

# 静电悬浮技术研究进展\*

胡亮<sup>†</sup> 鲁晓宇 侯智敏

(西北工业大学应用物理系 西安 710072)

**摘要** 利用静电悬浮技术可使各种材料处于稳定的悬浮无容器状态,达到深过冷,并对材料的熔凝过程进行实时观测.文章介绍了静电悬浮技术的机理及其在材料科学研究中的应用,并展望了它的发展方向.

**关键词** 静电悬浮,无容器处理,综述,深过冷

## Progress in electrostatic levitation technology

HU Liang LU Xiao-Yu HOU Zhi-Min

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

**Abstract** Electrostatic levitation is an important technique for containerless processing. It can provide a clean and quiescent environment for superheating and supercooling in different materials, while real-time fusion and solidification processes can be detected by non-contact instruments around the levitated sample. The mechanism and applications of electrostatic levitation in materials science are reviewed, and future prospects discussed.

**Keywords** electrostatic levitation, containerless processing, review, supercooling

### 1 引言

静电悬浮技术(electrostatic levitation,简称ESL)利用静电场中带有静电的样品受到的库仑力来抵消重力,实现无容器状态.无容器是空间环境最显著的特征,消除了容器壁引起的污染、异质形核作用和热运输的变化,有利于材料熔体获得深过冷,对材料的研究有重要的理论和现实意义.

通过静电力实现悬浮最早可追溯到1909年. Millikan采用静电场使大量油滴带电后达到悬浮状态,证明了电量的不连续性,测量了电子电荷,并得到相应的数值.1959年,Langmuir等人<sup>[1]</sup>研究了小粒子(直径约为几个微米)的静电悬浮.德国宇航院<sup>[2]</sup>于1979年通过静电悬浮起毫米尺寸的物体,开始用于材料的研究.1983年,美国喷气推进实验室<sup>[3]</sup>设计了三种不同形状的电极并用于太空材料实验.1984年,Rhim等人<sup>[4]</sup>在此基础上详细研究了反馈控制系统,实现了地面条件下直径为5mm左右镀银苯乙烯小球和金属球壳等物体的稳定悬浮;并且利用抛物线飞机实现了直径约10mm的水滴在低

重力环境中的稳定悬浮.1993年,Rhim<sup>[5]</sup>又研制了地面条件下材料高温无容器处理的静电悬浮设备,研究重点转向地面模拟.

地面模拟可实现大体积材料熔体的深过冷和快速凝固.悬浮无容器处理是模拟技术之一,其优点是悬浮时间长及悬浮样品尺寸较大,可对样品的熔凝过程进行实时观察和定量测量,很适合于研究材料的物理化学性质.目前采用的悬浮方法<sup>[6]</sup>有:静电悬浮<sup>[5]</sup>、声悬浮<sup>[7]</sup>、电磁悬浮<sup>[8]</sup>、气动悬浮<sup>[9]</sup>、光悬浮<sup>[10]</sup>、磁悬浮<sup>[11]</sup>和超导悬浮<sup>[12]</sup>等.与其他悬浮技术相比,静电悬浮具有以下优点:(1)适用范围广.适合于金属、半导体及绝缘体等所有能在表面保持足够实现悬浮的静电荷的材料,而电磁悬浮只适用于导体和具有高电导率的半导体材料.(2)超高真空环境.材料的整个处理过程可在高真空( $10^{-6}$ — $10^{-5}$  Pa)中进行,避免介质的影响,消除热传导、对流项.但对声悬浮和气动悬浮而言,介质温度等外界环境

\* 国家自然科学基金(批准号50571082)和西北工业大学英才培养计划资助项目

2007-08-16收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email:lmss\_utopian@nwpu.edu.cn

对稳定性的影响很大。(3)加热与悬浮独立控制.样品可在很大的温度范围内保持悬浮状态.相比之下,电磁悬浮不具有此优点。(4)采用反馈控制系统,可使样品保持静止,有利于其熔体获得深过冷.由于声场和气流的扰动,这一点在声悬浮和气动悬浮中无法实现.

基于以上优点,静电悬浮开始被逐步应用于材料的热物理性质、凝固过程、合成与制备等方面的研究.目前,这类研究主要集中在美国、德国和日本.国内学者虽对其机制与反馈控制进行了研究<sup>[13,14]</sup>,但未见应用于材料研究.下面就静电悬浮的机理及其在材料科学研究中的主要应用进行介绍.

## 2 静电悬浮技术的机理

静电悬浮的原理可用下式表示:

$$mg = \frac{Q_s V}{d}, \quad (1)$$

式中  $Q_s$  为样品带电量,  $V$ 、 $d$  分别为上下极板间电势差和距离.

