

基于高速摄影的烟火药水下燃烧喷口气泡 与噪声研究^{*}

欧阳的华¹ 关 华¹ 潘功配¹ 杜雪峰^{1,2} 范 磊¹ 吕惠平¹

(1 南京理工大学化工学院 南京 210094)

(2 沈阳理工大学装备工程学院 沈阳 110159)

2009 年 6 月 22 日收到

2009 年 11 月 22 日定稿

摘要 为分析烟火药水下燃烧的现象及声辐射特性,采用高速摄影技术,对烟火药水下燃烧喷口处的气泡进行了实验研究。在此基础上根据高速摄影的系列图像估计了气泡体积,通过对气泡体积的曲线进行拟合后再求二阶导数获得了其变化的加速度,基于脉动体积源点声源公式,计算了喷口噪声的声压。结果表明由于界面的 Bjerknes 力和浮力的作用,气泡主要呈现一种扁球体;烟火药水下燃烧喷口噪声的声压最高达到了 177.1 Pa。

PACS 数: 43.58, 43.30

Study on the bubble and noise of exit from pyrotechnic composition combustion underwater base on high speed photography

OUYANG Dehua¹ GUAN Hua¹ PAN Gongpei¹ DU Xuefeng^{1,2} FAN Lei¹ LÜ Huiping¹

(1 School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science & Technology Nanjing 210094)

(2 School of Equipment Engineering, Shenyang University of Science & Technology Shenyang 110159)

Received Jun. 22, 2009

Revised Nov. 22, 2009

Abstract In order to analyze the characteristics of the acoustic radiation and phenomenon of the pyrotechnic composition combustion underwater, the high speed photography has been used to study the behavior of the bubble at exit, which was generated by the pyrotechnic composition combustion underwater. The bubbles' volume were estimated with high speed film sequences, and their change acceleration were obtained by getting second-order derivative through the fitting curve of the bubble-volume, then the sound pressure of the noise were calculated based on the equation of point sound source of pulsation volume. Results show that the bubbles were mainly flattened sphere, because of the effects of the Bjerknes and buoyancy force on the interface, when the pyrotechnic composition is combusting underwater, the sound pressure of the noise from the exit is up to 177.1 Pa.

引言

烟火药通常是几种物质的机械混合物,燃烧时能够自供氧^[1],故在没有空气参与时,能够在水下持续稳定地燃烧,并与水发生一系列作用而辐射噪声。其

在水下燃烧产生的一定流量和温度的燃烧产物从喷口喷入水中时,由于速度剪切和汽-液相变等,会产生大量的气泡,而气泡又不断的碰撞、合并、破裂崩溃,在这过程中就会产生强烈的噪声。这之间涉及到复杂的相变,汽-液两相流动与传热等,过程十分复杂。但是通过高速摄影试验研究发现,燃烧产物的水

* 2009 年江苏省普通高校研究生科研创新计划项目 (CX09B_105Z) 和国家部委基金资助项目 (51305090302)。

下喷注过程与浮力射流^[2]以及柴油机水下排气过程基本类似^[3],可以初步的将其辐射噪声的机理分为烟火药在药室里面燃烧,产生的燃烧产物通过喷管注入水中形成气泡的过程中在喷管口辐射噪声,喷口气泡形成后脱离、上浮、演变以及破裂成气泡群等整个过程中所产生的气泡噪声,喷口有限的区域内湍流噪声以及气泡群上升到自由表面,由于气体的溢出而引起的水花飞溅噪声。燃烧产物通过喷管注入水中而形成的喷口噪声作为整个噪声形成的一个重要部分,对其进行研究具有十分重要的意义。

