

单轴式声悬浮的物理特性

解文军, 魏炳波

(西北工业大学应用物理系, 西安 710072)

摘要: 采用边界元方法对单轴式声悬浮过程中的入射声场计算, 揭示了样品在声悬浮过程中的受力特性。结果表明, 提高声源强度、降低重力水平或者采用密度大声速小的气体介质有利于提高声悬浮能力。另外, 采用适当曲率半径和较大截面半径的凹球面反射端能够提高模式 4 下靠近反射面的一个悬浮位置的悬浮性能。

关键词: 声悬浮; 悬浮性能

中图分类号: O422.7 文献标识码: A

Physical characteristics of single-axis acoustic levitation

XIE Wen-jun, WEI Bing-bo

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

Abstract: Single-axis acoustic levitation was investigated by a BEM model corresponding to our levitator and the levitation characteristics were revealed. The calculated results show that strong vibrating source, low gravitational level and sound medium with large density and small sound speed will enhance the levitation ability. Meanwhile, a concave reflector with suitable curvature radius and large section radius improves the levitation capabilities of the potential well near the reflector under mode 4.

Key words: acoustic levitation; levitation capabilities

1 引言

声悬浮是高声强条件下物体受到声场的声辐射压力而产生的一种非线性现象。利用声悬浮对材料进行无容器处理是空间材料科学研究的重要内容^[1], 它在液态物性的测定、材料的过冷与凝固以及自由液滴的流体动力学等领域的应用倍受关注^[2-4]。本文采用边界元方法研究了样品在声悬浮过程中的物理特性。

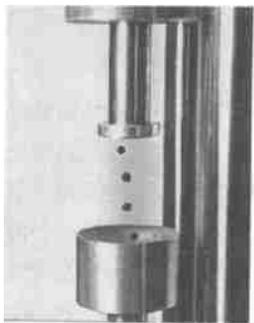


图 1 4 个直径为 3mm 的聚合物小球悬浮于空气中

2 计算模型

图 1 是采用自行研制的单轴式声悬浮器^[5]悬浮 4 个直径为 3mm 的聚合物小球的实验照片。图中上部分是频率为 16.7kHz 的声源, 下部分是一个反射面为凹球面的反射端。调节反射端到发射端的距离可以获得一定

模式的声场。声介质是室温下的空气。

样品在悬浮声场中受力特性可以借助 Gor'kov 定义的声辐射力压力的时间平均势来分析^[6,7]。时间平均势 U 定义为:

$$U = 2\pi R_s^3 (\overline{p_{in}^2} / 3\theta c^2 - \theta \overline{U_n^2} / 2) \quad (1)$$

其中 $\overline{p_{in}^2}$ 和 $\overline{U_n^2}$ 分别是样品所在处的声压和流体速度的均方差, R_s 是样品的半径, θ 是流体的密度, c 是声速。样品所受的声辐射力和势阱附近的回复力系数分别为 $F = -\nabla U$ 和 $k_i = \frac{\partial^2 U}{\partial x_i^2}$ 。

为了求得(1)式中的入射声压和流体速度, 将声悬浮器简化为两个同轴的圆柱体(如图 2 所示), 上面一个圆柱体是振源, 其下端以角频率 ω 和速度振幅 v_0 作等幅活塞式振动, 其它表面的法向振速为零。下面一个圆柱体是反射端, 其上表面是球心在圆柱对称轴上的凹球面。入射声场的速度势可以由边界元方法来计算, 公式是:

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

其中 M 是场点, Q 是源点, r 是 M 到 Q 点的距离, k 是波矢, n 是边界 Γ 的内法向, Φ 是速度势, C 是与界面几何形状有关的常数。

计算过程中采用无量纲化长度 $x = kx$ 和无量纲化速度 $v = v/v_0$, 其它各物理量的无量纲化形式

收稿日期: 2000-01-21; 修回日期: 2000-01-20

国家自然科学基金(批准号: 59871040)和国家高技术研究发展计划(批准号: 863-2-4-3-2)项目

作者简介: 解文军(1974), 男, 陕西省人, 博士研究生。

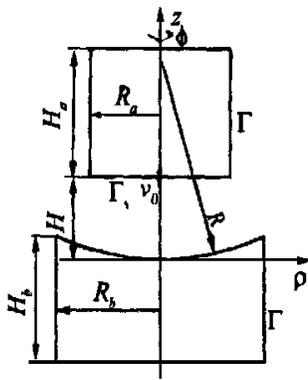


图2 单轴式声悬浮入射声场计算模型

可依次导出,反射端和发射端的几何参数依据实验参数取值。

3 计算结果与分析

单轴式声悬浮通常工作于声介质的谐振状态以获得足够强的声场和足够大的声悬浮力。为了确定谐振状态时反射端到发射端的谐振距离,计算了声辐射功率 P 随 kH 的变化,结果如图3所示。图中每一个峰对应于声场的一种谐振模式,依次称为模式1、模式2、模式3和模式4,相应的 H 值在实验条件下分别为12.1mm, 23.4mm, 34.6mm和45.6mm,与实验观测值11.9mm, 22.7mm, 34.1mm和44.3mm十分吻合。

