

文章编号:1007-6735(2012)05-0475-06

蒸汽水下喷注噪声的试验研究

何爱妮, 袁益超, 袁利芬, 袁建, 吴开奇

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 利用蒸汽直接加热给水的过程中,蒸汽经配汽管喷入水空间时,由于蒸汽泡的体积变化及蒸汽与周围水之间的湍流混合,在水空间内形成强烈的振动噪声.针对这一问题,采用不同结构的配汽管,在不同的水温和蒸汽流量下进行试验研究.结果表明,喷注 A 声级噪声主要受水温和蒸汽流量的影响,其中又以水温为主,蒸汽流量和 A 声级噪声间并不完全呈线性关系.

关键词: 噪声; 蒸汽喷注; 试验; 配汽管
中图分类号: TB 53 **文献标志码:** A

Experimental Study on Underwater Noise from Steam Jet

HE Ai-ni, YUAN Yi-chao, YUAN Li-fen, YUAN Jian, WU Kai-qi

(School of Energy and Power Engineer, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In a direct contact system, steam is ejected to heat water through an ejector. During the process of ejection, the noise is aroused due to the volume change of bubbles, and the turbulent mixing between steam and adjacent water. To solve this problem, experiment was done under variant water temperature and steam flux using ejectors with different structures. The results show that the jet noise is mainly affected by water temperature and steam flux, between them the water temperature is the main factor, and there exists partially a linear correlation between steam flux and A-weighted sound level.

Key words: noise; steam jet; experiment; ejector

利用蒸汽加热给水的直接接触式加热方式由于具有其它换热方式所不能比拟的优点而应用于生活及生产的许多方面,如企业、宾馆、饭店等需要集中供热的场所及除氧器、给水加热器、蓄热器等动力设备中.然而,蒸汽水下喷注加热液体的过程中会产生振动及噪声,损害设备,造成环境污染,如对于除氧器水箱内的再沸腾装置,蒸汽喷射进入水空间时会

产生振动及噪声,引起除氧器振动,对除氧器安全运行造成影响.因此,研究蒸汽水下喷注噪声的产生机理,利用噪声的变化规律控制噪声对减轻噪声带来的危害是有意义的.

喷注噪声的研究源于 20 世纪 50 年代, Lighthill 首先用声学类比的方法推导出了著名的 V^8 定律^[1],该定律成为研究及预测湍流喷注噪声的重要基础.

收稿日期: 2012-04-04
作者简介: 何爱妮(1986-),女,硕士研究生.研究方向:节能技术. E-mail: han_86ling@sohu.com
袁益超(联系人),男,教授.研究方向:节能技术. E-mail: ychuan@163.com

之后各国学者在广泛的范围内,从低压到高压阻塞喷注、从亚音速到超音速、从以冷空气为喷注媒质到任何气体在不同温度下的喷注,对在空气中的气体喷注噪声的机理进行了大量研究,基本掌握了气体喷注噪声的辐射规律^[2],在小孔喷注噪声、高压阻塞喷注的湍流噪声、脉动喷注噪声与稳态喷注噪声的关系等问题上^[3-5]进行了研究,并根据研究成果开发出了小孔消声器.90年代中期,马宪国等人^[6-8]对蒸汽水下喷注噪声进行了试验研究,定性地分析了影响蒸汽水下喷注噪声的影响因素,其试验结果为喷注噪声的进一步研究奠定了基础.浙江大学化工机械研究所的郝宗瑞等^[9]通过试验测试对水下排气形成的两相流态和排气噪声特性进行了研究,发现随着排气速率的增大,排气形成的两相流场由气泡流态过渡到射流流态,射流状态下的流动噪声高于气泡流态下的噪声.

然而,到目前为止,对蒸汽水下喷注噪声所作的研究并不多,已有的试验由于蒸汽流量范围不大(最大为9 kg/h^[8])等原因,试验结果有局限性,不能普遍运用,因此有必要对其作进一步研究.

