

引文格式:

张飞飞, 韦亚南, 徐耀辉, 等. Helmholtz 喷嘴结构参数对空化射流特性的影响 [J]. 集成技术, 2021, 10(2): 75-84.

Zhang FF, Wei YN, Xu YH, et al. Effects of structural parameters of Helmholtz nozzle on cavitating jet characteristics [J]. Journal of Integration Technology, 2021, 10(2): 75-84.

Helmholtz 喷嘴结构参数对空化射流特性的影响

张飞飞 韦亚南 徐耀辉 何 凯*

(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

摘 要 自振空化射流是在射流过程中利用喷嘴内部结构的振荡特性产生空泡, 在射出喷嘴后空泡发生溃灭来增大射流冲击作用的现象。由于自振空化射流效果与喷嘴结构有密切关系, 因此近年来关于喷嘴结构的优化研究广受关注。鉴于 Helmholtz 喷嘴在增强射流冲击力方面具有明显优势, 该文针对不同结构参数的 Helmholtz 喷嘴的内外流场进行了数值仿真, 重点分析了出口直径、出口长度、共振腔空化长度、共振腔空化直径等关键结构参数及射流靶距对空化水射流效果的影响, 相关研究成果可为空化射流船舶清洗技术提供理论指导。

关键词 Helmholtz 喷嘴; 数值仿真; 空化射流; 结构优化

中图分类号 TP 69 **文献标志码** A **doi**: 10.12146/j.issn.2095-3135.20201103001

Effects of Structural Parameters of Helmholtz Nozzle on Cavitating Jet Characteristics

ZHANG Feifei WEI Yanan XU Yaohui HE Kai*

(Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

*Corresponding Author: kai.he@siat.ac.cn

Abstract Self-oscillating cavitating jet is a phenomenon in the process of jet flow. The cavitation is produced by the oscillation characteristics of the internal structure of the nozzle. And the cavitation collapses after it is ejected from the nozzle, which enhances the impact force of the water jet. The self-oscillating cavitating jet effect is related to the nozzle structure. Since Helmholtz nozzle has great advantage in enhancing the jet impacting force, this paper investigates the flow fields inside and outside of the Helmholtz nozzle with different structural parameters based on numerical simulation, and this paper mainly analyzes the influence of some key structural parameters, including the outlet diameter, the outlet length,

收稿日期: 2020-11-03 修回日期: 2020-12-25

基金项目: 广东省海洋经济发展(海洋六大产业)专项资金项目(粤自然资合[2020] 031 号)

作者简介: 张飞飞, 博士, 助理研究员, 研究方向为金属板材柔性成形工艺和高压水射流; 韦亚南, 硕士研究生, 研究方向为脉冲电液成形工艺和高压水射流; 徐耀辉, 博士研究生, 研究方向为除锈机器人及空化射流; 何凯(通讯作者), 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为精密制造与自动化技术, E-mail: kai.he@siat.ac.cn.

the resonant cavitating length, the resonant cavitating diameter and the target distance, on the cavitating jet performance, and the results can provide a theoretical instruction for the applications like the cavitating jet technology in ship cleaning.

Keywords Helmholtz nozzle; numerical simulation; cavitating jet; structural optimization

Funding This work is supported by GDNRC ([2020]031)

1 引 言

船舶行业是许多国家非常重要的支柱产业。在船舶行驶过程中,海洋生物的附着会增加船舶负载、加速腐蚀过程,甚至导致垮塌等重大事故^[1-2],因此需要定期对船舶进行清洗和检修。目前,国内外常用的船舶清洗方法包括人工方法、气体喷丸、电化学方法和激光除锈方法等,但这些方法普遍存在污染环境、且对人类本身具有较大危害等问题。20世纪70年代以来,高压水射流技术被引入船舶清洗领域。与上述传统清洗方法相比,高压水射流清洗方法绿色环保、费用低且清洗效率高,但针对较难清洗的船舶表面污垢,高压水压力可能要达到200 MPa及以上,这对高压水设备提出了较高的要求。

