

基于 Hartmann 哨超声喷嘴的谐振腔结构仿真研究

陶嘉琪,姚福锋,鞠东兵,刘建成

(中国船舶集团有限公司第七〇三研究所,黑龙江 哈尔滨 150078)

摘要:为便于用试验方法研究汽轮机除湿问题,设计了一种新型大流量、高雾化度的喷嘴,在喷嘴设计中融入类似 Hartmann 哨的谐振腔结构,并通过超声波效应增强对水滴的雾化效果。采用 Fluent 流体仿真软件,对湿蒸汽环境下不同 Hartmann 哨谐振腔结构尺寸的流场速度、压力脉动以及谐振频率进行数值模拟,得到最佳谐振腔结构尺寸。研究结果表明:喷嘴入口压力一定时,改变谐振腔与喷嘴出口的角度(谐振腔夹角),速度脉动会随谐振腔夹角的增大而增大,而压力脉动随谐振腔夹角增大呈先增大后减小的趋势,在 125° 夹角下出现峰值; 125° 夹角下速度脉动最大值区域及谐振频率随谐振腔直径增大而减小;最终确定谐振腔的结构参数,其夹角为 125° 、直径为 3.4 mm、深度为 6.4 mm,该结构参数下谐振频率为 21 kHz,符合所需频率。

关键词:Hartmann 哨;谐振腔;谐振频率;速度脉动;压力脉动

中图分类号:TK263

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.03.026

[引用本文格式]陶嘉琪,姚福锋,鞠东兵,等.基于 Hartmann 哨超声喷嘴的谐振腔结构仿真研究[J].热能动力工程,2024,39(3):207-214.TAO Jia-qi,YAO Fu-feng,JU Dong-bing,et al. Simulation study on resonant cavity structure based on Hartmann whistle ultrasonic nozzles[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2024,39(3):207-214.

Simulation Study on Resonant Cavity Structure based on Hartmann Whistle Ultrasonic Nozzles

TAO Jia-qi, YAO Fu-feng, JU Dong-bing, LIU Jian-cheng

(No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078)

Abstract: In order to study the dehumidification problem of steam turbine by the experimental method, a new type of nozzle with large flow rate and high atomization degree was designed, and a resonant cavity structure similar to Hartmann whistle was incorporated into the nozzle design, hoping to enhance the atomization effect of water droplets through the ultrasonic effect. The fluent fluid simulation software was used to numerically simulate the velocity, pressure pulsation and resonant frequency of the flow field under different Hartmann whistle resonant cavity structure sizes, and the optimal resonator layout structure size was obtained. The results show that when the nozzle inlet pressure is constant, changing the angle between the resonant cavity and the nozzle outlet (i.e. resonant cavity angle) increases the velocity pulsation with the increase of the resonant cavity angle, while the pressure pulsation increases first and then decreases with the increase of the resonant cavity angle, reaching a peak at an angle of 125° ; the maximum velocity pulsation region and resonant frequency decreases with the increase of resonant cavity diameter; the structural parameters of the resonant cavity are finally determined that its angle is 125° , diameter is 3.4 mm and depth is 6.4 mm; the resonant frequency under this structure parameter is 21 kHz, which meets the required frequency.

Key words: Hartmann whistle, resonator, resonant frequency, velocity pulsation, pressure pulsation

引言

多年来,湿蒸汽除湿问题一直是饱和汽轮机设计中被持续关注的方面,通过模拟湿蒸汽环境进行试验研究是一种可行的手段^[1-3]。湿蒸汽中的增湿雾化通常通过喷嘴来实现。一般来说,气力辅助式喷嘴的液体雾化过程可以分为两个阶段:第1个阶段是,高速气体将液体撕裂成液膜、液丝、液带和大液滴;第2个阶段是,通过气体进一步将这些液体分解成越来越小的液滴来完成雾化^[4-5]。

Hartmann 哨是一种专门设计的谐振腔结构,该结构可以产生气流超声振荡。采用 Hartmann 哨的雾化喷嘴时,其液滴的雾化效果取决于气体的压力、流速以及脉动振荡效果。在 Hartmann 哨设计谐振腔的作用下,喷嘴可进一步使液滴表面发生形变,从而提高喷嘴的雾化效果^[6-8]。李洪喜等人^[9]研究了一种高效喷雾的超声激振喷嘴,通过仿真获得了共振距离与喷嘴撞壁角对流场的影响。刘旭泽等人^[10]运用试验手段对 Hartmann 哨结构的超声雾化喷嘴进行了雾化特性研究,得到了不同气压对雾滴索特平均直径(SMD)、雾化角和用水量的关系。Narayanan 等人^[11]研究表明,声场的存在会使液滴发生较大的变形,加入 Hartmann 哨的流体动力式喷嘴会比普通的流体动力式喷嘴雾化效果更好。

