

声悬浮研究新进展*

解文军 魏炳波

(西北工业大学应用物理系空间材料科学实验室 西安 710072)

摘要 建立了单轴式声悬浮的参数化模型和边界元算法,对单轴式声悬浮进行了优化设计,可以悬浮起密度高达 $18.9\text{g}/\text{cm}^3$ 的金属钨.研究了声悬浮条件下非金属材料 and 低熔点金属的无容器处理.

关键词 声悬浮,无容器处理

LATEST PROGRESS IN ACOUSTIC LEVITATION

XIE Wen-Jun WEI Bing-Bo

(Laboratory of Materials Science in Space, Department of Applied Physics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract A parametric model incorporating the boundary element method is presented for optimizing the design of single-axis acoustic levitation, which can produce stable levitation of materials as heavy as tungsten (density $18.9\text{g}/\text{cm}^3$). The containerless processing of non-metallic materials and low melting-temperature metals is investigated.

Key words acoustic levitation, containerless processing

随着凝聚态物质研究的深入,人们对实验环境的要求越来越高.空间环境便是这样的一种特殊环境,它的微重力、无容器和超高真空效应对凝固现象和流体现象的研究来说是非常理想的实验条件.但是,尽管航天技术在过去几十年得到了迅猛发展,人们迄今所能获得的空间资源仍十分有限.因此,模拟空间环境中各种效应的地面方法应运而生.声悬浮就是其中方法之一,它可以模拟空间环境中的无容器状态.2001年10月,《Nature》刊登了一篇专题评论文章^[1],介绍了本文作者^[2]在声悬浮研究中取得的突破性进展.文章写道:“超声波能够悬起像钨那样重的物体.这种非接触式的悬浮方法可以用来研制新材料.”

关于声悬浮的研究,最早可以追溯到1886年,那时人们就发现谐振管中的声波能够悬浮起灰尘颗粒.1934年,King^[3]首次从理论上揭示了声悬浮是高声强条件下的一种非线性现象.之后,在科学家们的不断努力下,声悬浮发展成为一种实验技术.声悬浮作为一种无容器处理方法,在先进材料的无容器制备、过冷态亚稳液体的物性测量和自由悬浮液滴的流体动力学研究等领域是一项不可或缺的实验手段.由于声悬浮对被悬浮物体没有电磁学性质上的

特殊要求,原则上可以悬浮任何物质,因而在各种悬浮技术中倍受青睐.但是,长期以来,声悬浮就存在着悬浮力小和稳定性差的问题,使得其应用范围仅局限于密度较小的材料.为了提高悬浮稳定性,人们曾一度使用造价昂贵、结构复杂的三轴式声悬浮器.为了提高悬浮力,1994年以来,人们将三轴式声悬浮与气动悬浮相结合,研制了气/声式悬浮器^[4].这是一种混合式悬浮技术:利用高速气流将样品托起来,并利用声悬浮使其稳定悬浮在一个固定的位置上.另一类混合式悬浮器是声悬浮与静电悬浮的组合^[5],称为声/电式悬浮器.利用这些混合式声悬浮器,人们在氧化物和高温超导材料的深过冷无容器凝固研究中获得了相当好的结果^[6].但是,最具有代表性的、结构最简单的单轴式声悬浮器,只是在水、丁二腈和液晶等小密度物质的无容器处理中得到初步的应用^[7].我们研制了一台磁致伸缩式单轴声悬浮装置,建立了单轴式声悬浮的参数化模型和入射声场的边界元算法,通过对声悬浮过程的优化设计,成功地提高了悬浮力和稳定性,在国际上首次悬浮

* 国家自然科学基金(批准号:50221101,50101010,59901009)和西北工业大学博士论文创新基金资助项目

2002-03-18收到初稿,2002-05-08修回

起密度高达 18.9g/cm^3 的钨^[2]. 而在此之前, 文献报道的最大悬浮能力是悬浮起密度为 11.3g/cm^3 的铅^[8]. 我们的这一研究结果大大扩展了声悬浮的应用范围.