根据 Earnshaw 定理<sup>[15]</sup>,静电场不存在三维最小静电势,所以要实现稳定悬浮就必须结合负反馈控制系统.除此之外,要进行材料研究,对样品的热处理必不可少,则还需配备加热和测温设备.因此,静电悬浮主要包含悬浮电极、负反馈控制及加热测温 3 个部分.下面结合美国<sup>[5,16]</sup>、德国<sup>[17]</sup>和日本<sup>[18]</sup>所研制的设备对此做一详细介绍.

### 2.1 悬浮电极

悬浮电极共有三对,分别位于竖直  $z$  方向、水平  $x$  方向和水平  $y$  方向,如图 1 所示.虽然各种悬浮电极形状设计不尽相同,但其基本构造都是类似的.侧面电极与下极板位于同一水平面,这样设计是为了给观察样品提供更开阔的视野,便于实时观测,但这会使样品的受力更复杂.

### 2.2 负反馈控制

对样品悬浮位置的探测与控制方法如下:首先采用一对二维位置灵敏探测器(Position Sensitive Detector)探测样品的三维位置信息,并将其数字信号输入计算机;然后通过位置式“比例-微分-积分”(PID)控制算法,输出使样品回复到预设悬浮位置的电压值,最后转换成模拟信号,改变金属极板上的电压,从而改变电场力的大小,直至使样品达到稳定悬浮状态.

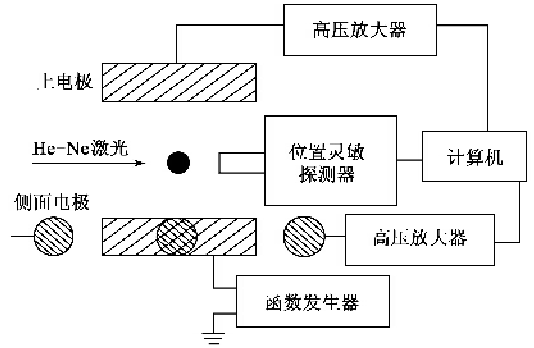


图1 静电悬浮的原理示意图

对于地面条件下的静电悬浮,样品的不稳定性主要来自于重力的作用,因而对  $z$  方向的控制比  $x$ 、 $y$  方向更为重要.相比于侧面电极,与上极板连接的高压放大器应具有更高的电压转换速率和精度.另外,除了由上、下电极施加的电场力外,样品在  $z$  方向上还受到由侧电极产生的力,这就使得对样品的位置控制是三维混合的控制.

### 2.3 加热和测温

在悬浮的同时,将一束激光分成多束,从不同方向使样品均匀地受热,并采用红外测温仪记录“熔化-冷却-再辉-凝固”的过程. Sung 等人<sup>[18]</sup>测量了难熔金属 Zr、Nb、Mo(熔点分别为 2128K、2742K、2896K)在此过程中的“温度-时间”曲线,并发现 Mo 样品的内部形成了由热扩散控制生长的均一的树枝晶结构,没有明显的晶界,这是由于异质形核在很大程度上被抑制而造成的.由于激光的加热效果优异(YAG 激光可加热至 2500K 以上),所以适合难熔金属及高温合金的研究.

除此之外,静电悬浮还需结合光学成像技术.即在加热过程中采用高速 CCD 实时监控样品的整个处理过程.综上所述,样品周围的加热及观测系统如图 2 所示.加热和观测设备均置于石英窗口前,置于真空室内部的聚光镜和球面反射镜分别用于增大样品上的光通量以及反射未达到样品的光.

## 3 样品的带电

实现悬浮的关键在于样品的带电.使样品带电的方式主要有:电容感应带电、光电效应带电和热电子发射带电.静电悬浮需将三者结合起来,样品带电过程如下:(1)将样品放置于下极板上,随上极板电势的增大,样品表面的感应电荷增多,直到离开下极

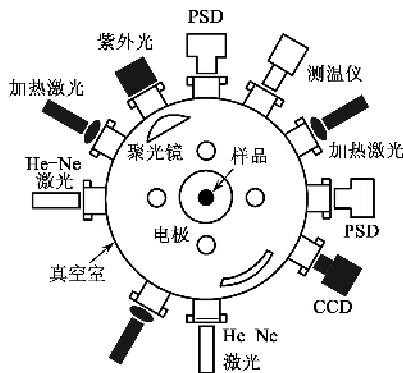


图2 静电悬浮装置示意图

板,即为电容感应带电过程.上极板必须始终保持负电势,这样可使样品带正电而不至于与另两种带电方式所产生的电荷相互抵消.样品刚要离开下极板时所带的电量为其初始带电量,一旦被加热,其带电量会发生改变.(2)随着样品温度升高,样品中挥发性组分以正离子的形式升华,发生“表面电离”,导致在其表面损失了大量的正电荷,影响了悬浮的稳定性,因此必须利用光电效应进一步产生正电荷.最初,Rhim<sup>[5]</sup>采用具有宽频带的氙灯同时作为光电发射及加热源,但存在较严重的“表面电离”.Rulison等人<sup>[16]</sup>使用“双光源”,即把紫外波段的氙灯作为光电发射源,YAG激光作为加热源,并且两个光源被独立控制,较好地解决了电荷损失的问题.而且由于激光和光电发射源均为窄频带光,所以不会影响位置、温度等信号的定量测量.(3)当样品被加热到1500K以上时,更为强大的热电子发射带电将起支配作用,这时悬浮将十分稳定.

