doi:10.3969/j.issn.1005－0329.2025.02.006

超声振动边界下亥姆赫兹腔室空化性能及涡行为分析

侯博文[1,4],方珍龙[1,2,3]

（1. 武汉理工大学 水路交通控制全国重点实验室,武汉 430063;2. 武汉理工大学 三亚科教创新园,海南三亚 572025;
3. 武汉理工大学 交通与物流工程学院,武汉 430063;4. 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院,武汉 430063）

摘　要:为了提升高湍流状态下亥姆赫兹式自振射流的工作能力,采用大涡模拟对由 UDF 动网格驱动的超声聚焦振动边界的自激振荡腔室内部的两相剪切流进行了数值仿真,并通过对比出口压力的模拟值与试验值,验证了模型的可靠性。对比分析有、无外加超声振动激励和不同激励频率对射流流动的自激频率、速度特征和空化能力的影响。从能量转化角度揭示了腔室内部剪切特性增强的原因,对、有无激励下腔室内气相的分布和射流结构的各区间射流性能进行分析,阐明了超声激励下周期性涡结构的发展过程。结果表明,相比于普通射流,当超声激励为 25 kHz 时,自振频率提高了 3.14 倍,且主频和振荡幅值更加突出,但频域性能提升致使射流速度受到最大 1.89% 的抑制;伴随激励频率的上升,速度受抑制趋势并不显著;超声激励的存在促进了腔室内涡结构能量传递与反馈,加剧了腔室内剪切效应,使射流出口流道（$0.5 \leqslant y/r_2 \leqslant 0.81$）范围内气相含量跃升,大幅度增强了自激振荡空化射流的能力。研究结果可为亥姆赫兹式自振射流的应用提供理论依据。

关键词:自振空化射流;超声聚焦振动;动网格技术;涡结构

中图分类号:O358　　**文献标志码:**A

Analysis of cavitation performance and vortex behavior in Helmholtz cavity under ultrasonic vibration boundary

HOU Bowen[1,4], FANG Zhenlong[1,2,3]

（1.State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
2. Sanya Science and Education Innovation Park, Wuhan University of Technology, Sanya 572025, China;
3.College of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
4.School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China）

Abstract: To improve the working ability of Helmholtz self-excited waterjets, LES was used in the flow of the cavity using UDF dynamic grid-driven ultrasonic focusing vibration boundary, and the reliability of the model was verified by comparing the simulated and experimental values of the outlet pressure.The study explored how external ultrasonic vibration and varying frequencies influenced self-excited frequency, velocity, and cavitation. From the perspective of energy conversion, the reason for the enhanced shear characteristics inside the chamber is revealed.The vapor phase distribution in the lower chamber under various conditions was compared, and the jet performance of each section of the jet structure was analyzed.Explained the development process of periodic vortex structures under ultrasonic excitation.The results show that when the ultrasonic excitation at 25 kHz compared to ordinary jet, the natural oscillation frequency soared 3.14-fold, main frequency and amplitude became more pronounced, though jet speed marginally decreased (1.89%). Higher excitation frequencies didn't significantly curb speed. The ultrasonic excitation bolstered energy transfer and vortex feedback, intensifying shear and raising vapor phase content ($0.5 \leqslant y/r_2 \leqslant 0.81$) in the outlet. The ability of self-excited oscillating cavitation waterjets can be significantly improved. The research results can provide theoretical basis for the application of Helmholtz type self oscillating jet.

Key words:self oscillating cavitation waterjets; ultrasonic focused vibration; dynamic mesh; vortex structure

收稿日期: 2024－04－10　**修回日期:** 2024－08－06

基金项目: 国家自然科学基金青年项目（51706161）;海南省重大科技计划项目（ZDKJ202015）

0 引言

自激振荡射流技术以其成本低、能量转化率高等优点被广泛应用于表面处理、材料切割和设备清洗等领域[1-3]。亥姆赫兹喷嘴是一种典型的自激振荡射流发生器，来流与腔室内流体间形成强烈的剪切流，由于开尔文－亥姆赫兹不稳定性[4]，流体在剪切层处微小扰动放大了自喷嘴上游脱落的剪切涡，使其在腔室内演化为大尺度的涡环结构并实现能量的释放与反馈，产生周期性的压力振荡。腔室内的流体由于压力振荡产生局部汽化生成空泡，主流抵达目标面后，空泡急剧溃灭形成微射流，释放出巨大的能量，配合主流造成强烈冲击，以达到清洗、除锈等目的[5-7]。

自振空化腔室结构与频率特性和空化性能之间存在密切关系[8-11]，但结构确定后仅通过改变工作参数来调制射流脉动频率难度较大。为了改善射流品质，王治国等[12]从射流介质入手，在自振射流中使用低黏度表面活性溶液耦合 DPM 颗粒进行仿真和试验，结果显示，射流对靶材的冲蚀效果有显著提升。叶飞等[13]以亥姆赫兹喷嘴为基础，建立了自激吸气式脉冲射流装置，并对装置内水气结构的演化过程进行分析，明晰了脉冲产生的机理。结果表明，在高工作压力或低围压下，喷嘴脉冲效果较好。