近年来,有学者将水射流技术与空化现象相结合,利用空泡破裂时产生的强大冲击力来增强射流的作用效果,在船体表面清洗^[3]、强化材料表面^[4]、油田^[5]及破煤^[6]等方面具有广阔的应用前景。相对于高压水射流,空化射流不需要太高的入口压力,因此极大地降低了对相关高压泵设备的要求,同时也降低了成本,故是一种高效且绿色环保的自动化清洗技术,也逐渐成为国内外很多学者研究的热点方向。

作为空化射流技术的关键环节之一,空化喷嘴结构对空化射流效果具有直接的影响。按照空化的产生原理,空化喷嘴可分为绕流型、剪切型和振荡型喷嘴^[7]。其中,自激振荡型(简称自振型)喷嘴是利用自身结构产生共振空化,从而

产生高强度的空化射流。目前常用的自振型喷嘴包括风琴管空化喷嘴和 Helmholtz 空化喷嘴,基于两者相关的研究有很多^[8]。有研究表明, Helmholtz 喷嘴的自激共振频率幅值峰值比风琴管喷嘴的更高,自振更剧烈,因此 Helmholtz 喷嘴的空化效果优于风琴管喷嘴^[9-10]。优化 Helmholtz 喷嘴结构可以更有效地增强船舶表面海洋生物附着物等的去除效果,有实质的应用市场。目前国内外对 Helmholtz 喷嘴结构进行的相关研究仍非常有限。由于实验所采用的环境和参数都与实际应用条件不同,所以很难进行完整的多因素量化结构参数分析。近年来,王循明^[11]、李文珂^[12]和刘梓光^[13]等对 Helmholtz 喷嘴结构进行了大量的实验研究,得到几组较好的尺寸范围。但总体而言,目前得到的喷嘴优化尺寸范围较大,不能准确地获取最优喷嘴结构参数。

综合上述文献, Helmholtz 喷嘴在增强射流冲击力方面具有很大的优势。然而, Helmholtz 喷嘴的基本结构参数对空泡效应具有很大的影响。为了获得更强的自振空化射流,扩大其应用范围,本文在数值模拟的基础上,对不同结构参数的 Helmholtz 喷嘴内外流场中空泡的生成和发展过程进行了系统研究,以明确各工艺参数(包括射流靶距)对空化射流效果的具体影响规律,为后续基于空化射流技术开展大规模应用奠定理论基础。

2 Helmholtz 喷嘴结构模型

图1为 Helmholtz 空化喷嘴的内部结构示意图

图。该自振空化喷嘴的主要几何参数包括入口直径 d_1 、入口长度 L_1 、出口直径 d_2 、出口长度 L_2 、共振腔空化长度 L_s 、共振腔空化直径 D_s 和碰撞壁锥角 α 。