样品在悬浮状态下多次被加热并冷却,样品表面挥发性杂质不断减少,可进一步抑制异质形核.

对样品的带电不仅要从过程上认识清楚,还必须建立相关的带电模型,才能更深刻地揭示这个物理过程,并且它对静电悬浮装置的设计与优化具有重要的指导意义.Rhim<sup>[5]</sup>提出了电容感应带电模型和光电效应、热电子发射带电模型(图3).

### 3.1 电容感应带电模型

在不加热时,仅考虑竖直方向的静电场力,采用数值有限差分法,得出了3个不同直径小球的初始带电量 $Q_s$ 、上极板所需的初始悬浮电压 $U$ 与其密度 $\rho$ 之间的关系<sup>[5]</sup>(图4),其中 $d$ 取为8mm.

由图4可知(1)样品通过感应所产生的初始带电量 $Q_s$ 约为 $10^{-9}C$ (2)考虑到光电、热电效应可

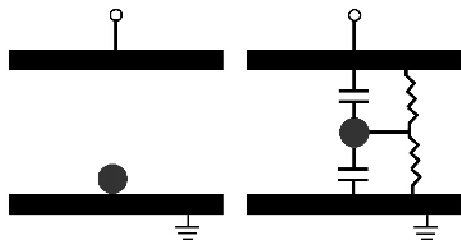


图3 (a) 电容感应带电模型 (b) 光电效应、热电子发射带电模型

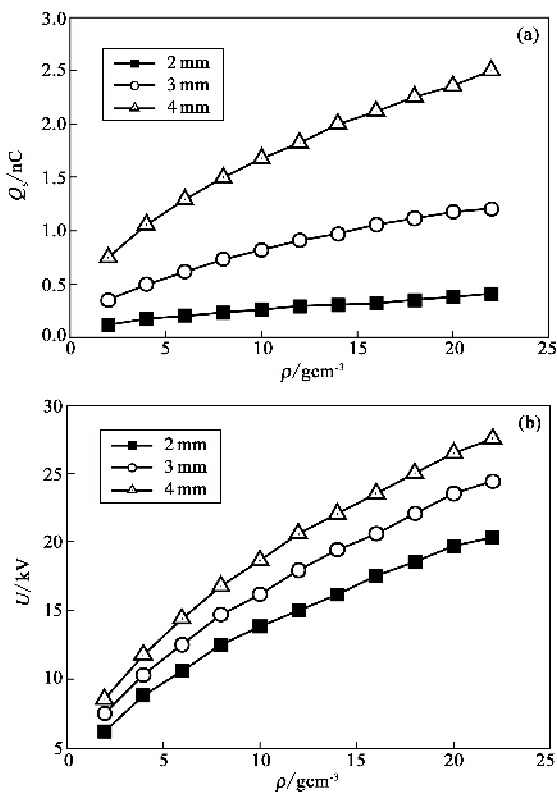


图4 (a) 不同直径的小球初始带电量与其密度的关系 (b) 上极板初始悬浮电压与小球密度的关系

产生更多的电荷,所以上极板所需最大悬浮电压 $U$ 选为20kV.

当样品由于某些扰动偏离中央悬浮位置时,需要通过侧面电极产生的电场来使其在 $x, y$ 方向上均保持稳定悬浮状态.下面对这一模型做简要分析.

图5显示了样品悬浮时的受力情况.如图5(a)所示,假设样品带电量仍为 $Q_s$ ,由“电像法”可知小球所受的电场力为

$$F_E = Q_s \frac{U_s}{d} + \frac{Q_s^2}{16\pi\epsilon_0} \left[ \frac{1}{(d-z)^2} - \frac{1}{z^2} \right], \quad (2)$$

其中 $r < z < d-r$ ,  $r$ 为小球半径.式中右边第一项是平行板电容器施加的电场力,第二项反映了带电小球与极板之间的相互作用. $z = d/2$ 时为理想的悬浮

位置,悬浮电压为  $U_0 = mgd/Q_s$ 。当  $r < z < d/2$  时,需增大  $U_z$ ,使其大于  $U_0$ 。当  $d/2 < z < d - r$  时,则要减少  $U_0$ 。

