

声频下驻波管中微粒的悬浮现象及其相位多普勒测量

吴 嘉 席葆树 许宏庆

(清华大学力学系 北京 100084)

2001 年 2 月 2 日收到

摘要 本文在声频信号下发现驻波管底部的微小颗粒群在一定声场强度下会腾空而起, 在管中形成稳定的悬浮层。通过相位多普勒 (PDA) 测量发现, 只有粒径在一定范围内的颗粒才能稳定悬浮在管中, 且颗粒悬浮层中颗粒的粒径按一定的高度规律分布。这一结果在粉尘颗粒分离、分级中有广阔的应用前景。

关键词 驻波管, 颗粒悬浮现象, 相位多普勒测量

Particles suspension in standing-wave tube under acoustic frequency and its phase Doppler measurements

WU Jia XI Baoshu XU Hongqing

(Mechanical department of Tsinghua Univ., Beijing 100084)

Abstract Particles at the bottom of acoustic-frequency standing-wave tube will rise high in the air under sufficient high intensity of the acoustical field and form stable particle suspending layer. The PDA measurement of the particle layer shows that only the particles whose diameters are in certain range can suspend in the tube, and that distribution of the particle size follows some regularity. The result may be used for particles separation and size classification.

Key words Standing-wave tube, Particle suspension phenomenon, PDA

1 引言

驻波声场对其中微小颗粒的作用问题十分复杂, 由于涉及非线性声学许多数学上的障碍, 理论方面的研究十分困难。由于颗粒在声场辐射压的作用下悬浮在空中, 这对材料的无容器加工无疑具有十分重要的意义。

本文就是关于颗粒声悬浮现象的。一些学者^[1,2]在实验中发现, 在超声频率下, 垂直放置在驻波管底部的颗粒会在一定的声场强度下运动到驻波波腹或波节平面, 并聚集在那里形成稳定的悬浮层。生物学家甚至已经利用这种现象分离细胞液混合物中的微小颗粒^[3]。他们的作法是这样的: 将细胞液和其中颗粒的混合

物倒入垂直放置的驻波管中, 在超声频率下, 其中的颗粒会在驻波声场的波腹或波节平面聚集, 在形成这样的稳定多层悬浮状态之后, 利用特定的装置将这些聚集层内的颗粒分离。本文在声频 (1kHz 左右) 下的驻波管中发现了同样的颗粒悬浮现象, 由于低频条件下驻波的波腹波节平面间距离较大, 对于颗粒悬浮层状态的观察以及实际应用中颗粒的分离将更加容易。通过进一步的相位多谱勒测量发现, 只有粒径大小在一定范围内的颗粒才能从管底上升并悬浮在波腹或波节平面, 而且悬浮层中的颗粒粒径分布有一定的规律。文中利用经典的理论分析结果对这一现象作了初步的分析。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。信号由 XD1022 低频信号发生器供给, 经功率放大器 (Model-SA600) 驱动低频大功率电动扬声器 (200W)。

驻波管为一壁厚 3mm 的玻璃管, 内径 55mm, 管长 505mm。为保证反射特性, 反射端采用 2mm 厚的钢板。测量声场时, 反射端钢板中间打有 $\phi 7\text{mm}$ 的孔, 1/4 英寸的电容式传声器由此引入, 测量其中声压。颗粒放入后反射端采用完全封闭的钢板, 颗粒初始置于管底, 即反射端钢板上。

电容传声器信号由 FDC-2A 型传声放大器测量, 可接计算机通过 A/D 板进行采集, 便于信号后处理。实验中使用的颗粒为一种多孔玻璃小球, 粒径基本分布在 $50\mu\text{m}$ 之内, 其材料真密度为 $2.5 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 。实验前, 为了避免颗粒间由于潮湿产生粘连而结块, 将实验中所使用的所有颗粒在干燥箱中经过充分加热, 并通风除湿, 然后保留在干燥器皿中备用。

由于电容传声器无法在高尘环境中使用, 故先不放置颗粒, 在特定频率下测量出驻波管反射端声压 (即声压波腹平面) 和电动扬声器输入电压之间的关系曲线。实验时反射端完全封闭, 通过测量扬声器的输入电压并利用上

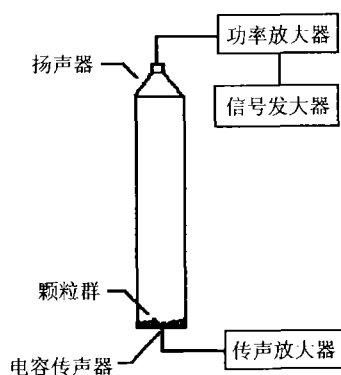


图 1 实验装置简图

述关系曲线得到驻波场的声压级, 即驻波强度。在共振频率下管中非线性现象最为强烈, 实验中选取驻波管的一阶和二阶共振频率 (即 330Hz 和 668Hz, 采用实验方法得到) 作为实验频率。由声学理论可知, 上述频率远小于驻波管的截止频率, 即管中仅有平面波传播。 $(\omega < 2.41c/R)$, 其中 ω 为信号角频率, c 为声速, R 为驻波管半径)

