

气泡雾化喷嘴气体溢出过程声波信号的时频特征研究*

孙春华 宁智 吕明 阎凯 付娟

(北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

摘要: 通过自建的气泡雾化喷嘴射流可视化实验平台对射流中气体溢出过程进行了声波信号采集和图像观测。采用自适应最优核(AOK)与希尔伯特-黄变换(HHT)边际谱两种时频分析方法对采集到的声波时频信号进行了处理和分析。结果表明:气泡溢出喷嘴时会导致声波信号 AOK 时频谱幅值的增加;时频谱幅值随时间的变化可以反映喷孔处气体溢出量的实时变动;声波信号的 HHT 边际谱能量主要集中在一定频率范围内,且在频率轴上的分布与气液两相压力、气液混合状态等因素有关;边际谱能量关于某一中心频率呈近似对称分布,且该中心频率与气泡压力相关,而与气泡大小关系不大;声波信号的时频分析结果能很好地捕捉到气泡雾化喷嘴射流时气相在溢出过程中的变化。声波信号时频分析方法可作为气泡雾化喷嘴射流研究的一个有效途径。

关键词: 气泡雾化喷嘴 气泡 气液两相流 声波信号 时频特征

中图分类号: O359⁺.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)01-0315-08

Time – frequency Characteristics of Acoustic Signal in Gas Flowing Process of Effervescent Spray Nozzle

Sun Chunhua Ning Zhi Lü Ming Yan Kai Fu Juan

(College of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Adaptive optimal kernel (AOK) and Hilbert – Huang transform (HHT) marginal spectrum methods were introduced to process acoustic signals from effervescent atomizer. The time – frequency results reflected the information of bubble pressure, bubble size and gas-liquid mass ratio fluctuation which had significant impacts on spray. The experimental results showed that the outflow moment of bubble could be accurately captured by AOK time – frequency spectrum, and the pulsation of amplitude could reflect the gas-liquid mass ratio fluctuation. The Hilbert marginal spectrum power was concentrated in a short frequency range. The power-frequency distribution was affected by gas-liquid pressure and gas-liquid mixture form. The Hilbert marginal spectrum power was symmetric with the center frequency which was positively correlated with bubble pressure, but little correlated with bubble size. Time – frequency analysis of acoustic signals from effervescent atomizer provides a new tactics for further study of the mechanism for effervescent atomization.

Key words: Effervescent spray nozzle Bubble Gas-liquid flow Acoustic signal Time – frequency characteristics

引言

由于气泡雾化喷嘴在低喷射压力下能对高粘度

液体实现良好的雾化效果,因此在农业机械、化工、石油、动力机械等领域具有广泛的应用前景^[1-2]。

近喷孔处气液两相的交互作用是气泡雾化喷嘴区别

收稿日期: 2014-04-02 修回日期: 2014-07-20

* 国家自然科学基金资助项目(51276011)、北京市自然科学基金资助项目(3132016)、国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA065303)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013YJS068)和内燃机燃烧学国家重点实验室开放基金资助项目(k2013-3)

作者简介: 孙春华, 博士生, 主要从事射流喷雾与雾化研究, E-mail: 11116347@bjtu.edu.cn

于普通单相流喷嘴的最大特点,也是其强化射流雾化效果的关键^[3]。气泡雾化喷嘴气体溢出膨胀过程的研究对于深化气泡雾化机理分析以及喷雾技术的研究具有重要的意义。

气泡雾化喷嘴气相溢出过程是强非线性的气液固三相相互作用的过程,理论研究非常困难。高速摄影技术是气泡雾化喷嘴射流研究的一个重要手段,目前已取得一些重要的研究成果^[4-6]。借助气相溢出喷孔时的图像可获取气相形态(气泡大小、形状等)对射流形态(射流锥角、方向等)的影响。但通过高速摄影技术进行研究时,需借助可视化喷嘴,且得到的只是喷孔处的喷雾图像,无法反映气体溢出喷孔时的许多重要信息;利用高速摄影技术对气泡雾化喷嘴射流的研究有其局限性。

声波信号经处理后可提取出反映研究对象特性的重要信息^[7-9]。液体射流过程中的气体压力振动被认为是反映液体射流雾化重要信息^[10-11]。气体从气泡雾化喷嘴喷孔溢出时在近喷孔处会引起强烈的气体压力振动,其中一部分会以声波形式发射出来。进入喷孔区域的气相形态会对声波信号的时间-频率-振幅产生影响;通过提取不同射流条件下声波信号的时频谱特征,有可能得到气体溢出喷孔时的时变特征和瞬时气体溢出量等重要信息,从而为气泡雾化喷嘴气体溢出强化雾化机理的研究提供一个新的途径或方法。目前,对喷雾过程产生的声波进行的研究还很少,采用时频分析方法对气泡雾化喷嘴射流声波信号的分析还未见报道。

本文通过实验图像对气泡雾化喷嘴气体溢出过程进行观测,并采用自适应最优核(AOK)与希尔伯特-黄变换(HHT)边际谱两种时频分析方法对产生的声波信号进行处理和分析。

