

# 液体物性对于多孔板型超声雾化器诸特性的影响

## 一、前言

超声波的雾化装置，由于是一种比较小且小容量的雾化装置，所以对其研究由来已久，并提出了多种方案。近年来又提出了与传统的雾化装置雾化结构不同的多孔板型超声雾化器，这就是应用墨水喷射式装置原理发展而来的雾化器。这种新的雾化方法采用的是：用压电振子使连接液体的多孔板挠曲振动，并利用其激励能量，通过小孔喷射液滴的雾化结构。它具有(a)粒子直径均匀，(b)粒子直径易调节，(c)雾化效率高，(d)空化稳定，(e)结构小型简单，(f)泵作用等优点。

这种多孔板是与液体相接触，再从小孔喷射出液滴，所以在实际应用时，必须了解液体的物理性质与雾化特性的关系，进行最佳设计。特别重要的是要弄清可能适用的液体的物理性质的范围，尤其是用水、液体燃料、药水等各种液体的雾化装置。

本文对在实际情况中可能运用的性质与雾化装置电气特性及雾化特性的关系进行了实验研究，以明确最佳设计方法及可能应用的范围。

## 二、雾化器构造与基本特性

在探讨液体物理性质和雾化特性关系之前，先简述一下雾化器的构造、工作原理及其基本特性。

### 1. 构造及工作原理概述

多孔板型超声雾化器剖视图如图1，它由圆环状压电振子、中央带有许多小孔的振动

板(多孔板)和空腔壳体等构成。

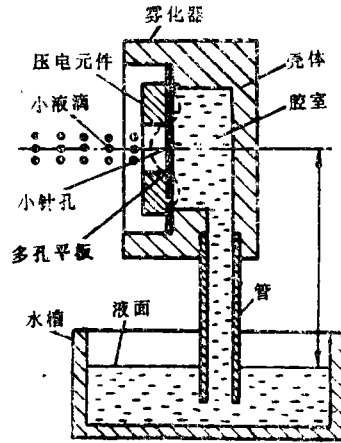


图1 多孔板型超声雾化器的剖视图

圆环状压电振子的外径10mm，内径3.9mm，厚1mm，材料为PCM5。振动板为直径16mm、厚50mm的不锈钢板，其中央有61个直径为 $80\mu\text{m}$ 的小孔。这两部分如图所示，与带有3mm深空腔的黄铜壳体连接着。

这一雾化器的工作原理可用图1简要说明。腔内压力 $P_c$ 可表示如下，

$$P_c = P_0 - \rho gh$$

这里， $P_0$ ， $\rho$ ， $g$ ， $h$  分别是大气压，液体比重，重力加速度和液面至小孔的高度。

振动板受压电振子激励作挠曲振动，在腔内液体中产生声压 $P_a$ 。它与振动板的振动同步，且满足(2)式，根据毕努里定理，液滴以(3)式飞翔速度 $V_d$ 射出。

$$P_a > 2\gamma/R + \rho gh \quad (2)$$

$$V_d = \sqrt{2P_a/\rho} \quad (3)$$

这里， $\gamma$ 、 $R$  分别是液体表面张力和在小孔上的液体表面曲率半径。

出于下一节所述的理由，振动板的振动采用二次振动模式。在图1中用虚线表明。

## 2. 雾化器样机的基本特性

图2为雾化器阻抗圆图。如图所示，雾化器有两个谐振频率  $F_{r01}$  和  $F_{r02}$ ，若腔内充有液体，则为  $F_{r01}$  和  $F_{r02}$ 。这里试验液体为煤油，其比重  $\rho$ ，粘度  $\eta$ ，表面张力在  $20^\circ\text{C}$  下，分别为  $0.79\text{g/cm}^3$ ， $1.5\text{cp}$  和  $28\text{dyn/cm}$ 。\*由于液体的注入，对二次振动模式的谐振频率  $F_{r02}$  阻抗影响很小，Pa 并不比在谐振频率  $F_{r01}$  时大，不会产生空穴效应。

