

声悬浮技术的发展及应用

沈昌乐 解文军 洪振宇 魏炳波

一、引言

在过去半个世纪中,空间技术的发展日新月异。人们先后实现了人造卫星的发射,太空漫步和空间站的建立。空间环境与地面条件有着显著的不同,其主要特征有微重力、无容器、超高真空和宇宙射线等。如何利用空间环境进行科学研究和材料制备成为国际热点课题。美国、俄罗斯、欧盟、中国和日本先后对空间环境下流体力学,生物医学和材料科学等重要方向进行立项和研究。虽然航天技术在过去几十年中得到了迅猛发展,开展空间实验的成本依然昂贵。相对于研究的需求而言,空间实验的机会还十分有限。因此,需要开展空间环境的地面模拟研究,各种实验方法也应运而生。声悬浮可以模拟空间环境中的无容器状态。与其他悬浮方式相比,声悬浮的主要特点是对试样的电磁性能没有特殊要求,悬浮较稳定,容易控制。电磁悬浮要求试样能够导电,静电悬浮则需要对试样的带电量和悬浮电压进行精确控制,气动悬浮横向稳定性较差,光悬浮试样的尺寸通常在 $150\mu\text{m}$ 以下。

从一个偶然发现的实验现象到一种较为成熟的科学研究手段,声悬浮技术经历了一个多世纪的发展历程。1866年,德国科学家孔特(Kundt)首先报道了谐振管中的声波能够悬浮起灰尘颗粒的实验现象。1933年波兰物理学家巴克斯(Bücks)等人利用声辐射力作用下水雾的分布实现了声场可视化,并成功地悬浮起多个直径为 $1\sim 2\text{mm}$ 小水滴。1934年,加拿大物理学家金(King)计算了理想流体中刚性小球受到的声辐射力,从而揭示了声悬浮是高声强条件下的一种非线性现象。1964年,美国明尼苏达州立大学的汉森(Hanson)等人根据金的理论设计建造了一台用于单个液滴动力学行为研究的声悬浮装置。1975年,美国科学家威马克(Whymark)将声悬浮用于空间实验的定位,并研究了铝、玻璃及聚合物在无容器条件下的熔化和凝固过程。现在,人们可以通过声悬浮方法,实现各种金属材料、无机非金属和有机材料的无容器处理,开展液滴动力学、材料科学、分析化学和生物化学等方面的研究。

二、基本原理

声悬浮利用物体受到的声辐射力来实现悬浮。在声场中,物体表面所受的声辐射压 p_a 可以表示为:

$$p_a = \frac{1}{2} \frac{\rho_0}{c_0^2} \langle p^2 \rangle - \frac{1}{2} \rho_0 \langle v^2 \rangle, \quad (1)$$

其中, p 为声压, ρ_0 为悬浮介质的密度, c_0 为声波在悬浮介质中的传播速率, v 为声波传播时媒质粒子的运动速率, $\langle \cdot \rangle$ 表示物理量的时间平均值。从(1)式可以看出,声辐射压是关于声压的二阶小量。因此,要实现物质的悬浮,需要较大的声强。比如,在空气中悬浮一滴水,声压级需达到 160dB ,而悬浮起钨,则需达到 172dB 。这样强的声场一般通过在超声发射端和反射端之间形成驻波来实现。

声悬浮装置主要有三轴式和单轴式两种类型。前者包含三组超声发射端和反射端,三束超声分别从 X 、 Y 、 Z 三个方向约束悬浮物体。后者仅由一组发射端和反射端构成,通过采用凹面反射端,可以使超声驻波发生畸变从而对悬浮物体在水平方向进行约束。后者的搭建和操作更为简便。微型化的单轴式声悬浮装置总质量小于 5kg ,有利于将声悬浮技术用于空间实验。

图1给出了单轴式声悬浮装置的示意图。调节发射端和反射端之间的距离,使其约为声波半波长的整数倍,从而形成驻波。在声压波节位置对应声辐射力时间平均势能的极小值点,可以用于物体的悬浮。当发射端和反射端的间距较大时,可以形成数个波节,可以实现多个物体的悬浮。由于相邻波节间的距离约为声波半波长,因而被悬浮物体在声波传播方向的尺寸不能超过其波长的一半。

