

穿孔板噪声谱分析研究

冯中营^{1,2}

(1. 太原工业学院理学系, 山西 太原 030008; 2. 陕西师范大学应用声学研究所, 陕西 西安 710062)

摘要:水力空化与超声空化是产生空化的两种主要方法, 国内外研究者对超声空化的噪声谱研究的非常多。但对于水力空化, 一般仅进行应用方面的实验研究, 而疏于声学方面的研究。为进一步了解水力空化的声学特性, 本文理论上进行板的振动的计算, 并用 ANSYS 模拟穿孔板的振动, 研究其振动频率与测得的空化噪声谱之间的联系。研究结果表明, 在特定的条件下, 测得的噪声谱呈现明显线状谱分布的超声成分, 此时高速水流冲击穿孔板引起了穿孔板的强烈振动, 发出超声, 但在一般情况下, 多孔板水力空化噪声谱并不含超声成分, 也不具有明显线状谱特性。

关键词:水力空化; 穿孔板; 噪声谱

中图分类号: O426

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2010.03.028

0 引言

空化是一种非常复杂的流体力学现象, 空泡在液体中运动和崩溃时产生的局部高温高压、发光、放电、冲击波、高速射流等极端物理条件, 能使在一般条件下难以实现的化学反应得以实现。产生空化的方法一般有压电换能器超声空化方法与水力空化方法^[1-3]。超声空化的处理量是非常有限的, 水力空化技术有成本低、装置简单的特点, 水力空化引起了国际上声化学应用研究者的广泛关注, 但主要基于经验公式以及具体不同状况的实验曲线给出的结果与特征趋势来考虑问题。对于实际要求来说, 理论上的精确预示与计算有关的声波特征, 如频率、强度、声场分布等等, 无疑能更有利于它的应用以及控制。因而, 对流体动力发生器声波的产生和特征的进一步研究是今后值得深入探讨的研究方向。本文在参考了国内外文献的基础上对水力空化装置多孔板产生的噪声进行分析, 研究其理论计算、数值模拟与实验数据的一致性问题。

1 穿孔板振动频率的理论计算与 ANSYS 模拟计算

1.1 穿孔板振动频率的理论计算

将所有的穿孔板简化看作圆板, 由于穿孔板在实验中是用法兰盘固定的, 因此可以近似认为

穿孔板的振动为圆板在周边钳定条件下的振动, 周边钳定的板的振动方程为^[4-6]:

$$\frac{EK^2}{\rho(1-\sigma^2)} \nabla^4 \eta \Big| \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

其中: $\eta(t, x, y)$ 代表板中心面上任何一点在垂直方向的位移;

$K = \frac{h}{\sqrt{12}}$ 为截面回转半径, 而 h 为板的厚度;

$$\nabla^4 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right)^2 = \left(\frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \right).$$

周界钳定时, 圆板振动的边界条件为:

$$\left. \begin{aligned} (\eta_a)_{(r=a)} &= 0 \\ \left(\frac{\partial \eta_a}{\partial r} \right)_{(r=a)} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

求解得圆板在周界钳定边界条件下的振动频率为 (其中 μ_n 为解方程 (1) 过程中查表得到的柱贝赛尔函数的根值):

$$\text{简正频率: } f_n = \frac{\mu_n^2 h}{4\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} \quad (2)$$

其基频为:

$$f_1 = \frac{3.20^2 h}{4\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} = 7.097 \text{ kHz} \quad (3)$$

其泛频为:

$$f_2 = \frac{6.30^2 h}{4\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} = 27.749 \text{ kHz} \quad (4)$$

$$f_3 = \frac{9.44^2 h}{4\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} = 62.099 \text{ kHz} \quad (5)$$