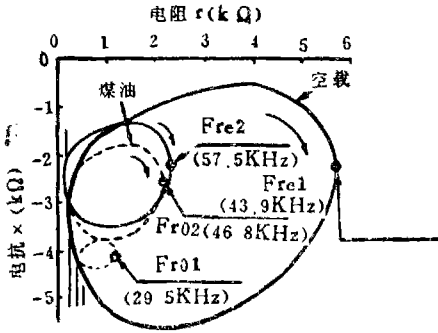


图2 在负载和空载情况下喷雾器的阻抗圆图

另外在稳定的60伏驱动电压时，雾化量频率特性表明，雾化量在谐振频率  $F_{r01}$  和  $F_{r02}$  上具有相同的雾化量极大值（即  $32\text{g/min}$ ）。但是，在一次振动模式的谐振频率  $F_{r01}$  上，由于空穴效应产生的气泡的影响，容易产生脉动的雾化，而在  $F_{r02}$  上雾化状态是稳定的。

图3是工作在  $F_{r02}$  时的雾化量 - 电压特性。雾化起始电压  $V_{st}$  约为  $6.5\text{V}$ ，在此电压时刚好产生满足(2)式的声压。雾化起始电压  $V_{st}$  到稳定雾化阈值电压  $V_{th}$  的区域  $X_1$ ，由于结构的非均衡等因素，雾化工作不稳定，所有喷出口不作喷射，而成为偏斜的轨迹。而从阈值电压  $V_{th}$  至最大雾化电压  $V_m$  的区域  $X_2$ ，电压增加，雾化量也随之增加。同时，随电压变化大小粒子直径也变化。在大于最大雾化电压  $V_m$  的区域  $X_3$  内，驱动电压  $V_0$  越大，由于空穴效应，气泡产生越显著，雾化

量反而减小。这些特征电压量  $V_{st}$ 、 $V_{th}$ 、 $V_m$  及最大雾化量  $W_m$ ，因液体种类而异，并且与液体的物理性质有着密切的关系。

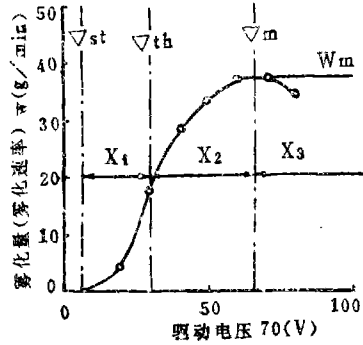


图3 雾化器在驱动电压作用下的特性曲线

## 三、液体的物理性质和雾化器特性

将雾化器应用于各种场合，必须清楚液体的物理性质对雾化器各特性的影响。

在此，根据雾化器工作原理，着重于那些可能对雾化器各特性影响较大的物理性质，即液体的比重  $\rho$ ，粘度  $\eta$ ，表面张力  $\gamma$  以及液体中的溶存空气量等。

表1给出了比较实用的液体燃料以及由上述考虑而选择的几种其他液体的物理性质。

表1. 液体的物理性质

No. 液体	比重 $\rho$	粘度 $\eta$	表面张力 $\gamma$
A 煤油	$0.79\text{g/cm}^3$	$1.5\text{CP}$	$28\text{dyn/cm}^*$
B 脱气煤油	0.79	1.5	28
C 轻油	0.80	20.0	28
D 净水	1.00	1.0	72.8
E 乙二醇-甲基醚	1.05	7.5	36.0
F 乙烯二醇	1.115	20.9	47.7
G 聚乙烯二醇	1.125	48.0	44.5