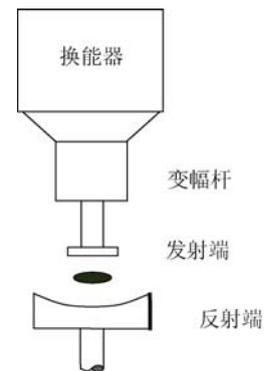


图1 声悬浮装置示意图

金给出了平面驻波中物体受到的声辐射压计算方法,而实际上声悬浮装置产生的是在边缘效应和几何形状共同作用下发生了畸变的超声驻波。本文作者基于边界元方法提出了用于单轴式声悬浮装置

金给出了平面驻波中物体受到的声辐射压计算方法,而实际上声悬浮装置产生的是在边缘效应和几何形状共同作用下发生了畸变的超声驻波。本文作者基于边界元方法提出了用于单轴式声悬浮装置

几何参数优化设计的双圆柱模型。边界元方法可以由边界的振动状态计算得到空间各点的声场分布。双圆柱模型将声悬浮装置的边界简化为两个同轴的圆柱体，其中上面的圆柱体为超声发射端，它的底面是振动面，在法线方向发生正弦振动。下面的圆柱为反射端，其上表面为凹球面。除了振动面以外，两个圆柱的其他表面都是静止的。声场中速度势 Φ 的边界积分方程为：

$$C(M)\Phi(M) = \int_{\Gamma} \left[\frac{\partial \Phi(Q)}{\partial n} \frac{\exp(jkr)}{4\pi r} - \Phi(Q) \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{\exp(jkr)}{4\pi r} \right) \right] d\Gamma(Q) \quad (2)$$

其中， M 是空间中任意一点， Q 是表面 Γ 上任意一点， r 是点 M 和点 Q 之间的距离， k 为波数， n 为边界外法线方向， C 是和点 M 处表面的几何性质相关的常数。由(2)式求解得到的速度势 Φ 可以给出入射声压 p_{in} 和质点运动速率 v_{in} ，从而计算出声辐射力时间平均势 U 的分布：

$$U = 2\pi R_s^3 \left[\frac{\langle p_{in}^2 \rangle}{3\rho_f c^2} - \frac{\rho_f \langle v_{in}^2 \rangle}{2} \right], \quad (3)$$

其中， ρ_f 和 c 分别为悬浮媒质的密度和声速， R_s 为悬浮小球的半径。

通过双圆柱模型，可以计算出不同几何参数下的声场分布和悬浮力，实现声悬浮装置的优化设计。图 2(a)所示为采用双圆柱模型计算得到 4 个波节模式下声辐射力时间平均势的分布。图中等高线分布给出了 4 个势能极小值区域，对应于 4 个悬浮位置，在图中用“+”标出。图 2(b)为在该谐振模式下悬浮 4 个液晶小球的实验照片。由于凹面反射端对超声驻波的畸变作用，在靠近发射端和反射端的两个极小值是以 Z 轴为对称轴的圆环，另外两个极小值是 Z 轴上的两个点。这种圆环形的势阱使得靠近反射端和发射端的样品偏离柱对称轴。

声悬浮装置的悬浮能力主要表现为可以悬浮物体的最大密度。通过对发射端和反射端进行优化设计，可以显著提高其悬浮能力。人们已经可以在地面上实现常温下密度最大的固体铱(密度 22.6 g/cm^3) 和液体汞(密度 13.6 g/cm^3) 的声悬浮。在发射端振幅相同的情况下，悬浮力随着声压波节数目的增多而减小，因而在对密度较大物体进行悬浮时通常采用较低的谐振模式。图 3(a)、(b)分别给出了在 1 个波