1 噪声源分析

从包含质量源、力源项的区域的流体力学的连续性方程和动量方程出发,通过声学假设及某些运算后,可得到一个独立的微分方程^[10],即广义的Lighthill方程式,它的左边是一个波动方程的形式,右边则是能解释为声源的项.

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c_0^2} \ddot{p} = -\dot{q} + \nabla \cdot \mathbf{f} - \frac{\partial^2 \tau_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (1)$$

式中, p 为声压,Pa; c_0 为液体中的声速,m/s; q 为液体中单位体积内质量的脉动速率,kg/m³; $\mathbf{f}$ 为作用在单位体积流体上的脉动外力,N; τ_{ij} 为流体应力张量,N/m.

式(1)给出了声学中主要类型的声辐射源,包括:

- a. 进入到流体中的非平稳质量流引起的脉动体积声源;
- b. 施加在刚性界面上的非平稳力作用下的脉动力声源;
- c. 与流体动力运动本身有关的分量,对于液体流,主要是与湍流运动有关的湍流声源.

蒸汽水下喷注时,不存在刚性界面的非平稳力作用,因此,主要考虑由质量流及湍流引起的噪声.

2 喷注噪声的影响因素

蒸汽在过冷液中喷注时,大量的蒸汽经过汽液相变和湍流等复杂的过程,直接被分割成许许多多的汽泡.由于汽液混合层内存在较大的温度梯度,所形成的汽泡会很快地塌缩破裂.在汽泡溃灭过程中,由于体积迅速变化,造成强烈的压力脉动,从而产生强烈的体积脉动噪声.此外,高速的蒸汽喷入水中与周围低速水发生湍流混合,使水的稳定状态受到破坏而发生很大的扰动,由此产生湍流噪声.

对于脉动体积声源,仅与流体的脉动质量有关,因此将式(1)简化后可推得^[11]

$$p(r, t) = \frac{\rho_0 (R^2 \ddot{R} + 2R\dot{R}^2)}{r} \quad (2)$$

式中, ρ_0 为周围液体的密度,kg/m³; r 为汽泡中心至流场中任一点处的径向距离,m; R 为汽泡半径,m.

对于水中一个孤立球形汽泡,根据汽液分界面上的热力学平衡条件,当汽泡稳定时有

$$p_v - p_l = \frac{2\sigma}{R} \quad (3)$$

式中, p_v 为汽泡内压力,Pa; p_l 为汽泡外液体压力,Pa; σ 为汽液界面上的表面张力,N/m.

又对于液体中任一自由汽泡,有汽泡壁速度^[11] U 为

$$U = \left\{ \frac{2}{3\rho} p_\infty \left[\left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - 1 \right] - \frac{2p_0}{\rho} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \ln \left(\frac{R_0}{R} \right) + \frac{2\sigma}{\rho R} \left[\left(\frac{R_0}{R} \right)^2 - 1 \right] + \frac{3k\Delta T}{4\pi\rho\gamma R} \left[\left(\frac{R_0}{R} \right)^2 - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中, p_∞ 为无穷远处液体的压力,Pa; p_0 为初始时刻汽泡内的蒸汽压力,Pa; R_0 为汽泡初始半径,m; $\sigma = \sigma(T)$ 为汽液界面上的表面张力,N/m; γ 为蒸汽的汽化潜热,J/kg; ρ 为液体的密度,kg/m³; ρ_v 为汽泡内的蒸汽密度,kg/m³; k 为蒸汽和水之间的传热系数,W/(m²·K); ΔT 为蒸汽和水之间的温差,K.

汽泡壁速度反映的即是汽泡半径随时间的变化.