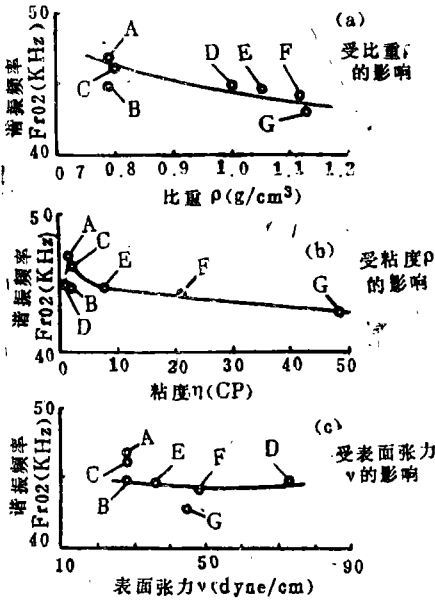
温度:  $20^\circ\text{C}$

\* 原文如此

## 1. 对谐振频率的影响

利用表1中的液体作喷雾试验,研究雾化器的第2谐振频率 $F_{r,02}$ ,找出 $F_{r,02}$ 与比重 $\rho$ ,粘度 $\eta$ ,表面张力 $\gamma$ 及溶存空气量的关系。

图4中(a)、(b)和(c)分别表示了 $F_{r,02}$ 与比重 $\rho$ ,粘度 $\eta$ 和表面张力 $\gamma$ 的关系。



注:图4(c)表面张力 $\gamma$

图4 在谐振频率 $F_{r,02}$ 上液体物理性质的影响

由图可知,谐振频率 $F_{r,02}$ 与比重 $\rho$ ,粘度 $\eta$ 有关,而表面张力 $\gamma$ 对谐振频率影响极小。

声压 $P_a$ 是压电振子和振动板组成的振动系统,对辐射阻抗 $Z_r$ 的反作用产生的,因此谐振频率 $F_{r,02}$ 受阻抗 $Z_r$ 的影响。 $Z_r$ 与 $\rho$ 成正比, $F_{r,02}$ 自然与 $\rho$ 有关。

另一方面,因为 $\eta$ 是与 $Z_r$ 无关的参数,所以理论上 $F_{r,02}$ 与 $\eta$ 无关。因此在图4(b)低粘度区域内,难以确定谐振频率与粘度是否有关,如果粘度 $\eta$ 大的液体同时其比重也大时,那么可以认为 $F_{r,02}$ 对于 $\eta$ 的关系很小。

通过这些并考虑到振动系统的工作原理,可知谐振频率 $F_{r,02}$ 主要受比重 $\rho$ 的影响。此外将普通煤油即试验液体A与脱气煤

油即试验液体B作比较时,发现谐振频率 $F_{r,02}$ 随着无溶存空气而变化的。

$Z_r$ 与比重 $\rho$ 和声速 $c$ 成正比。由于脱气而难产生空穴效应,因此体积压缩率 $\kappa$ 变化时声速 $c$ 也变化,结果 $F_{r,02}$ 随着 $Z_r$ 变化而改变。

从以上结论得到谐振频率 $F_{r,02}$ 受比重 $\rho$ 及溶存空气量所影响,其影响程度是在实验的 $\rho$ 及溶存空气量的范围内小于 $\pm 2$ kHz,因为振动系统Q值为10~15,所以这一变化在实用时不成问题。

## 2. 对雾化量的影响

雾化器的雾化量 $W$ 与液体的物理性质间的关系极重要。在实验研究它的关系时,雾化器的工作频率为对应于各种试验液体的谐振频率 $F_{r,02}$ ,工作电压 $60V_{rms}$ 是一定的,且雾化量 $W$ 采用接住被喷雾液体的回收方法测定。