综上所述,本项研究根据模拟试验对大流量、高雾化度喷嘴的要求,提出了一种新型雾化喷嘴结构,在喷嘴结构中加入 Hartmann 哨谐振腔,并对该谐振腔结构开展气动性能研究。

1 新型带 Hartmann 结构的喷嘴设计方案

1.1 总体结构方案

该喷嘴结构如图 1 所示,由汽相通道、液相通道和谐振腔 3 部分组成。图 1 在雾化喷嘴直径方向上设计若干蒸汽喷射孔和 Hartmann 哨型谐振腔,二者呈一定角度布置。汽相通道为设置在中间圆柱面外壁 1 圈的 36 个圆形气孔,液相通道为 1 圈 36 个方形槽。在每个汽相通道和液相通道之间设置 1 个谐振腔。蒸汽从汽相通道流出产生射流,冲击谐振

腔产生激励,并与从液相通道中喷出的液体发生撞击,使液滴雾化。同时,通过谐振腔使汽体产生共振,进一步促进液体雾化。

1.2 谐振腔结构方案

由于谐振腔的夹角、直径以及深度是影响汽相激励的主要参数,因此本文对谐振腔的尺寸进行多方案仿真分析,得到满足工程设计所需的最佳结构尺寸。若要得到该结构下较好的汽相激励及液滴破碎效果,谐振腔的谐振频率以 21 kHz 左右为宜^[12]。

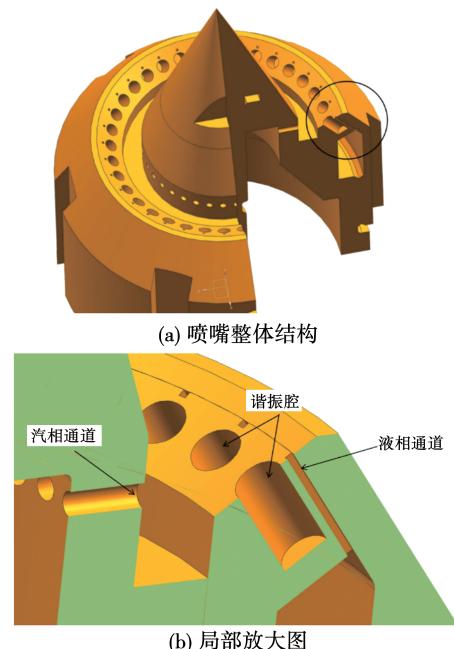


图 1 喷嘴结构图

Fig. 1 Nozzle profiles

对于图 1 具有 36 个谐振腔的喷嘴结构,选取其中 1 个典型流道开展计算仿真研究。简化后的谐振腔基本结构如图 2 所示。图 2 中,1 为圆柱形蒸汽喷射孔,距喷射孔右侧布置有圆形谐振腔 2。为使汽相冲击谐振腔后产生激励并继续与后部的液相发生较大面积的碰撞,将汽相通道与谐振腔的中轴线按一定角度 θ 布置,并将夹角设定在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 的范围内。图 2 中, D_p , W_p 分别为喷嘴直径 (mm) 和长度 (mm), D_q , H_q 和 θ 分别为谐振腔直径 (mm)、谐振腔深度 (mm) 和谐振腔夹角 ($^\circ$)。

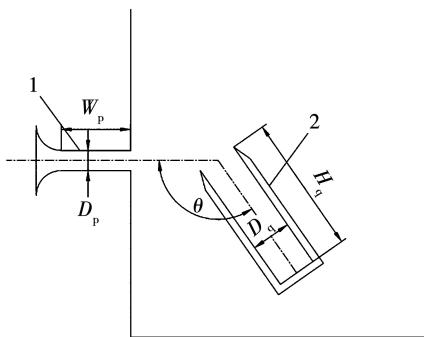


图 2 谐振腔结构

Fig. 2 Resonant cavity dimension

2 谐振腔气动性能仿真

鉴于用二维计算对 Hartmann 哨流场进行仿真取得较好效果^[13-14],本文采用 Fluent 软件对二维计算域进行气动仿真计算。

2.1 模型网格

在 workbench 中建立计算域模型,并对计算域进行网格划分,网格划分如图 3 所示。采用分区域网格划分方式,对谐振腔内部和周围区域以及喷嘴内部进行了网格加密。对网格数目进行无关性验证,喷嘴出口处速度随网格数的变化如图 4 所示。