新兴的超声辅助射流是向流体介质中辐射超声波进而产生超声空化效应，在不改变腔室结构尺寸的同时产生更多空化核心，配合主流提升射流能力。国内外学者针对超声辅助自振射流在增强射流能力，改善射流空化特性上进行了许多有益的研究。吴文华等[14]综述了超声场中液体材料的空化和声流动力学的研究进展，总结了超声振源的参数等因素对声压和声流分布的作用规律。王满等[15]通过数理分析，对亥姆赫兹喷嘴施加超声场，认为腔长和腔径对空化强度和空泡动态变化具有正向影响，且腔内存在最佳超声频率使空化强度达到最大。沈灵[16]在静止水箱内使用超声振动边界完成了不同频率振动对流场影响的仿真，分析并总结了聚焦振动下焦点处空化现象和压力分布特征。计时鸣等[17]搭建了超声辅助磨粒流试验装置，验证了超声空化能提高磨粒流中磨粒的动能，从而提升磨料射流的切削能力。李华等[18]对近年来超声振动辅助磨料射流的技术发展做出概要和归纳，指出当前的研究热点和亟须解决的问题。何魁魁等[19]在渐缩喷嘴上施加超声速度入口，并设计超声振动面与喷嘴结构参数进行了数值仿真，结果表明，超声幅值和频率的增大使射流流速和脉动增强。ZHONG 等[20]建立了水下超声照射辅助空化射流的实验装置，结果显示，当水下空化射流与超声波结合时，样品的质量损失大幅增加。BAI 等[21]通过实验研究了不同结构形态的空化气泡在 20 kHz 超声场中的结构和演化，并分析了声空化结构的核源。BIASIORI-POULANGES 等[22]将损伤与气泡活动相关联，阐明了聚焦超声结石粉碎中空化气泡在石质表面破碎中的作用机理。

综上所述，目前开展的理论探索多为超声空化的微尺度研究，试验研究方面，使用超声在腔室外辅助照射射流束，使两者互相作用产生超声空化效应，从而提升射流能力，但对于实际工业场景而言，外部超声辅助照射射流存在着诸如设备复杂性高、实时协同性差、超声波衰减致使射流空化能力提升有限等问题。而针对超声波直接作用于腔室内部调制射流振荡特性与空化效果的作用机理研究较少。具体来说，具备频率特征的超声波与使射流周期性振荡的腔室的自振频率间相互耦合机制有待完善，以及超声引起腔室内剪切提升对射流涡旋－空化作用的影响机理，均是本项研究的研究方向。

本文通过计算流体动力学的动网格技术模拟了超声波作用在亥姆赫兹腔内部的两相流动，研究了超声振动对内部空化的影响规律，为进一步揭示超声作用下自激振荡腔室内部空化流动机理进行了理论探索，对提升自振空化射流能力具有一定的理论意义和工程价值。

1 计算模型和数值方法

1.1 模型及求解策略

1.1.1 计算模型和边界条件

图 1 示出腔室的几何计算模型。

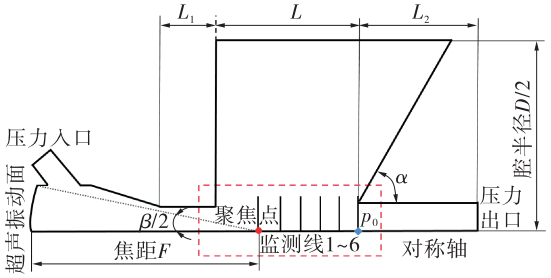


图 1 模型及参数标注

Fig.1 Parameter annotation of model

表 1 列出模型相关尺寸参数。模拟超声波换能器的弧形振动面位于腔室左侧，振动面中心点对准射流中心轴线，通过两侧斜入式通道引导流体进入腔内，流体在腔内经过超声振动作用后喷射出去。

表 1　模型参数

Tab.1　Geometric structure parameter

参数	数值
上游流道入口直径 d_1/mm	2.6
两侧流道直径 d_0	$0.5d_1$
下游流道出口直径 d_2	$1.2d_1$
腔径 D	$4d_1$
腔长 L	$3d_1$
上游流道长度 L_1	$2d_1$
下游流道长度 L_2	$4d_1$
振动面至入口距离 S/mm	10
碰撞角 α /(°)	60
超声振动聚焦角 β /(°)	约 11.77
焦距 F/mm	12
振动面半径 R/mm	2.5

如图 1 所示，在焦点到腔室出口 5.8 mm 距离范围内，沿着 X 轴正方向等间距设置 6 条高 2 mm 的监测线，命名为监测线 1~6，从左到右依次展开。图中虚线框为本研究重点关注区域。

工作介质为标准状况下水和水蒸气。上游流道双侧入口的压力均为 1.0 MPa，入口温度设置为 298.15 K；下游出口压力为标准大气压；壁面为无滑移边界，温度为 343.15 K。

1.1.2　求解策略

选择对剪切流动求解精度较高的大涡模拟进行求解，其中，Smagorinsky 亚格子模型可使可解尺度运动方程封闭[23-24]。

压力 – 速度耦合的求解采用 SIMPLEC 算法，选择 Mixture 两相流模型，空化模型为 Schnerr–Sauer 模型。

在空间离散化中，梯度设置为最小二乘单元，压力为二阶精度，瞬态过程采用二阶隐式格式，收敛残差为 10^{-6}。所有工况时间步长设置为外加振动激励频率周期的 1/10，仿真计算总时长均为 0.1 s。

1.2　基于 UDF 的聚焦振动边界

聚焦式振动模拟超声换能器的压电陶瓷表面聚焦振动的真实情况。运用由用户自定义函数（UDF）定义的动网格，使振动边界按预设运动参数产生高频率的聚焦振动，该振动以压力波的形式作用在腔室内部的剪切流场中。