图5中(a)、(b)及(c)分别表示雾化量 $W$ 与比重 $\rho$ ,粘度 $\eta$ 和表面张力 $\gamma$ 的关系。

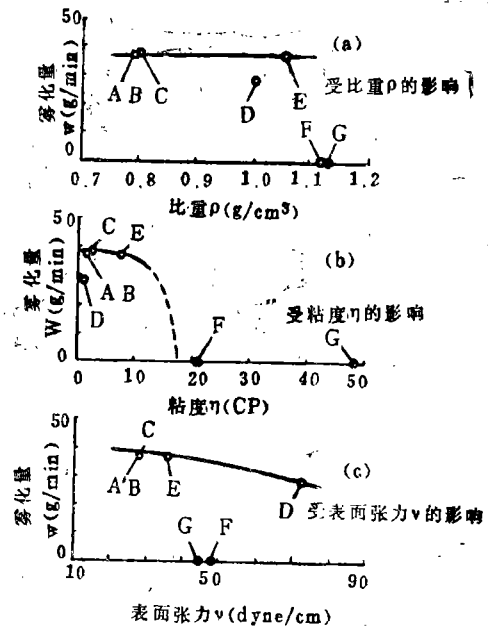


图5 液体的物理性质对雾化量 $W$ 的影响

试验液体F及G不能雾化,分析这类试验液体F及G和其他试验液体的区别知,在表1

注:图4(c)图5(c)受表面张力 $\gamma$ 的影响

显示的物理性质范围中, 决定能否进行雾化的主要因素是粘度 $\eta$ , 即在粘度 $\eta$ 为 10 ~ 20 CP 之间存在雾化允许极限。据图知其极限值为 15CP。

按照 Poissuill 振动法则, 液体的粘度 $\eta$ 很大, 当其振动时就不能看作是非粘性流体, 而振动系统的边界条件也完全变化了。并且由流体力学上知从喷嘴射出液体与束紧系数有关。粘度 $\eta$ 越大, 等效喷嘴变小, 也就不再能喷雾。上面结论就是基于这一理由, 考虑到雾化器的工作原理, 则粘度 $\eta$ 是决定其雾化极限的物理性质。

图5中(a)与(b)表示当粘度 $\eta$ 小于 10CP 时, 雾化量 $W$ 与比重 $\rho$ 和粘度 $\eta$ 无关。即被喷雾液体的比重 $\rho$ 越大, 粒子直径就越小, 比重越大的液体就易于微粒化。

除了高粘度的试验液体 F 和 G, 如图5(c)所示, 表面张力 $\gamma$ 与雾化量 $W$ 具有明显的关系。液体从喷嘴射出的条件是满足(2)式, 所以为了射出, 表面张力 $\gamma$ 越大, 声压 $Pa$ 也必须大。即表面张力 $\gamma$ 越大的液体, 要击破表面张力, 也就需要大的能量。换句话说, 在振动板给予液体的能量中, 减去击破起阈作用的表面张力 $\gamma$ 所需的能量, 剩下的用于喷出液体。

另外, 如果驱动电压不过分大, 几乎还没有产生空化气泡时, 则溶存空气的有无, 对雾化量影响是很小的。这在图5上比较试验液体A和B就可知道。

由以上的结果, 可明确下述的事实。也就是(a)粘度 $\eta$ 约为 15CP 以下能够雾化。(b)在约 10CP 以下, 雾化量 $W$ 与粘度 $\eta$ 及比重 $\rho$ 无关。(c)在这一范围内, 雾化量 $W$ 与表面张力 $\gamma$ 有关, 表面张力 $\gamma$ 越大时, 在同一驱动电压下的雾化量 $W$ 减少。(d)在适当的驱动电压时, 溶存空气量对雾化量 $W$ 无影响。

### 3. 对电压特性的影响

在此, 分析一下在图3中已说明的雾化起始电压 $V_{st}$ , 稳定雾化阈值电压 $V_{th}$ , 最大

雾化电压 $V_m$ 及最大雾化量 $W_m$ 与液体的物理性质之间的关系。表2显示了这些参数对应各试验液体A~E的实验结果。

图2 雾化的实验结果

编号	液 体	$V_{st}$	$V_{th}$	$V_m$	$W_m$
A	煤油	6.0V	30V	66V	38g/min
B	脱气煤油	8.0	30	100	41
C	轻油	9.0	40	82	42
D	净水	12.0	60	120	56
E	乙二醇-甲基醚	14.0	50	110	49