1 时频分析方法

目前,时频分析方法可以分为两类:基于Fourier变换的信号分析方法,包括短时Fourier变换法、Wigner-Ville分布法、小波变换法等;由Huang等1998年提出的HHT信号处理方法^[12]。

AOK时频分析方法是Jones等学者提出的一种改进的Wigner-Ville分析方法^[13],在处理气液两相流波动信号时有很好的时频分辨率,在反映时频平面信息时具有较好的可读性,并已在两相流领域有成功应用^[14]。基于此,本文采用AOK时频分析方法对气泡雾化喷嘴射流的声波信号进行处理,以获得能够反映声波信号时间-频率-振幅耦合关系的AOK时频谱。HHT信号处理方法在非线性和非平稳信号的分析处理中表现出自适应性强、分辨率高等

优点;HHT边际谱更是可以对信号频率-能量的对应关系提供准确的描述。基于此,本文对气泡雾化喷嘴射流的声波信号进行HHT边际谱分析,以获得声波信号能量随频率的分布,并通过边际谱特征提取,以得到射流过程声波信号的能量和频率的定量分析结果。

1.1 AOK自适应最优核时频分析方法

经典的Wigner-Ville分布法具有许多优良特性,如时频分辨率高、时间-带宽积可达到Heisenberg不确定性原理给出的下界等。但用其分析多频率分量信号时会出现严重的交叉项,从而影响信号的识别和分析。为了抑制交叉项,人们对Wigner-Ville分布法进行了一系列的改进。改进后的时频分布可以统一表示为^[15]

$$C_z(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \iint A(\theta, \tau) \phi(\theta, \tau) e^{-j\theta t - j\tau \omega} d\theta d\tau \quad (1)$$

式中 $C_z(t, \omega)$ ——信号的瞬时频率 ω 在 t 时刻的能量振幅

$\phi(\theta, \tau)$ ——低通核函数,通过设计不同的核函数可以得到不同的分布特性

θ ——频偏 τ ——时移

$A(\theta, \tau)$ ——信号 $s(t)$ 的模糊函数

$$A(\theta, \tau) = \int s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{j\theta t} dt \quad (2)$$

式中, s^* 为 s 的共轭。由于径向高斯核时频分布是一种整体算法,对整个信号只设计了一个核函数,不适合非平稳信号的分析,为此, Jones等提出了AOK自适应最优核时频分析方法^[13]。

定义短时模糊函数 $A(t; \theta, \tau)$, 它是由模糊函数 $A(\theta, \tau)$ 经过加窗处理得到的,其表达式为

$$A(t; \theta, \tau) = \int s^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) \omega^*\left(u - t - \frac{\tau}{2}\right) \cdot s\left(u + \frac{\tau}{2}\right) \omega\left(u - t + \frac{\tau}{2}\right) e^{j\theta u} du \quad (3)$$

式中 $\omega(u)$ ——对称的窗函数

t —— $\omega(u)$ 的中心位置时刻

令 $|u| > T$ (T 为窗长) 时, $\omega(u) = 0$, 则在任一时刻 t , 只能在被窗函数 $\omega(u)$ 截取的 $[t - T, t + T]$ 范围内计算信号模糊函数 $A(t; \theta, \tau)$ 。时间段 $[t - T, t + T]$ 内信号的自适应最优核时频分布为

$$C_{\text{AOK}}(t, \omega) =$$

$$\frac{1}{2\pi} \iint A(t; \theta, \tau) \phi_{\text{opt}}(t; \theta, \tau) e^{-j\theta t - j\tau \omega} d\theta d\tau \quad (4)$$

式中 $\phi_{\text{opt}}(t; \theta, \tau)$ —— $\phi(\theta, \tau)$ 的短时最优核函数

核函数 $\phi_{\text{opt}}(t; \theta, \tau)$ 能够随时间变化而对信号的局部特征进行自适应;相比于径向高斯核时频分布, AOK时频分布非平稳信号细节描述能力方面

有了极大的改进。

1.2 HHT 边际谱

HHT 信号处理方法是基于经验模态分解理论 (Empirical mode decomposition, EMD) 的时频分析方法。EMD 是将信号分解成若干个满足以下两个条件的固有模态函数 (Intrinsic mode function, IMF)^[12]: 整个 IMF 函数构成的信号中零点与极数相等或至多相差 1; 信号上任意一点, 由局部极大值点确定的包络线和由局部极小值点确定的包络线的均值为零, 即信号关于时间轴局部对称。

经过 EMD 处理的原始信号 $s(t)$ 可表示为不同时间尺度下的固有模态函数 $c_i(t)$ 与残差 $r_n(t)$ 的组合, 即

$$s(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (5)$$

式中 n ——EMD 分解次数

对式 (5) 中的每个固有模态函数 $c_i(t)$ 进行 Hilbert 变换以构造解析信号 $z(t)$, 然后分别计算幅值函数 $\alpha_i(t)$ 和相位函数 $\varphi_i(t)$, 进而求得瞬时频率和 Hilbert 谱, 过程如下:

IMF 的 Hilbert 变换

$$z(t) = c_i(t) + jH(c_i(t)) = \alpha_i(t) e^{j\varphi_i(t)} \quad (6)$$

$$\text{瞬时频率} \quad f_i(t) = \frac{d\varphi_i(t)}{dt} \quad (7)$$

$$\text{Hilbert 谱} \quad H(f, t) = \text{Re} \left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i(t) e^{j[2\pi f_i(t) t]} \right\} \quad (8)$$

式中, $\text{Re}\{\}$ 为取 Hilbert 变换实部。

对式 (8) 在信号总长度 T 内积分, 可得 HHT 边际谱, 即

$$h(f) = \int_0^T H(f, t) dt \quad (9)$$

HHT 边际谱是由信号瞬时的时频谱对时间积分后获得的, 能真实地描述信号幅值在整个频段上随频率的变化^[16]。

1.3 基于 HHT 边际谱的特征提取

基于 HHT 边际谱, 定义一定时间内某频率范围内的边际谱无量纲平均能量

$$e = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n h_j(f_i)^2 / n \quad (10)$$

式中 $h_j(f_i)$ ——一个 IMF 的瞬时频率 f_i 的边际谱幅值

f_i ——瞬时频率 n ——数据个数

m ——IMF 的个数

从本文获得的实验数据可以发现, 气体从气泡雾化喷嘴膨胀溢出时产生的声波信号虽然以较宽的频率释放能量, 但能量分布主要集中于某一“中心频率”附近。为了得到声波边际谱所对应的中心频

率, 进行如下处理和定义。

在 HHT 边际谱的频率-幅值平面内, 将瞬时频率 $f_1 \sim f_n$ 所对应的 n 个点 $(f, h(f))$, 根据幅值 $h(f)$ 进行由大到小排序, 形成新的点集

$$A = \{(\hat{f}_1, h(\hat{f}_1)), (\hat{f}_2, h(\hat{f}_2)), \dots, (\hat{f}_n, h(\hat{f}_n))\} \quad (11)$$

其中 $h(\hat{f}_1) = \max\{h(f)\}$

式中 \hat{f}_1 ——边际谱最大幅值所对应的瞬时频率

\hat{f}_n ——边际谱最小幅值所对应的瞬时频率

中心频率定义为

$$\bar{f}(N) = \frac{\sum_{i=1}^N \hat{f}_i h(\hat{f}_i)^2}{\sum_{i=1}^N h(\hat{f}_i)^2} \quad (12)$$

式中 N ——计算点数

$\bar{f}(N)$ ——频率 $f_1 \sim f_n$ 范围内边际谱能量由高到低前 N 个数值所对应中心频率

当 $N=1$ 时, $\bar{f}(1)$ 即为最大边际谱幅值对应的频率。中心频率 $\bar{f}(N)$ 与计算点数 N 的关系曲线可反映声波信号的边际谱能量随频率的分布情况; 当分布曲线斜率接近于零时, 表明能量随频率分布呈近似的对称分布。

2 实验系统

图 1 为自建的气泡雾化喷嘴喷雾实验系统原理图。

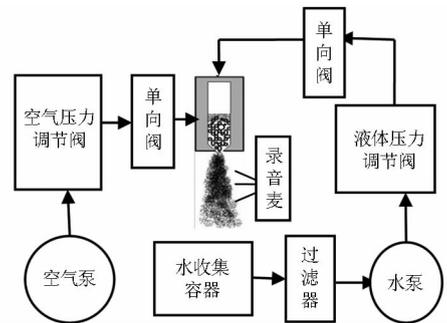


图 1 喷雾实验系统原理图

Fig. 1 Schematic of spray system

为了便于观察喷嘴内部的气液两相分布, 实验中采用自行设计的透明喷嘴, 使用的工作介质为水和空气。液体和空气的注入压力由水泵、空气泵以及压力调节阀控制; 压力调节范围分别为: 液体 0 ~ 0.7 MPa, 空气 0 ~ 0.65 MPa。实验过程中声波信号的采样设备为高保真录音麦; 采样频率为 44.1 kHz, 频响为 0.02 ~ 20 kHz, 信噪比 S/N 大于 90 dB, 总谐波失真小于 0.02%; 录音麦布置位置与喷孔同一水平高度, 距离为 15 cm。

图 2 为实验时采用的气泡雾化喷嘴结构图。气泡

雾化喷嘴气液混合腔为 $12\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的矩形通道。喷嘴的喷孔直径为 2 mm ，充气孔处设置有微孔径为 0.8 mm 的多孔片(图2右侧)。