聚焦振动面为壁面变形，设置振动幅度为 10 μm。如图 2 所示，焦点位置移动，焦距也发生变化。中间弧线为振动面初始位置，以焦点为原点。振动面的运动形式是维持 M，N 两点固定，在运动中保持球面，向前至弧线（点划线）所在圆 R_1，向后至弧线（虚线）所在圆 R_2。前后两条弧线之间的范围即为振动行程。

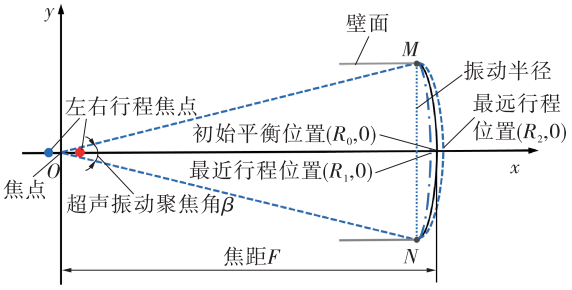


图 2　聚焦振动原理

Fig.2　Principle of cavitation focused ultrasound

由几何关系知 $R_1<R_0<R_2$，推导圆 R_1、圆 R_0 及圆 R_2 的横坐标及振幅相关计算式如下[16]：

$$x_1=\left(R_1^2-y^2\right)^{1/2}+R_0\cos\left(\beta/2\right)-\left[R_1^2-R_0^2\sin^2\left(\beta/2\right)\right]^{1/2} \tag{1}$$

$$x_0=\left(R_0^2-y^2\right)^{1/2} \tag{2}$$

$$x_2=\left(R_2^2-y^2\right)^{1/2}+R_0\cos\left(\beta/2\right)-\left[R_2^2-R_0^2\sin^2\left(\beta/2\right)\right]^{1/2} \tag{3}$$

R_1 与 R_0 距离差值 Δx_1 计算式如下：

$$\Delta x_1=x_0-x_1 \tag{4}$$

R_0 与 R_2 距离差值 Δx_2 计算式如下：

$$\Delta x_2=x_2-x_0 \tag{5}$$

求得 R_1 和 R_2 后，将振动面在 X 方向预定的位移附加简谐运动构造成所在平衡位置的位移函数，该函数描述为：

$$x=\left(R_0^2-y^2\right)^{1/2}+\frac{1}{2}\left(\Delta x_1+\Delta x_2\right)\sin\left(2\pi ft\right) \tag{6}$$

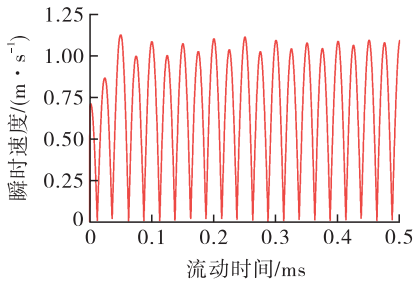


图 3　振动面前 1 mm 处速度

Fig.3　Velocity at a position 1mm in front of the vibrating wall

1.3　网格划分和模型验证

为了精确捕捉腔室内的流动状态，保证对高频率振动波的解析。在剪切效应强烈的腔室内部、

振动面附近及监测点 p_0 所在的出口中心处，对局部网格进行加密处理，图 4 示出图 1 中虚线框区域中碰撞角处网格。

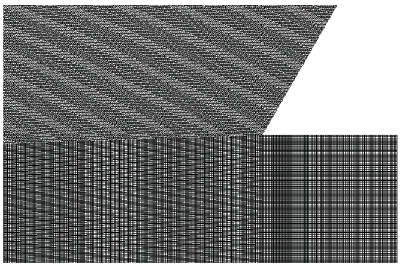


图 4　碰撞角处局部网格

Fig.4　Local grid at the boundary layer

以出口平均速度作为目标量进行网格无关性检验，结果如图 5 所示，当网格数量在 60.24 万以上时，速度波动非常小，满足使用要求，但为了更加精确地描述压力波在腔室内部的传递，同时，为避免计算超高频率振动导致计算发散，且满足大涡模拟对网格质量的要求，最终确定网格数量为 124 万，壁面 y^+ 值维持在 1 左右。

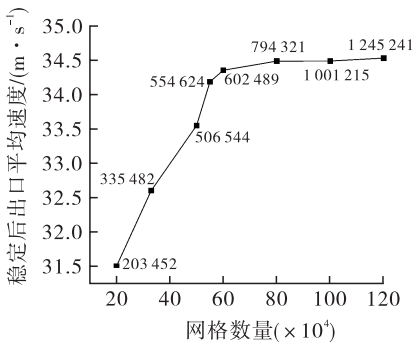


图 5　网格无关性验证

Fig.5　Grid independence verification

图 6 示出腔长 $L=4d_1$ 时，不同入口压力下，射流 CFD 计算值与 FANG 等[4]的压力振荡试验值之间的对比情况，其中，最大误差为 9.756%，平均误差为 7.816%，考虑到本研究为二维计算，因此模型和计算方法具有一定准确性。

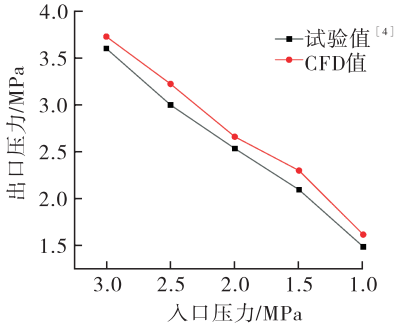


图 6　模型验证

Fig.6　Model validation

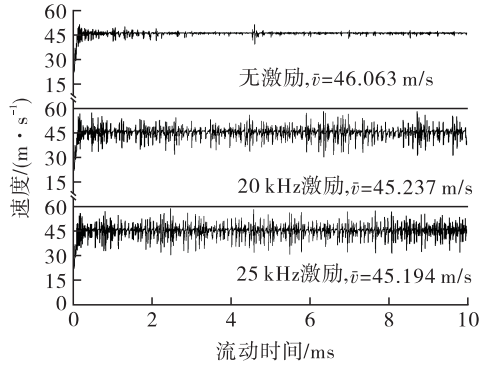
2　结果与分析

当声波频率高于 20 kHz 时属于超声波，其能在介质中传播，并与介质相互作用，产生一系列效应。本文主要针对气液两相的二维空腔湍流流动进行研究，着重捕捉腔室中的压力波动和空化效应。