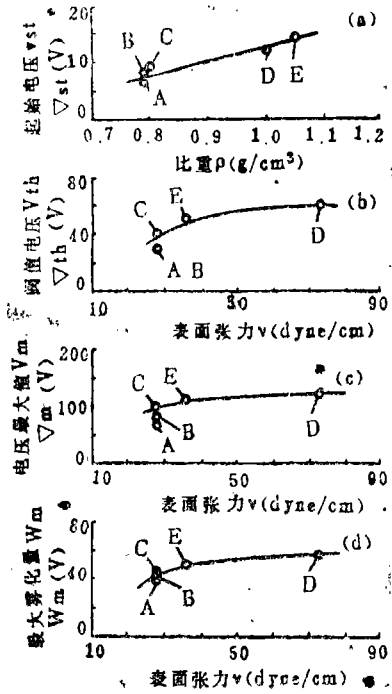
温度: 20°C

基于上述实验结果, 图6(a)~(d)表明了四种参数各受液体哪些物理性质影响。

雾化起始电压 $V_{st}$ , 如图6(a)所示, 主要由比重 $\rho$ 决定, 约为 $10 V_{m0}$ 。这一雾化起始现象, 是由众多喷嘴中一部分开始喷雾的现象。即微小振幅时, 由于加工组装带来的不均衡, 以致足有一部分的喷嘴的振幅极大, 因此也只从那些喷嘴射出。这时, 这一部分的喷嘴处是满足式(2)。用这样微小的振幅, 并且偏向振幅分布存在时, (2)式右边第2项作用较大, 因此可知雾化起始电压 $V_{st}$ 与比重 $\rho$ 的关系较大。

稳定雾化阈值电压 $V_{th}$ , 如图6(b)所示, 主要由表面张力 $\gamma$ 决定, 表面张力 $\gamma$ 越大,  $V_{th}$ 就越高。 $V_{th}$ 是使振动板能象平面活塞那样振动, 并使振动板上的所有众多喷嘴稳定喷雾的电压。即 $V_{th}$ 是对于所有的喷嘴, 使(2)式充分成立的驱动电压。为了(2)式充分成立, 表面张力 $\gamma$ 越大, 也就需要更大的声压 $Pa$ 。 $Pa$ 与振动振幅 $\delta$ 成正比,  $\delta$ 与驱动电压 $V$ 成正比, 因此 $\gamma$ 越大时, 充分满足(2)式的驱动电压 $V$ 也就越大。如前所述, 对微小的振动振幅来说, 组装加工上误差而产生的不均衡, 对振幅分布影响大; 而当大振幅时, 其影响相对很小。即表面张力越大时, 稳定雾化阈值电压 $V_{th}$ 也越大。不失一般性, 可以

取阈值电压约为 $40V_{rms}$ 。据此，在工业应用中，可以采用 $50\sim 60V_{rms}$ 的驱动电压。



注：图6(b)(c)(d)中，表面张力 $\gamma$

(a) 起始电压 $V_{st}$ 与比重 $\rho$ 的关系

(b) 阈值电压 $V_{th}$ 与表面张力 $\gamma$ 的关系

(c) 最大电压 $V_m$ 与表面张力 $\gamma$ 的关系

(d) 最大雾化量 $W_m$ 与表面张力 $\gamma$ 的关系

图6 液体的物理性质对电压特性的影响

最大雾化电压 $V_m$ 和最大雾化量 $W_m$ 如图6(c)和(d)所示，同时受表面张力 $\gamma$ 的影响。表面张力 $\gamma$ 起着喷嘴上阀的作用，且其作用随 $\gamma$ 增大而增大。 $\gamma$ 越大的液体，用高电压驱动可以阻止由喷嘴来的空气逆流，产生较大的声压 $P_a$ ，使大电压驱动成为可能。并且表面张力越大的液体，不易产生空穴效应，能量损耗也小。由此可得，最大雾化电压 $V_m$ 值是受表面张力 $\gamma$ 影响。同时，最大雾化量也一样随着表面张力 $\gamma$ 的增大而增大。由图6中(c)及(d)可知最大雾化电压 $V_m$ 和最大雾化量 $W_m$ 的典型值分别约为 $100V_{rms}$ 和 $45g/min$ 。