从式(2)可以看出,汽泡半径变化的快慢直接影响到声压的大小,汽泡的初始半径及液体密度对声压的大小也有影响.从式(3)及式(4)可以看出,汽泡半径的大小及半径变化与汽泡内外的蒸汽压力、汽泡的表面张力、蒸汽温度、蒸汽和周围液体之间的温差等因素有关.汽泡内的蒸汽压力变化复杂,难以直

接测量得到,汽泡的表面张力与汽泡周围液体的温度有关.因此,由质量流引起的体积脉动噪声源于汽泡破裂时产生的噪声,与蒸汽和周围液体之间的温差、周围液体的温度等因素有关.

对于湍流产生的声波有^[10]

$$p(r,t) = \frac{\rho_0 u}{2\pi r} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_V u'_i(t') dV \quad (5)$$

式中, u 为流体的平稳速度,m/s; $u'_i(t')$ 为流体的脉动速度,m/s; $\int_V u'_i(t') dV$ 为流体脉动速度的体积分.

从式(5)中可以看出,湍流噪声的声压与流体的速度有关.

3 试验系统

经过上述对声源及其影响因素的分析,可以得出蒸汽水下喷注时,汽泡生长、破裂过程引起的压力脉动和由速度剪切引起的湍流噪声是噪声的来源,

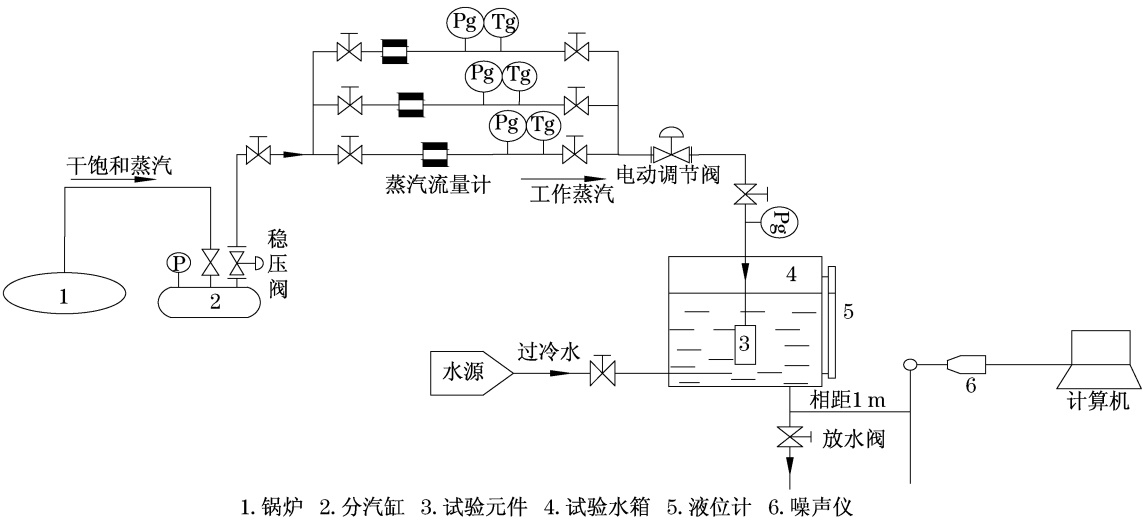
水温、蒸汽流量等在一定程度上对喷注噪声有影响.由此,设计建立了相应的试验系统装置,其主要目的是对 3 种不同结构的蒸汽配汽管(喷头)进行单喷头的噪声对比试验,研究水温、蒸汽流量及喷头结构对噪声的影响规律.

3.1 试验系统介绍

试验是以一定压力的蒸汽在敞口水箱内通过不同结构的配汽管喷注加热过冷水进行的.如图 1 所示,整个试验系统由 4 个部分组成:蒸汽发生系统、过冷水系统、蒸汽水下喷注系统和数据采集系统.

3.2 试验试件

试验试件为开有多个小孔的配汽管,共 3 种结构.配汽管管径均为 $\phi 76 \times 5$,各配汽管开孔情况如表 1 所示,开孔总面积相同.以 3 号试件结构为例,试件结构如图 2 所示.