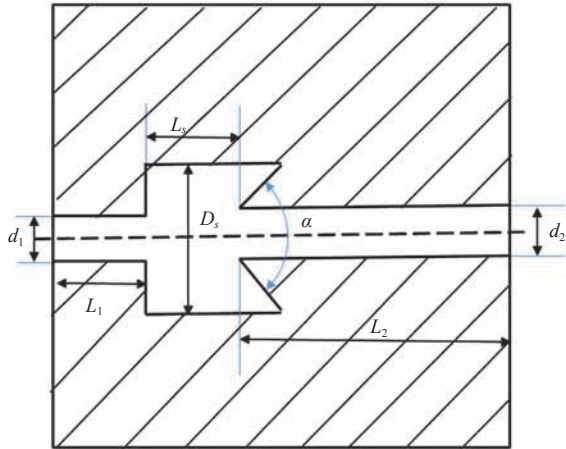


图 1 Helmholtz 喷嘴几何结构图

Fig. 1 Geometry of Helmholtz cavitating nozzle

一般情况下, 入口直径由入口压力和相应的入口流量决定, 在共振腔中会出现空化现象, 而入口长度对空化现象几乎无影响, 因此这里将入口直径 d_1 和入口长度 L_1 分别设置为 1.20 mm 和 5.0 mm。同时, 根据文献实验结果^[14-15], 本研究采用的最佳碰撞壁锥角为 120° 。因此, 本文在数值模拟的基础上, 主要研究出口直径 d_2 、出口长度 L_2 、共振腔空化长度 L_s 和共振腔空化直径 D_s 等喷嘴结构参数及射流靶距 T_d 对空化效应的影响。根据文献提供的喷嘴初步优化尺寸范围^[11-13,16], 本研究确定的相应喷嘴结构参数(包括射流靶距)设置见表 1。

3 Helmholtz 喷嘴内外流场数值仿真

目前, 基于喷嘴结构进行的仿真研究很多, 但所研究的喷嘴结构、侧重的研究因素(包括内流场、外流场中的速度变化、压力变化及相变过程等)都存在较大区别^[14-15,17-19]。在本研究中, 同时模拟计算 Helmholtz 喷嘴的内部流场和外部流

表 1 Helmholtz 数值仿真参数设置

Table 1 Numerical parameter settings for Helmholtz nozzle

喷嘴编号	L_2 (mm)	d_2 (mm)	D_s (mm)	L_s (mm)	T_d (mm)
1	15	2.4	10	4	25
2	30	2.4	10	4	25
3	45	2.4	10	4	25
4	15	1.8	10	4	25
5	15	3.2	10	4	25
6	15	2.4	15	4	25
7	15	2.4	20	4	25
8	15	2.4	10	10	25
9	15	2.4	10	16	25
10	15	2.4	10	4	10
11	15	2.4	10	4	40

注: L_2 为出口长度; d_2 为出口直径; D_s 为共振腔空化直径; L_s 为共振腔空化长度; T_d 为射流靶距

场, 主要对比研究不同结构的 Helmholtz 喷嘴内外流场中空泡的生成和发展情况。为了减少计算时间, 采用 1/2 二维有限元模型, 如图 2 所示。其中, 外部流场模型为直径 160 mm 的圆柱体, 内部流场模型的几何参数与表 1 中所列喷嘴尺寸相同。为了获得精确的数值仿真结果, 需要定义合适的物理模型、材料模型和相应的边界条件。Fluent 中包含 3 种多相流模型: Mixture 模型、VOF 模型和 Euler 模型。考虑到计算精度、计算