3 颗粒分层悬浮现象

图 2 给出了用 CCD 拍摄的在驻波管一阶共振频率下, 管底颗粒 (多孔玻璃小球) 群在一定的声场强度时形成稳定悬浮层的过程。驻波管的初始状态如图 2(a) 所示, 在一阶共振频率 (330Hz) 下打开扬声器, 逐步调节功放输出, 增加驻波管内的声压级。由一般的驻波理论可知, 颗粒开始所处的位置 (即管底) 为速度波节平面, 即压力波腹平面。在管内声压级较低时颗粒并无偏离该位置的运动迹象, 仅在管底作微小振动, 随着驻波强度的提高, 部分颗粒 (粒径较小的颗粒) 开始在管底大幅度的跳跃, 有偏离管底向上运动的趋势。进一步地, 这种运动延伸到驻波管整个下半部分, 如图 2(b) 所示。由观察可知, 颗粒由管中央上升, 到速度波腹平面附近 (即管的中部) 后沿四周的管壁下落。图 2(b) 中的箭头所指即为颗粒运动方向。此时驻波的强度 (即反射端声压) 为 142dB。

当驻波强度继续增大, 上述颗粒运动逐步加剧。逐渐地, 在管的中部, 即压力波节平面附近, 颗粒浓度加大, 如图 2(c) 所示, 此时驻波的强度为 147dB。继续增加驻波强度, 就会在压力波节平面附近产生一清晰稳定的颗粒悬浮层, 如图 2(d) 所示, 此时驻波强度达到 151dB。值得注意的是, 颗粒的悬浮状态十分稳定, 且悬浮层有一定的厚度。当驻波强度再进一步提高时, 管中颗粒悬浮层开始失稳, 直至破坏, 说明悬浮状态和驻波强度有关, 存在最佳悬浮声强。

进一步地, 对二阶共振的情况也进行了观察研究。图 3 给出了二阶共振频率下管内最终

的悬浮情况。当声压级达到一定大小并且不再变化时, 颗粒层逐渐形成并稳定在由反射端向上的第一个速度波腹平面附近, 如图 3(a) 所示。如果此时给驻波场一个扰动, 如改变扬声器输出, 则悬浮层中一部分颗粒会上行, 分别到达下一个速度波腹和波节平面附近后再次形成清晰的悬浮层, 如图 3(b) 所示。通过实验观察可以看到, 在该状态下, 两个速度波腹平面的悬浮层明显比速度波节平面的悬浮层清晰、稳定, 只有在驻波强度改变时, 该平面悬浮层中的颗粒才会发生向上层或下层的迁移; 而速度波节处的颗粒层极不稳定 (包括管底的速度波节平面), 即使在声场条件不变的情况下颗