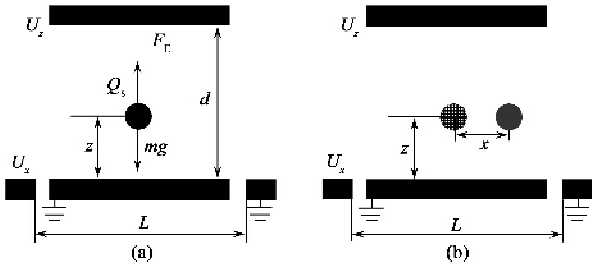


图5 (a) 样品悬浮时的受力情况 (b) 偏离中央位置时的受力情况

如果由于某些扰动使样品相对中央处偏离了  $x$  (如图5(b)所示),则由“像电荷”产生的“回复力”为

$$F_x = \frac{xQ_s^2}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{1}{[x^2 + 4(d-z)^2]^{3/2}} + \frac{1}{(x^2 + 4z^2)^{3/2}} \right\}, \quad (3)$$

力的方向为水平向左。而由侧面电极产生的电场力近似为

$$F'_x = \frac{U_x}{L} Q_s, \quad (4)$$

要使样品在水平方向上稳定,应使  $F_x = F'_x$ 。取  $z = d/2$ ,当  $x = d\sqrt{2}$  时  $U_x/L$  取最大值,并将  $Q_s = 10^{-9}C$ ,  $d = 8mm$  代入,可得最大值的表达式为

$$U_x = \alpha L, \quad (5)$$

式中  $\alpha$  为  $1.085 \times 10^5 V/m$ 。一般将上、下极板设计为  $\phi 25mm$  左右,  $L$  则约为  $35mm$ ,代入(5)式,可知  $U_x$  为  $3.8kV$ ,即侧面电极使用最大悬浮电压为  $4kV$  的高压放大器,就可保证样品在  $x, y$  方向上悬浮稳定。

### 3.2 光电效应及热电子发射带电模型

将样品在紫外光辐射下带电的动态过程用 R-C 电路进行等效,可建立相关理论模型,如图3(b)所示。通过模型分析,得出以下结论(1)静电悬浮的不稳定主要出现在低温范围,即小于  $1500K$  光电发射起主要作用的阶段。Ishikawa<sup>[19]</sup>提出在样品未悬浮前,先将其加热到热电子发射起主要作用的  $1500K$  附近,再开启悬浮系统,待悬浮后调整光束方向继续加热。这大大减少了加热时间,提高了悬浮稳定性。但此方法只适用于熔点高于热电子发射温度的材料,而对于熔点较低的材料则需要改进带电方

式。(2)为了减轻样品的电荷损失程度,可选择比样品具有更高逸出功的材料做悬浮电极。

## 4 静电悬浮技术的主要应用

### 4.1 热物理性质

材料的热物理性质对材料形成过程及形成之后产品的宏观性能有很大的影响,也是实现定量热力学和动力学研究的基础。因为静电悬浮具有高真空、高温、可实现稳定悬浮等特点,所以它可应用于材料处在深过冷或过热这种远离平衡条件下的热物理性质的研究。下面主要概括介绍密度、热膨胀系数、比热容、半球全发射率、表面张力及粘度的测量原理和方法。

#### 4.1.1 密度和热膨胀系数<sup>[19,20]</sup>

密度是与热力学量有本质关联的物理量之一。其测量方法如下<sup>[20]</sup>:首先采用高速 CCD 及测温仪同时记录未旋转的球形样品的实时图像和温度,将 CCD 得到的图像数字化,并通过寻找最大光强梯度来确定图像的边缘;采用线性球谐函数拟合求出样品体积;再通过相同条件下悬浮一个大小为已知的标准样品对结果进行修正,最终得到  $V(T)$ ,从而求得密度

$$\rho(T) = \frac{m}{V(T)}, \quad (6)$$

进一步由

$$\beta = \frac{1}{v} \frac{\partial V}{\partial T} \quad (7)$$

求出热膨胀系数。由此可知,密度值的精确与否关键在于体积测量的精度大小,即成像质量的高低。

通常所采用的黑背景或白光背景<sup>[20]</sup>都不能在样品整个处理过程中得到高质量的成像,而采用紫外光作为背景光成像时<sup>[19]</sup>,不仅能得到高质量的成像,还可以作为光电效应的光源,有效地提高了带电量。

除了密度,通过上述方法还可测得样品的蒸气压<sup>[19]</sup>,其表达式为

$$V_p(T) = 1.013 \times 10^5 \frac{m}{tA} (2\pi RTM)^{-1/2}, \quad (8)$$

式中  $V_p(T)$  为蒸气压,  $m/t$  表示真空中测得的蒸发率,  $A$  是样品表面积,  $M$  是样品的摩尔质量。

#### 4.1.2 比热与半球全发射率<sup>[21,22]</sup>

比热  $C_p$  是导出熵、焓、吉布斯自由能等热力学参量的基本量之一。在晶体生长、快速凝固等过程的

热辐射通量计算中,发射率  $\varepsilon_T$  必不可少。

由于静电悬浮的高真空环境以及无容器效应,使得熔体仅通过热辐射的形式冷却,消除了热平衡方程中的传导与对流项,从而有

$$\frac{C_p}{\varepsilon_T} = - \frac{AM\sigma_{SB}(T^4 - T_s^4)}{m dT/dt}, \quad (9)$$