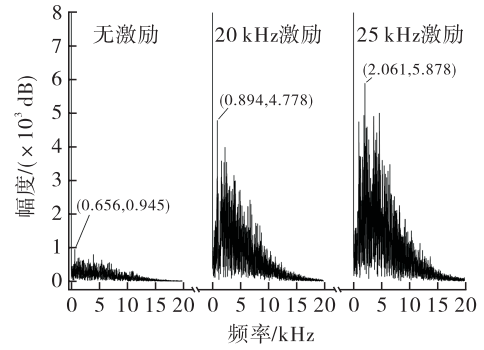
由于高频率动网格往复运动机制的复杂性，且腔室内部处于高湍流状态，状态量的梯度变化剧烈。如激励为 30 kHz 时，为保证计算稳定性，将一个简谐振动周期分为 10 步进行解析后，计算步长将为振动周期时长的三十万分之一，这将使网格数量和计算时间大幅度增加。因此，选择对 20 kHz 和 25 kHz 两种激励条件与无激励下腔室内部流动进行对比分析。

2.1　腔室内部流动特征

图 7(a)示出不同激励条件下出口轴线中心 p_0 点处速度脉动的时域曲线。显然，由于双侧高压进流，腔室内部流量激增，导致腔室内周期性涡结构的生成和反馈减弱，振荡效果不佳。伴随激励频率的增加，速度振荡幅值出现大幅度上升，这将显著增强射流脉动作用于目标面的水锤效应。



(a)时域曲线



(b)频域曲线

图 7　不同激励条件 p_0 处速度特性

Fig.7　Velocity characteristics at p_0 with various excitations

如图 7（b）所示，对计算稳定后的时域数据进行傅里叶变换，获得速度脉动的频域曲线。无激励时，频谱更宽且最高频率为 656 Hz，伴随着激励频率的上升，射流脉冲振荡幅频特性得到增强，脉动的幅度大幅上升。频率增大的同时频谱更加集中，主频率更为突出，在外加 25 kHz 激励时脉冲频率达到 2 061 Hz，数值上是无激励时脉冲频率的 3.14 倍。但同时，p_0 处平均速度则出现下降的趋势，速度由无激励时的 46.06 m/s，逐次下降到 45.24 m/s 和 45.19 m/s，最大降幅达到 1.89%，见图 7（a）。图 8 示出了腔室轴线上时均速度分布，在腔室内部和下游流道，添加激励的工况，其时均速度明显低于无激励工况。

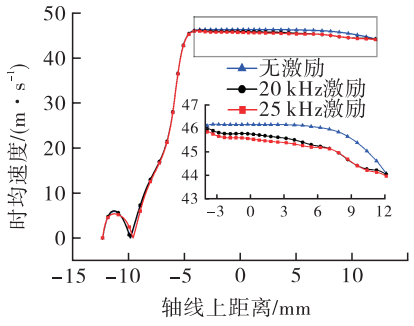


图 8　轴向距离上时均速度分布

Fig.8　Time averaged velocity distribution along axial distance

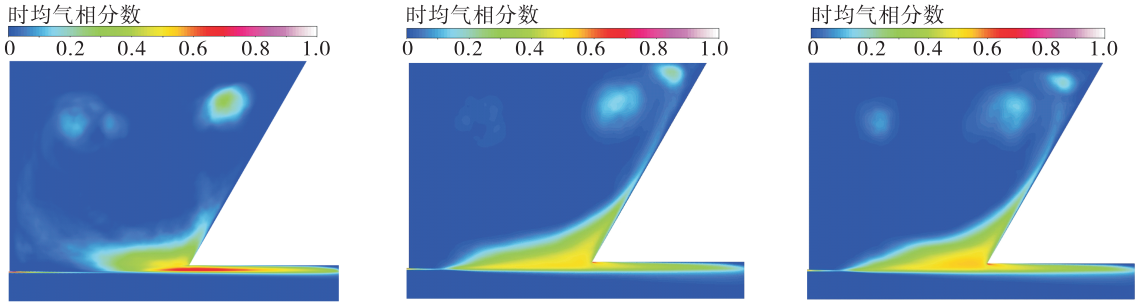
综上所述，外加激励对于射流速度具有抑制倾向，但随着激励频率的上升，速度下降却不明显。外加振动压力波的存在使得射流核心区能量变的更加集中，从而提升了脉动幅度，腔室内压力能在得到外部能量增益的同时，促使腔内部分动能转化成为了压力能，因此速度受到限制，而压力脉动变得更加显著。

2.2　腔室内空化特性分析

2.2.1　有无激励条件下腔室内部气相分布特征

图 9 示出了有、无激励下时均气相分布对比，激励工况下气相在剪切层两侧形成相似的楔形分布，且分布面积相较于无激励时更大，这表明激励能使来流在腔室内产生强烈的空化效应，超声振动使得压力波持续传递并进入主流中，实现了与射流脉动压力的耦合并将压力波动放大，更加强烈的压力脉动促使剪切层产生空化空泡的数量增多。