在图6(c)及(d)上，比较试验液体A和B，可知液体B的 $W_m$ 和 $V_m$ 都比液体A的大。与

其他液体相比，试验液体A(即煤油)中的溶存空气量特别多，并且含有数量较多的低蒸气压成份。由于气泡性空穴效应的产生，而大量吸收能量，使得试验液体A(煤油)与同图的曲线偏移很大。由此可知，溶存空气量对 $V_m$ 和 $W_m$ 影响较大。

#### 4. 对雾化能力控制特性的影响

提出间歇控制法作为这一雾化器简单的雾化能力控制法。要清楚获得线性控制特性的系统结构。而控制特性的线性往往取决于雾化器的液体供给系统惯性和稳定性。如果充分考虑这些问题再组织液体供给系统，那么就可实现良好的线性。由此，液体的物理性质对雾化能力控制法的影响是不小的。

这里，对各种物理性质的液体，根据间歇控制法原理，讨论雾化能力控制法的适用。

图7是应用表2中液体所得到的负载占空比控制特性。这里，驱动频率 $f_0$ 分别为各种试验液体的第2谐振频率 $F_{r02}$ ，试验液体A、B和C时，驱动电压 $V_0$ 约为 $50V_{rms}$ ，D和E时分别为 $80V_{rms}$ 和 $70V_{rms}$ ，占空工作频率 $f_d (= 1/t_2)$ 为 $30Hz$ ，雾化量 $W/W_{100}$ 之比是任意 $\alpha$ 上的雾化量 $W$ 与 $\alpha$ 为100%时的雾化量 $W_{100}$ 之比。

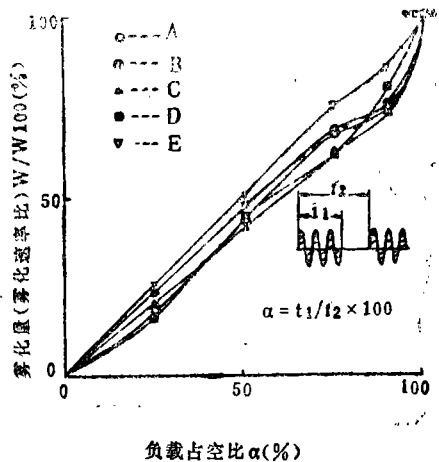


图7 液体物理性质对负载占空比控制特性的影响

由图可知有关表2中可能雾化的液体( $\eta \leq 10CP$ )，控制特性的有些非线性，通过负载

占空比控制法, 还是能够进行雾化能力控制的。而且, 如前所述在实用上通过对惯性和稳定性的充分考虑, 来组成液体供给系统, 这种微弱的非线性是能够充分加以改善的。

然后, 对于各试验液体, 其负载占空比控制曲线并不相同。因此当需要高精度线性控制特性时, 对应液体的物理性质变化, 给出最佳液体供给系统组成条件, 必须具备分别适合不同液体的液体供给系统。

### 5. 归纳

下面总结一下本文所提到的液体的物理性质对雾化器诸特性影响的研究结果。

(1) 谐振频率 $F_{r,02}$ 主要受到液体比重 $\rho$ 的影响。比重 $\rho$ 大 $F_{r,02}$ 较小。且 $F_{r,02}$ 受溶存空气量影响较大, 溶存空气量少 $F_{r,02}$ 就较小。