目前国内外采用高速摄影技术对水下爆炸气泡^[4-6],水下高压放电气泡^[7-8],可燃气体水下燃烧气泡^[9]以及空化气泡^[10]等进行了较多的研究,虽然早在1995年,就有关于法国烟火集团拉克鲁瓦防御公司研制出了一种用于干扰鱼雷的“烟火一声发射器”声诱饵的报道^[11],国内也有烟火药水下燃烧的运用设想和实验研究^[12],但是关于烟火药水下燃烧产物形成的喷口噪声(是指从燃烧产物经喷管喷入水中在喷口形成气泡到气泡开始脱离的整个过程中所辐射的噪声)的研究几乎未见报道。

本文采用高速摄影仪对烟火药水下燃烧产物经喷口喷入水中形成喷口气泡的演变过程进行了记录,根据高速摄影的系列图像估计了喷口控制体(即气泡,下同)在不同时刻的体积,采用曲线分段拟合方法,结合二次求导获得了气泡体积变化的加速度曲线,最终基于脉动体积源点声源方程得到了喷口噪声,并与相关文献的结果进行了验证比较,以期对烟火药水下燃烧的声辐射特性和机理的探讨以及模型的建立奠定基础。

1 试验原理

烟火药水下燃烧时,通过喷口将具有一定流量和温度的燃烧产物喷入水中,使得在喷口周围一定区域里的水受到强烈的扰动,从而引起其密度的变化,形成脉动体积源(气泡)而向外辐射噪声。对于本实验而言,气泡的体积相对于装置来说很小,故此处可以粗略的假设为无边界场,且对于烟火药水下燃烧引起的喷口噪声而言,声源尺寸比波长小得多,故可将脉动体积源视为点源,可采用简化后的脉动体积源点声源公式进行计算。张文平等^[13]曾利用该方程对柴油机水下排气管口处气泡的辐射噪声(管口辐射噪声)进行了理论分析,但是由于其求解气泡体积加速度的公式中影响因素十分复杂,从而在该论文中未能给出具体的计算结果。戚定满利用

该方程对单空泡的辐射噪声进行了计算^[14],取得了较好的效果。

根据脉动体积源点声源公式^[15],可以得到气泡体积加速度与其所辐射声压的关系式:

$$P_s(r, t) = \frac{\rho \ddot{V}(t)}{4\pi r} = \frac{\rho}{4\pi r} \frac{d^2V}{dt^2}, \quad (1)$$

其中, ρ 为水的密度, d^2V/dt^2 为气泡体积变化的加速度, r 为空间点到气泡中心的距离。为了确定气泡体积随时间变化的加速度关系,本文采用高速摄影技术,拍摄了燃烧产物喷入水中喷口处气泡演变的整个瞬态过程,基于高速摄影的瞬时性,根据高速摄影的系列图像估计了喷口气泡体积,结合曲线分段拟合方法,即可得到气泡体积与时间的关系式,根据体积对时间的二阶导数的物理意义,通过对拟合曲线二阶求导即可获得气泡体积加速度随时间变化的关系曲线。

2 试验

2.1 试样的制备

本试验采用氧化剂、可燃剂和粘合剂组成的烟火药反应体系,将各组分混合均匀过筛后,压制成密度为 1.8 g/cm^3 、直径为 18 mm 、质量为 15 g 的药柱,共 5 发,分别装于自行设计的壳体中,接上电点火头,即可用于水下燃烧试验。