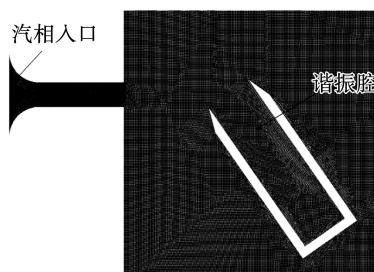


图 3 整体网格划分

Fig. 3 Overall grid division

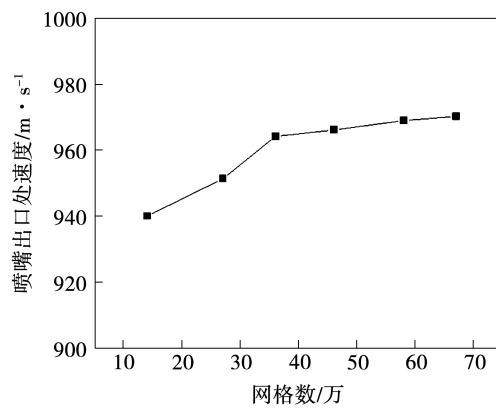


图 4 喷嘴出口处速度随网格数的变化

Fig. 4 Nozzle outlet velocity varing with the number of grids

由图 4 可知,当网格数大于 36 万后,喷嘴出口处的速度基本保持不变。考虑计算效率及计算精度,最终选取 36 万网格进行计算。

2.2 仿真边界条件设置

流体计算介质为可压缩的理想气体,汽相入口设置为压力入口,入口压力为 1.5 MPa,温度为 483 K。出口设置为压力出口,出口压力设置为 0.1 MPa。谐振腔周围壁面及汽相通道设置为壁面,壁面类型为无滑移壁面。

本文研究重点为压力和速度脉动。大涡模拟(LES)方法可通过空间滤波的方法将大小两种尺度的涡团分离。该方法可以捕捉到汽流在谐振腔激励中产生的许多非稳态、非平衡的大尺寸湍流效应,同时又克服了直接数值模拟由于求解所有湍流尺度而带来的巨大计算开销的问题^[15-16]。因此,本文选用大涡模拟方法进行仿真计算。

利用 Fluent 仿真软件进行数值模拟,由于压力基更适用于可压缩流体,考虑到模拟收敛速度和计算精度,选用基于压力分离求解器的 SIMPLEC 算法。动量方程及能量方程均采用二阶迎风差分格式来求解。为精确捕捉流场中涡流及脉动变化,选用瞬态计算,湍流模型选用 LES 湍流模型,时间步长设置为 1×10^{-6} 。

3 计算结果及分析

3.1 谐振腔夹角的影响分析

为分析不同谐振腔夹角 θ 对激振流场的影响,取 100° , 125° 和 140° 3 个谐振腔夹角方案开展分析。其他结构参数设置为 $D_p = 1.6$ mm, $D_q = 3.2$ mm, $W_p = 5.6$ mm, $H_q = 11.2$ mm。计算得到不同谐振腔夹角的速度云图,如图 5 所示。由图 5 可知,谐振腔夹角布置对速度分布产生了一定影响。高压蒸汽通过窄长的渐缩喷管进入开放空间后,由于压力的剧变在喷嘴出口处产生了脉动。由喷嘴结构可知,汽体掠过谐振腔后会冲击液相,汽体冲击方向影响着其与液相接触面积,对雾化效果会产生较大影响。

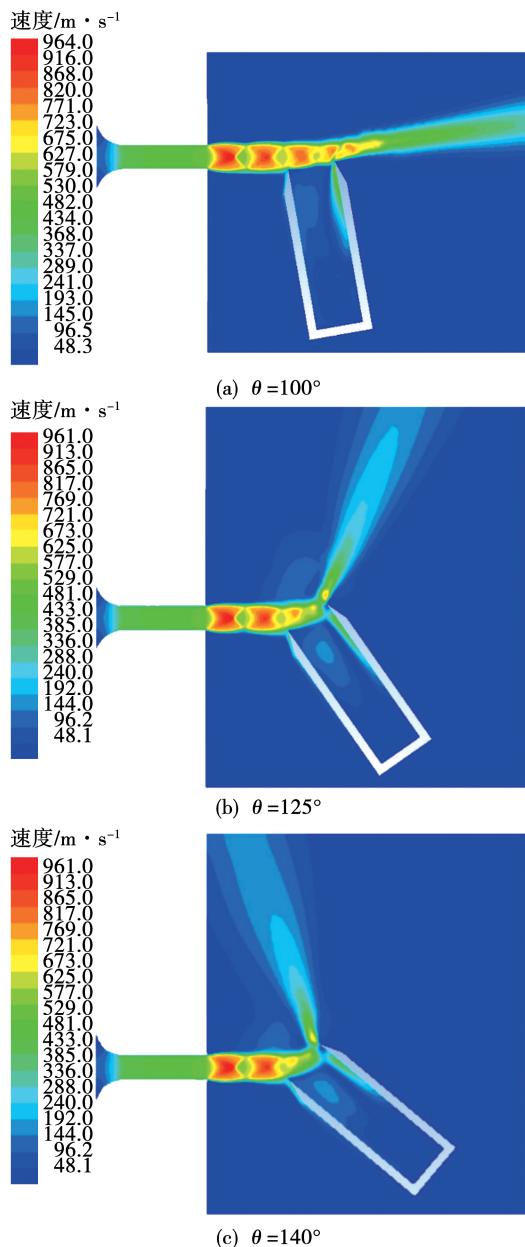


图 5 不同谐振腔夹角下的计算域速度云图

Fig. 5 Velocity nephograms of computational domain under different resonant cavity angles