节模式下铱和汞悬浮的实验照片。由于声悬浮对被悬浮物体的电磁性能没有特殊要求，这标志着原理上可以实现任何物质的声悬浮。

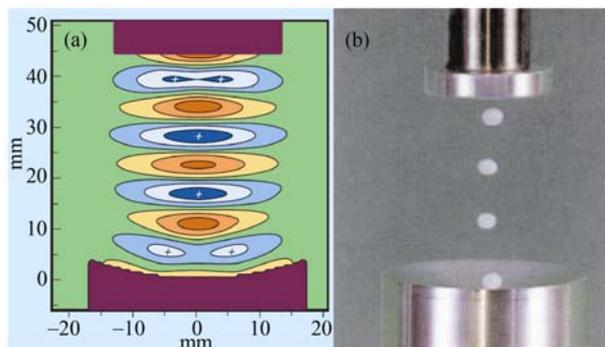


图 2 四波节模式下的声悬浮
(a) 声辐射力时间平均势的分布；(b) 4 个液晶小球的悬浮

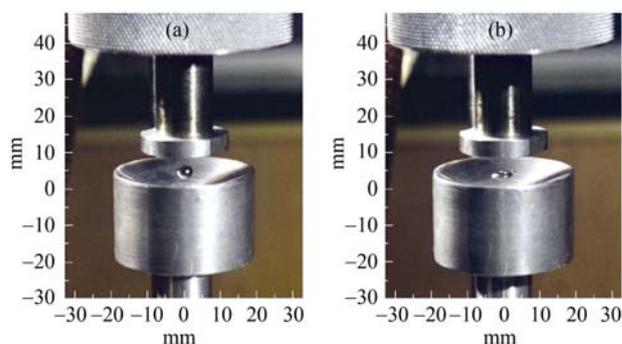


图 3 高密度物质的悬浮
(a) 铱 (密度 22.6 g/cm^3)；(b) 汞 (密度 13.6 g/cm^3)

经过优化设计的声悬浮装置，不仅可以用于各种固体和液体的悬浮，还可以在空气中束缚生物活体，为悬浮条件下生命科学的研究提供实验平台。图 4 分别给出了蚂蚁，瓢虫和小鱼悬浮的实验照片。在悬浮过程中，它们都用各自的方式企图摆脱声场的约束，但均以失败告终。由于 99% 以上的超声能量在动物的表面被反射，悬浮过程不会对动物的生命造成显著的危害。在悬浮 30 分钟后，蚂蚁可以

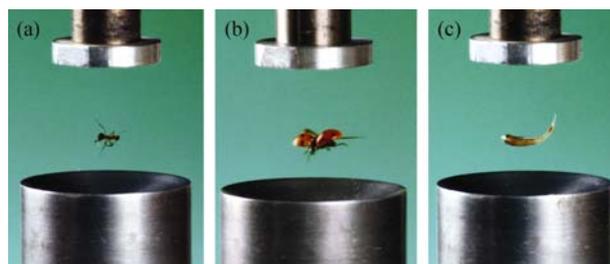


图 4 小动物的声悬浮
(a) 蚂蚁；(b) 瓢虫；(c) 小鱼

照常爬行，瓢虫可以自由飞翔，只有小鱼因为供水不足生命活力减弱。

三、主要应用

声悬浮技术可以模拟空间无容器状态，用于材料凝固理论和制备工艺的研究。水通常在 0°C 结冰，而我们在实验中发现，声悬浮条件下水滴可以冷却到 -32°C 仍然保持液体状态。这种物质在温度低于熔点而仍然保持液体状态的现象称为过冷现象，其温度与熔点的差值称为过冷度。熔体能够实现过冷是因为结晶需要经历一个形核阶段。在常规条件下，熔体与容器壁的接触，可以促进晶体的异质形核，因而过冷度很小，几乎在温度降至熔点即开始凝固。通过悬浮无容器处理，可以避免熔体与器壁的接触，使晶体的形核变得困难，从而实现深过冷。这类似于降雨过程，除了水蒸汽要求达到过饱和状态，还需大气中灰尘作为凝结核。过冷态的水处于亚稳状态，一旦开始结冰，其凝固速率将远远大于常规条件下冰的生长速率。实验测定发现，在 -24°C 的过冷水中，冰枝晶的生长速率可达 170 mm/s ，整个水滴的凝固在瞬间完成。悬浮条件下晶体的形核及生长特征为熔体的形核规律研究提供实验依据。