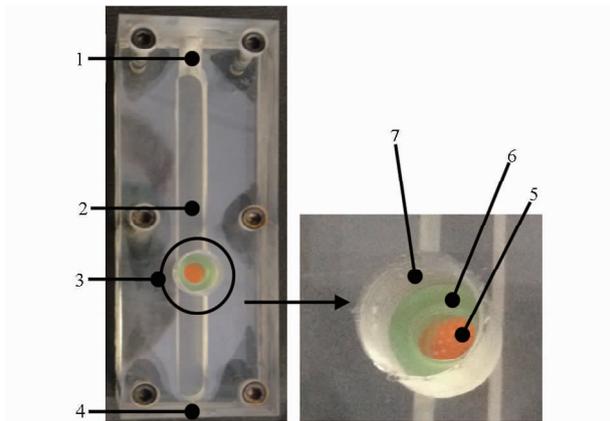


图2 气泡雾化喷嘴结构图

Fig.2 Figures of effervescent atomizer

1. 充气口 2. 矩形通道 3. 充气口 4. 喷孔 5. 多孔片 6. 密封垫圈 7. 充气管路连接螺纹

3 气泡雾化喷嘴射流声波信号处理分析

气相通常以气泡形式溢出气泡雾化喷嘴,为了得到气泡溢出喷嘴时声波信号的特征,本文对确定工况下单气泡I和单气泡II两个气泡的溢出过程进行研究。为了对气泡雾化喷嘴常见工作形式——泡状流时的声波信号进行时频分析,本文进行了泡状流工况实验。需要说明的是,由于气液压力的调节对泡状流型的形成非常敏感,因此具体实施过程是:将气压固定,液压从零缓慢增大,直至出现稳定泡状流。此外,为了说明声波信号振幅主要来源于气体溢出喷嘴过程,本文还进行了纯液射流实验,以提供对照比较。纯液射流实验时,液压取所有实验的一个适中水平值。各实验的气、液两相压力如表1所示。

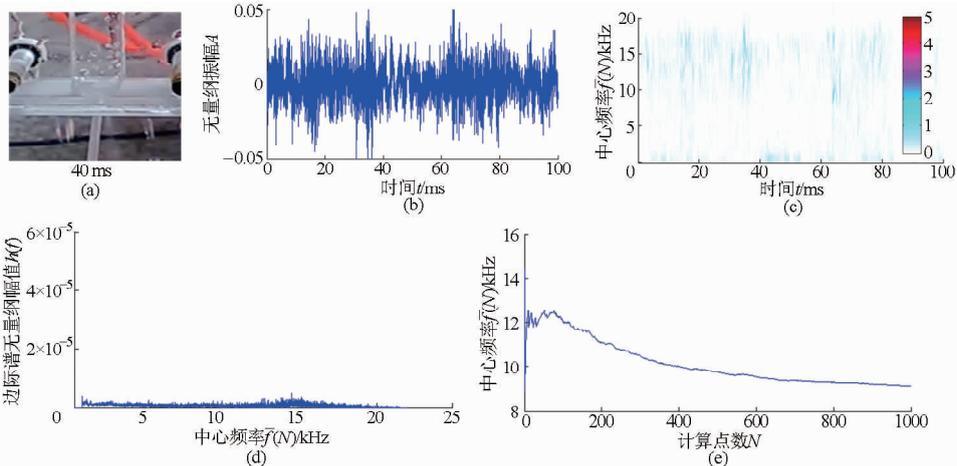


图3 纯液射流时的声波信号处理结果

Fig.3 Sound wave process results of pure liquid spray

(a) 实验图像 (b) 原始声波信号 (c) AOK 时频谱 (d) HHT 边际谱 (e) 中心频率 $\bar{f}(N)$

表1 实验工况及边际谱特征计算结果

Tab.1 Experiment conditions and marginal spectrum feature results

| 工况 | 液压 p_l /MPa | 气压 p_a /MPa | 中心频率 $\bar{f}(200)$ /kHz | 无量纲平均能量 e |
|---|------------------|------------------|--------------------------------|------------------------|
| 单气泡 I ($d \approx 12\text{ mm}$) | 0.32 | 0.26 | 13.15 | 4.21×10^{-11} |
| 单气泡 II ($d \approx 7.5\text{ mm}$) | 0.32 | 0.26 | 13.12 | 2.71×10^{-11} |
| 纯液 | 0.28 | 0 | 7.93 | 5.77×10^{-13} |
| 泡状流 | 0.38 | 0.37 | 14.60 | 2.74×10^{-11} |

实验过程同时采集射流声波信号和图像信息,并对时长为 100 ms 的声波信号进行处理和分析。由于水泵和空气泵工作时产生的低频噪声较大,在进行 AOK 时频谱分析和 HHT 边际谱分析前,需要对提取的射流声波信号进行滤波处理。另外,为了保证时频分析结果能够反映不同工况下的能量大小关系,录音设备输入电平保持不变。

根据 HHT 边际谱的计算结果,按前述的中心频率的定义,计算得到中心频率 $\bar{f}(200)$;以 $\bar{f}(200)$ 为中心,计算频率范围为 $[\bar{f}(200) - 5, \bar{f}(200) + 5]$ 的无量纲平均能量。

表1中同时给出了不同实验条件下边际谱特征的计算结果。

3.1 纯液射流过程的声波信号分析

为了与单气泡溢出时的声波信号处理结果和泡状流射流时的声波信号处理结果进行比较,首先进行了纯液射流过程声波信号的检测及处理。图3给出的是纯液射流时的实验图像、原始声波信号以及声波信号的处理结果。