2.2 试验仪器及装置

实验仪器主要为美国 REDLAKE 公司的高速摄影仪。试验装置示意图如图 1 所示。

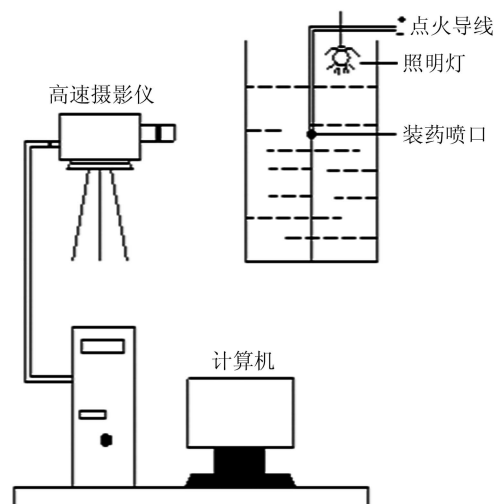


图 1 试验装置示意图

2.3 测试方法

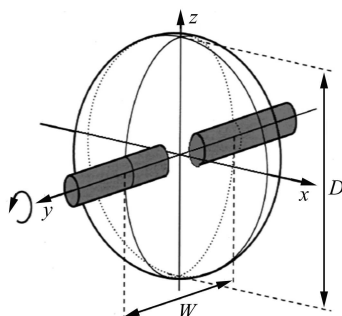
实验在直径为 0.5 m, 高为 2.0 m, 内注自来水的有机玻璃箱中进行, 注水深度为 1.6 m, 装于壳体中的药柱被固定在水深为 1 m 的地方(喷口垂直向外, 故在图 1 中是一个黑圆圈)。实验时使用两节五号干电池串连对电点火头进行点火, 从而点燃药柱。光源放于水面进行拍摄, 燃烧时喷口处单个气泡的形成至脱落的整个过程由高速摄影仪进行记录, 且点火与仪器开启记录同步, 选用 2000 fps 的模式进行拍摄(每 0.5 ms 1 幅)。拍摄完成后, 储存在高速摄像机中的图片通过视频传输采集卡输入电脑, 计算机通过 REDLAKE 公司提供的控制软件进行实时显示和采集, 并通过图形处理软件对图像进行分析。

2.4 实验数据的处理

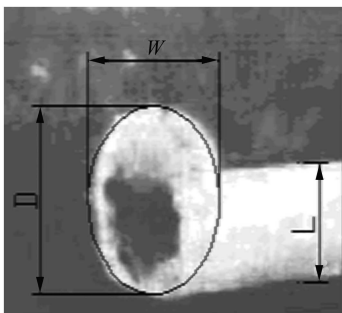
将气泡等效为椭球体, 如图 2(a) 所示。定义气泡在 z 轴方向上的长度为长 (D), x 和 y 轴方向上为径 (W)。对于气泡尺寸的计算, 采用 AutoCAD 对图像中的喷管和气泡进行尺寸标注(如下图 2(b) 所示), 然后与喷管直径的实际尺寸 (15 mm) 进行比较, 就可求出气泡的实际尺寸。即: 放大(缩小) 倍数 $n=15/L$, 则气泡在 z 轴方向上的实际长度 $D_0 = D \times n$, x 和 y 轴方向上的径长 $W_0 = W \times n$, 依据椭球体的体积计算公式:

$$V = \frac{1}{6}\pi W_0^2 D_0, \quad (2)$$

即可求出气泡的实际体积。



(a) 等效气泡尺寸示意图



(b) 真实气泡的尺寸示意图

图 2 气泡尺寸示意图

3 结果与分析

3.1 喷口处气泡的演变

利用高速摄影仪拍摄喷口处燃烧产物注入水中时喷口处气泡从产生到脱离的演变过程, 经过灰度处理后的结果如下图 3 所示(该组是 5 发试验中其中的一组图, 由于燃烧有一定的烟, 所以气泡不是透明的)。其中, 第一幅图为喷管的图片, 每幅图之间的时间间隔为 8 ms(最后两幅图之间是 4 ms)。从整幅图中可以看出, 烟火药水下燃烧喷口处单个气泡从产生到脱离形状都在不断变化, 本试验中单个气泡从产生到脱离的时间为 100 ms。由该图可知, 气泡大部分时间是呈现扁球体形或环形, 这主要是由于气泡在膨胀或收缩的过程中受到了方向相反的界面 Bjerknes 力和浮力的共同作用, 并且 Bjerknes 力要大于浮力所致^[16]。气泡就这样一个接一个地连续产生, 进行演变、运动和破裂, 直至烟火药燃烧完为止, 而不像水下爆炸或其他方式那样, 能量是在极短的时间内完全释放而形成气泡。