悬浮无容器处理是实现深过冷快速凝固研究的重要手段。快速凝固通常指熔体以大于 10 mm/s 凝固速率从液态转变为固态的过程。通过快速凝固可以使合金的组织细化，成分均匀，从而制备出性能优越的金属材料。实现快速凝固有急冷和深过冷两种途径。前者需要将凝固过程释放的结晶潜热迅速传递出去，因而要求至少在一个方向尺寸较小，所得试样的形式为粉末、条带或者箔片。后者则通过消除容器对熔体的异质形核作用，从而在慢速冷却下实现大体积熔体的深过冷和快速凝固。深过冷方法对于凝固理论的研究具有重要价值。因为深过冷实验中可以更准确地获取实验数据，还可以通过外部诱发形核，研究特定过冷度下的凝固过程和所得试样微观组织及性能。

我们采用声悬浮方法研究了铅-锡 (Pb-Sn) 共晶合金凝固过程，获得了 38°C 的最大过冷度。与常规条件下的实验结果相比，声悬浮试样的共晶层片不再是规则排列。分析表明，这是共晶层片在生长过程中由于声悬浮液滴内部的复杂流动而发生碎断的结果。此外，在试样的表面还观察到由于超声作用而产生的毛细波。常规条件和声悬浮条件下铅-

锡共晶合金的凝固组织及声悬浮试样表面毛细波如图 5 所示。钇钡铜氧 ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$) 是一种高温超导材料，其传统制备工艺是粉末冶金方法，即先造粒，再进行热处理。美国材料学家奥丽芙 (Olive) 等人采用无容器深过冷方法可以使钇钡铜氧相从熔体中直接形成，获得了很好的超导性能。

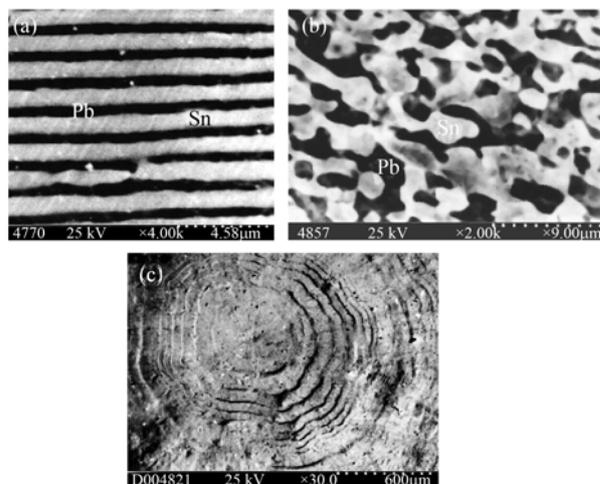


图 5 Pb-Sn 共晶合金的凝固组织
(a) 常规条件；(b) 声悬浮条件；(c) 声悬浮试样表面形成的毛细波。其中 Pb 相呈白色，Sn 相呈灰色

在合金的凝固研究中，通常需要经历熔化和凝固两个相变过程，相伴随的是悬浮物体和媒质温度的变化。如何在温度发生变化时，保持系统的谐振状态是一个技术难题。当悬浮室温度变化小于 1°C/s 时，可以通过实时调节发射端与反射端之间的距离来保持系统的谐振状态。而在高温合金的无容器快速凝固实验中，试样的温度变化可达 200°C/s ，实时调节的方法已不能满足实验要求。因此我们提出了自适应反射端的理念，经过反复的实验和分析，发现采用如图 6 所示的弹性反射端，可以开展高温