关于悬浮, 人们听到最多的可能是磁悬浮列车. 事实上, 实现物体悬浮的物理方法是多种多样的, 例如: 气动悬浮、电磁悬浮、声悬浮、光悬浮、静电悬浮、超导悬浮等. 声悬浮是利用声波产生的作用力来抵抗重力从而实现物体悬浮的, 声波产生的这种力称为声辐射压力. 在线性声学中, 声压随时间呈周期性变化, 声压在一个周期的时间平均值为零. 但是, 在高声强条件下, 声波的非线性效应变得越来越显著, 会在声压中引起一个“直流”项, 这一项的时间平均值具有固定的方向和大小, 从而产生声辐射压力. 声波产生的辐射压力是惊人的, 它可以使密度比空气大几百甚至几万倍的常见固体的液体克服地球引力而悬浮于空气中, 也可以将密度很小的气泡定位于液体中某一位置而不漂浮到液面上. 在液体和固体的无容器处理研究中, 人们主要关心的是前者.

声悬浮理论^[3]通常要求被悬浮物体的尺寸 (R_s) 远小于半波长 ($\lambda/2$), 在实际应用中, 样品的直径一般不大于 $\lambda/4 - \lambda/3$. 由于驻波产生的声辐射压力远大于行波 [前者正比于 $(R_s/\lambda)^3$, 后者正比于 $(R_s/\lambda)^2$], 所以声悬浮实验普遍采用驻波. 以平面驻波为例, 对于形如 $p = p_0 \cos(kz) \sin(\omega t)$ 的声场, 声辐射压力为 $F = (5/6)\pi R_s^3 (\omega/\rho_f c^3) p_0^2 \sin(2kz)$. 这里 ρ_f 和 c 分别为空气密度和声速, ω 和 k 分别为角频率和波数. 可见, 声辐射压力沿波动方向以 $\lambda/2$ 为周期分布, 在声压波节处 ($z = \lambda/4, 3\lambda/4, 5\lambda/4, \dots$), 声辐射压力具有回复力的特性, 即一旦样品偏离了平衡位置, 就有被拉回原位置的趋势, 这些位置就是样品的悬浮位置. 通常, 使声波动方向与重力方向平行, 以克服样品的重力. 对于较重的物体, 其悬浮位置会偏向声压波节的稍下方.

声悬浮需要很高的声强条件. 对于我们所采用的频率 16.7kHz 的超声波, 在空气中悬浮一滴水, 需要至少 159.5dB 的声压级, 而悬浮起钨, 需要至少 172dB 的声压级. 这样强的声场, 一般需要依靠谐振腔的共振才能获得. 最简单的谐振系统可由一个声发射端和一个反射端来构成, 也称为单轴式声悬浮器, 如图 1 所示. 反射端到发射端的间距是可调的, 以便满足声场的共振条件. 如果将反射端到发射端之间的声场简单视为平面驻波, 则共振条件可表达为: $H = n \cdot \lambda/2, n = 1, 2, \dots$. 在第 n 个共振模式, 可

以悬浮 n 个样品.

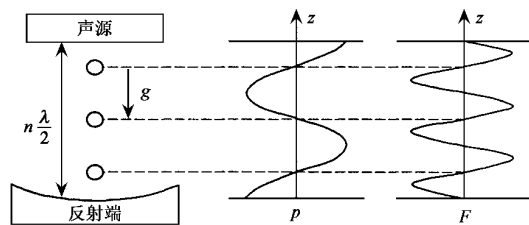


图 1 单轴式声悬浮

实际上, 反射端与发射端之间的声场并非简单的平面驻波, 它在水平方向也具有声压梯度, 因而也产生水平方向的回复力, 这就使样品能够稳定在中心对称轴上, 而不会在水平方向随意摆动. 人们发现, 采用一个适当弯曲的反射面, 不但能够有效地增大竖直方向声悬浮力, 而且能够提高水平方向的悬浮稳定性. 这意味着, 单轴式声悬浮的性能与反射端甚至发射端的几何参数有着密不可分的关系. 我们建立了一个单轴式声悬浮的参数化模型和入声场的边界元算法^[2], 成功地揭示了这两者之间的依赖关系, 从而可以找出最优化参数, 最大限度地提高悬浮力和悬浮稳定性, 悬浮起密度高达 18.9g/cm^3 的钨.

