体力学中的N-S方程,描述能量和样品平衡的迁移方程,以及由欧姆定律给出的电动力学和流体力学现象的联系。

4.1 势阱函数

悬浮力由非磁性导体球上空间不均匀的交变磁场产生,它可由一个势函数的负梯度给出。这个势可直观地表示出由环形线圈产生的几种典型场的悬浮性质。

由前面所述可知,悬浮力

$$F = W\lambda I^2 G(x)/(G\delta R_1^3)。$$

该方程在某种程度上与实验参量有关;这一表示的严重缺陷是在分析水平悬浮稳定性时,水平力在数学上的表达过于复杂,没法给出。所以,它在描述水平稳定性时是失败的。

而势阱函数的提出弥补了这一漏洞。它的分析结果为:

竖直稳定平衡满足

$$[\partial^2 V/\partial \zeta^2]_p > 0,$$

则

$$[\partial^2 r/\partial \zeta^2]_p > 0。$$

水平稳定平衡满足

$$[\partial^2 V/\partial \rho^2]_p > 0,$$

则

$$[\partial^2 r/\partial \rho^2]_p > 0^{[5]},$$

式中 r 为势阱函数, V 为被测小球的总势, p 为小球所在位置。

模拟 r 势表面的拓扑特性,可以得到四个熟知磁场:二极场、亥姆霍兹场、镜场和四极场。

固体悬浮的研究已较成熟,它避免了自由表面未知的困难。液态金属的电磁悬浮存在三个问题:磁场的确定、自由表面形状和内部流的运动。

4.2 典型的理论分析之一

这部分工作就是前面提到的由 Sneyd 和 Moffatt 所做的理想化的二维悬浮装置分析。他们分析研究了悬浮在一个磁场中的圆柱及其流

体与磁场的关系。

他们进行了以下几方面的工作:等量平行线电流悬浮一固体圆柱及稳定边界讨论,熔化金属的表面流的计算,静磁学分析,悬浮圆柱的流体运动分析。通过分析,表明用平行线电流产生的磁场悬浮液态金属圆柱的可行性和优越性。

尽管这个系统在截面受到微扰时能稳定下来,但由于表面张力的影响和凸起处向磁场更低处下沉,仍会有竖直方向的不稳定性;不过这种不稳定性可以通过应用足够的纵向磁场来消除,而且螺旋管形的悬浮装置也可实现。

但在分析中仍有明显的不足之处:

(1)计算中用到了变分定理,它仅仅在动力压影响可以忽略时成立。而问题的完全解显然要求包括动力压,而且动力学问题要包括被磁压扭曲的自由表面,因此,即使知道流为薄层,也仍是一个难以解决的问题。

(2)分析中将流考虑为湍流,假设涡粘滞均匀。在分析中假设由旋转力激起闭合流线形的湍流,而实际情况是流在自由表面上波动速度分量下降极慢,所以在自由表面附近的涡粘滞性降低,这些影响可能与理想分析不符。

(3)存在稳定性问题。在悬浮样品上有一微扰将导致线圈和样品的互感扰动,从而可能导致包括连接器在内的动力学不稳定。

Sneyd 和 Moffatt 的工作还是卓有成效的,做了一些有益的假设。分析手段的益处是抓住了假设框架中的基本要素,所以为更复杂的数值模型和实验设计提供了进一步的引导。

4.3 典型的理论分析之二

研究最广泛的悬浮系统是由一套平行共轴的电流线圈 2 产生的磁场悬浮金属球。其中 Mestel^[14]的工作比较典型。他详细分析了在轴对称和环形高频电流的情况下,对金属进行悬浮熔炼的过程。在低雷诺数的假设和忽略热效应的前提下,推导出了平均速度场和与之相关的自由表面形状的控制方程。并在高雷诺数的情况下讨论了其一般形式。对于球体,应用有限差分方法解 N-S 方程,并计算了表面扰动,