1.2 穿孔板振动频率的 ANSYS 模拟计算

ANSYS 是常用的有限元分析软件^[7,9], ANSYS 中的模态分析模块可以分析穿孔板的振动模态及对应的振动频率. 通过 ANSYS 对半径为 $a=0.0375$ m, 厚度为 $h=0.004$ m 边界钳定的不同孔径不同孔个数的圆形薄钢板进行模态分析. 在 ANSYS 前处理模块中, 利用强大的实体建模和网格划分工具, 指定分析类型为模态分析, 定义单元类型为四面体单元, 材料参数分别为: 泊松比 $\sigma=0.28$, 杨氏模量 $E=19.5 \times 10^{10}$ N/m², 密度 $\rho=7.8 \times 10^3$ kg/m³, 并使用进行智能网格划分. 利用 ANSYS 分析计算模块中的模态分析模块, 施加载荷和边界条件并假定穿孔板在理想的周边钳定条件下振动, 进行求解. 最后在后处理模块中的通用后处理模块获得求解过程的计算结果并对其进行显示. 得出各穿孔板的各阶振动模态及其振动频率如表 1 所示. 其分析结果表明穿孔板小孔的数量与直径对整个钢板振动模态的影响基本可以忽略.

表 1 穿孔板的各阶振动频率表

Table 1 The vibration frequency of the orifice plates

振动 阶次	不同板的振动频率/kHz		
	1 mm 孔径 36 个孔	2 mm 孔径 9 个孔	3 mm 孔径 1 个孔
1	6.993	7.018	6.979
2	14.351	14.336	14.270
3	14.358	14.731	14.285
4	23.060	23.256	22.906
5	23.242	23.451	22.960
6	26.131	26.653	26.002
7	33.333	33.784	32.868
8	33.338	33.881	32.874
9	38.983	38.536	38.691
10	39.032	40.882	38.786
11	42.763	42.752	42.115
12	42.766	43.590	42.133

通过 ANSYS 模拟计算可知, 在周边钳定条件下, 本文实验所用穿孔板的振动频率随孔径及孔数目的变化很小(下文选用 3 mm 孔径 1 个孔的多孔板为代表进行噪声采集与频谱分析), 其可听声范围内的振动频率大约为 7、14 kHz. 其中 7 kHz 的振动频率与理论计算的周边钳定的圆板的振动频率相吻合.

2 穿孔板(3 mm 孔径 1 个孔)空化噪声谱的测量与分析

利用水听器采集穿孔板产生空化时的噪声, 并进行频谱分析, 分析结果见图 1~3.

图 1 表明, 在进口压强为 0.4 MPa 时, 5 kHz 以下的噪声谱仍具有明显的线状谱特性, 主峰值频率为 0.464、0.991、1.660、2.354、2.881、3.545

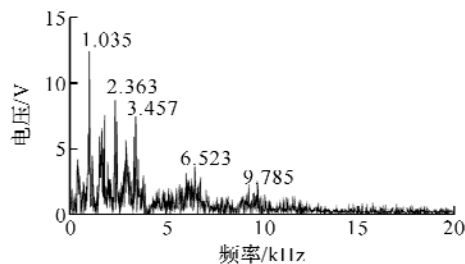


图 1 进口压强为 0.4 MPa 时的噪声谱

Fig. 1 Acoustical amplitude spectra at 0.4 MPa inlet pressure

kHz, 与低进口压强时比较, 主峰值频率略有变化. 在 5~10 kHz 频率范围内, 呈现主峰值频率分别为 6.523 kHz 和 9.785 kHz 的 2 组峰簇. 此压强下, 靠近穿孔板位置时, 人同样能听到清晰的哨声.

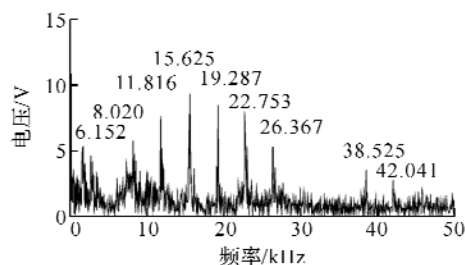


图 2 进口压强为 0.5 MPa 时的噪声谱

Fig. 2 Acoustical amplitude spectra at 0.5 MPa inlet pressure

图 2 表明, 在进口压强为 0.5 MPa 时, 测得的噪声谱中出现明显的线状谱, 并且主峰值频率超出可听声频率范围, 扩展到大于 20 kHz 超声频段. 主峰值频率为 6.152、8.020、11.816、15.625、19.287、22.754、26.367、38.525、42.041 kHz, 具有明显的谐波、分谐波特性, 与低进口压强下的噪声谱完全不同.