由图 5 可知,该结构谐振腔产生的最大速度约为 961 m/s ,对应的马赫数为 1.7 ,同时观察到谐振腔角度变化对速度方向产生较大影响,尤其在汽体掠过谐振腔后, 140° 夹角下汽体速度方向发生改变最大,导致汽相与液相接触面积减小。

速度脉动和压力脉动是反映速度以及压力变化剧烈程度的重要指标。剧烈的速度及压力变化使汽液之间相互碰撞更剧烈,促进液滴表面发生形变,有

利于提高雾化效果。

不同谐振腔夹角下汽体的脉动速度均方根如图 6 所示。

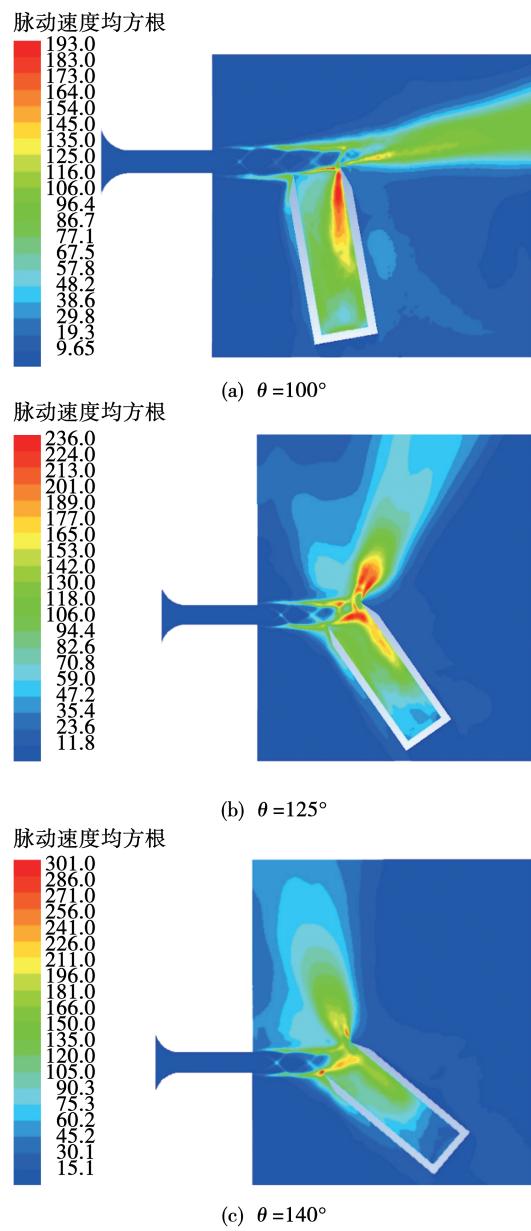


图 6 不同谐振腔夹角下脉动速度均方根

Fig. 6 RMS of pulsating velocity under different resonant cavity angles

由图 6 可知, 100° 夹角布置下的谐振腔速度最大脉动为 192 m/s , 125° 夹角下最大速度脉动为 236 m/s , 140° 夹角下最大速度脉动为 301 m/s 。 125° 夹角下谐振腔右上方区域速度脉动值最大,且最大脉动所占区域范围比 100° 以及 140° 夹角时大,

这对液相出口处液体的雾化起促进作用。

不同谐振腔夹角下汽体的脉动压力均方根如图7所示。由图7可知,压力脉动最大值均出现在谐振腔右侧出口端,100°夹角时最大压力脉动为231 kPa,125°夹角时最大压力脉动为275 kPa,140°夹角时最大压力脉动为217 kPa。