证明了无旋涡量的渐近过程。

一旦金属被熔化,会有许多变化出现:(1)液体表面是根据加在其上的压力而自由调整的,而且悬浮小球所成的形状是预先未知的;(2)洛伦兹力是旋转的,所以必须驱动流体旋转,它的雷诺数很大;(3)在导体所在区域内,磁感应线弯曲。

将系统限定在轴对称和单一频率情况,以便于分析。忽略所有的热效应,假设已达到平衡温度或温度变化很慢。浮力与密度成正比,所以浮力与洛伦兹力相比可以忽略。他还假设流为层状的,湍流效应(如果存在的话)能被一个有效的涡粘滞替换分子粘滞来表示。在实验室中,液态金属流通常为湍流,这样只能符合涡粘滞,然而,作为一个分析过程,这种假设可以成立。

分析中解决微扰问题分三步:(1)利用外电流分布找到导体球的表面场分布;(2)解由洛伦兹力悬浮起的小球中的 N-S 方程;(3)计算相应的表面扰动。

5 长时间稳定悬浮金属样品的一个范例

如前所述,用电磁悬浮技术加工金属样品有许多优越性,并且迄今为止已做了大量理论和实验工作,但这种方法还未广泛应用于制备金属样品,主要困难来源于动力学不稳定性,它最终将导致固体或液体样品脱离线圈系统的支持。

这方面的工作,许多科学工作者进行了尝试,并取得了不同程度上的成功。其中,做得较好的是 Essmann 和 Kiessig^[15]。他们通过脱碳、去气,在超高真空中,悬浮一个半径为 3.5mm 的单晶铌球长达 16h。

他们主要解决了三个问题:

(1)通过悬浮射频信号的修正和调整,消除样品重力中心的漂移;

(2)通过叠加一直流磁场,使偶尔的样品旋转尽可能小;

(3)用钨丝做一个承接架,以便当射频发生

器关闭时为小球提供支持。

他们的实验条件为:10kW 的射频发生器(每秒产生 150 个 RF 脉冲);超高真空,压力 P 为 2×10^{-10} mbar;频率为 200—400kHz;最大阳极电压为 10kV,加热电流为 80A,加热电压为 8V,功率为 800W;温度为 2300—2800K。

6 结束语

空间微重力环境或地面悬浮无容器环境为研究颗粒或液体的静力学行为提供了一种独特而优越的条件。由于各种基本参数(如颗粒或液体的内聚力、粘滞力、表面亲和力、表面张力、表面化学条件、尺寸、温度、环境、气体成分和压力以及其他作用力)的影响。可以说凡与滴、泡界面状态有关的课题都可以从无容器技术中得到有用的结果。还有一些研究更是必须借助无容器技术。自由液滴作为具有内相互作用的统计系统的标准模型,在大至星系,小至原子核的各种系统的研究中都有重要意义。对它的深入研究也将促进这些相关学科的发展。

参 考 文 献

- [1] O. Muck, German Patent, No. 422.004, (1923).
- [2] E. C. Okness, D. M. Wroughton, G. Comenetz et al., *J. Appl. Phys.*, **23**(1952), 545.
- [3] D. H. Polonis, R. G. Butter and J. G. Parr, *Research*, **7** (1954), 273.
- [4] D. H. Polonis, R. G. Butter and J. G. Parr, *Research*, **7** (1954), S10.
- [5] W. Scheibe, *Metall*, **7**(1953), 751.
- [6] D. M. Wroughton, E. C. Okress, P. H. Brace et al., *J. Electrochem. Soc.*, **99**(1952), 205.
- [7] G. Comenetz, J. W. Salatka, *J. Electrochem. Soc.*, **45**(1958), 673.
- [8] A. D. Sneyd, H. K. Moffatt, *J. Fluid Mech.*, **117**(1982), 45.
- [9] I. Simon, *J. Appl. Phys.*, **24**(1953), 19.
- [10] B. Harris, B. Sc., A. E. Jenkins et al., *J. Sci. Instrum.*, **36**(1959), 238.
- [11] A. Gagnoud, M. Garnier, *IEEE Tran. On Magnetics*, **Mag-21**(1985), 1886. (下转第 576 页)