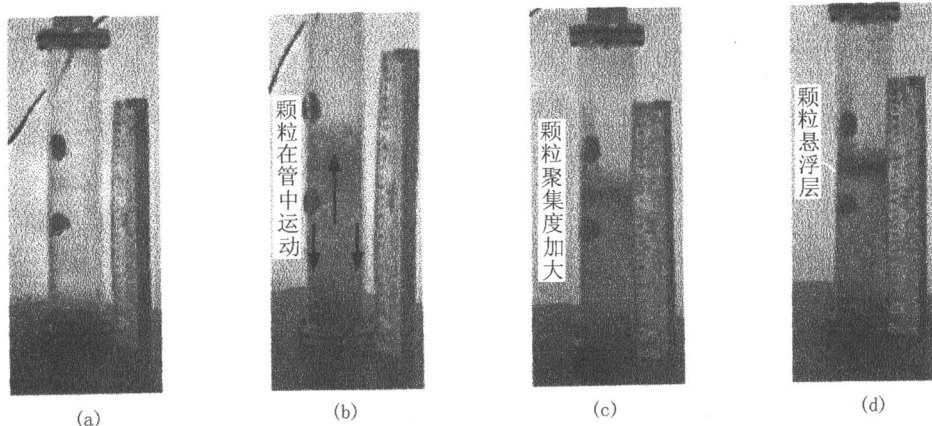


图 2 颗粒悬浮层的形成

(a) 驻波管中的起始状态 (b) 颗粒开始在管中跟随声流的旋涡运动 (c) 颗粒向压力波节平面聚集 (d) 形成颗粒悬浮层

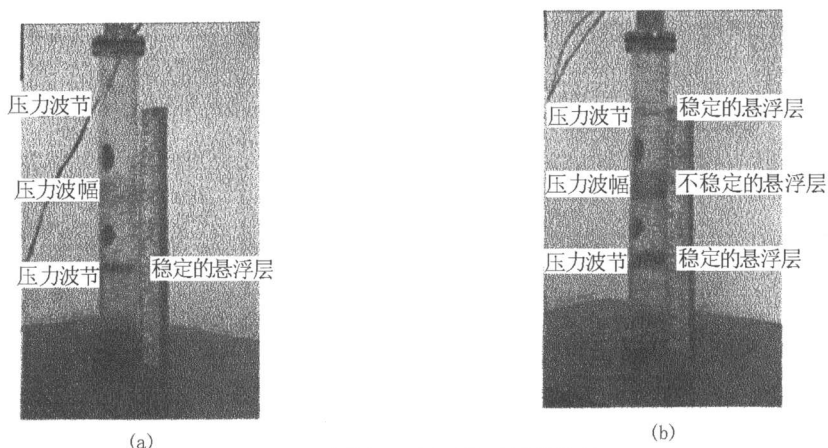


图 3 二阶共振下悬颗粒浮层的状况

(a) 单一悬浮层的情况 (b) 三层悬浮的情况

粒也在不停的跳动, 其中部分颗粒会向上或向下进入稳定悬浮层。

实验中继续对更高阶共振状态下管中的情况作了观察, 基本过程及特点与上面类似。

如上所述, 这种驻波管中颗粒的分层悬浮现象曾经在超声频率下被发现, 但在可听声范围内未见报道。虽然悬浮层的稳定性各不相同, 但颗粒可以悬浮在波腹和波节的任意平面, 即层间间隔 $1/4\lambda$, 这与超声下 $1/2\lambda$ 的结果有所不同。进一步地, 我们利用激光多谱勒相位技术对悬浮层中的颗粒粒径分布进行了测量。

4 悬浮层颗粒的 PDA 测量及结果分析

相位多谱勒技术 (PDA — Phase Doppler Anemometer) 是近来发展迅速的一种动态测量颗粒粒径的技术, 在两相流动问题的测量中有十分广泛的应用。为了研究上述悬浮状态中颗粒粒径的分布状态, 实验中采用丹麦 Dantec 公司的 PDA 系统对一阶共振频率下悬浮层中 (速度波腹平面附近, 即管长的一半处, 距管底反射端 252.5mm) 颗粒粒径的轴向分布作了初步测量, 结果如图 4 所示。测量时声场强度为 150dB。此时的颗粒悬浮层状态十分稳定, 通过观察可以发现, 颗粒在径向平面内 (即驻波管的横断面) 跟随一定的旋涡运动。

通过图 4 首先可以看出, 处于悬浮状态的颗粒粒径大小在一定的范围内, 本实验中为 $20\mu\text{m}$ 。而且悬浮层中的颗粒粒径分布自上而下有明显的规律性, 即上面的颗粒粒径较小, 而下面的颗粒粒径较大。这一结果无疑为不同颗粒粒径分离、颗粒粒径分级找到了一条可行的途径。

其实 King^[4] 很早就从理论上分析了声场中微小球形颗粒的受力。在理想不可压介质的假设下, King 给出了平面驻波和平面行波环境中粒径远小于声波波长的刚性球形颗粒的受

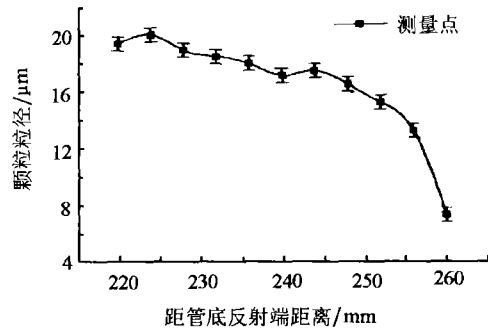


图 4 颗粒粒径的 PDA 测量结果

力公式。在驻波下, 当颗粒粒径远小于波长 (实验波长在 cm 量级, 而颗粒大小为 μm 量级, 即 $r \ll \lambda$) 且颗粒密度远大于声传播介质的密度时, 作用在颗粒上的辐射压力沿管长有如下表达式:

$$\bar{P} = \frac{10}{3} \frac{\pi^2 r^2}{\lambda} \bar{E} \sin \frac{4\pi x}{\lambda} \quad (1)$$

$$\text{其中 } \bar{E} = \frac{2\pi^2 \rho_p}{\lambda^2} |A|^2$$

其中, r 为颗粒半径, λ 为波长, x 为颗粒所处位置距管底反射端的距离, $\bar{E}$ 是驻波管中的平均能量密度, ρ_p 是介质密度, $|A|$ 为波动方程中速度势 ϕ 的振幅。在驻波强度一定的情况下管中各点的 $\bar{E}$ 具有相同的表达式。在特定的频率下 (即 λ 一定), 当驻波强度一定时, 由 (1) 式可以给出半径为 r 的球形颗粒 (假设实验中的多孔玻璃小球为标准球形) 所受辐射压沿管长的变化曲线, 如图 5 所示。