在整个燃烧的过程中, 烟火药的燃烧速度影响了排气速度, 从而影响了产物对喷口周围水的冲击程度, 以及其它一些力的作用, 进而影响到喷口处气泡的形状和持续时间(排气速度快, 气泡不稳定, 会发生合并或很快就会破裂成为许多小的气泡), 故在不同的时刻, 气泡的形状有所不同。

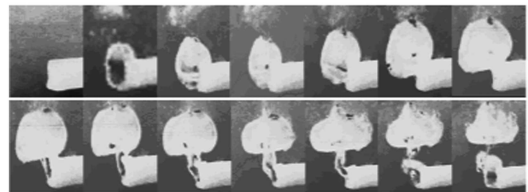


图 3 喷口处单个气泡的演变

3.2 喷口处气泡的体积及体积加速度

采用 2.4 节介绍的方法, 将试验所得的 5 组数据各个相同时刻所对应的值进行求平均, 就可以得到喷口气泡体积随时间变化的关系图。同时采用曲线分段拟合方法, 得到了相应的拟合曲线(各段的平均相关系数或回归系数 $R = 0.98$), 具体如下图 4 所示。

由图 4 可知, 喷口处气泡的体积变化过程主要分为两个阶段: 第一个是气泡体积的加速变化阶段(即 AB 阶段), 在该阶段气泡在燃烧产生的高温高压的产物作用下, 体积迅速增加, 气泡从无到有, 迅速向外膨胀, 在 32 ms 左右的时间内就增加到了 11.1 cm^3 ,

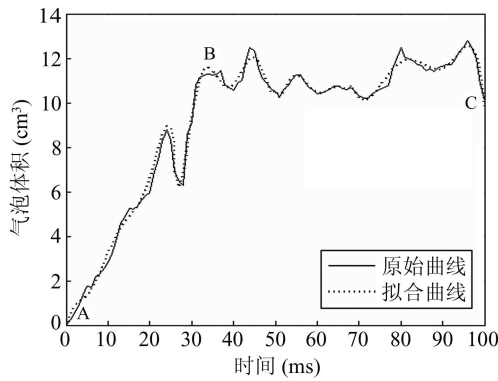


图 4 气泡体积随时间的变化曲线

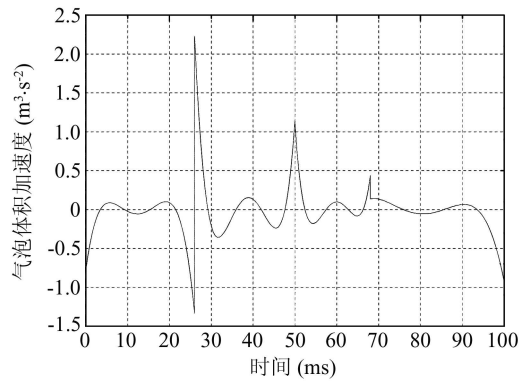
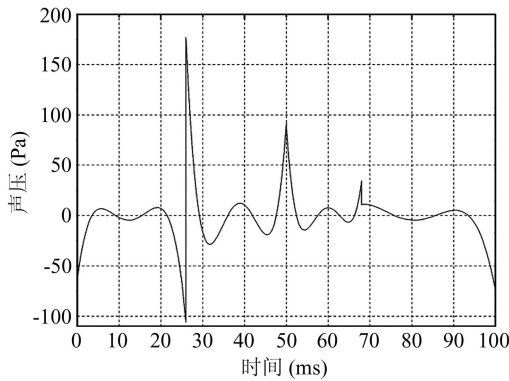
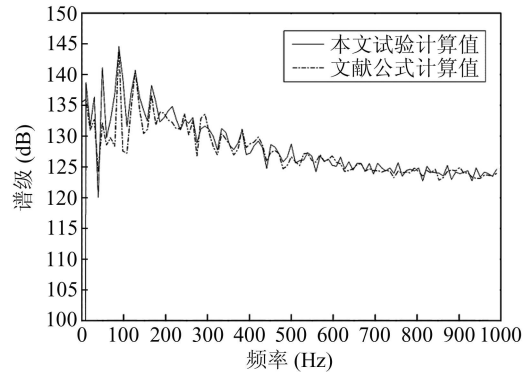