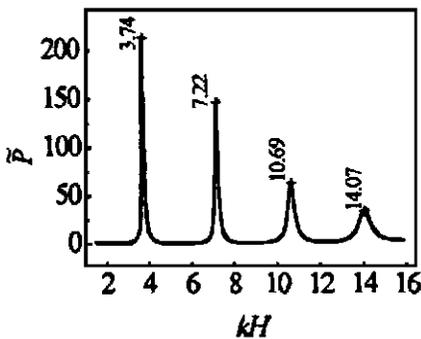


图3 声辐射功率 P 与 kH 的关系

图4是当 $kR_a = 3.858$ 、 $kR = 12.334$ 、 $kR_b = 5.092$ 时模式4下声辐射力的时间平均势的分布等高线图。图中有4个势阱,其中靠近反射面和发射面的两个势阱是以对称轴为轴心的势能极小值圆环,其余两个是位于对称轴上的势能极小值点。对照图4和图1,可见数值计算对悬浮位置的预测与实验吻合得非常好,并且两个圆环形势阱很好地解释了实验中靠近反射端和发射端的两个样品偏离对称轴的现象。

为了进一步研究样品在声场中的受力情况,下面考察沿着竖直(z)方向和水平(x)方向的势能和力的分布。图5是 $\rho = 0$ 时势能 U 和力的竖直分量 F_z 沿 z 方向的分布。图中每一势阱附近向上的最大回复力 F_{zM} 决定了该势阱可悬浮样品重量的大小。在某一势阱处可悬浮样品的最大密度为:

$$\rho_s = \left[\frac{3}{2} F_{zM} k U_0^2 / g + 1 \right] \rho \quad (5)$$

其中 g 为重力加速度。可见,提高声源强度、降低重力水平或者采用密度大声速小的气体介质有利于提高声悬浮能力。

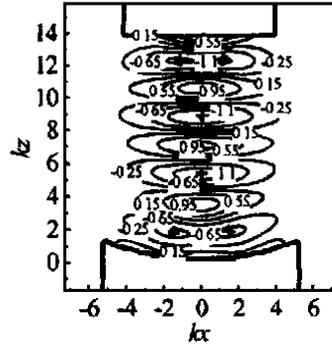


图4 $kR_a = 3.858$ 、 $kR = 12.334$ 、 $kR_b = 5.092$ 时模式4下 U 的分布

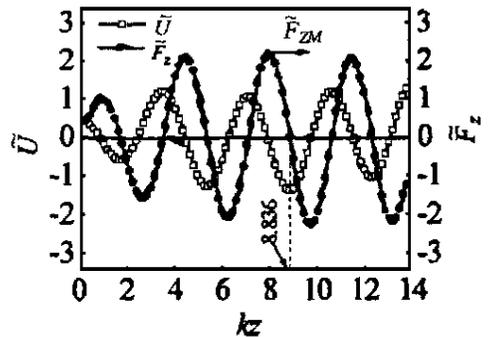


图5 $\rho = 0$ 时势能 U 和力的竖直分量 F_z 沿 z 方向的分布

图6是 $kR_a = 3.858$ 、 $kR_b = 5.092$ 时模式4下靠近反射面的一个势阱的 F_{zM} 、 $F_{\rho M}$ 、 k_z 和 $k\rho$ 随反射面曲率半径 kR 变化的情况,当 $kR = 12.334$ 时 F_{zM} 和 k_z 取得最大值, $F_{\rho M}$ 和 $k\rho$ 随 kR 的增大而减小。这说明,当 $kR_a = 3.858$ 、 $kR_b = 5.092$ 时采用 $kR = 12.334$ 附近的反射面可以使模式4下靠近反射面的一个悬浮位置获得较好的悬浮性能。

4 结论

在一种单轴式声悬浮模型的基础上采用边界元方法计算了入射声场并对样品在声场中悬浮位置、

受力特性、悬浮能力和悬浮稳定性进行了讨论。分析表明,提高声源强度、降低重力水平或者采用密度大声速小的气体介质有利于提高声悬浮能力。另外,采用适当曲率半径的凹球面反射端能够提高模式 4 下靠近反射面的一个悬浮位置的悬浮性能。

参考文献:

[1] D. M. Herlach, R. F. Cochrane, I. Egry et al. Containerless processing in study of metallic melts and their solidification[J]. Int. Mater. Rev., 1993, 38: 273-347.