(2) 能否进行雾化是取决于粘度 $\eta$ 的影响。 $\eta$ 约大于15CP就不能进行雾化。

(3) 在可以稳定喷雾的比重 $\rho$ 和粘度的范围内, 即 $\rho \leq 1.05\text{g/cm}^3$ ,  $\eta \leq 10\text{CP}$ 时, 雾化量 $W$ 与 $\rho$ 及 $\eta$ 无关。且 $W$ 仅受表面张力 $\gamma$ 的影响, 如果驱动电压一定时,  $\gamma$ 增大则 $W$ 减少。

(4) 雾化起始电压约为 $10V_{r,m}$ 。 $V_{s,t}$ 与比重 $\rho$ 有关,  $\rho$ 越大则 $V_{s,t}$ 越高。

(5) 稳定雾化的阈值电压 $V_{th}$ 约为 $40V_{r,m}$ 。 $V_{th}$ 与表面张力 $\gamma$ 有关,  $\gamma$ 越大 $V_{th}$ 就越高。

(6) 最大雾化电压 $V_m$ 和最大雾化量 $W_m$ 分别约为 $100V_{r,m}$ 和 $45\text{g/min}$ 。 $V_m$ 和 $W_m$ 都与表面张力 $\gamma$ 有密切关系。 $\gamma$ 越大则为高电压和大雾化量状态。即这种雾化器对 $\gamma$ 越大的液体, 越能发挥大的雾化能力。根据工作原理就可得到这一恰如其份的结论。

(7) 根据负载占空比控制特性来控制雾化能力, 至少在下列范围中能适用。即比

重 $\rho$ , 粘度 $\eta$ 与表面张力 $\gamma$ 分别为 $\rho \leq 1.05\text{g/cm}^3$ ,  $\eta \leq 10\text{CP}$ 和 $\gamma \leq 80\text{dyn/cm}$ 。但是,  $\rho$ 、 $\eta$ 、 $\gamma$ 及溶存空气量, 会导致其控制特性的非线性, 为了得到高精度的线性, 必须具有适应各类液体的最佳的液体供给系统。

## 四、结语

通过实验分析研究了雾化液体的物理性质对多孔板超声雾化器的诸特性的影响。

因为受所采用的雾化器限制, 要将具体的数值作为普遍值表示是困难的。在此给出下面几点定性的结论。

(1) 谐振频率 $F_{r,02}$ 与液体的比重 $\rho$ 和溶存空气量有关。比重 $\rho$ 越大且溶存空气量少, 则谐振频率 $F_{r,02}$ 越小。

(2) 雾化极限由粘度 $\eta$ 决定。振动的非粘性液体是可以雾化的条件。

(3) 雾化能力和雾化稳定性与表面张力 $\gamma$ 有关, 对于这种雾化器的喷雾结构来说, 表面张力 $\gamma$ 是最重要的物理性质。

(3) 根据负载占空比控制法的雾化能力控制, 在可以稳定雾化的物理性质范围, 是适用的。其线性程度与比重 $\rho$ 、粘度 $\eta$ 、表面张力 $\gamma$ 和溶存空气量有关。

上述结论是定性且实验性的, 显然它表明了这种雾化器诸特性受液体物理性质的影响及程度。因此, 适应各类用途的雾化器, 应已知所具备的被喷雾液体的必要条件且设计的条件。今后将对广泛应用于工业的这种雾化器有所帮助。

丁怡译自

《日本音响学会杂志》1988, Vol. 44

No. 6, P425~430

吴绳武 刘守华校

(上接第38页)

门宽和门位, 以满足各种实验条件。这里所提出的两种声速测量方法, 工作温度高达 $800^\circ\text{C}$ , 充分显示了该系统的能力, 而其分辨率

达到了 $\pm 0.1\text{ns}$ , 总精度好于 $3\text{ns}$ 。

高玉译自 Ultrasonics 1988 Vol. 26  
September

吴绳武校