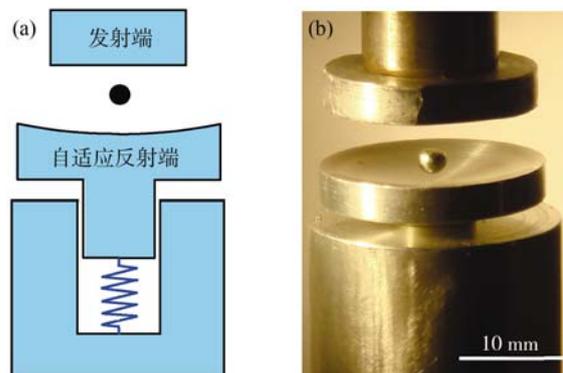


图 6 自适应声悬浮装置
(a) 示意图；(b) 实物图

合金的无容器凝固研究，即使在试样温度变化达 200℃/s 的情况下，仍然无需主动调节就可以保持系统的谐振状态和悬浮稳定性。

液滴动力学是一个重要的基础理论问题，在流体力学、气象学、材料和化工等领域的研究中受到广泛关注。美国喷气推进实验室郑 (Trinh) 等人采用声悬浮方法，研究了液滴振荡规律。他们从实验上验证了球形液滴振荡频率和液滴半径及表面张力之间的函数关系，并采用液滴振荡法以非接触的方式测定了水、硅油及甘油溶液的表面张力。这种方法对于过冷、高温或高化学活性液体性质测定具有重要意义。他们还通过调节声场驱使液滴旋转，当液滴旋转速率超过特定的临界值时，观察到表面张力和离心力共同作用下的液滴由扁圆形向两瓣和三瓣形状转化的现象。这些研究可以用来类比原子核以及星体的演化。

近年来，声悬浮技术还被广泛用于微量生物化学研究。它可以消除容器对分析物的吸附，保持细胞的自然生存环境，避免器壁对分析检测信号的干扰。通过液滴的蒸发或者试剂的补给，可以控制液滴的化学成分和浓度。

瑞典隆德大学桑特松 (Santesson) 等人采用声悬浮方法研究细胞对环境药物的反应。在 0.5μL 悬浮液滴中仅包含 3~15 个细胞，因而可以对细胞的个体生化行为进行研究。他们先对细胞的胰岛素敏感性分析，确认了声悬浮不会对液滴中的细胞造成伤害。接着，通过 PH 值荧光指示剂实时监测了脂肪细胞的脂解过程。澳大利亚莫纳什大学伍德 (Wood) 等人发现采用声悬浮液滴对海藻细胞进行拉曼光谱分析，其信噪比可以提高 15 倍。德国联邦材料研究和测试中心赖特雷尔 (Leiterer) 等人通过声悬浮液滴的蒸发，研究了不同浓度下有机染料和包含纳米晶体溶液的荧光特性，结果表明声悬浮方法可以有效地消除器壁对分析物的吸附和提高光谱的信噪比。德国化学家韦尔特 (Welter) 等人将声悬浮液滴用于痕量分析，通过液滴蒸发实现了溶质的富集，在悬浮液滴中实现了液液萃取和不混溶液相间的溶质交换。

德国联邦材料研究和测试中心克利马科 (Klimakow) 等人在声悬浮条件下通过同步辐射 X 射线衍射和拉曼光谱分析了硝苯吡啶的结晶过程。通过拉曼光谱给出晶体较小时相变的信息，而同步

辐射 X 射线衍射则用来监测晶体的生长过程。德国科学家沃尔夫 (Wolf) 等人在声悬浮液滴中研究了碳酸氢钙的分解及碳酸钙的形核及生长过程。他们采用 X 射线衍射实时监测液滴中的物质结构的转变和晶体生长过程。试验后将液滴冻结并在低温透射电子显微镜观测析出碳酸钙的形貌。分析结果表明，碳酸钙在初期以无定形的方式析出，在无定形结构的基础上发生晶体形核。气液界面对晶体形核过程没有显著影响。

四、结束语

人们对声悬浮现象认识的历史已经有一个多世纪。随着研究的深入，声悬浮技术的发展日益成熟，已经可以用于各类固体颗粒和液滴的悬浮。试样的尺寸可以在几百微米到几毫米的范围变化，密度可以从常规水溶液的约 1g/cm³ 到最重固体铀的 22.6g/cm³，温度可以从零下四十摄氏度到超过一千摄氏度。相关的配套分析设备不断完善，可以根据需要，调节悬浮环境的温度和湿度，控制悬浮液滴的体积、成分和浓度，并采用高速摄像、荧光分析、激光拉曼光谱及同步 X 射线衍射等手段进行实时监测。应用范围不断扩展，已经被用于液滴动力学，材料热物性，溶液中的晶体生长，合金熔体的凝固，以及微量生化分析等领域的研究。通过和各个学科的紧密结合，声悬浮这个有趣实验现象的种子，定能在相关科学研究的土壤中生根发芽并且开出美丽的花朵。

致谢耿德路、闫娜和鄢振麟等同事对本文完成给予了热情帮助和有益讨论，在此谨致谢意。

(西北工业大学应用物理系 710129)