1. 锅炉 2. 分汽缸 3. 试验元件 4. 试验水箱 5. 液位计 6. 噪声仪

图 1 试验系统图

Fig.1 Schematic of experimental system

表 1 试验试件结构参数
Tab.1 Structural parameters of ejectors

试件编号	开孔孔径 d/mm	孔排间距 S/mm	孔数 $n/\text{个}$
1	5	12	196
2	8	20	77
3	10	25	49

3.3 试验仪器

a. 温度测量

蒸汽温度由精度为 A 级的 PT100 铂电阻测量,水温由均匀布置在水箱内的铜-康铜热电偶测量.

b. 压力测量

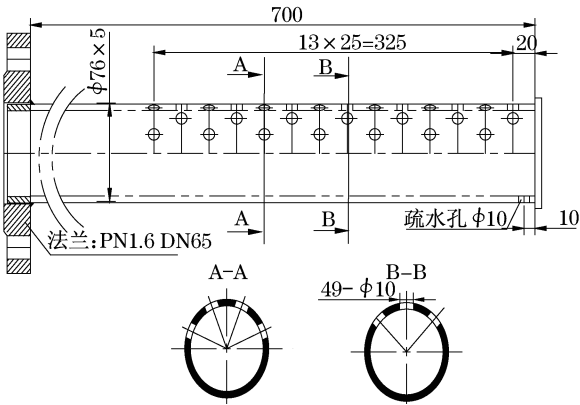


图 2 试验试件结构图

Fig.2 Structural schematic of ejector

蒸汽压力由精度为0.2级的CECY-160型压力变送器及EJA430压力变送器测量,进水箱前的喷注蒸汽压力由精度为0.2级的1151电容式压力变送器测量.

c. 流量测量

蒸汽流量分别由精度为1级的YF105-AGSC2-CD及YF110-AGSC2-CD涡街流量计测量,蒸汽流量在0~500 m³/h范围内时由YF105型测量,流量在500~1 662 m³/h范围内时由YF110型测量.

d. 噪声测量

噪声由HS6288B声级计测量.

e. 数据采集

压力变送器、涡街流量计、电动调节阀输出等信号由ADAM4118型模拟输入模块采集,铂电阻信号及热电偶信号分别由ADAM4015T型6路热电阻模块及ADAM4018型8路热电偶模块采集,所有采集信号同时输入计算机,由数据采集程序实时采集并记录各项试验数据.电动调节阀输入信号经由ADAM4024模拟输出模块从计算机输入.

4 结果与分析

通过试验发现,蒸汽水下喷注时形成的噪声由两部分组成:一是高温蒸汽在接触到低温水时由于凝结而引起的噪声;二是高速蒸汽喷射时由于湍流产生的噪声,且以前者为主.

4.1 水温对喷注A声级噪声的影响

试验发现,对于一定的配汽管结构和一定的蒸汽流量,随着水温的升高,A声级噪声先逐渐增加,达到最大值后又逐渐减小,当水温接近饱和温度时喷注噪声明显低于喷注起始噪声.

对于一定的喷注蒸汽流量,水温较低时,蒸汽温度与过冷水温度之差大,气泡半径的变化速度快,产生的噪声的声压高,同时由于凝结换热速度快,气泡破裂所需的时间短,产生的噪声的频率高^[11],而人耳对于高频率的声音不敏感.所以,水温低时,虽然气泡产生的噪声声压高,但喷注时高频成份较多,使A声级噪声较低.随着水温的升高,气泡破裂产生的噪声声压降低,同时,噪声的频率降低,相应的A声级噪声上升.当水温进一步升高,气泡破裂产生的A声级噪声会达到一个最大值.随后,水温进一步升高,气泡破裂产生的噪声声压和频率进一步降低,喷注噪声中的低频成份比重增加,使得A声级噪声下降.当水温接近饱和温度时,气泡基本不再破裂,

而是逸出水面,此时由汽泡破裂引起的噪声很小,基本为零.在不同的试验条件下如不同的蒸汽流量、不同的配汽管结构,所得到的试验结果如图3~5所示.