图 3 表明, 继续增大进口压强时, 测得的穿孔板的空化谱中未出现超声频率成份, 仅有可听声成份. 在 10 kHz 频率以下呈现几组峰簇, 最大的峰簇主峰值频率为 6.016 kHz, 这一频率与在 0.5 MPa 进口压强下出现超声频率时的噪声谱频率 6.152 大致相同. 其它主峰值频率为 0.957、1.934、3.438、4.395 kHz.

3 mm 孔径 1 个孔的穿孔板空化时测得的噪声谱具有明显的线状谱特征. 在增大进口压强时, 没有出现主峰值向高频段转移的特征, 仅在 0.5 MPa 进口压强下测得了超声频率, 说明只有在此条件下才能够激发穿孔板在空化时产生超声频率段的噪声. 图 2 中可听声部分的峰值频率 8.020 kHz 和 15.625 kHz 对应的理论计算求得的穿孔板的振动频率为 6.979 kHz 和 14.270 kHz.

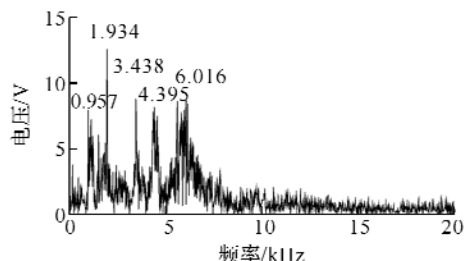


图3 进口压强为0.6 MPa时的噪声谱

Fig. 3 Acoustical amplitude spectra
at 0.6 MPa inlet pressure

两者之间具有较好的符合性,计算的相对误差分别为12.98%和8.67%,这可能是由于计算是理想条件,而实际中的条件是很复杂的.对比图2中通过实验测得的噪声谱的主频率与表1中通过ANSYS计算求得的穿孔板的振动频率,可以发现,无论在可听声部分还是在超声频段部分,实验测得的频率值都与ANSYS理论计算值具有很好的符合性,所以说当特定穿孔板在特定条件下被激发而发出超声时,噪声主要是由于板的振动而产生的^[10-11].

由于实验中所用的穿孔板并非完全是周边钳定条件,这与理论计算和模拟中的周边钳定条件是有区别的,这可能会造成实际测的频谱峰值与理论计算模拟得出的结果不一致.在实验中,穿孔板是用两个法兰盘通过螺丝固定的,穿孔板周边一定面积的部分都被法兰盘所固定,这会影响穿孔板的振动频率;同时法兰盘也不是完全固定的,整个实验装置是放置在支架上的,所以穿孔板会随法兰盘的振动而振动,这也会对穿孔板的振动频率造成影响;水听器与穿孔板的位置是通过调整有机玻璃管道与不锈钢管道的位置来实现的,各个法兰盘中间是通过硅胶板制成的密封圈密封的,硅胶板是弹性非常好的材料,它的加入也会影响穿孔板的振动频率.由于上述各种原因及更多的未知因素,造成由水听器测得的噪声频谱峰值与计算值不符.

3 结 语

理论计算得到的无孔圆板钳定振动在低频20 kHz以内时,基频为7.097 kHz,泛频为27.749 kHz.从ANSYS模态分析得出,各种穿孔板在振动频率近似是相同的,而且孔的直径与个数对穿孔板的振动频率影响非常小,模态分析得出穿孔板的振动频率6.979 kHz、26.002 kHz与理论计

算的圆板的基频、泛频相吻合.当特定穿孔板被激发产生超声时,通过水听器测得的频率与ANSYS模拟计算得到的频率及理论计算频率值也具有很好的符合性,从而说明理论计算、有限元分析与实验结果是吻合的.

本实验初步对水力空化的装置穿孔板在其振动模态与噪声谱方面进行了研究,但水力空化的装置还有很多,例如簧片哨、文丘里管等,单就穿孔板而言不同的材料、孔径、孔数目等也会产生不同的空化效果,对其进行多方面的分析研究有助于找出其规律性,为增强空化效果或避免空化灾害提供了很好的思路.