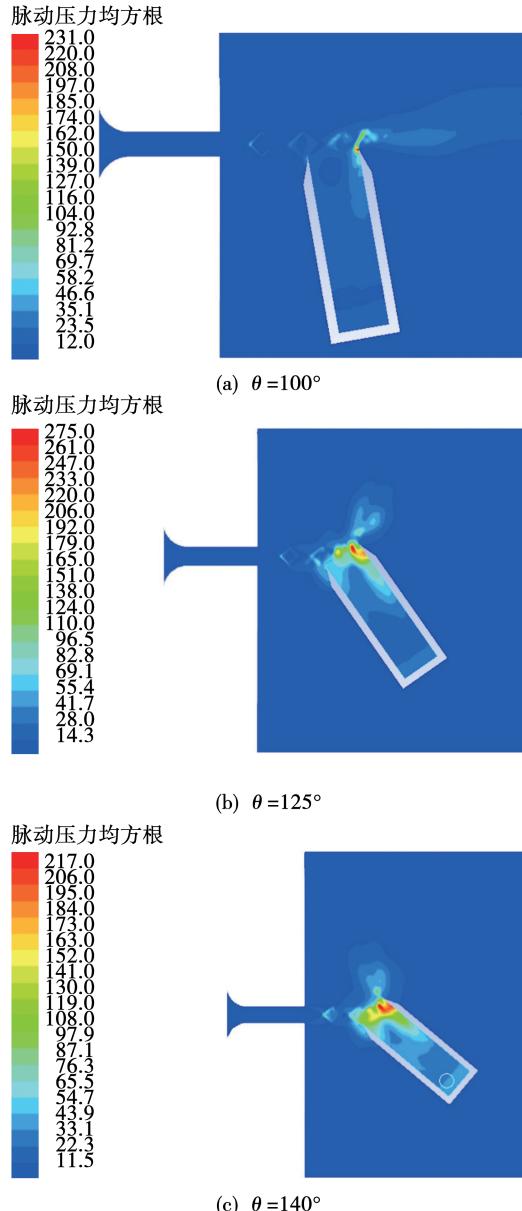


图7 不同谐振腔夹角下脉动压力均方根

Fig. 7 RMS of pulsating pressure under different resonant cavity angles

通过Fluent运用傅里叶变换处理得到不同谐振腔夹角下频谱功率与谐振腔产生谐振频率的关系,

如图8所示。由图8可知,100°夹角的频谱功率峰值出现在13 kHz左右,125°夹角的频谱功率峰值出现在34 kHz左右,140°夹角达的频谱功率峰值出现在15 kHz左右。

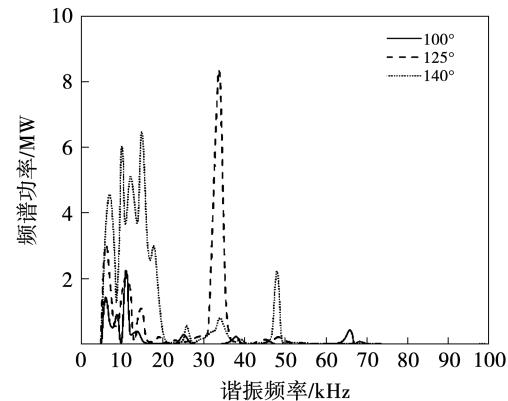


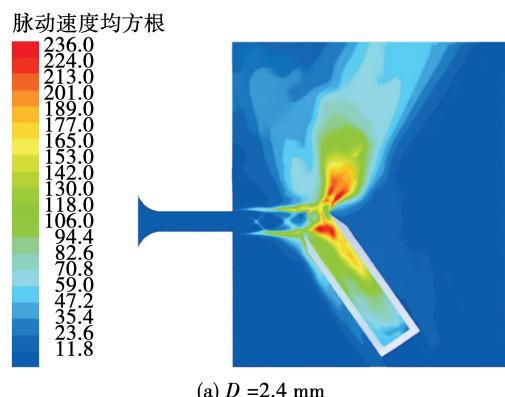
图8 不同谐振腔夹角下谐振腔产生谐振频率所对应的频谱功率

Fig. 8 Spectral power corresponding to resonant frequency generated by resonator under different resonant cavity angles

对于本设计需达到的21 kHz谐振频率,各谐振腔夹角下都没有得到最大的功率峰值。但由前文可知,125°夹角下流场情况及脉动性能均较好。因此,选取谐振腔夹角 $\theta = 125^\circ$,后续通过调整谐振腔其他结构尺寸来降低其功率峰值所对应的频率。

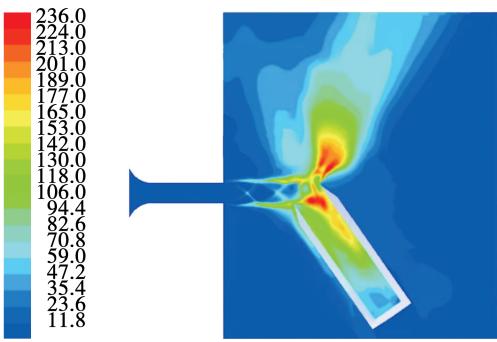
3.2 谐振腔直径以及深度的影响分析

在谐振腔夹角取125°时,保持其他参数不变,通过改变谐振腔直径,来调整谐振腔谐振频率。将谐振腔直径 D_q 分别设定为2.4,2.8,3.2,3.6和4 mm,不同谐振腔直径下的脉动速度均方根如图9所示。