从图3a中可以看到,纯液射流时,射流液柱呈

圆柱状,此时射流锥角较小,为 3.3° 。从图 3b 中可以看到,纯液射流过程中采集的声波信号的无量纲幅值仅在 ± 0.05 之间变化。从图 3c 给出的 AOK 时频谱中可以看到,纯液射流时声波幅值(灰度越大,幅值越大)在时间轴上很小。从图 3d 给出的 HHT 边际谱中可以看到,HHT 边际谱无量纲幅值均小于 5×10^{-6} 。从图 3e 给出的中心频率随计算点数的变化中可以看到,在计算点数 300 以前,计算出的中心频率呈现出大幅度波动情况,表明纯液射流时,声波信号幅值随频率的分布不具有对称性。

3.2 单气泡溢出过程的声波信号分析

单气泡 I 和单气泡 II 是指在相同的液压、气压条件下产生的大小不同(表 1)的两个气泡。图 4 和图 5 是单气泡 I 和单气泡 II 从气泡雾化喷嘴溢出时

的实验图像、原始声波信号以及声波信号的处理结果。

从图 4a 和图 5a 中看到,随着气泡溢出喷孔,射流锥角经历了先变大后变小的过程,其中单气泡 I 的最大射流锥角达到 17.3° ,单气泡 II 的最大射流锥角达到 12.7° 。

从图 4b 和图 5b 中看到,与纯液射流的声波信号无量纲幅值相比,气泡溢出时(图 4b 中 20 ms),声波信号的无量纲幅值随气泡溢出会有明显的突增。

图 4c 和图 5c 给出了声波信号时间-频率-振幅三者之间的关系。通过图 4c 和图 5c 可以看到,气泡的溢出会伴随有声波信号 AOK 时频谱幅值的增加。大小不同气泡的 AOK 时频谱幅值有明显的差异且 AOK 时频谱幅值在时间轴上不连续;这是由于