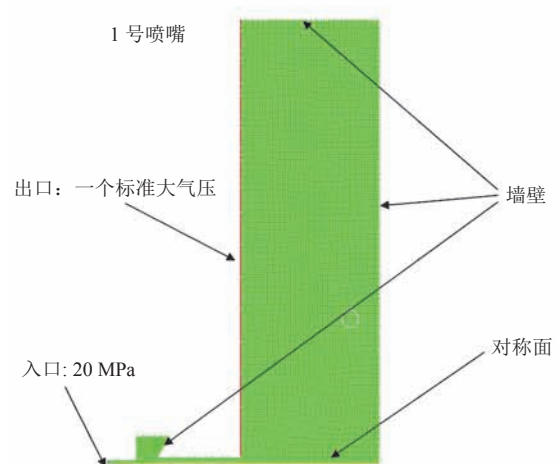


图 2 Helmholtz 喷嘴的空化射流有限元模型

Fig. 2 Finite element model for cavitating jet with Helmholtz nozzle

效率及模型适用性,本研究选用 Mixture 模型。同时,Fluent 中计算高速流体湍流最常用的方模型是 $k-\varepsilon$ 模型,该模型包括标准 $k-\varepsilon$ 、RNG $k-\varepsilon$ 和 Realizable $k-\varepsilon$ 模型。其中,Realizable $k-\varepsilon$ 模型适用于多数流场分析,因此本研究选用其作为湍流模型。除此之外,为了准确描述空化过程中的相变过程,需要设置合适的空化模型。这里选用适用于所有湍流模型的 Schnerr-Sauer 模型^[20]。需要说明的是,上述湍流模型和空化模型的参数在 Fluent 中都是默认设置好的,只需要选择合适的模型即可。图 2 还显示了 1 号喷嘴结构相应的边界条件。由于采用 1/2 二维有限元模型,需要在图 2 中所示的下方边界设置对称边界条件,同时,入口边界条件为压力入口(本研究中采用的压力都为 20 MPa),出口边界条件为 1 个大气压。其余边界条件设置为墙壁。另外,对于本研究中的数值模拟,时间尺度因子设定为 0.01,迭代次数设定为 3 000 次。

根据伯努利原理,流体速度与流体压力的关系可简化为:

$$v=w\sqrt{\frac{2P}{\rho}} \quad (1)$$

其中, v 为入口流体速度; P 为入口压力; ρ 为流体密度; 参数 w 为流速系数,这里取为 0.95。因此,根据入口射流水压力,可通过理论计算得到射流的速度。图 3 为不同入口压力条件下的喷嘴入口水射流速度理论值与数值仿真理论值对比。可以看到,理论计算结果与数值预测结果吻合良好,最大误差不超过 1%。这表明该数值仿真结果可靠。同时,图 4 为入口压力为 20 MPa 条件下从喷嘴入口到右侧墙壁(即被清洗表面)的流体速度分布曲线。其中,流体速度在喷嘴入口处最大,从喷嘴入口到喷嘴出口的流体速度没有显著变化;但当流体流入外流场后,由于高速流体会与大气压状态下的静态流体产生相互作用,流体速度显著降低,在右侧墙壁处,流体速度减小为 0。