我们的模型由两个同轴圆柱体构成. 上面的一个圆柱体是声源, 其底面是振动面, 在垂直方向以正弦方式振动. 下面的一个圆柱体是反射端, 它的上端面 (即反射面) 是凹球面. 除了振动面以外, 两个圆柱体的其他表面都是静止的. 基于该模型, 可以将描述声波动的亥姆霍兹 (Helmholtz) 方程转化为两个圆柱体表面上的边界积分方程. 采用边界元算法, 可以求得空间中入射声场的数值解. 将这一数值解代入声辐射力的时间平均势的表达式, 就可以分析声辐射力在空间的分布情况. 作用于小硬球的声辐射力时间平均势的表达式是由 Gor'kov^[9] 给出的: $U = 2\pi R_s^2 (\overline{p_m^2}/3\rho_f c^3 - \overline{v_m^2}/2)$. 知道了时间平均势 U 的信息, 我们首先找到势阱的位置, 即样品悬浮的位置. 然后分析势阱附近轴向和径向的回复力和回复力系数. 势阱周围的最大回复力表示被悬浮样品可承受的外力的上限, 例如, 轴向向上的最大回复力就是该势阱的最大悬浮力. 轴向和径向的回复力系数类似于弹簧的弹性系数, 反映了该势阱悬浮样品的稳定性.

我们重点考察了悬浮力和悬浮稳定性与反射端的截面半径 (R_b)、凹球面曲率半径 (R) 以及反射端 - 发射端间距 (H) 之间的依赖关系. 首先, 需要确

定声场的共振状态.我们计算了声辐射功率与 H 的关系,得到若干个共振峰,如图 2 所示.这实际上模拟了声悬浮实验中的调谐过程.各共振状态所对应的 H 值与实验测量值符合得非常好.由此可见,在实际情况下,满足共振条件的 H 值[分别为 $(1.19, 2.30, 3.40, 4.48) \cdot \lambda/2$]比平面驻波所要求的 H 值稍大.另外,随着模式数的增大,声辐射功率在减小.这一趋势同样也会反映在悬浮力和稳定性上,因此在第 1 个模式下,可以获得最佳的悬浮性能.接下来,我们计算了时间平均势 U 的分布.图 3 是第四个模式下 U 的等高线分布,图中显示了四个势阱,中间两个势阱位于对称轴上,是势能极小值点.靠近发射端和反射端的两个势阱是势能极小圆环.这两个圆环状的势阱成功地解释了实验中靠近发射端和反射端的两个样品的悬浮位置并不位于对称轴上的事实.

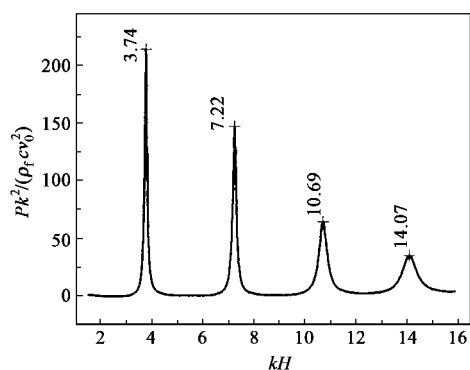


图 2 计算得到的前四个共振模式

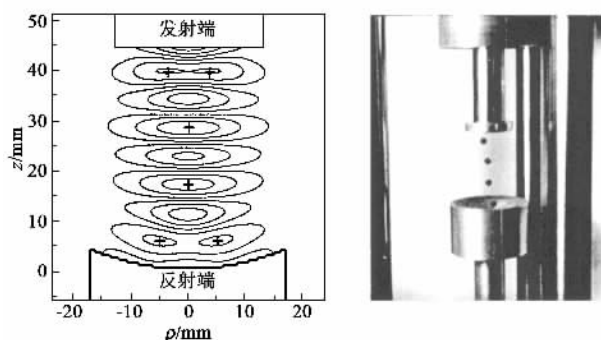


图 3 计算得到的时间平均势的分布(左图中“+”表示势阱)和四个聚合物小球的声悬浮照片(右图)