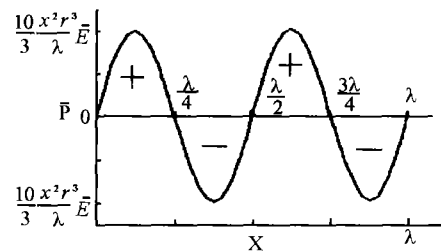


图 5 颗粒沿管长所受到的辐射压

由此可以看出, 颗粒在速度波节和波腹平面所受的辐射压力均为零。在它们的中间截面所受的辐射压力最大, 但方向周期性变化。另

(下转第 17 页)

表 3 反演声速剖面的均方根误差、平均误差随沉积层参数的变化值

密度 (g/cm^3)	1.30	1.50	1.70	1.80	1.90
均方根误差 (m/s)	1.20	1.98	0.53	1.57	1.82
平均误差 (m/s)	1.83	3.98	1.38	2.20	3.52
传播损失系数 (dB/λ)	0.10	0.30	0.40	0.50	0.80
均方根误差 (m/s)	1.72	0.53	0.89	1.57	1.28
平均误差 (m/s)	2.95	1.40	1.27	2.20	1.06
声速 (m/s)	1600	1650	1700	1750	1800
均方根误差 (m/s)	1.59	1.57	1.58	1.59	1.59
平均误差 (m/s)	2.22	2.20	2.10	2.10	2.10

速剖面的影响不明显,在工程应用中可以忽略不计。

参 考 文 献

- 1 Munk M, Wunsch C. *Deep-Sea Res.*, Part A, 1979, **26**: 123–161.
- 2 Jin G, Lynch J F, Chiu C S, et al. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1996, **101**(1): 193–205.
- 3 Lindsay C E, Chapman N R. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1993, **18**(3): 224–231.
- 4 Lu I T. *J. Computational Acoustics*, 1997, **5**(2): 193–218.
- 5 张忠兵, 马远良, 倪晋平等. 西北工业大学学报, 2002, **20**(1): 36–39.

- 6 Hamilton E L. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1980, **68**(5): 1313–1340.
- 7 Porter M. The KRAKEN normal mode program. SACLANTCEN Mem. SM-245(1991).
- 8 Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, et al. *Computational Ocean Acoustics*. New York: AIP press, 1993.
- 9 Jesus S M, Porter M B, Stephan Y, et al. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2000, **25**(3): 337–346.
- 10 Porter M B, Buckner H P. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1984, **82** (4): 1349–1359.
- 11 Kuperman W A, Collins M D, Perkins J S, et al. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1990, **88**(6): 1802–1810.

(上接第 24 页)

外非常有意义的一点是,在管中辐射压力均指向速度波腹平面,这就是该平面悬浮状态比较稳定的主要原因。(图中的“十”、“—”表示出了辐射压的方向)

通过图 5 还可以看出,颗粒在速度波腹平面下方所受到的辐射压力逐渐增大,且有极大值。这个力的方向与颗粒重力方向相反,起到平衡的作用。这就是所悬浮的颗粒粒径在一定范围内且粒径分布有一定规律的主要原因。

另外还需说明一点的是,关于悬浮层的形成以及决定可以稳定悬浮状态的声场强度与声流的状态及其临界值有关,关于驻波声流状态的可视化研究可以参见参考文献 [5]。

5 结 论

本文在低阶频率下的驻波管中研究了微小

颗粒的悬浮现象。与以往超声条件下的现象有所不同,颗粒悬浮层间的距离为 $1/4\lambda$ 。速度波腹平面的颗粒悬浮层状态稳定,且通过进一步的 PDA 测量发现,其中的颗粒粒径分布有一定的规律;速度波节平面的颗粒悬浮层处于不稳定的状态。这一结果在粉尘工业中有很大的应用前景。

致谢 本文在 PDA 实验中得到了清华大学热能工程系阎德忠老师的帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Gould R K, Coakley W T, Grundy M A. *Ultrasonics*, 1992, **30**(4): 239–244.
- 2 Whitworth G, Coakley W T. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1992, **91**(1): 79–85.
- 3 Hawkes J J. *J. Phys.*, D, 31, 1998: 1673–1680.
- 4 King L B. *Pro. R. Soc. Lond.*, 1934, A147: 211–240.
- 5 吴嘉等. 声学学报, 2002, **27**(1): 23–26.