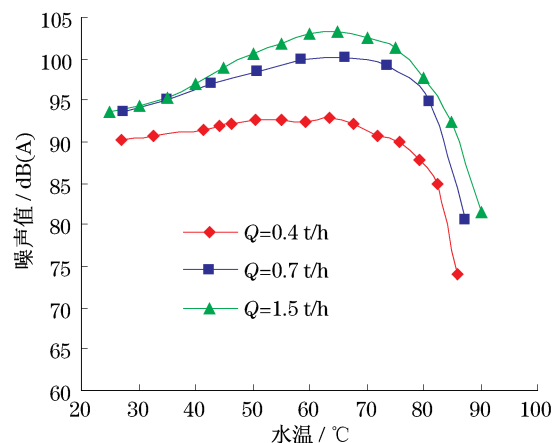


图3 1号试件不同蒸汽流量下噪声的变化规律
Fig.3 Variation of noise under different steam flux of No.1 ejector

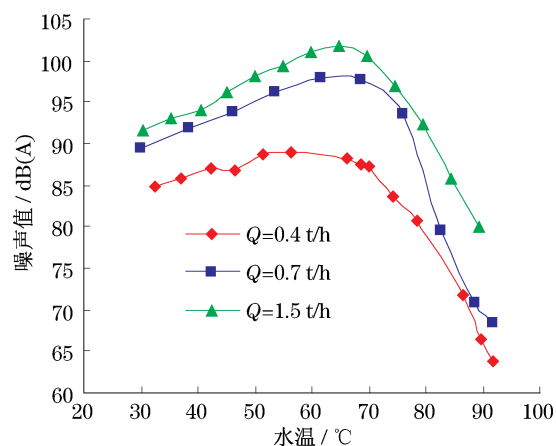


图4 2号试件不同蒸汽流量下噪声的变化规律
Fig.4 Variation of noise under different steam flux of No.2 ejector

从图3~5中可以看出,不同蒸汽流量的情况下,噪声随水温变化规律基本相同,即随着水温升高,A声级噪声先逐渐增加到达最大值后,随着水温的进一步升高A声级噪声迅速降低.

马宪国等^[6]也曾通过试验得到相同的结果,其试验中喷口最小孔径为4 mm,最大孔径为8 mm.本试验中喷口最小孔径为5 mm,最大孔径为10 mm,由试验结果可得,随着配汽管开孔孔径的变化,水温对A声级噪声的影响规律也基本不变.

4.2 蒸汽流量对喷注A声级噪声的影响

对于同一种结构的配汽管,蒸汽流量的变化也

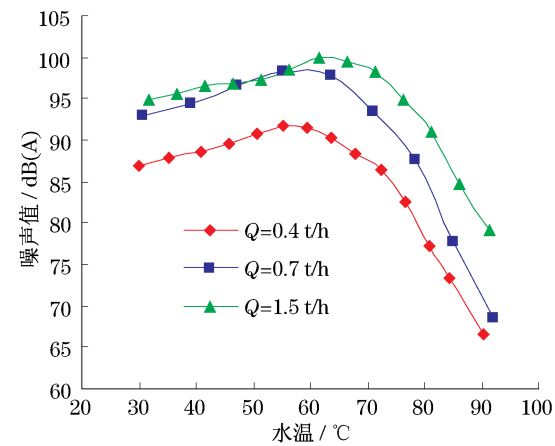


图 5 3 号试件不同蒸汽流量下噪声的变化规律
Fig.5 Variation of noise under different steam flux of No.3 ejector

反映了流速的变化.水温较低时,随着蒸汽流量增加,其喷注噪声也增加,当流量增加到某个临界值后,流量的变化对噪声的影响较小.水温较高时,随着蒸汽流量增加,喷注噪声增加,如图 3~5 所示.