无激励条件下，由于没有持续外部能量输入，流速过大导致涡结构溃散，使得反馈机制减弱，受流体黏性的影响，气相在腔室内部循环速率较慢，并出现黏滞在腔室内部的情况，如图 9（a）左侧所示。同时观察到，大部分气泡被堆积在碰撞角下侧的射流边缘。



（a）无外加激励　（b）20 kHz 外加激励　（c）25 kHz 外加激励

图 9　有、无激励条件下时均气相分布

Fig.9　Time-average vapor distribution with or without vibration

图 10 示出了无激励和两种不同频率激励下，沿监测线 1~6 上时均气相体积分数的分布情况。监测线按出口流道半径（$r_2=d_2/2$）进行归一化处理。伴随着剪切流的展开，气相聚集在剪切层两侧并逐渐增多。两种不同频率的激励工况气相发展至监测线 3 处时保持近乎一致，在此之前有激励工况的气相含量远大于无激励时，而后 25 kHz 激励逐步超过 20 kHz 激励时的气相分布范围和含量，并保持到腔室出口产生气相分离的监测线 6 处。

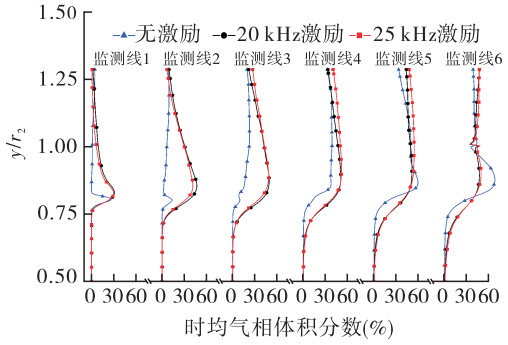


图 10　监测线 1~6 上时均气相分布

Fig.10　Time averaged vapor distribution on line 1~6

2.2.2 腔室内气相分离与射流结构分析

图 11 示出 3 种条件下气相在碰撞角下的出口中心平面上监测线 6 处的分离情况，其能代表调制后射流中的气相分布。即部分气相被流体裹挟进入下游流道，而 $y/r_2 \geqslant 1$ 范围内的气相则保留在腔室内，由图 11 局部放大图可知，激励条件下，出口处气相均在 $y/r_2=1$ 处陡然下降。分离出腔室进入下游流道的气相含量均在靠近 $y/r_2=0.87$ 处达到峰值，25 kHz 激励相比于 20 kHz 激励的气相峰值上升 8.3%。而无激励条件下气相体积分数最高达到 68%，远超添加激励的工况。

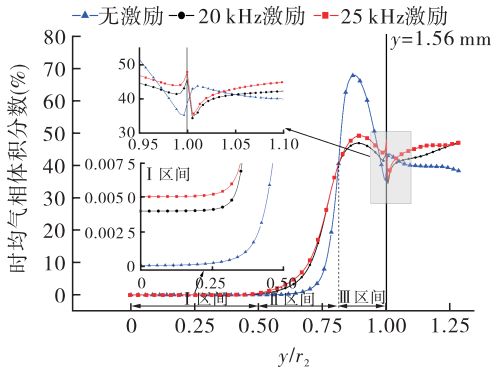


图 11 腔室出口监测线 6 处时均气相分布

Fig.11 Time-mean vapor distribution on line 6

根据图中气相分布特征，对比有、无激励工况下监测线 6 处气相组成，对腔室内射流结构划分为Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ共 3 个区间，三者在径向距离上共同组成 $0 \leqslant y/r_2 \leqslant 1$ 的射流主流区，如图 12 所示。以下对各个区间从自振射流的压力脉动打击和空化能力两种主要作用形式上展开分析，探讨超声振动对射流品质的改善效果。

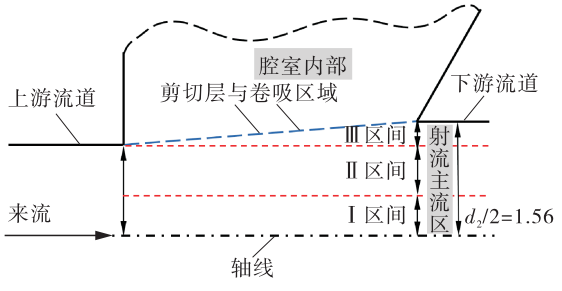


图 12 腔室内射流结构示意

Fig.12 Schematic diagram of jet structure inside the chamber

Ⅰ区间的范围为 $0 \leqslant y/r_2 \leqslant 0.5$，处于射流核心区，此区域远离剪切层，流体的速度最高，气相维持在较低水平，这是保留在腔室内的气相与来流掺混的结果，所以此区间空化性能较差。受腔室内周期性压力脉动向射流轴心的影响，压力脉动是该区间的主要作用形式。在该区间内，25 kHz 激励下含气量更为突出，表明激励后的射流使得主流区空化核心增多，在射流喷射进入低于腔室压力的工作面过程中，会在腔室外产生更多的空泡，大幅度提升空化射流品质，将有力地配合压力脉动打击。

$y/r_2 \geqslant 1$ 区间内为气相分离后保留在腔室内部的气相，有激励工况的含气量远超过无激励的工况。25 kHz 激励时留存在腔室内的气相含量比无激励峰值气相含量增加了 12.5%，更多的气相留存在腔室内参与循环，促进了腔室内气液两相的交融，在腔室脉动压力的作用下将促进这些残留的气相掺混进入射流中心的核心区。此区间的空化残留在腔室内气相增多将有力促进Ⅰ区间的空化能力。