式中  $T_s$  为环境温度,  $\sigma_{SB}$  为斯特藩-玻尔兹曼常数。

测量熔体通过热辐射冷却过程中的“温度-时间”关系曲线,就可精确测得  $C_p/\varepsilon_T$ 。由此可知,只要已知其中一个量就可求出另一个<sup>[21]</sup>。

利用冷却曲线,还可直接推导出不含  $\varepsilon_T(T)$  的过冷熔体的平均比热<sup>[22]</sup>:

$$C_{pl,av} = \frac{h_f}{T_m - T_{hyp}}, \quad (10)$$

式中  $T_{hyp}$  为熔体达到“超过冷状态”时的开始凝固温度,  $h_f$  为熔化潜热。

#### 4.1.3 表面张力和粘度<sup>[23-27]</sup>

材料的表面张力和粘度是对许多重要工业过程(如铸造、焊接、晶体生长等)进行数值模拟时所必需的参数。它们的测量采用静电悬浮液滴振荡法,与电磁悬浮相比,静电悬浮可处理难熔金属、高温合金以及有重要工业应用价值的半导体材料,还可由所测得的振荡信号直接得出  $\sigma$  及  $\eta$  的值。

瑞利<sup>[23]</sup>推导出了没有外场力作用的带电液滴的振荡频率,若液滴带电量为  $Q_s$ ,则  $P_2(\cos\theta)$  模式下的振荡圆频率为

$$\omega^2 = \frac{8\sigma}{\rho r_0^3} \left( 1 - \frac{Q_s^2}{64\pi^2 r_0^3 \sigma \varepsilon_0} \right), \quad (11)$$

则表面张力

$$\sigma = \frac{r_0^3 \rho}{8} \left( \omega^2 + \frac{Q_s^2}{8\pi^2 r_0^3 \rho \varepsilon_0} \right), \quad (12)$$

式中  $Q_s$  由(1)式得出。同时,由流体力学公式可知液滴的粘度为

$$\eta = \frac{\rho r_0^2}{5\tau}, \quad (13)$$

式中  $\tau$  为振荡信号的衰减时间,  $r_0$  为悬浮液滴半径。

要激发液滴振荡,需在下极板与地之间接入函数发生器(如图1所示)以产生一个正弦交流信号,进而通过液滴振荡信号探测系统<sup>[24]</sup>记录随后发生的瞬态信号。值得注意的是,在静电悬浮中,处于悬浮状态的液滴无内部流动,可保持较好的球状,因此产生的振荡频率为瑞利频率  $\omega_{l=2}$  (其中  $l$  表示液滴振荡模式索引),使数据分析直接明了,提高了测量精度。而在电磁悬浮中,由于重力及线圈的作用,瑞

利频峰往往发生分裂与偏移,给频峰模式的区分带来困难,并且由于高频电磁场产生了内部流动,无法直接测量粘度。

当液体粘度增大时,液滴无法被激发而产生振荡,因此它只适用于低粘度液体。对于高粘度液体应采用液滴旋转法<sup>[25]</sup>,例如非晶合金在玻璃转变温度( $T_g$ )附近,粘度增加近14个数量级<sup>[26]</sup>。此外,它还可用于测量金属熔体的电阻<sup>[27]</sup>。

#### 4.2 过冷及凝固

高温、高真空静电悬浮(HTHVESL)技术可对深过冷液态金属的过冷及凝固行为进行较全面的研究。Robinson等人<sup>[28]</sup>使  $Ni_{59}Nb_{41}$  合金的过冷度达到210K,同以往的实验相比,提高了160K,并指出此合金的过冷度并不是被亚稳相分离所限制,而是晶体的形核。Yu等人<sup>[29]</sup>研究了磁性材料  $Nd_2Fe_{14}B$  在不同过冷度下形成的微观组织和磁化强度,并在大过冷时得到了精细的组织(平均晶粒尺寸为2—4 $\mu m$ ),提高了材料的饱和磁化强度。