[2] K. Ohsaka, E. H. Trinh, M. E. Glicksman. Undercooling of acoustically levitated molten drops [J]. J. Cryst. Growth, 1990, 106: 194-196.

[3] E. H. Trinh, K. Ohsaka. Measurement of density, sound velocity, surface tension, and viscosity of freely suspended supercooled liquids[J]. Inter. J. Thermophysics, 1995, 16: 545-555.

[4] T. G. Wang, E. H. Trinh, A. P. Croonquist et al. Shapes of rotating free drops[J]. Phys. Rev. Lett., 1986, 56: 452-455.

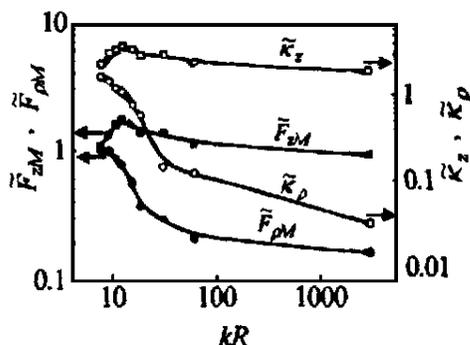


图 6 反射面曲率半径 R 对悬浮性能的影响

[5] 解文军, 曹崇德, 魏炳波. 声悬浮的实验研究和数值模拟分析[J]. 物理学报, 1999, 48: 250-256.

[6] L. P. Gor'kov. On the forces acting on a small particle in an ideal fluid[J]. Sov. Phys. Dokl., 1962, 6: 773-775.

[7] M. Barmatz, P. Collas. Acoustic radiation potential on a sphere in plane, cylindrical and spherical standing wave fields[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1985, 77: 928-945.

祝贺冯绍松教授 70 华诞

今年 4 月 22 日是上海市声学学会第四届理事会理事长冯绍松教授 70 华诞,在此,我们表示衷心的祝贺。

冯绍松教授 1931 年 4 月 22 日出生于江苏无锡,1952 年毕业于上海同济大学物理系后留校任教。1957 年,在“向科学进军”口号的激励下,考取中国科学院研究生(导师:应崇福院士),同年被派往苏联科学院声学研究所攻读博士学位,师从安德列耶夫院士,专攻非线性声学理论。1960 年回到中国科学院声学研究所,1962 年调至中国科学院声学研究所东海研究站,1979 年起历任副站长,站长等职。1979 年曾应邀赴前西德汉堡大学担任访问学者。

冯绍松教授主要致力于流体非线性声学理论和应用的研究,论著颇丰,编译和编辑出版了多种专著和刊物。早在 1956 年,就曾参与翻译苏联 1954 年出版的“超声的简单实验”一书,这是国内较早介绍前苏联超声实验技术的专著,也是当时国内一些大学物理教师准备超声实验教学的参考书之一。60 年代,参与并负责上海市声学工作委员会编译出版的“声学译丛”中的“水声学”分册。70 年代,先后参与中国“大百科全书”、“当代新科技辞书”(物理卷)的撰写与编辑,以及合译出版“水声工程原理”(国防出版社)、“海洋声学”(科学出版社)等译著。

冯绍松教授长期从事非线性声学中的反射和折射问题及海洋中声混响问题的研究,近年来,又致力于研究反射体的反射信号的特征、液体中激光发声机理的研究等。在国内外学术刊物发表论文百余篇,一些研究项目曾获得全国科学大会奖、国家海洋局重大科技成果奖和上海市科技进步奖。

冯绍松教授还是一位热心的声学学会活动家,当年,曾参予上海市声学学会的筹建和《声学技术》杂志的创办工作,并为此作出了艰辛的努力。先后担任第一、二、三届学会的副理事长,第四届学会的理事长。在他任职期间,学会在国际往来、学术交流、科普教育等方面都有长足进展,如上海市声学学会与香港声学学会学术交流往来;组织超声诊断专家赴浙江、安徽边远地区开展专家门诊等。他长期担任《声学技术》的主编,为征集稿件、筹措经费尽心尽责。《声学技术》1986 年开始向国内外公开发刊,深受好评,冯先生功不可没。冯绍松教授还曾担任中国声学学会第一、二、三届的常务理事,水声分科学会副主任委员,《应用声学》副主编,上海市科协第三、四届委员。

近年来,冯先生虽视力减退,但仍关心学会的各项工作。孜孜不倦的敬业与创新精神,给年轻一代树立了学习的楷模。值此 70 华诞之际,我们衷心祝愿他健康长寿,万事如意。

上海市声学学会办公室