$0.5 \leqslant y/r_2 \leqslant 0.81$ 为Ⅱ区间，其依附于射流核心区并靠近剪切层，这一部分既存在压力脉动，同时也通过腔室剪切产生空化效果，该区间有激励工况的气相含量远高于无激励时。这是因为超声波在流体传播的机械效应与自激振荡喷嘴的周期性压力波动相耦合，当超声压力波在流体介质中形成驻波时，悬浮在流体中的原始空化核心因受机械力的作用而凝聚在波节处，在空间内形成更靠近射流轴心的气相堆积，空化能力相比于无激励时得到了大幅度的增强。

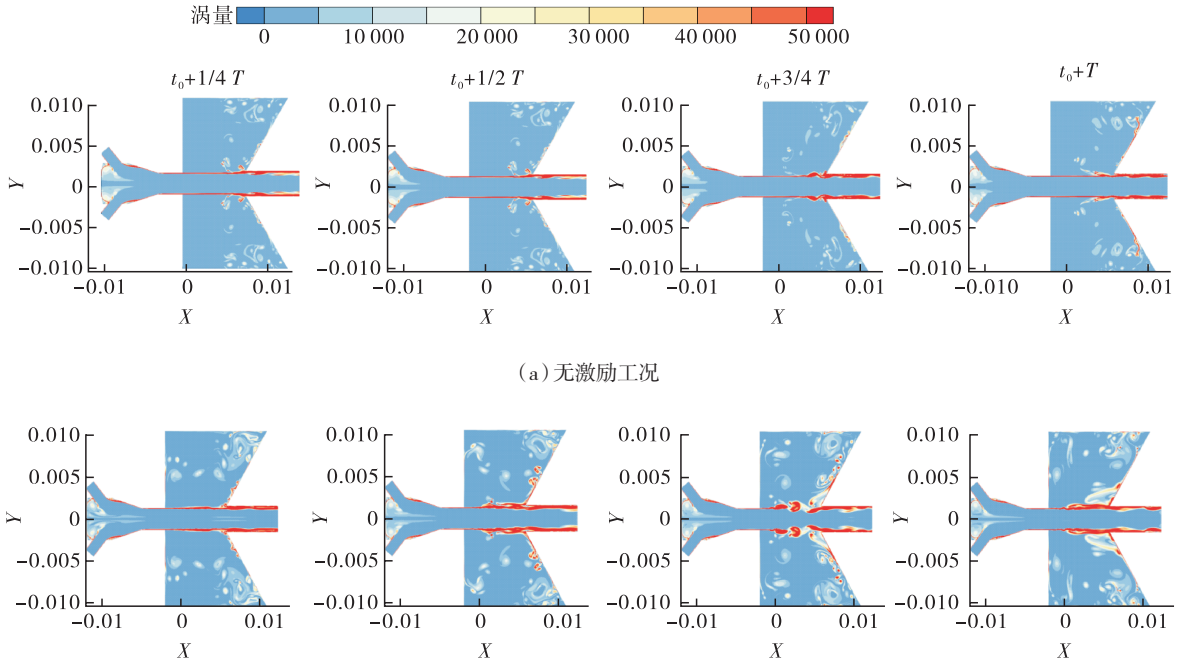
$0.81 \leqslant y/r_2 \leqslant 1$ 的Ⅲ区间位于射流边缘区，不承担核心打击作用，无激励工况的含气率远高于施加激励工况，这是由于双侧进流形成的高速流体在边界层处剪切速率加快，从而提高了该处气相含量，但此区域位于射流核心区的边缘，气相离开下游流道后，大多会在外流场呈现喇叭状的发散过程中溃灭，因此，边缘区空化效果的提升对射流能力增强不显著。

综合以上对于腔室内部射流结构的各区间的分析，可以得出在研究范围内，外加超声激励能显著拓宽射流在腔室中的空化能力，特别是对于靠近射流中心的Ⅱ区域，也提升了Ⅰ区间的气相掺混。相对于无激励的普通自振射流，空化品质有显著的提升，这对于改善自振射流品质具有重要意义。

2.3 腔室涡结构瞬态特征

将腔室内周期性变化某一时刻定为 t_0，如图 13 所示，腔内某个周期内的涡结构可描述为扰

动、碰撞、反馈、吸收能量再循环的 4 个阶段。流体在腔室内的剪切层附近的流场中存在一个较大的速度梯度，其两侧流体之间存在较强的动量交换。剪切层能量的吸收和释放是腔内涡环结构周期性变化的重要原因。由图可知，有激励条件下腔室内部涡结构比无激励时各个阶段的涡结构都更活跃，且腔室内部涡结构循环范围变大，涡尺度显著增强。



（a）无激励工况

（b）25 kHz 激励工况

图 13　无激励和 25 kHz 激励时周期性涡量云图

Fig.13　Single period vorticity cloud map under no vibration and 25 kHz vibration

从图中可以看出，在 t_0+1/4 T 的初始时刻，由于外加激励所形成的压力波携带的能量输入，造成了剪切层附近扰动的增强，扰动被开尔文 – 亥姆赫兹不稳定性持续放大，加剧了剪切层附近的剪切效应，促进了初生涡环吸收上个周期反馈的离散涡能量。

随着剪切层涡环向下迁移，涡结构稳定增长并聚集为大尺度涡，在抵达下游碰撞壁附近时聚集和吸收的能量达到最大值并被压缩。随后在碰撞角附近发生碰撞并分离，此时，有激励的能量远超无激励时的能量，从而保证稳定的能量输出和向上游的能量反馈。