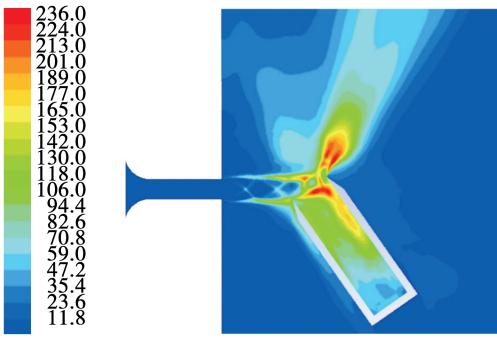


(a) $D_q = 2.4 \text{ mm}$

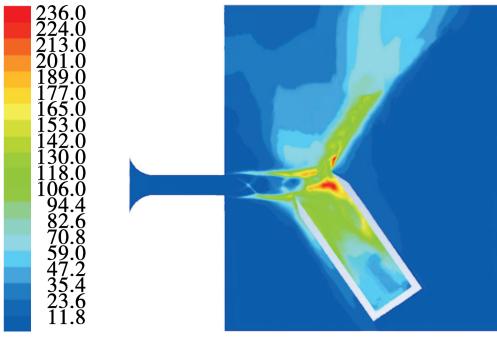
脉动速度均方根

(b) $D_q = 2.8 \text{ mm}$

脉动速度均方根

(c) $D_q = 3.2 \text{ mm}$

脉动速度均方根

(d) $D_q = 3.6 \text{ mm}$

脉动速度均方根

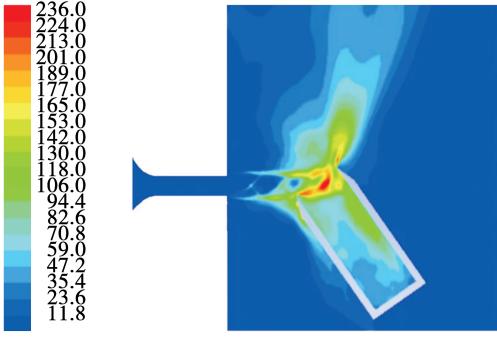
(e) $D_q = 4.0 \text{ mm}$

图 9 不同谐振腔直径下脉动速度均方根

Fig. 9 RMS of pulsating velocity under different resonant cavity diameters

由图 9 可知, 调整谐振腔直径对汽流场产生了一定影响。在汽相通道出口处出现脉动, 速度脉动

最大处均出现在谐振腔右侧出口处, 随着谐振腔直径增加, 最大速度脉动辐射范围呈减小趋势。

不同谐振腔直径下的谐振频率如图 10 所示。由图 10 可知, 不同谐振腔直径时谐振频率有较大差异。在谐振腔直径为 2.4 ~ 4 mm 范围内, 谐振腔产生的谐振频率随直径增加呈减小趋势。在上述几个直径中, 谐振腔直径为 3.2 和 3.6 mm 时谐振腔所产生的谐振频率最接近所需的谐振频率 21 kHz 的要求, 通过插值法可将谐振腔直径设定为 3.4 mm。

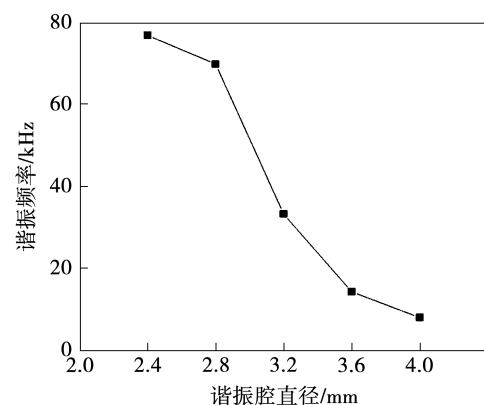


图 10 不同谐振腔直径下的谐振频率

Fig. 10 Resonant frequency under different resonant cavity diameters

对于谐振腔深度的选取, 可以采用 Brocher^[17]谐振腔经验公式:

$$f = \frac{c}{4H_q} \quad (1)$$

式中: f —谐振腔频率, kHz; c —声速, m/s; H_q —谐振腔深度, mm。

根据喷嘴使用条件, 计算得到 $c = 540 \text{ m/s}$, 代入式(1)得到谐振腔深度为 6.4 mm。

3.3 谐振腔尺寸结构的验证

通过以上计算, 得出 1 组能达到所需频率的谐振腔结构参数, 其具体数值为: 谐振腔直径 $D_q = 3.4 \text{ mm}$, 谐振腔深度 $H_q = 6.4 \text{ mm}$, 谐振腔夹角 $\theta = 125^\circ$ 。保持边界条件及计算模型不变, 采用 Fluent 对该结构参数进行验证。