高真空静电悬浮技术还为非晶合金的研究提供了新的方法。主要体现在两个方面:(1)制备技术。静电悬浮具有超高真空的环境,而且加热与悬浮相互独立,可使液态金属获得在常规凝固条件下难以达到的过冷度,从而制备出非晶。Kim等人<sup>[30]</sup>选择具有高热稳定性的  $Zr-Ti-Cu-Ni-Be$  合金,有效地推迟了均质形核,成功地制备出了非晶。随后, Kim<sup>[31]</sup>又结合等温退火方法,测量了此合金的TTT曲线,首次得到了从液相线温度冷却到  $T_g$  整个温度范围内的结晶动力学实验数据,为理论分析打下了基础。(2)物理性质。利用高真空静电悬浮技术,实现了对大块非晶合金的结晶行为、比容及粘度的无接触测量<sup>[32]</sup>,并在此基础上揭示了Zr基大块非晶合金的玻璃形成能力(GFA)的热力学、动力学影响因素,发现相比于其他热力学量,熔体的粘度对GFA的影响至关重要,并指出熔体与晶体间的界面张力越低,就越容易形成非晶。这是由于过冷熔体具有二十面体短程有序结构,这种结构一方面可以降低界面张力,另一方面又可以增加其粘度<sup>[33]</sup>。

#### 4.3 深过冷熔体结构

为了从实验上研究静电悬浮中深过冷熔体的原子结构,日本研究者<sup>[34]</sup>发展了结合中子散射的静电悬浮技术并用于研究液态金属Zr、Nb和Sn的结构。Kelton与其合作者<sup>[35]</sup>研制了结合高能X射线的静

电悬浮无容器处理实验装置,研究了深过冷 Ti - Zr - Ni 熔体的二十面体准晶结构,这种装置被人们称之为结合射线的静电悬浮装置( Beamline Electrostatic Levitation, BESL )<sup>[36]</sup>. 这项新技术为深过冷熔体结构以及液 - 液、液 - 固相转变的研究提出了新的方法,同时也为高温合金相图及其相转变顺序的确定提供了新的手段<sup>[37]</sup>. 它最重要的特点在于可以实现在对同一样品作结构测量的同时测量一系列热物理参量,如相变焓、液相线及固相线温度等<sup>[38]</sup>.

Kelton<sup>[36]</sup>利用 BESL 首次从实验上证明了 Frank<sup>[39]</sup>早在 1952 年提出的过冷金属熔体具有二十面体短程有序结构的假设,这个假设解释了金属熔体过冷的物理本质. 前面述及关于非晶合金 GFA 的研究结果正是采用 BESL 得出的. 由此可见,结合强大的实验分析手段,可使熔体结构的研究更加精确.

#### 4.4 材料的合成

材料在超过冷条件下凝固可获得诸如晶态亚稳相、纳米晶、准晶态亚稳相以及非晶等特殊的微观结构,进而实现新材料的合成. 这主要体现在对具有优良光、电、磁及机械性能的陶瓷材料(例如 YAG, BaTiO<sub>3</sub>, BiFeO<sub>3</sub> 等)的研究中. 传统的 HTHVESL 适用于金属材料,对氧化物材料不适合. 原因在于真空或低压环境不利于具有高蒸气压的材料,并且在加热过程中会改变其原有的氧元素配比. 更重要的是,这类材料在实验上无法获得足够实现悬浮的电荷量,即使 Ishikawa 提出的先加热后悬浮的方法也由于其粘性较大和表面张力较小而失效,因此要对装置进行改进.

Paradis 等人<sup>[40]</sup>研制了地面条件下结合气动悬浮的静电悬浮装置( Pressurized Electrostatic Levitation Furnace ). 首先通过高压气流将样品悬浮并加热至 1500K 附近,再开启静电悬浮系统,合成出了具有巨大介电常数的六方单晶 h-BaTiO<sub>3</sub><sup>[41,42]</sup>. 而且为了改进工业生产过程和建立数值模型,对其热物理性质也进行了研究<sup>[43]</sup>.

#### 4.5 空间实验

以上讨论的主要是地面环境中的静电悬浮,对于微重力环境,由于浮力驱动的对流和流体静压力的消失,悬浮能力进一步增强,更有利于研究材料的凝固和相选择. 因此有必要进行材料在空间环境中的静电悬浮无容器处理研究.

Yu<sup>[44]</sup>利用探空火箭搭载静电悬浮装置实现了

对 BiFeO<sub>3</sub> 的无容器处理,并确定了其液相线温度. 虽然没有得到所预想的均一的 BiFeO<sub>3</sub> 相,但由于大的过冷度而形成了不规则的胞状共晶. 而且,对于 Fe 和 BaTiO<sub>3</sub>, BiFeO<sub>3</sub> 等氧化物材料,很难获得足够的电量,空间实验则可实现其静电悬浮<sup>[19]</sup>.

## 5 总结与讨论

综上所述,静电悬浮无容器处理技术不仅在金属材料 and 半导体材料的热物理性质、过冷与凝固过程及深过冷合金熔体结构等方面的研究中体现出它独特的优势,而且结合气动悬浮研究氧化物等无机非金属材料,在新材料的合成中显示出较好的应用前景,同时用于研究材料在空间环境中的熔凝过程和物理化学性质,这已成为空间材料科学领域的前沿课题.