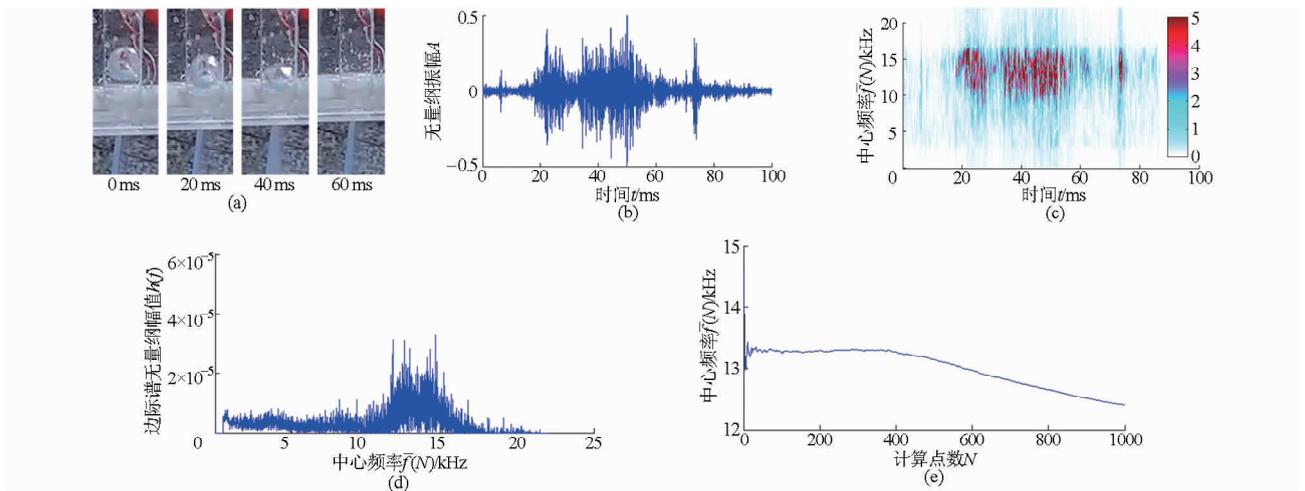


图 4 单气泡 I 溢出喷孔时的声波信号处理结果

Fig. 4 Sound wave process results of single bubble I burst from nozzle

(a) 实验图像 (b) 原始声波信号 (c) AOK 时频谱 (d) HHT 边际谱 (e) 中心频率 $\bar{f}(N)$

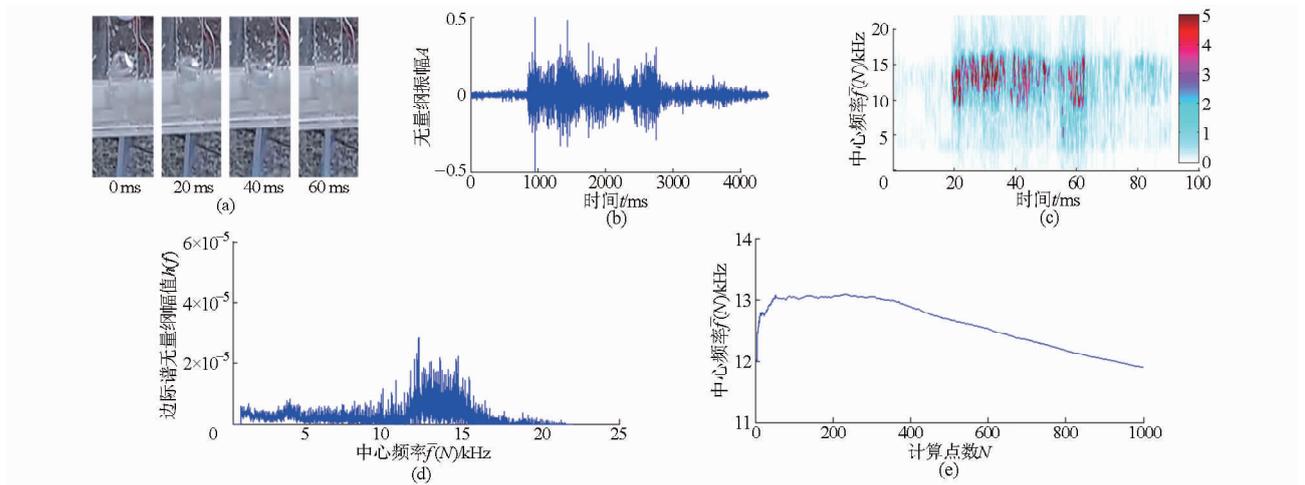


图 5 单气泡 II 溢出喷孔时的声波信号处理结果

Fig. 5 Sound wave process results of single bubble II burst from nozzle

(a) 实验图像 (b) 原始声波信号 (c) AOK 时频谱 (d) HHT 边际谱 (e) 中心频率 $\bar{f}(N)$

气泡溢出喷孔的过程并非连续稳定的,大气泡在喷孔处有可能被分割成若干个小气泡,如图6所示^[4];这一现象可进一步说明声波信号的时频分析结果能很好地捕捉到气泡雾化喷嘴射流时气相在溢出过程

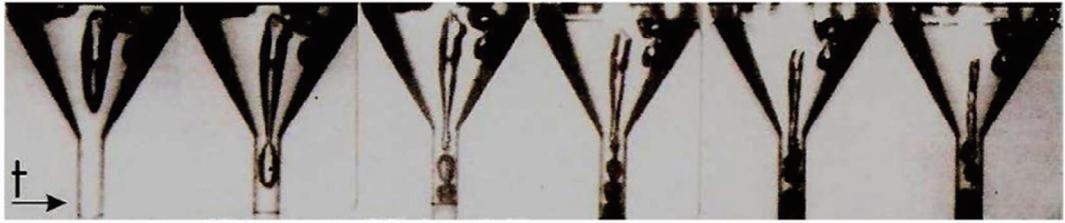


图6 大气泡在喷孔分裂成若干个小气泡

Fig. 6 Process of a large bubble split into several small ones

从图4d和图5d中可以发现,单气泡溢出时的声波能量主要集中在某一中心频率附近。根据中心频率定义计算出的单气泡I和单气泡II溢出喷孔时声波信号的中心频率 $\bar{f}(N)$ 如图4e和图5e所示。

通过图4d和图5d可以看到,气泡大小不同时,边际谱无量纲幅值存在差异;表1给出的两单气泡工况的边际谱无量纲平均能量显示,边际谱无量纲平均能量与气泡大小有关。

从图4e、图5e以及表1中可以看到,在相同的射流条件下,气泡大小不同时,两单气泡溢出喷孔时边际谱无量纲平均能量集中区(计算点数 N 小于

中的变化。在相同的液压和气压条件下,大小不同气泡的AOK时频谱幅值所对应的频率范围大致相同;表明气泡从喷孔溢出时引起的周围介质的振动频率与气泡大小关系不大。

400的区域)的中心频率 $\bar{f}(N)$ 基本相同,约为 $\bar{f}(200)$,且能量集中区的中心频率 $\bar{f}(N)$ 关于计算点数 N 的关系曲线斜率接近于零,表明声波信号中心频率与气泡大小关系不大,且边际谱能量关于中心频率呈近似的对称分布。

3.3 泡状流射流过程的声波信号分析

泡状流射流是工程中气泡雾化喷嘴常见的一种工作形式。泡状流射流时,在喷嘴气液混合腔中会存在大量的微小气泡,即形成泡状流,然后经由喷孔喷出。图7给出的是泡状流射流时的实验图像、原始声波信号以及声波信号的处理结果。