通过傅里叶变换得到谐振腔谐振频率所对应的频谱功率如图 11 所示。由图 11 可知, 其谐振频率在 21 kHz 左右, 与理论计算相符。谐振腔的压力云图如图 12 所示。由图 12 可知, 观察到谐振腔内高

压区域出现在谐振腔右侧出口处,整个谐振腔内静态压力约为 240 kPa。

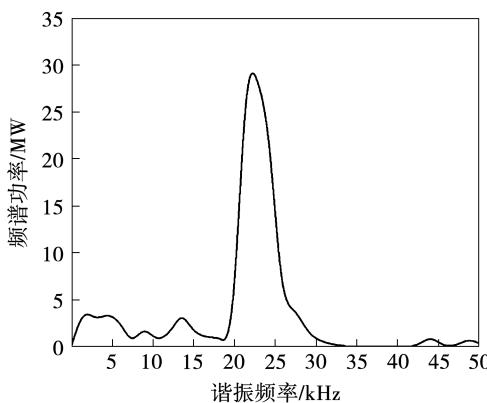


图 11 $D_q = 3.4 \text{ mm}$, $H_q = 6.4 \text{ mm}$, $\theta = 125^\circ$ 时,
谐振腔产生谐振频率所对应的频谱功率

Fig. 11 Spectral power corresponding to resonant frequency generated by resonator at $D_q = 3.4 \text{ mm}$, $H_q = 6.4 \text{ mm}$, $\theta = 125^\circ$

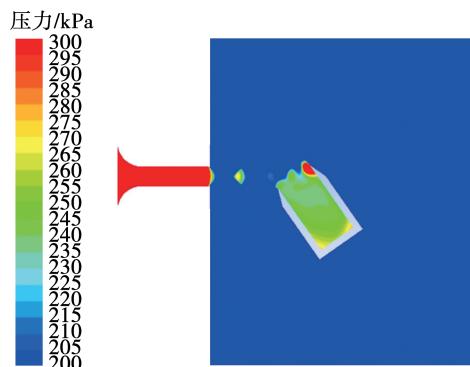


图 12 $D_q = 3.4 \text{ mm}$, $H_q = 6.4 \text{ mm}$, $\theta = 125^\circ$ 时
谐振腔内静态压力云图

Fig. 12 Static pressure nephogram in resonant cavity at $D_q = 3.4 \text{ mm}$, $H_q = 6.4 \text{ mm}$, $\theta = 125^\circ$

4 结 论

本文通过仿真分析,研究了谐振腔的直径、深度和夹角等参数对谐振腔谐振频率的影响,得到 1 组产生所需谐振频率的较优结构参数。具体结论为:

(1) 对比 100° , 125° , 140° 夹角下谐振腔速度及压力脉动可知,喷嘴入口压力一定时速度脉动随谐振腔夹角增大而增大,压力脉动随谐振腔夹角增大呈先增大后减小的趋势。 125° 谐振腔夹角下出现压力脉动峰值,峰值为 275 kPa。

(2) 在 125° 夹角下,速度脉动最大值区域及谐振腔频率均随谐振腔直径增大而减小。

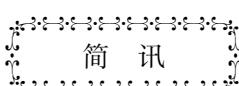
(3) 最终确定的一组谐振腔结构参数为:谐振腔夹角为 125° , 直径为 3.4 mm , 深度为 6.4 mm 。该结构参数下的谐振频率为 21 kHz , 符合所需频率要求,在该频率下谐振腔内静压为 240 kPa 。

参 考 文 献:

- [1] 杜利鹏. 电容法测量蒸汽湿度的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
DU Li-peng. Research on the capacitance method for measurement of the steam humidity [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [2] 王 建. 湿蒸汽环境下多相冲蚀磨损试验平台及材料形变的数值模拟研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
WANG Jian. Numerical simulation study on multiphase erosion wear test platform and material deformation under wet steam environment [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014.
- [3] 宁德亮. 新型电容传感器测量流动湿蒸汽湿度的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
NING De-liang. Research on the measurement of humidity in flowing wet steam using a new type of capacitive sensor [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007.
- [4] 刘 刚, 董 羽, 史俊伟, 等. 广角内混式空气雾化喷嘴雾化特性研究 [J]. 煤矿安全, 2018, 49(10): 30–33.
LIU Gang, DONG Yu, SHI Jun-wei, et al. Study on atomization characteristics of wide-angle internal mixing air atomizer nozzle [J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49 (10): 30–33.
- [5] 郑 斌, 姬丽霞, 孔昭健. 新型外混式气动喷嘴的雾化性能 [J]. 导弹与航天运载技术, 2009(1): 56–60.
ZHENG Bin, JI Li-xia, KONG Zhao-jian. Atomization characteristics of a new-style external mixing type atomizer [J]. Missile and Space Vehicles, 2009(1): 56–60.
- [6] 李 刚, 吴 超. 超声干雾抑尘机理及其技术参数优化研究 [J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(3): 108–113.
LI Gang, WU Chao. Research on mechanism and parameters optimization of ultrasonic atomization technique for dust removal [J]. Chinese Safety Science Journal, 2015, 25(3): 108–113.
- [7] 郝俊忠, 韩振南, 李德镇, 等. 变截面喷孔内油液流动性能的 CFD 模拟分析 [J]. 中国农机化学报, 2015, 36(4): 148–153, 168.
HAO Jun-zhong, HAN Zhen-nan, LI De-zhen, et al. CFD simulation analysis on the performance of the oil flow inside the variable cross-section nozzles [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(4): 148–153, 168.

