

文章编号: 1001-3806(2009)01-0018-03

水下气泡幕消光特性研究

马治国^{1,2}, 王江安^{1*}, 余扬², 石晟玮²

(1. 海军工程大学 电子工程学院, 武汉 430033; 2. 海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033)

摘要: 为了研究水下气泡幕对激光传输特性的影响, 采用米氏散射理论对水下气泡的消光截面和消光系数进行了计算, 并在此基础上采用朗伯特-比尔定律对水下气泡幕的消光特性进行了理论分析和实验验证, 取得了不同密度、不同厚度以及处于不同位置处气泡幕的透射光功率数据。结果表明, 透过气泡幕的光功率随气泡密度以及气泡幕厚度呈指数衰减, 而与气泡幕所处的位置没有密切关系。这一结论对舰船气泡尾流的光学探测是有帮助的。

关键词: 散射; 消光; 米氏理论; 气泡

中图分类号: O436.2 **文献标识码:** A

Light extinction properties of underwater bubble films

MA Zhi-guo^{1,2}, WANG Jiang-an¹, YU Yang², SHI Sheng-wei²

(1. College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to study the transmission properties of laser in bubble films, the extinction section and the extinction efficiency of bubbles were calculated by means of Mie scattering theory. The light extinction properties of underwater bubble films were analyzed theoretically and validated in laboratory based on the Lambert-Beer law. The laser power transmitted through bubble film of different density, thickness, and distances was measured with a power meter. The results indicated that the power decayed exponentially with the density and the thickness, but had no relation to the distance between the film and the detector. The conclusions are helpful for optical detection of bubble wakes of ships.

Key words: scattering; light extinction; Mie theory; bubble

引言

舰船在航行过程中会产生大量的气泡, 并在很长时间内存在。这就为通过尾流探测舰船提供了可能^[1-2]。由于气泡的存在, 水的光学特性与无气泡时会有显著的区别^[3-5]。气泡对光的影响主要是散射和吸收, 这就造成光强的衰减, 即消光。近年来, 众多学者围绕着气泡的光散射特性开展了研究, 而对气泡的消光特性则甚少涉足^[6-11]。作者从理论和实验两方面对水下气泡幕的消光特性进行了研究。

1 理论分析

1.1 单个气泡的消光特性

单个气泡的消光能力由消光截面 C_e 和消光系数 K_e 来描述。把气泡视为各向同性的均匀球体, 则其消光截面和消光系数可由米氏散射理论进行计算。

作者简介: 马治国(1978-), 男, 博士研究生, 现主要从事激光水下目标探测的研究。

* 通讯联系人。E-mail: gdyfzx@163.com

收稿日期: 2007-10-29; 收到修改稿日期: 2007-12-04

设气泡的直径为 D , 入射光波长为 λ , 气泡的尺度参量 $\alpha = \frac{\pi D}{\lambda}$, 则由米氏散射理论, 单个气泡的消光系数可表示为^[12]:

$$K_e = \frac{2}{\alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (1)$$

式中, a_n, b_n 为米氏散射系数, 是气泡的尺度参量 α 以及相对折射率 m 的函数。

单个气泡的消光截面为:

$$C_e = K_e \sigma \quad (2)$$

式中, σ 为气泡在迎着光传播方向上的投影面积。对于直径为 D 的球形气泡, $\sigma = \frac{\pi D^2}{4}$, 则有: $C_e = K_e \sigma =$

$$\frac{\pi}{4} K_e D^2。$$

从以上推导中可以看出, 消光系数 K_e 、消光截面 C_e 均是气泡直径 D 、入射光波长 λ 以及相对折射率 m 的函数。图 1 中给出了消光系数随气泡直径、入射光波长以及相对折射率的变化关系。由图 1a 可知, 随着气泡直径的增大, 消光系数呈现出一种波动的曲线, 这种曲线类似于阻尼振动所给出的振幅衰减曲线。波动