目前存在的主要问题以及今后的发展方向如下(1)侧重对难熔材料(尤其是难熔金属)的热物理性质进行研究. 研究对象应更多地涉及陶瓷、多元复相合金,甚至有机透明合金.(2)现有的带电理论模型主要针对金属,对于非金属材料则较为简化,需要进一步完善.(3)除了热物理性质外,还应涉及更多的研究内容,例如多元单相合金的枝晶生长、复相合金凝固过程中的溶质分配等.

致谢 感谢殷涵玉、秦涛等同事在论文写作过程中的帮助.

### 参 考 文 献

- [1] Wuerker R F, Shelton H, Langmuir R V. *J. Appl. Phys.*, 1959, 30(3):342
- [2] Clancy P F, Lierke E G, Grossbach R *et al.* *Acta Astron.*, 1980, 7:877
- [3] Wang T G, Trinh E, Rhim W K *et al.* *Acta Astron.*, 1984, 11(3-4):233
- [4] Rhim W K, Collender M, Hyson M T *et al.* *Rev. Sci. Instrum.*, 1985, 56(2):307
- [5] Rhim W K, Chung S K, Barber D *et al.* *Rev. Sci. Instrum.*, 1993, 64(10):2961
- [6] Brandt E H. *Science*, 1989, 243(4889):349
- [7] 解文军,魏炳波. *物理*, 2002, 31(9):551 [Xie W J, Wei B B. *Wuli (Physics)*, 2002, 31(9):551 (in Chinese)]
- [8] Volkman T, Wilde G, Willnecker R *et al.* *J. Appl. Phys.*, 1998, 83(6):3028
- [9] Nordine P C, Atkins R M. *Rev. Sci. Instrum.*, 1982, 53(9):1456
- [10] Ashkin A. *Phys. Rev. Lett.*, 1970, 24(4):156
- [11] Berry M V, Geim A K. *Eur. J. Phys.*, 1997, 18:307
- [12] Geim A K, Simon M D, Boamfa M I *et al.* *Nature*, 1999, 400(6742):323
- [13] 章海军,黄峰. *光子学报*, 2000, 29(1):72 [Zhang H J, Huang F. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(1):72 (in Chinese)]

[ 14 ] 王新杰,章海军,黄峰. 光子学报, 2002, 31( 2 ):187  
[ Wang X J, Zhang H J, Huang F. Acta Photonica Sinica, 2002, 31( 2 ):187( in Chinese ) ]

[ 15 ] Laud B B. Electromagnetics. 2nd, New York :Halsted Press, 1987. 65

[ 16 ] Rulison A J, Watkins J L, B Zambrano. Rev. Sci. Instrum., 1997, 68( 7 ):2856

[ 17 ] Meister T, Werner H, Lohoefer G *et al.* Control Engineering Practice, 2003, 11 :117

[ 18 ] Sung Y S, Takeya H, Togano K. Rev. Sci. Instrum., 2001, 72( 12 ):4419

[ 19 ] Paradis P F, Ishikawa T, Yoda S. Int. J. Thermophys, 2005, 26( 4 ):1031

[ 20 ] Chung S K, Thiessen D B, Rhim W K. Rev. Sci. Instrum., 1996, 67( 9 ):3175

[ 21 ] Sung Y S, Takeya H, Togano K. J. Appl. Phys., 2002, 92( 11 ):6531

[ 22 ] Rulison A J, Rhim W K. Rev. Sci. Instrum., 1994, 65( 3 ):695

[ 23 ] Lord Rayleigh. Philos. Mag., 1882, 14( 5 ):184

[ 24 ] Rhim W K, Ohsaka K, Paradis P F *et al.* Rev. Sci. Instrum., 1999, 70( 6 ):2796

[ 25 ] Rhim W K, Ishikawa T. Rev. Sci. Instrum., 2001, 72( 9 ):3572

[ 26 ] Kurz W, Fisher D J. Fundamentals of solidification. 4th, Switzerland :Trans Tech Publications Ltd, 1998

[ 27 ] Rhim W K, Ishikawa T. Rev. Sci. Instrum., 1998, 69( 10 ):3628

[ 28 ] Robinson M B, Li D, Rogers J R *et al.* Appl. Phys. Lett., 2000, 77( 20 ):3266

[ 29 ] Yu J, Paradis P F, Ishikawa T *et al.* Jpn. J. Appl. Phys., 2002, 41( 5 ):2908

[ 30 ] Kim Y J, Busch R, Johnson W L *et al.* Appl. Phys. Lett., 1994, 65( 17 ):2136

[ 31 ] Kim Y J, Busch R, Johnson W L *et al.* Appl. Phys. Lett., 1996, 68( 8 ):1057