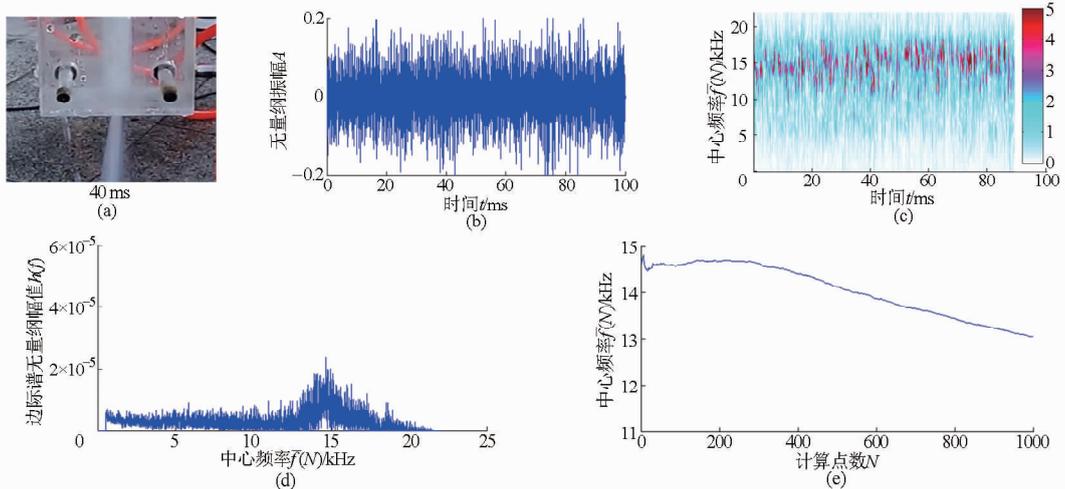


图7 泡状流射流时的声波信号处理结果

Fig. 7 Sound wave process results of bubbly flow spray

(a) 实验图像 (b) 原始声波信号 (c) AOK时频谱 (d) HHT边际谱 (e) 中心频率 $\bar{f}(N)$

从图7a给出的实验图像中可以看到,相比纯液射流工况,泡状流射流时,射流锥角明显增大,为 19.4° ,且在射流中有比较明显的雾化现象。

图7b为泡状流射流时采集的声波信号;从中可以看到,泡状流射流时,无量纲幅值随时间呈较均匀的分布,无量纲幅值大于纯液射流幅值,但小于单气泡溢出时幅值。

从图7c给出的声波信号的AOK时频谱中可以

看到,与单气泡从喷孔膨胀溢出时相比,泡状流射流的声波幅值随时间分布更为均匀,但仍有一定参差。这可以从两方面进行解释:一方面,泡状流射流时,总有气泡不停地从喷孔溢出,AOK时频谱上的声波幅值在时间轴上均有分布;另一方面,泡状流射流时,通过喷孔的气泡大小、数量随时间一直在变化,这就导致了声波幅值在时间轴上不可避免地产生参差。这种参差可以通过较小时长内泡状流射流声波

信号的 AOK 时频谱体现,如图 8 所示,其中时间范围对应图 7c 的 40 ~ 50 ms。从图 8 中可以看到,在泡状流工况下,AOK 时频谱能量呈现出明显的离散分布特征,形成了若干个“能量团”(图中虚线所示),每个能量团的时间尺度均小于 1 ms。每个“能量团”极有可能是在单个气泡溢出喷嘴时产生的。

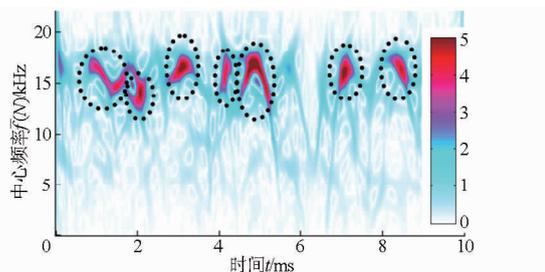


图 8 泡状流射流声波信号 AOK 时频谱细节

Fig. 8 AOK spectrum details of bubbly flow spray

根据前面气泡溢出时引起周围介质的振动能量与气体溢出量相关的分析结论,泡状流射流时声波幅值在时间轴上的参差与气体经喷嘴的溢出量随时间的脉动存在着密切的关系。

喷嘴处瞬时气液比被认为是气泡雾化喷嘴射流稳定性的重要影响因素^[17]。由于在一定条件下气体经喷嘴的溢出量与喷嘴处的气液质量比密切相关,因此从 AOK 时频谱上观察到的声波幅值在时间轴上的参差分布可反映出喷嘴处气液质量比时变情况。目前关于喷嘴处瞬时气液质量比的测量方法的报道非常鲜见。

通过图 7d 和图 7e 所示的泡状流射流时声波信号的 HHT 边际谱及中心频率 $\bar{f}(N)$,并结合表 1 给出的定量结果,可以发现,与单气泡从喷嘴膨胀溢出时相比,泡状流射流的声波信号边际谱的无量纲幅值在频率轴上的分布更为集中,表明振动能量随频率的分布与气液两相压力及气液两相混合状态密切相关;同单气泡溢出时相似,能量集中区的中心频率

$\bar{f}(N)$ 关于计算点数 N 的关系曲线的斜率接近于零,表明边际谱能量关于某一中心频率呈近似对称分布;气液两相压力较高时的泡状流能量集中区的中心频率 $\bar{f}(200)$ 高于气液两相压力较低时的单气泡溢出时能量集中区的中心频率,这进一步说明了气泡溢出时引起的周围介质的振动频率与气液两相压力密切相关。

4 结论

通过实验图像对气泡雾化喷嘴射流进行了观测,并采用 AOK 与 HHT 两种时频分析方法对射流过程气相溢出喷嘴产生的声波时频信号进行了初步处理和分析。得到以下结论:

(1) AOK 时频谱可提供包含时间-频率-振幅的气泡雾化喷嘴射流的声波信息;HHT 边际谱及从中提取的相关特征可以给出不同射流条件下气泡雾化喷嘴声波信号能量随频率的分布。