在蒸汽喷注的过程中,汽泡体积变化引起的脉

动噪声和湍流噪声是共同作用的.

蒸汽流量小于临界流量时,流量小,速度剪切和湍流混合的作用不明显,产生的湍流噪声并不显著,此时的噪声主要是由汽泡体积变化产生的,噪声源单一,产生的声压级小.

蒸汽流量增加,蒸汽流速大,湍流强度高,速度剪切和湍流混合的作用增加,同时存在汽泡体积变化产生的噪声,使得声压级有所增加.

当蒸汽流量进一步增加,大于某一临界值后,水温低,蒸汽与周围水间的温差大,汽液两相之间的传热和相变占主导,汽泡体积变化引起的脉动噪声为主要声源,湍流噪声为次要声源,因此蒸汽流量的变化对声压级的影响小;水温升高,蒸汽与周围水间的温差小,汽泡体积变化缓慢,湍流噪声作用明显,此时,蒸汽流量大,声压级大.

以 1 号试件为例,部分试验数据如表 2 所示.从表 2 看出,不同水温的情况下,流量增幅相同时其噪声值增加的幅度不同,由此可见,蒸汽流量和 A 声级噪声间并不完全呈线性关系.

表 2 1 号试件部分试验数据
Tab.2 Part of experimental data of No.1 ejector

水温/℃	流量/(t·h ⁻¹)	流量的变化	A 声级噪声值/dB(A)	噪声值的变化
40	0.4		91.5	
	0.7	比 0.4 增加 75%	96.9	比 91.5 增加 5.9%
	1.5	比 0.7 增加 114%	97.0	比 96.9 增加 0.1%
66	0.4		92.1	
	0.7	比 0.4 增加 75%	100.2	比 92.1 增加 8.8%
	1.5	比 0.7 增加 114%	103.2	比 100.2 增加 3.0%
80	0.4		87.7	
	0.7	比 0.4 增加 75%	94.9	比 87.7 增加 8.2%
	1.5	比 0.7 增加 114%	96.7	比 94.9 增加 1.9%

4.3 孔径对喷注 A 声级噪声的影响

根据小孔消声器的原理,孔径大小对噪声是有影响的.小孔间距对噪声也有影响,但其影响效果受到孔径大小的影响,因此,蒸汽流量相同时,在孔间距比(即两个小孔中心距/孔径)基本不变的情况下,对比各试件的试验结果可得到孔径对噪声的影响,如图 6、图 7(见下页)所示.

小流量时,从图 6 可以看出,在低温区,同一水温下最大噪声值与最小噪声值相比,最大相差约 9%;在高温区,同一水温下最大噪声值与最小噪声值相比,最大相差 21%.大流量时,从图 7 可以看出,在低温区,同一水温下最大噪声值与最小噪声值相比,最大相差 4.2%;在高温区,同一水温下最大噪声值与最小噪声值相比最大相差 3.1%.

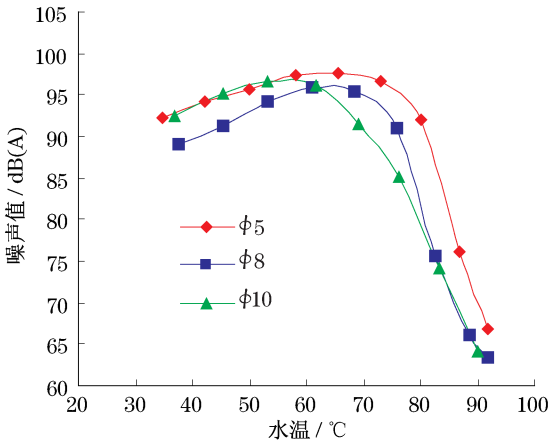


图 6 Q = 0.7 t/h 时孔径对噪声的影响
Fig.6 Effect of the nozzle diameter on the noise when Q's equal to 0.7 t/h

从试验结果可得,孔径对噪声有影响.在小流量时,孔径对噪声的影响较大,在大流量时,孔径对噪声的影响较小.此外,孔径大小改变喷注 A 声级噪声曲线的形状和最大声压级出现的位置.