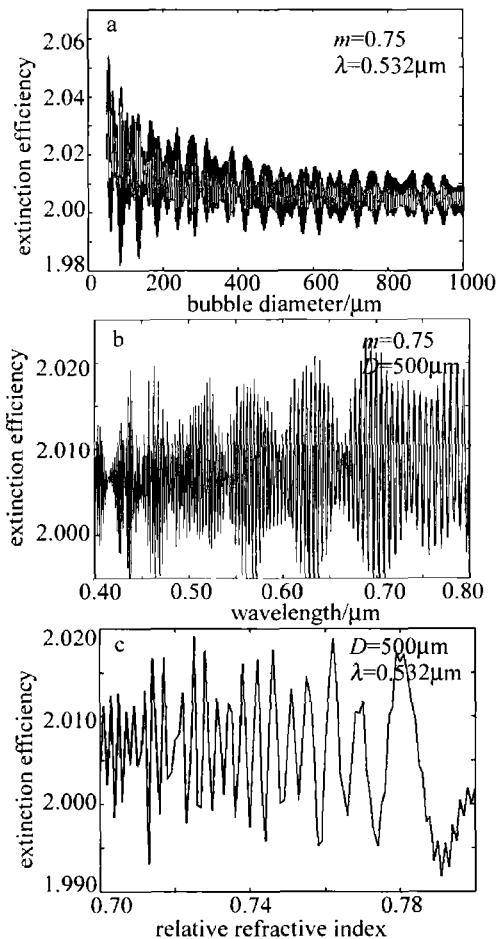


Fig. 1 The extinction efficiency of a bubble

的幅度随着气泡直径的增大而逐渐衰减,并最终趋向于2。由图1b可知,在可见光范围内,消光系数仅在1.995~2.025之间围绕2上下波动,变化范围在0.03内;可以认为消光系数与入射光波长的关系并不密切。由图1c可知,当相对折射率在0.75附近变化时,消光系数在1.990~2.020之间围绕2上下波动,变化范围在0.03内;可以认为,消光系数与相对折射率的关系也不密切。因此,消光系数与入射光波长以及相对折射率没有多大关系。根据(2)式可知,消光截面与入射光波长以及相对折射率也没有多大关系。

图2中给出了消光截面随气泡直径的变化关系,

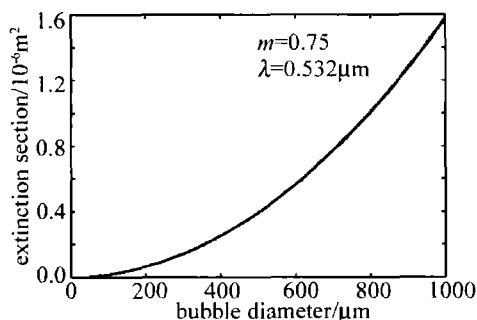


Fig. 2 The extinction section of a bubble

从中可以看出,消光截面大体上随气泡直径成2次曲线变化,气泡越大,消光截面越大,中间过程有非常微

弱的振荡。这主要是因为消光系数随气泡直径的变化较小,而消光截面与气泡直径的平方成正比,因此,由 $C_e = \frac{\pi}{4} K_e D^2$ 可知,消光截面更多地受到气泡直径的影响,近似为2次方关系。

1.2 气泡幕的消光特性

对于气泡幕,采用浊度来描述其消光特性。考虑一气泡幕对入射光进行不相关散射,则根据朗伯特-比尔定律,气泡幕的浊度 τ 由下式进行计算:

$$\tau = NK_e\sigma = NC_e \quad (3)$$

式中, N 为单位体积内的气泡数,即气泡密度。

由(3)式可以看出,气泡幕的浊度与气泡密度及单个气泡的消光截面成正比,气泡密度越大,浊度越大;气泡的消光截面越大,浊度越大。

1.3 透射光功率计算

如图3所示,激光在水中传播距离 L_1 后进入厚度为 l 的气泡幕,透射光传输距离 L_2 后被激光功率计接收,激光器与功率计之间的距离为 L 。

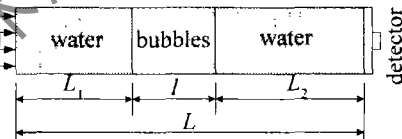


Fig. 3 Sketch map of tester

设激光器发射的光功率为 P_0 , 水体的浊度为 τ_0 , 气泡幕的浊度为 τ , 又设透射光功率为 P , 则由朗伯特-比尔定律,得:

$$P = P_0 \exp[-\tau_0(L_1 + L_2) - \tau l] = P_0 \exp(-\tau_0 L) \cdot \exp[-(\tau - \tau_0)l] \quad (4)$$

由(4)式可以看出,透射光功率随气泡幕浊度及气泡幕厚度呈指数衰减变化,气泡幕浊度越大,气泡幕越厚,则透射光功率越小;在激光器与接收器距离一定的情况下,若保持气泡幕厚度不变,则气泡幕位置的改变对透射光功率不会造成影响。

2 实验研究

2.1 实验装置

实验装置如图4所示,由激光器、气泡发生器以及

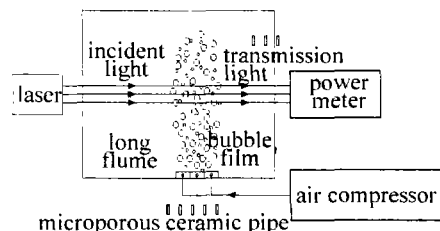


Fig. 4 Sketch map of the measurement system

激光功率计组成。其中,光源使用的是输出功率为100mW、波长为532nm的半导体激光器。气泡发生器

由空压机和微孔陶瓷管阵列组成,微孔陶瓷管阵列置于水槽底部,通过调节气压来控制产生气泡的大小和密度,通过调整陶瓷管数量来控制气泡幕的厚度。采用激光功率计对透过气泡幕的光功率进行测量,激光功率计探头面积为 1.0cm^2 ,精度为 1pW ,其光轴与激光器光轴基本平行,相距 10cm 。实验在自制 7m 长玻璃水槽内进行,其宽和高分别为 1m 和 0.5m 。水槽内侧和底部以黑纸覆盖,以消除水槽各表面反射光对测量结果的影响。