图 5 气泡体积加速度与时间的关系曲线



(a) 喷口噪声的声压曲线



(b) 喷口噪声的频域曲线

图 6 喷口噪声曲线

且此阶段后期伴有振荡现象发生；第二个为气泡体积缓慢变化阶段 (BC 阶段), 在该阶段气泡体积增长的速度明显减慢, 基本是处于平缓变化的阶段, 主要是在惯性的作用下进行振荡, 不过在这一阶段气泡达到了最大体积, 其值为 12.5 cm^3 。这主要是由于气泡的位置大体上没有什么变化, 作用于其上的 Bjerknes 力和浮力也就基本不变, 气泡自身就在惯性的作用下来回的振荡, 但由于喷口还有燃烧产物进入气泡内, 所以相对前一阶段, 气泡整体的变化趋势还是膨胀的。

对于气泡体积变化的加速度, 根据体积加速度公式的物理意义, 可基于上图 4 气泡体积变化的时间曲线所得到的拟合曲线, 对其相应的关系式进行求二阶导数即可得到气泡体积变化的加速度与时间的关系曲线, 如下图 5 所示。可以看出各个时刻气泡体积变化的加速度大小不等, 这主要是作用在它上面的各种力综合作用的结果。

3.3 喷口辐射噪声

根据图 5 的结果, 代入式 (1) 可得喷口气泡演变的过程中不同时刻, 距离喷口气泡中心 $1 \text{ m} (r = 1)$ 处的声压, 如下图 6(a) 所示。

喷口所辐射噪声的声压随着气泡体积加速度的

变化而变化, 两者成一种正比关系, 声压最大值达到了 177.1 Pa 。其对应的频域曲线如图 6(b) 中的实线所示, 由该图可知, 噪声分布在 1000 Hz 以内。根据实验现象和以往的水下射流研究 [17-18] 分析可知, 气泡体积的变化速度与喷管中燃烧产物的流量有着十分直接的关系, 故进而影响其所形成的噪声特性, 对产物流量进行控制, 可以达到控制噪声的目的。正是由于这一个一个的喷口处的气泡的振荡演变与相互作用, 才使得烟火药水下燃烧的过程中不断地向外辐射声能。

4 喷口辐射噪声结果的比较分析

对于烟火药水下燃烧来说, 整个过程是连续的, 目前只能测试整个过程所辐射的噪声, 对于喷口噪声还无法采用实验方法直接测量。为了验证结果的正确性, 本文与文献 [3] 的研究成果进行了计算比较。该文献通过对柴油机水下排气管口噪声的研究, 从点声源辐射出发采用当量球形气泡半径, 得到了管口声辐射的简单估算公式, 即:

$$\text{SPL} = 8 \log Q + S_{pe} + 16.0 - 20 \log r, \quad (3)$$

其中, Q 为喷口产物的体积流量, S_{pe} 为喷口内测得的压力的功率谱均方根谱级 (喷口内测得的压力的功率谱均方根谱级是采用美国 PCB 公司的型号为 M102B 的压力传感器, 在距喷口八分之一波长之内的喷管内测量的^[3], 参考声压为 $20 \mu\text{Pa}$), r 为空间点到气泡中心的距离。当 $r = 1\text{m}$ 时, 可知:

$$\text{SPL} = 8 \log Q + S_{pe} + 16.0 \quad (4)$$

将所测得的相应结果代入式 (4), 即可计算得到 SPL, 计算结果如上图 6(b) 中的虚线所示。

由图可知, 两者结果的曲线虽然存在一定的差异, 但是大体上基本一致。产生误差的主要原因是将有边界的测试场粗略的作为一个自由场来处理时, 会存在一定的误差; 另一方面, 本文根据高速摄影图片来估算气泡体积时, 所得的结果也存在一定的误差。