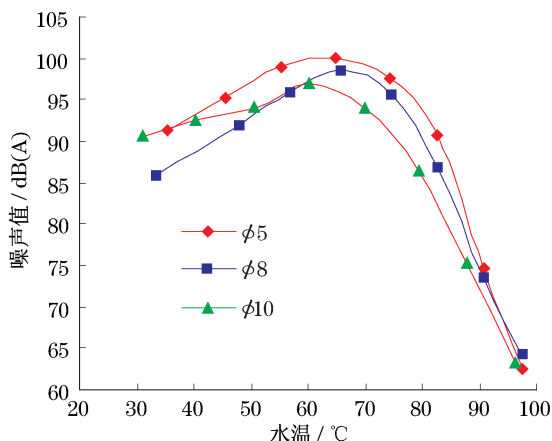


图7 $Q = 1.5 \text{ t/h}$ 时孔径对噪声的影响
Fig.7 Effect of the nozzle diameter on the noise when Q 's equal to 1.5 t/h

5 结 论

a. 蒸汽水下喷注时,主要的喷注声源为汽泡破裂引起的噪声及湍流噪声,且以前者为主.

b. 蒸汽流量不同、配汽孔孔径不同时,水温对喷注 A 声级噪声的影响规律基本相同,即随着水温的升高,A 声级噪声逐渐增加,当水温升高到某一程度后,A 声级噪声达到最大值,之后随着水温进一步升高,A 声级噪声开始迅速下降.

c. 喷注 A 声级噪声和蒸汽流量间并不完全存在线性关系.水温较低时,随着蒸汽流量增加,其喷注噪声也增加,当流量增加到某个临界值后,流量的变化对噪声的影响小.水温较高时,随着蒸汽流量增加,喷注噪声增加.

d. 当蒸汽流量小时,孔径对噪声的影响较大;当蒸汽流量大时,孔径对噪声的影响较小.

参考文献:

- [1] Lighthill M J. On sound generated aerodynamically [J]. Proc Roy Soc A, 1952, 211(1107): 564 - 587.
- [2] 马大猷. 湍流喷注噪声定律的发展 [J]. 声学学报, 1987, 12(5): 321 - 328.
- [3] 马大猷, 李沛滋, 戴根华, 等. 小孔喷注噪声和小孔消声器 [J]. 中国科学, 1977, (5): 445 - 455.
- [4] 马大猷, 李沛滋, 戴根华, 等. 高压阻塞喷注的湍流噪声 [J]. 声学学报, 1979, 14(3): 176 - 181.
- [5] 丰乐平, 马大猷. 脉动喷注噪声与稳态喷注噪声的关系 [J]. 声学学报, 1990, 15(5): 378 - 383.
- [6] 马宪国, 赵在三, 陈之航. 疏水进入除氧器水箱喷注噪声的实验研究 [J]. 华东工业大学学报, 1997, 19(2): 10 - 16.
- [7] 马宪国, 陈之航, 赵在三. 动力设备中蒸汽喷注噪声的研究 [J]. 动力工程, 1998, 18(2): 60 - 64.
- [8] 马宪国, 胡兴. 蒸汽水下喷注噪声的实验研究 [J]. 热能动力工程, 2000, 15(9): 627 - 629.
- [9] 郝宗瑞, 王乐勤, 吴大转, 等. 水下气体喷射噪声特性研究 [J]. 工程热物理学报, 2010, 31(9): 1492 - 1495.
- [10] 罗斯 D. 水下噪声原理 [M]. 北京: 海洋出版社, 1983.
- [11] 胡兴, 马宪国. 蒸汽水下喷注噪声的产生机理和辐射规律的研究 [J]. 上海理工大学学报, 2000, 22(1): 5 - 8.