- nization, 2015, 36(4): 148 – 153, 168.
- [8] 张文俊, 武明亮, 郭丽潇, 等. 超声雾化频率与雾化粒径关系的实验研究 [J]. 压电与声光, 2013, 35(6): 886 – 888.
ZHANG Wen-jun, WU Ming-liang, GUO Li-xiao, et al. Experimental study on relationship between ultrasonic atomization frequency and atomized particle diameter [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013, 35(6): 886 – 888.
- [9] 李洪喜, 刘邱祖, 刘燕萍, 等. 基于 CFD 的超声激振喷嘴雾化特性数值模拟研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2017, 37(1): 113 – 117.
LI Hong-xi, LIU Qiu-zu, LIU Yan-ping, et al. Numerical simulation on atomization characteristics of ultrasonic vibration nozzle based on CFD [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2017, 37(1): 113 – 117.
- [10] 刘旭泽, 高贵军. 基于 Hartmann 哨超声喷嘴的雾化特性研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(3): 268 – 272.
LIU Xu-ze, GAO Gui-jun. Atomization characteristics of ultrasonic nozzle with Hartmann whistle structure [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2016, 36(3): 268 – 272.
- [11] NARAYANAN S, BHAVE P, SRINIVASAN K, et al. Spectra and directivity of a Hartmann whistle [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 321: 875 – 892.
- [12] 刘旭泽. 超声雾化喷嘴的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
LIU Xu-ze. Study on ultrasonic atomization nozzle [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [13] 王鲜艳, 张明铎, 马寅文, 等. 基于 FLUENT 的 Hartmann 哨流场研究 [J]. 西安邮电学院学报, 2011, 16(S2): 44 – 46.
WANG Xian-yan, ZHANG Ming-duo, MA Xian-wen, et al. Research of fluid field of Hartmann whistle based on FLUENT [J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2011, 16(S2): 44 – 46.
- [14] 张亮永, 方厚林, 程 章, 等. Hartmann 哨流仿真计算 [C]//中国声学学会 2017 年全国声学学术会议论文集. 上海, 2017.
ZHANG Liang-yong, FANG Hou-lin, CHENG Zhang, et al. Hartmann whistle flow simulation calculation [C]//Proceedings of the 2017 National Acoustics Academic Conference of the Chinese Acoustic Society. Shanghai, 2017.
- [15] 顾发东. 高雷诺数下二维圆柱尾迹空化及其与多尺度涡相互作用机制研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2023.
GU Fa-dong. Study of two-dimensional cylindrical wake cavitation at high Reynolds number and its interaction mechanism with multi-scale vortices [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023.
- [16] 王 宇. 椭圆柱绕流及气动干扰效应数值模拟研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
WANG Yu. Numerical simulation of flow around elliptic cylinder and aerodynamic interference effect [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [17] BROCHER E, MARESCA A, BOURNAY M H. Fluid dynamics of the resonance tube [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1970, 43: 369 – 384.

(丛 敏 编辑)



韩华集团成功运行 100% 燃氢的燃气轮机

早在 2023 年 4 月, Hanwha Impact 株式会社 (HWI) 和韩华电力系统公司与韩国西部电力公司 (KOWEPO) 合作, 成功地在相同的 80 MW 级燃气轮机进行了 60% 的氢混合演示试验, 这是世界上第一次 60% 氢混合燃气轮机试验。日前, 韩华集团 (Hanwha) 的各公司以世界一流技术为基础, 成功运行了 100% 使用氢燃料的中大型燃气轮机。Hanwha Impact 和韩华电力系统于 2023 年 12 月 20 日表示, 将 80 MW 中大型燃气轮机的氢气混合率从 60% 提高到 100%, 实现了氢气完全燃烧。

韩华集团的氢轮机技术将延长现有电力设施中老化涡轮机的使用寿命, 在环境和经济方面发挥重要作用。将这种延长寿命的技术应用于面临淘汰的液化天然气 (LNG) 燃气轮机, 可能会使经济效益翻倍。

(孙嘉忆摘译自 <https://hydrogen-central.com>)