5 结论

本文根据高速摄影仪拍摄的喷口处气泡图像数据进行计算与分析, 结合脉动体积源点声源方程对烟火药水下燃烧喷口噪声进行了研究, 可得到以下结论:

(1) 喷口处的气泡由于界面 Bjerknes 力和浮力的共同作用, 而呈现一种扁椭球体形状;

(2) 根据高速摄影所得的气泡体积估算结果, 直接采用曲线分段拟合的方法, 依据二阶导数的物理意义对所得拟合曲线进行二阶求导而得到了气泡体积加速度, 避免了以往研究对气泡的球形假设, 更具有实际意义。所得结果与文献的结果总体上基本吻合, 计算得到实验中其声压最大达到了 177.1 Pa , 频率主要分布在 1000 Hz 以内;

(3) 烟火药水下燃烧, 燃烧产物由喷口注入水中而形成的喷口噪声与喷口处产生的气泡体积的变化加速度成正比, 而后者又与燃烧产物的体积流量紧密相关, 故对燃烧产物的体积流量进行控制, 可以达到控制或调节喷口噪声的目的;

(4) 采用高速摄影结合 AutoCAD 技术, 对气泡进行研究是一种可行的方法。

参 考 文 献

- 1 潘功配, 杨硕. 烟火学. 北京: 北京理工大学出版社, 1997: 43
- 2 Schetz J A. Injection and mixing in turbulent flow. New York: The University Press, 1980: 52—61
- 3 张文平. 柴油机水下排气噪声试验和理论研究. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院, 1992: 44
- 4 张阿漫, 姚熊亮. 近自由面水下爆炸气泡的运动规律研究. 物理学报, 2008; **57**(1): 339—352
- 5 朱锡, 牟金磊, 洪江波等. 水下爆炸气泡脉动特性的试验研究. 哈尔滨工程大学学报, 2007; **28**(4): 365—368
- 6 张寒虹, 陈志福. 水中电爆炸的高速摄影研究. 光子学报, 2001; **30**(7): 889—891
- 7 Silvano B, Giovanni B C. Implosion of an underwater spark-generated bubble and acoustic energy evaluation using the Rayleigh model. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2002; **111**(6): 2594—2600
- 8 Khoo B C, Adikhari D, Fong S W *et al.* Multiple spark-generated bubble interactions. *Modern Physics Letters B*, 2009; **23**(3): 229—232
- 9 Preston S W, Janet L E, Thomas G M. Experimental investigation of the combustive sound source. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1995; **20**(4): 311—320
- 10 Bai Lixin, XU Weilin, TIAN Zhong *et al.* A high-speed photographic study of UL transonic cavitation near rigid boundary. *Journal of Hydrodynamics*, 2008; **20**(5): 637—644
- 11 Massimo Annati. Anti-torpedo defence systems. *Military Technology*, 1995(10): 10—16
- 12 欧阳的华, 潘功配, 关华等. 具有脉动燃烧效应的烟火药水中燃烧声频特性. 含能材料, 2008; **16**(5): 603—605
- 13 张文平, 马强, 张志华等. 柴油机水下排气管口辐射噪声. 哈尔滨船舶工程学院学报, 1993; **14**(2): 25—33
- 14 戚定满, 鲁传敬. 单空泡演化及辐射噪声. 上海交通大学学报, 1998; **32**(12): 50—54
- 15 Lighthill M J. On sound generated aerodynamically. *Proc Roy Soc*, 1952; **A2171**: 564—587
- 16 张阿漫, 姚熊亮. 近壁面气泡的运动规律研究. 物理学报, 2008; **57**(3): 1662—1670
- 17 David Azbel. Two phase flows in chemical engineering. Cambridge University Press, 1981: 311
- 18 Silberm. Production of bubbles by the disintegration of gas jets in liquid. *Proceedings of the 15th midwestern conference of fluid mechanics*, 1957: 263—284