计算中,我们采用了无量纲化参数,其中无量纲的悬浮力和回复力系数是仅与反射端和发射端的几何参数有关的量,因而研究它们与几何参数之间的关系有助于我们对单轴式声悬浮器进行优化设计.我们计算了最靠近反射面的这个势阱的无量纲悬浮

力 \bar{F} 在不同的模式下与反射端截面的半径 (kR_0) 和曲率半径 (kR) 的关系.为了验证计算结果的可靠性,我们设计了一个验证实验.实验的思路是这样的:对一个密度为 ρ_s 的样品,通过逐渐减小声源的输入功率的方法,测出悬浮该样品所需的最小输入电流 I ,那么,对于一组 ρ_s 值,就可以获得相应的一组 I 值;另一方面,理论上可以知道 ρ_s 和 I 之间有如下关系: $\rho_s = \alpha I^2 + \rho_f$,通过对 $\rho_s \sim I^2$ 的线性回归,可以求得 α 的值,而 α 又与悬浮力 \bar{F} 成正比,所以通过该实验就得到了无量纲悬浮力的相对实验值.实验结果证实了计算的可靠性.我们得到的 $\bar{F} - kR_0 - kR$ 关系表明,选择合适的反射端几何参数,可以在不改变声源和媒质的条件下,使悬浮力提高几个数量级.从这个关系可以得到一个有指导意义的结论是:采用较大截面半径和较小曲率半径的反射面,并且工作在第 1 个模式下,可以获得最大的悬浮力.不过,在反射面的设计中,还要考虑观察和操作的简便性,因此,反射面的曲率半径也不宜过小.

人们发展声悬浮的最初目的是在空间实验中对样品进行定位,因为空间环境是微重力环境,定位样品所需的声辐射力很小.随着声悬浮能力的提高,在地面上也可以悬浮起较重的物体,从而使声悬浮技术在材料无容器处理中得到更广泛的应用.无容器处理方法避免了容器壁对样品的接触与污染,在材料的无容器过冷和凝固,亚稳液态物理性质的测量以及液滴流体动力学的研究中具有不可替代的作用.在各种悬浮技术中,电磁悬浮是比较成熟的一种,但是电磁悬浮不能处理非导电材料,并且由于其强烈的加热效应,会导致低熔点金属的过热和蒸发,也不适合处理低熔点金属材料.声悬浮的优势体现在对非金属的无机材料和有机材料以及低熔点金属材料的研究中.采用单轴式声悬浮^[7],Ohsaka 等人研究了丁二腈的无容器过冷和凝固行为, Bauerecker 等人研究了冰粒的形成和生长,我们则对液晶的无容器熔化、过冷和凝固进行了研究.这些研究表明,在声悬浮无容器条件下,材料的过冷和凝固过程可能与超声的作用有着很大关系.采用气/声式悬浮^[6],人们对硼、 Al_2O_3 、 $YBa_2Cu_3O_x$ 和 $NdBa_2Cu_3O_x$ 等非金属材料的液态结构、深过冷和快速凝固进行了研究,并使 $YBa_2Cu_3O_x$ 包晶相直接从过冷熔体中形成,获得了很好的超导性能.另一方面,通过对声悬浮状态下液滴的运动学和动力学规律的研究,可以测量液体的密度、表面张力和粘滞系数等物理性质.由于这

是一种非接触式测量方法,所以可以获得其他方法难以得到的液体在过冷态的热物性实验数据.例如,已经获得了水、高纯铟和 OTH(o-terphenyl)分别在过冷度 21K、57K 和 70K 范围内的表面张力、粘滞系数和密度等实验数据^[10].