当处于 t_0+1/2 T 时刻，主涡到达碰撞壁之后，涡旋经碰撞产生了涡的分离，导致反向压力波的产生，造成的不稳定扰动使剪切层和碰撞壁附近的流动发生紊乱，放大了腔室内剪切强度，实现了能量的部分反馈。

伴随着振荡周期的展开，在 t_0+3/4 T 时刻，主涡碰撞后在腔室内部沿碰撞壁移动并实现反馈破碎成小涡，由于持续的离散小涡是反馈和促进自激效应的驱动力[7]，这些小涡被由主涡结构碰撞后产生，并被反向压力波裹挟，不断回流并抵达剪切层附近释放能量。而外加激励的存在，使得腔室内速度变化程度增大，加速了腔室内部流体的循环，促进了离散的小涡在剪切层附近能量的释放。能量的集中反馈使得剪切层附近的涡环结构变得滚动起来而脱落，从而完成了能量的吸收、储存。

在周期结束的 t_0+T 时刻，，涡环半径沿碰撞壁增大并分解。壁面上涡结构的反馈急剧减弱，于是射流剪切层附近的旋转涡环结构被拉伸，剪切层变得相对稳定，此时，有激励的条件下剪切层两侧涡结构储存的能量更强，这促进了下一个脉动周期的展开。

由上述分析可知，外加激励使得腔室内部涡结构活跃，显著增强了腔室内能量回馈的自持性，使涡结构强度提升，这将增强涡旋 – 空化的相互作用[25]，从而进一步提升射流能力。

3 结论

（1）相比于无激励的自振射流，2 种外加超声激励的自振射流振荡幅频特性均大幅度上升。当激励频率为 25 kHz 时，自振频率达到 2 061 Hz，相比于无激励时自振频率提高了 3.14 倍，且主频更加突出。

（2）随着外加超声激励的增大，腔室内射流速度有被抑制的倾向，速度最大降幅达到 1.89%，原因在于连续输入的超声压力波使腔内流体得到能量增益，促进腔内动能向压力能的转化，但随着激励频率的上升，速度下降并不显著。

（3）超声激励能促进腔室内部气相的循环，并增强腔室内剪切特性，拓宽了剪切层两侧的空化范围，使射流出口流道 $0.5 \leqslant y/r_2 \leqslant 0.81$ 范围内的气相含量大幅上升，并提高射流中心区域的气相掺混，增强了自振射流的空化能力。

（4）超声激励增强了涡结构在腔室内的循环范围和活跃程度，加速腔室内部能量的储存和释放，促进腔室内部涡结构能量传递与反馈，自激振荡射流涡旋 – 空化的能力得到有效提高。

参考文献：

[1] LI D, KANG Y, DING X L, et al. Experimental study on the effects of feeding pipe diameter on the cavitation erosion performance of self-resonating cavitating waterjet [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 82: 314 – 325.

[2] LIU W C, KANG Y, WANG X C, et al. Integrated CFD-aided theoretical demonstration of cavitation modulation in self-sustained oscillating jets [J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 79: 521 – 543.

[3] 司鹄，薛永志，周维 . 自激振荡脉冲射流破岩效率数值模拟 [J]. 振动与冲击，2016，35（20）：149 – 153.
SI H, XUE Y Z, ZHOU W. Numerical simulation of rock fragmentation efficiency under self-excited oscillation pulsed jet [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35（20）: 149 – 153.

[4] FANG Z L, ZENG F D, XIONG T, et al. Large eddy simulation of self-excited oscillation inside Helmholtz oscillator [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 126: 103253.

[5] 方珍龙，康勇，王晓川，等 . 腔径比对亥姆赫兹自振射流性能影响 [J]. 浙江大学学报（工学版），2016，50（11）：2100 – 2106.
FANG Z L, KANG Y, WANG X C, et al. Numerical investigation of cavity diameter ratio influence on Helmholtz oscillation waterjet [J]. Journal of Zhejiang University（Engineering Science）, 2016, 50（11）: 2100 – 2106.

[6] 王循明 . 自激振荡脉冲射流装置性能影响因素数值分析及喷嘴结构优化设计 [D]. 杭州：浙江大学，2005.
WANG X M. Influence factors simulation study of the self-exicited oscillation pulsed jet device and nozzle structure optimized design [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.

[7] WANG D D, WANG Z H, FAN Y W, et al. Characterization of vortex structures with self-excited oscillations based on liutex-omega vortex identification method [J]. Journal of Hydrodynamics, 2023, 35（1）: 95 – 111.

[8] 戚美，王立夫，陈庆光，等 . 双腔室自激振荡脉冲喷嘴空化射流的数值模拟 [J]. 排灌机械工程学报，2020，38（5）：457 – 461.
QI M, WANG L F, CHEN Q G, et al. Numerical simulation of cavitating jet in dual chamber self-oscillation pulse nozzle [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38（5）: 457 – 461.

[9] 彭淑怀，王建强 . 自激振荡超声喷嘴设计及射流频率特征实验 [J]. 机械设计与制造，2024（7）：305 – 309.
PENG S H, WANG J Q. Design of self-excited oscillation ultrasonic nozzle and experimental of jet frequency characteristics [J]. Machinery Design & Manufacture, 2024（7）: 305 – 309.

[10] 蔡腾飞，马飞，潘岩，等 . 喷嘴出口结构参数对自振射流振荡特性的影响 [J]. 煤炭学报，2023，48（增刊 1）：130 – 138.
CAI T F, MA F, PAN Y, et al. Effects of nozzle outlet geometry on the oscillating characteristics of self-excited waterjet [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48（Sup.1）: 130 – 138.