2.2 实验结果及分析

2.2.1 透射光功率随气泡密度的变化 通过增大空压机的供气气压来逐渐增大气泡幕的气泡密度,测量透射光功率,结果如图5所示。可以看出,随着供气压力的逐渐增大,由于气泡密度随之逐渐增大,透射光功率逐渐减小,说明气泡幕的消光能力增强。

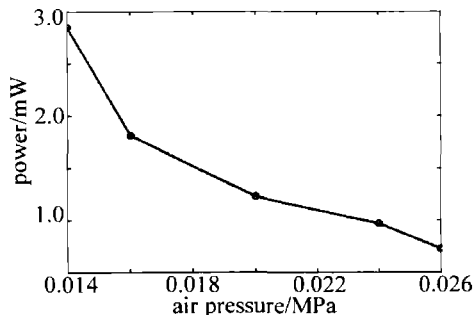


Fig. 5 Light power at various pressures

2.2.2 透射光功率随气泡幕厚度的变化 通过增大陶瓷管数量,逐渐增大气泡幕厚度,再次测量透射光功率,结果如图6所示。可以看出,随着气泡厚度的增大,透射光功率逐渐减小,减小趋势与拟合的指数衰减曲线相吻合。

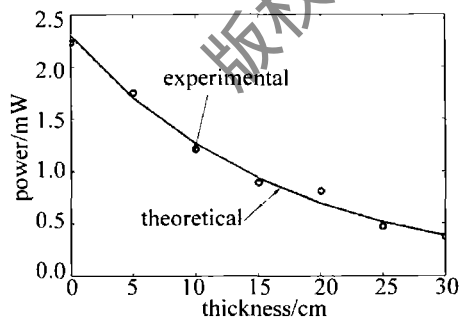


Fig. 6 Light power at various thicknesses

2.2.3 透射光功率随气泡幕位置的变化 在不改变气泡幕密度及厚度的情况下,改变气泡幕与激光器之间的距离,测量透射光功率,结果如图7所示。可以看出,透射光功率基本上是在 2mW 附近 $1.7\text{mW} \sim 2.3\text{mW}$ 变化,而与气泡幕所处的位置没有明显关系。

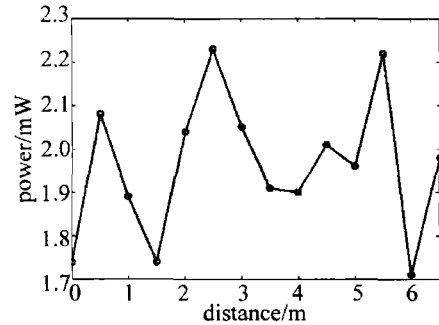


Fig. 7 Light power at various distances

3 结论

理论与实验研究结果说明,水下气泡幕的消光特性与气泡密度以及气泡幕厚度密切相关。气泡密度越大,其消光能力越强。透射光功率随气泡幕厚度呈指数衰减。

参考文献

- [1] WANG J A, JIANG X Zh, MA Zh G, *et al.* Study on back light-scattering property of bubbles in ship wake [J]. *Laser Technology*, 2005, 29 (2): 205-206 (in Chinese).
- [2] STROND J S, MARSTON P L. Transient bubble oscillations associated with the under-water noise of rain detected optically and some properties of light scattering by bubbles [C]//*Bubble Dynamics and Interface Phenomena*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1994: 161-169.
- [3] JI Y J, HE J H, CHEN L Y. Scatter light of bubble and the distribution of bubble size [J]. *Laser Technology*, 2004, 28 (4): 414-416 (in Chinese).
- [4] ZHANG X H, LEI X H, RAO J H, *et al.* Study of homing means for laser-wake-homing torpedoes [J]. *Laser Technology*, 2005, 29 (5): 494-500 (in Chinese).
- [5] ZHU D H, ZHANG X H. Ship wake detection based on laser Doppler effect [J]. *Laser Technology*, 2006, 30 (3): 298-300 (in Chinese).
- [6] PEREIRA F, GHARIB M, DABIRI D, *et al.* Instantaneous whole field measurement of velocity and size of air microbubbles [C]//*Tenth International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics*. Lisbon: Springer Berlin/Heidelberg, 2000: 1-11.
- [7] ZHANG X D, LEWIS M. The volume scattering function of natural bubble populations [J]. *Limnology and Oceanography*, 2002, 47 (5): 1273-1282.
- [8] ZHANG X D, LEWIS M, JOHNSON B. Influence of bubbles on scattering of light in the ocean [J]. *Appl Opt*, 1998, 37 (27): 6525-6536.
- [9] KOKHANOVSKY A. Optical properties of bubbles [J]. *J Optics*, 2003, A5 (1): 47-52.
- [10] KOKHANOVSKY A. Single light scattering: bubbles versus droplets [J]. *American Journal of Physics*, 2004, 72 (2): 258-263.
- [11] CARRICA P M, DREW D, BONETTO F, *et al.* A poly-disperse model for bubbly two-phase flow around a surface ship [J]. *International Journal of Multi-phase Flow*, 1999, 25 (2): 257-305.
- [12] BOHREN C F, HOFFMAN D R. Absorption and scattering of light by small particles [M]. New York: Wiley, 1983: 530-531.