实现了钨的声悬浮原则上已经大大缩小了样品密度对声悬浮应用的限制,但是在材料的声悬浮无容器处理中,温度场与声场的耦合作用仍是一个需要深入研究的重要问题.首先,直观地看,温度的升高会引起媒质气体密度的下降和声速的增大,这两者的综合作用使声悬浮力以 $T^{-3/2}$ 方式下降.其次,温度升高会引起声波长的增大,而反射端和发射端的几何参数都是以声波长作为参照的,这会导致声悬浮器的几何参数的相对变小,从而使声悬浮性能发生较大变化.再者,温度变化会破坏声场的共振条件,从而导致声悬浮实验的失败,为了避免发生这一情况,需要跟踪温度变化对声场进行实时调谐.另外,温度梯度场的存在对声悬浮过程有什么样的影响,还不十分清楚.以上几方面的因素会在材料的声

悬浮无容器处理过程中引起很大的悬浮不稳定性.只有对上述问题有了深入的了解,才能使声悬浮的应用取得更大的进展.

参 考 文 献

- [1] Brandt E H. Nature, 2001, 413: 474
- [2] Xie W J, Wei B B. Appl. Phys. Lett., 2001, 79: 81
- [3] King L V. Proc. Roy. Soc., 1934, A147: 212
- [4] Weber J K R et al. Rev. Sci. Instrum., 1994, 65: 456
- [5] Apfel E, Zheng Y, Tian Y. J. Acoust. Soc. Am., 1999, 105: L1
- [6] Krishnan S et al. Phys. Rev. Lett., 1998, 81: 586; Ansell S et al. Phys. Rev. Lett., 1997, 78: 464; Weber J K R et al. J. Am. Ceram. Soc., 1995, 78: 577; Olive J R et al. J. Mater. Res., 1994, 9: 1; Nagashio K, Kuribayashi K, Takamura Y. Acta Mater., 2000, 48: 3049
- [7] Ohsaka K, Trinh E H, Glicksmann M E. J. Cryst. Growth, 1990, 106: 191; Bauerecker S, Neidhart B. J. Chem. Phys., 1998, 109: 3709; Xie W J, Wei B B. Chin. Phys. Lett., 2001, 18: 68
- [8] Magill J et al. High Temp. High Pres., 1987, 19: 461
- [9] Gor'kov L P. Sov. Phys. Dokl., 1962, 6: 773
- [10] Trinh E H, Ohsaka K. Inter. J. Thermophysics, 1995, 16: 545; Bayazitoglu Y, Hell G. J. Thermophysics Heat Trans., 1995, 9: 684



·读者和编者·

2002 年第 10 期《物理》内容预告

研究快讯

瑞利型非简并四波混频:一种研究超快过程的新方法(傅盘铭等).

评 述

碳纳米管电子学的研究与进展(杨铮等).

知识和进展

新世纪的第一只燕子——2001 年度诺贝尔物理学奖述评(魏晓云等);

以小搏大——生物学中的纳米科技(武振羽等);

光学微球腔及其应用(金乐天等);

超快光声光谱技术的进展和前景(潘新宇等);

离子辐照聚乙烯合成小于 C₆₀ 的富勒烯分子晶体(王震遐等);

光学小波匹配滤波器与图形识别(吴华文等).

实验技术

飞秒脉冲测量技术(王兆华等);

噪声信号与速度测量(陈学煌).

讲 座

同步辐射讲座第四讲 同步辐射 50 年(麦振洪).

物理学史和物理学家

百年诺贝尔物理学奖探析(仲伟纲等);

燕园青松永留情——缅怀著名的实验物理学家、教育家褚圣麟教授对我国物理学教学和科学事业的贡献(许祖华);

中国女物理学家为何在减少?(吴令安).

物理教育

以评促进 加强实验课程建设(胡益丰).