[11] 向美景，王晓川，李登，等 . 亥姆霍兹上喷嘴出口结构对射流振荡特性的影响 [J]. 振动与冲击，2020，39（7）：74 – 80.
XIANG M J, WANG X C, LI D, et al. Effects of Helmholtz upper nozzle outlet structure on jet oscillation characteristics [J]. Juronal of Vibration and Shock, 2020, 39（7）: 74 – 80.

[12] 王治国，刘阳，魏然，等 . 表面活性剂流体的空化 –

冲蚀耦合射流试验研究[J]. 流体机械,2024,52(6):1 – 9.
WANG Z G,LIU Y,WEI R,et al.Experimental study of coupled cavitation-erosion jets with viscoelastic surfactant solution[J].Fluid Machinery,2024,52(6):1 – 9.

[13] 叶飞,刘新阳,赵礼,等 . 自激吸气式脉冲射流装置机理的试验和理论研究[J]. 流体机械,2023,51(3):1 – 7.
YE F,LIU X Y,ZHAO L,et al.Experimental and theoretical researches on mechanism of self-excited aspiration pulse jet device[J].Fluid Machinery,2023,51(3):1 – 7.

[14] 吴文华,翟薇,王建元,等 . 超声场中液体材料的空化和声流动力学研究进展[J]. 中国科学:技术科学,2023,53(1):2 – 27.
WU W H,QU W,WANG J Y,et al.Progress of cavitation and acoustic streaming dynamics of liquid materials within ultrasonic field[J].Scientia Sinica Technologica,2023,53(1):2 – 27.

[15] 王满,袁淼,闵瑞,等 . 自激振荡射流空化泡动力学特征及超声强化数值研究[J]. 石油钻探技术,2023,51(6):43 – 49.
WANG M,YUAN M,MIN R,et al.Numerical study on the dynamic characteristics and ultrasonic enhancement of cavitation bubbles under self-excited oscillating jet[J].Petroleum Drilling–Techniques,2023,51(6):43 – 49.

[16] 沈灵 . 基于超声空化的振动边界作用流场的数值模拟[D]. 北京:清华大学,2011.
SHENG L.Numerical simulation of the flow field induced by vibrating surface in the application of ultrasonic cavitation[D].Beijing:Tsinghua University,2011.

[17] 计时鸣,陈凯,谭大鹏,等 . 超声空化对软性磨粒流切削效率和质量的影响[J]. 农业工程学报,2017,33(12):82 – 90.
JI S M,CHEN K,TAN D P,et al.Effect of ultrasonic cavitation on maching efficiency and quality of soft abrasive flow[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2017,33(12):82 – 90.

[18] 李华,任坤,殷振,等 . 超声振动辅助磨料流抛光技术研究综述[J]. 机械工程学报,2021,57(9):233 – 253.
LI H,REN K,YIN Z,et al.Review of ultrasonic vibration-assisted abrasive flow polishing technology[J].Journal of mechanical engineering,2021,57(9):233 – 253.

[19] 何魁魁,戴玉堂,王嘉凯 . 超声射流系统设计及仿真分析[J]. 流体机械,2022,50(6):47 – 53.
HE K K,DAI Y T,WANG J K.Simulation analysis and design of ultrasonic jet system[J].Fluid Machinery,2022,50(6):47 – 53.

[20] ZHONG X,DONG J M,LIU M H,et al. Experimental study on ship fouling cleaning by ultrasonic-enhanced submerged cavitation jet:A preliminary study[J]. Ocean Engineering,2022,258:111844.

[21] BAI L X,XU W L,DENG J J,et al.Generation and control of acoustic cavitation structure[J].Ultrasonics Sonochemistry,2014,21(5):1696 – 1706.

[22] BIASIORI–POULANGES L,LUKIĆ B,SUPPONEN O. Cavitation cloud formation and surface damage of a model stone in a high-intensity focused ultrasound field[J].Ultrasonics Sonochemistry,2024,102:106738.

[23] LILLY D K. A proposed modification of the Germano-subgrid & hyphen. scale closure method[J].Physics of Fluids A:Fluid Dynamics,1992,4(3):633 – 635.

[24] 华有明,陈云良,熊顺,等 . 液体射流泵空化流动特性分析[J]. 流体机械,2023,51(1):36 – 43.
HUA Y M,CHEN Y L,XIONG S,et al.Numerical simulation analysis of cavitation flow characteristics of liquid jet pump[J].Fluid Machinery,2023,51(1):36 – 43.

[25] FANG Z L,HOU W J,FAN S D,et al.Coherent structure analysis of cavitation waterjets using dynamic mode decomposition[J].Physics of Fluids.,2024,36(3):035114.

作者简介:侯博文(1999),男,硕士研究生,主要从事超声辅助空化射流研究,E – mail:287491396@qq.com。

通信作者:方珍龙(1989),男,博士,副教授,主要从事空化射流研究,通信地址:430063 湖北省武汉市武昌区和平大道1040号武汉理大学余家头校区水路交通控制全国重点实验室,E – mail:zl_fang@whut.edu.cn。

本文引用格式:
侯博文,方珍龙 . 超声振动边界下亥姆赫兹腔室空化性能及涡行为分析[J]. 流体机械,2025,53(2):41 – 49.
HOU B W,FANG Z L.Analysis of cavitation performance and vortex behavior in Helmholtz cavity under ultrasonic vibration boundary[J].Fluid Machinery,2025,53(2):41 – 49.