[ 32 ] Mukherjee S, Kang H G, Johnson W L *et al.* Phys. Rev. B, 2004, 70( 17 ):174205

[ 33 ] Mukherjee S, Schroers J, Johnson W L *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 94( 24 ):245501

[ 34 ] Paradis P F, Ishikawa T, Yoda S. J Non-Cryst. Solids, 2002, 312—314 :309

[ 35 ] Kelton K F, Gangopadhyay A K, Lee G W *et al.* J Non-Cryst. Solids, 2002, 312—314 :305

[ 36 ] Kelton K F, Lee G W, Gangopadhyay A K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2003, 90( 19 ):195504

[ 37 ] Kim T H, Lee G W, Sieve B *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 95( 8 ):085501

[ 38 ] Gangopadhyay A K, Lee G W, Kelton K F *et al.* Rev. Sci. Instrum., 2005, 76( 7 ):073901

[ 39 ] Frank F C. Proc. R. Soc. London A, 1952, 215( 1120 ):43

[ 40 ] Paradis P F, Ishikawa T, Yu J *et al.* Rev. Sci. Instrum., 2001, 72( 6 ):2811

[ 41 ] Yu J, Ishikawa T, Arai Y *et al.* Appl. Phys. Lett., 2005, 87( 25 ):252904

[ 42 ] Yu J, Paradis P F, Ishikawa T *et al.* J. Cryst. Growth, 2005, 273 :515

[ 43 ] Ishikawa T, Yu J, Paradis P F. Rev. Sci. Instrum., 2006, 77( 5 ):053901

[ 44 ] Yu J, Koshikawa N, Arai Y *et al.* J. Cryst. Growth, 2001, 231 :568



· 书评和书讯 ·

## 探索高等科教书店物理类书目推荐( VIII )

作者	书名	定价	作者	书名	定价
R. Shankar	量子力学原理 第2版(影印)	99.0	M. A. Nielsen	量子计算和量子信息(1、2)·赵千川译	78.0
J. J. Sakurai	现代量子力学 修订版(影印)	36.0	张永德	量子信息物理原理	59.0
D. J. Griffiths	量子力学概论 第2版(影印)	39.0	G. Alber	量子信息(影印)	49.0
T Muta	量子色动力学基础 第2版(影印)	63.0	M. A. Nielsen	量子计算和量子信息(影印)	59.0
Luis Sobrino	非相对论量子力学基础(影印)	40.0	陈汉武	量子信息与量子计算简明教程	20.0
W. Equations	相对论量子力学 第3版(影印)	86.0	P. Busch	运算量子物理学(影印)	36.0
李训贵	少体系统的量子力学对称性	32.0	李承祖	量子通信和量子计算	25.0
W. Greiner	量子力学专论(影印)	80.0	B. Sutherland	模型之美—量子多体问题严格解70年(影印)	58.0
H. Haug	半导体输运和光学中的量子动力学(影印)	52.0	曾谨言	量子力学导论 第2版	17.0
杨本洛	量子力学形式逻辑与物质基础探析(上中下)	248.0	丛爽	量子力学系统控制导论	46.0
L. E. Ballentine	量子力学(影印)	98.0	关洪	量子力学基础	18.6
张哲华、刘莲君	量子力学与原子物理学	19.8	W. Dittrich	经典和量子动力学 第2版(影印)	56.0
刘莲君、张哲华	量子力学与原子物理学学习指导	36.5	A. M. Perelomov	量子力学专题选(影印)	38.0
曾谨言	量子力学 第4版( I、II卷)	98.0	喀兴林	高等量子力学 第2版	44.6
钱伯初、曾谨言	量子力学习题精选与剖析 第2版(上下册)	44.0	龙桂鲁、裴寿镛	量子力学新进展 第四辑	39.8
S. Brandt	图解量子力学 第2版(影印)	68.0	刘自信	量子力学考研指导与习题精析	19.0
曾谨言	量子力学教程	25.0	范洪义	量子力学纠缠态表象及应用	25.0
孙婷雅	量子力学教程习题剖析	16.0	苏汝铿	量子力学 第2版	37.4
柯善哲	量子力学朝花夕拾(第二辑)	38.0	钱伯初	量子力学	26.4
葛墨林	量子力学中的场—巴克斯特方程	14.1	倪光炯	高等量子力学 第2版	42.0

我店以经营科技专著为特色 以为科技工作者和大专院校师生提供优质服务为宗旨 欢迎广大读者来店指导或来电查询。

电话 010-82872662、62556876、89162848

网址 <http://www.explorerbook.com>

电子邮箱 [explorerbook@vip.163.com](mailto:explorerbook@vip.163.com)

通讯地址 北京市海淀区海淀大街31号313北京探索高等科教书店

邮政编码 100080

联系人 徐亮、秦运良