(2) 气泡的溢出会伴随有声波信号 AOK 时频谱幅值的增加;通过 AOK 时频谱给出的声波幅值在时间轴上的参差分布可反映出气泡雾化喷嘴出口处的气体溢出量随时间的变化。

(3) 气体溢出时引起周围介质振动的能量主要集中在一定频率范围内且关于某一中心频率呈近似对称分布;该中心频率与气液两相压力相关,而与气泡大小关系不大;振动能量随频率的分布与气液两相压力及气液两相混合状态密切相关。

(4) 声波信号的时频分析结果能很好地捕捉到气泡雾化喷嘴射流时气相在溢出过程中的变化。通过对气泡雾化喷嘴射流时声波信号的时频分析,可挖掘出关于气泡压力、气泡大小、瞬时气体溢出量等对气泡雾化喷嘴射流过程有重要影响的信息,声波信号时频分析方法可作为气泡雾化喷嘴射流研究的一个有效途径。

参 考 文 献

- 1 Sovani S D, Sojka P E, Lefebvre A H. Effervescent atomization [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2001, 27(4): 483 - 520.
- 2 Ramamurthi K, Sarkar U K. Performance characteristics of effervescent atomizer in different flow regimes [J]. Atomization and Sprays, 2009, 19(1): 41 - 56.
- 3 Roesler T C, Lefebvre A H. Studies on aerated - liquid atomization [J]. International Journal of Turbo & Jet-Engines, 1989, 6(3 - 4): 221 - 230.
- 4 Lorcher M, Schmidt F, Mewes D. Effervescent atomization of liquids [J]. Atomization and Sprays, 2005, 15(2): 145 - 168.
- 5 Catlin C A, Swithenbank J. Physical processes influencing effervescent atomizer performance in the slug and annular flow regimes [J]. Atomization and Sprays, 2001, 11(5): 575 - 595.
- 6 黄鑫. 气泡雾化细水雾灭火有效性模拟研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2007.
Huang Xin. Study on the fire extinguishing efficiency of water mist produced by effervescent atomizer [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)
- 7 邹淑云, 刘忠, 李志鹏, 等. 离心泵空化状态与声发射信号特征关系试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 45 - 48.

- Zou Shuyun, Liu Zhong, Li Zhipeng, et al. Experiment on relationships between centrifugal pump cavitation conditions and acoustic emission signal characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 45 - 48. (in Chinese)
- 8 董全成, 艾长胜, 孙选, 等. 数控加工状态声谱特征的研究[J]. 振动、测试与诊断, 2006, 26(3): 217 - 220.
Dong Quancheng, Ai Changsheng, Sun Xuan, et al. Research on sound spectrum characters of CNC machining[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2006, 26(3): 217 - 220. (in Chinese)
- 9 王秀清, 王海燕, 杨世凤. 基于近场声全息的植物病害监测[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 256 - 261.
Wang Xiuqing, Wang Haiyan, Yang Shifeng. Plant disease detection based on near-field acoustic holography[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 256 - 261. (in Chinese)
- 10 Lin S P, Creighton B. Energy budget in atomization [J]. Aerosol Science and Technology, 1990, 12(3): 630 - 636.
- 11 向宇, 郭烈锦, 陈永利, 等. 气液两相雾化器喷雾噪声频谱特性的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(1): 49 - 52.
Xiang Yu, Guo Liejin, Chen Yongli, et al. Frequency characteristics of noise from a gas - liquid sprayer[J]. Journal of Xian Jiaotong Universtiy, 1998, 32(1): 49 - 52. (in Chinese)
- 12 Huang N E. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society A, 1998, 454(1971): 903 - 995.
- 13 Jones D L, Baraniuk R G. An adaptive optimal kernel time - frequency representation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(10): 2361 - 2371.
- 14 孙斌, 王二朋, 郑永均. 气液两相流动波动信号的时频谱分析研究[J]. 物理学报, 2011, 60(1): 014701-1-014701-8.
Sun Bin, Wang Erpeng, Zheng Yongjun. Time frequency spectral analysis of gas - liquid two-phase flow's fluctuations[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(1): 014701-1-014701-8. (in Chinese)
- 15 张宇辉, 金国彬, 李天云. 基于自适应最优核时频分析理论的简谐波分析新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 84 - 89.
Zhang Yuhui, Jin Guobin, Li Tianyun. A novel approach to interharmonics analysis based on adaptive optimal kernel time - frequency distribution[J]. Proceeding of the CSEE, 2006, 26(18): 84 - 89. (in Chinese)
- 16 钟佑明, 秦树人, 汤宝平. 希尔伯特-黄变换中边际谱的研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(9): 1323 - 1326.
Zhong Youming, Qin Shuren, Tang Baoping. Study on the marginal spectrum in Hilbert-Huang transform [J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(9): 1323 - 1326. (in Chinese)
- 17 Ghaemi S, Rahimi P, Nobes D S. Effect of bubble generation characteristics on effervescent atomization at low-liquid ratio operation [J]. Atomization and Sprays, 2010, 20(3): 211 - 225.