参考文献:

- [1] 秦平力,李端勇,张昱.利用Origin7.0软件处理超声波声速实验数据[J].武汉工程大学学报,2009,31(9):69-71,77.
- [2] 孙华,李胜清,付健健,等.超声波辅助合成离子液体及其性能研究[J].武汉工程大学学报,2007,29(3):14-17.
- [3] 胡鹏,余海潮,邓金阳.超声化学法制备PbS纳米立方体[J].武汉工程大学学报,2008,30(4):73-75.
- [4] Testud P, Moussou P, Hirschberg A, et al. Noise generated by cavitating single-hole and multi-hole orifices in a water pipe[J]. Journal of Fluids and Structures, 2007, 23: 163-189.
- [5] 应崇福.超声学[M].北京:科学出版社,1990:457-513.
- [6] 冯若.超声手册[M].南京:南京大学出版社,1999:78-717.
- [7] Koch C. Coated fiberoptic hydrophone for ultrasonic measurement[J]. Ultrasonics, 1996, 34(6): 687-689.
- [8] Koch C. Measurement of ultrasonic pressure by heterodyne interferometry with a fibertip sensor[J]. Applied Optics, 1999, 38(13): 2812-2819.
- [9] Phelps A D, Leighton T G. The subharmonic oscillations and combination frequency subharmonic emissions from a resonant bubble: their properties and generation mechanisms [J]. Acustica - Acta Acustica, 1997, 83(1): 59-66.
- [10] Neppiras E A. Acoustic cavitation series, part one: Acoustic cavitation: an introduction [J]. Ultrasonics, 1984, 22(1): 25-28.
- [11] Moholkar V S, Sable S P, Pandit A B. Mapping the cavitation intensity in an ultrasonic bath using the acoustic emission [J]. AIChE Journal, 2000, 46(4): 684-693.

Analysis research on the noise spectrum of perforation plate

FENG Zhong-ying^{1,2}

(1. Department of Science, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China;

2. Institute of Applied Acoustics, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: The two main methods to cause cavitation are the hydrodynamic cavitation method and the supersonic cavitation method. The noise spectrum caused by supersonic cavitation is widely studied by domestic and foreign researchers. But regarding the hydrodynamic cavitation, only the experimental study on application is studied generally, and the acoustics research is very limited. To further understand the acoustics characteristic of hydrodynamic cavitation, the theory computation and the ANSYS simulation of the vibration of the perforation plate have been performed to study the relation of the vibration frequency and the cavitation noise spectrum obtained. The conclusion is that under the specific condition, the noise spectrum obtained presents the obvious line spectrum distribution and has ultrasonic ingredient. In that situation, the high-velocity flow impacted perforation plate and caused the perforation plate to vibrate intensely and to send out ultrasonic. But in ordinary circumstances, cavitation noise spectrum caused by perforation plate includes no supersonic ingredient, also does not have the obvious line spectrum characteristic.

Key words: hydrodynamic cavitation; perforation plate; noise spectrum

本文编辑: 龚晓宁



(上接第 81 页)

Studies on syntheses and properties of waterborne polyurethane from castor oil

HE Lei, YANG Jun, TU Jie, YANG Liang-liang, KUANG Zhi-juan

(School of Materials & Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Waterborne polyurethane (WPU) was prepared by the reaction of castor oil (C. O.) with dimethoxypropionic acid (DMPA) and toluene diisocyanate (TDI). The effects of molar ratios of —NCO to —OH and DMPA content on the properties were investigated. The result showed that the castor oil based waterborne polyurethane had excellent film-forming property, high hardness, excellent fallibility and good resistances to water. The best experiment conditions were as follows: molar ratio of $n(\text{—NCO})/n(\text{—OH})$ was 2.2, DMPA content was 7.0 %, the temperatures of reaction and emulsification stage were 70 and 30 °C, respectively.

Key words: castor oil; waterborne polyurethane; waterborne coating

本文编辑: 龚晓宁