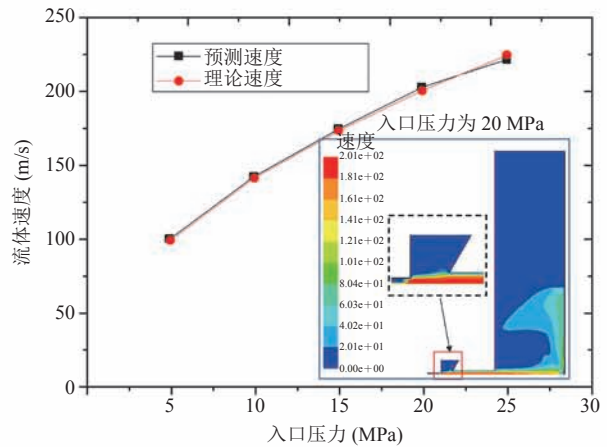


图 3 仿真预测与理论计算的射流速度对比图

Fig. 3 Comparison of the predicted velocity and theoretical velocity

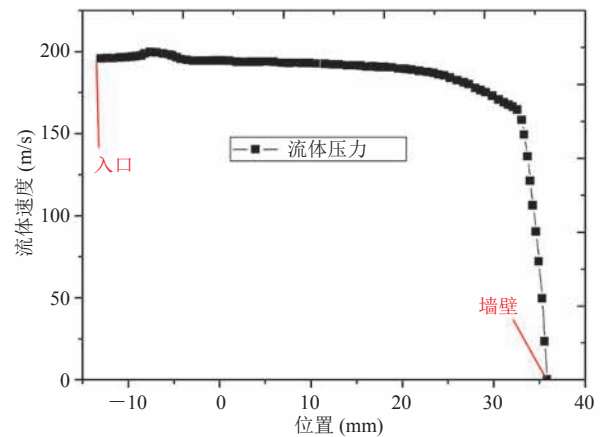


图 4 沿对称面的流体速度分布曲线

Fig. 4 Liquid velocity distribution along the symmetrical line

在空化射流过程中,作用在被清洗表面的作用力与产生的空泡有直接关系,因此可以通过数值仿真计算的空泡体积分数云图分析空化喷嘴结构的性能。图 5 为入口压力为 20 MPa 条件下 1 号喷嘴在空化水射流过程中空泡的演变和发展。可以看出,在 Helmholtz 喷嘴的内部流场中,空泡首先在共振腔出口附近产生,然后沿着斜角侧壁发展,最后发展到共振腔与入口相交一侧,直至填满共振腔。在外部流场中,空泡首先在喷嘴出口处产生,然后逐渐向四周扩散。

4 仿真结果与讨论

在空化射流中, 空泡形成并长大, 当含有这些空泡的射流冲击物体时, 会使空泡在物体表面及其附近破裂, 而空泡破裂会产生极大的冲击压力和应力集中, 极大提高射流冲击力, 使物体表面(或被清洗物质)迅速破坏。由于基于数值仿真只能计算图 5 所示空泡的发展演化历史, 因此本小节以相同数值仿真参数下生成空泡的体积分数为依据, 判断 Helmholtz 喷嘴结构的优

劣。对于本小节所涉及的数值仿真, 入口压力均为 20 MPa, 时间尺度因子设定为 0.01, 迭代次数设定为 3 000 次。

4.1 喷嘴出口长度对空化效果的影响

首先, 对 1 号至 3 号喷嘴的内外流场进行了有限元模拟。三种情况下, 喷嘴出口长度不同, 而其他结构参数相同。图 6 为 3 000 次迭代后 3 种喷嘴内部流场和外部流场中生成空泡的体积分云图。可以看出, 出口长度对内部流场中空泡的发展影响很小, 而在外部流场中空泡的发

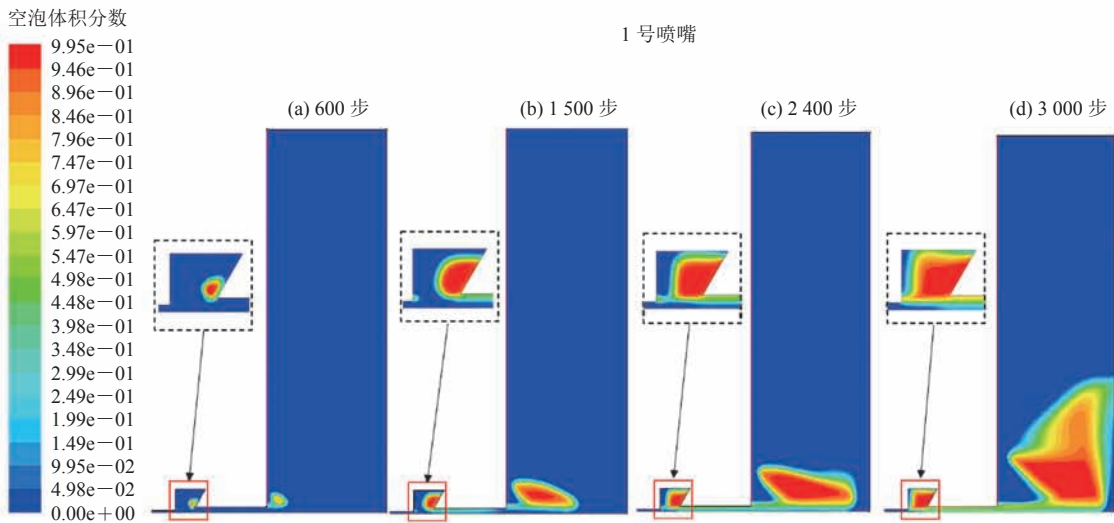


图 5 数值仿真中不同迭代步数下空泡的发展

Fig. 5 Develop of vapor during numerical simulation under different iteration steps

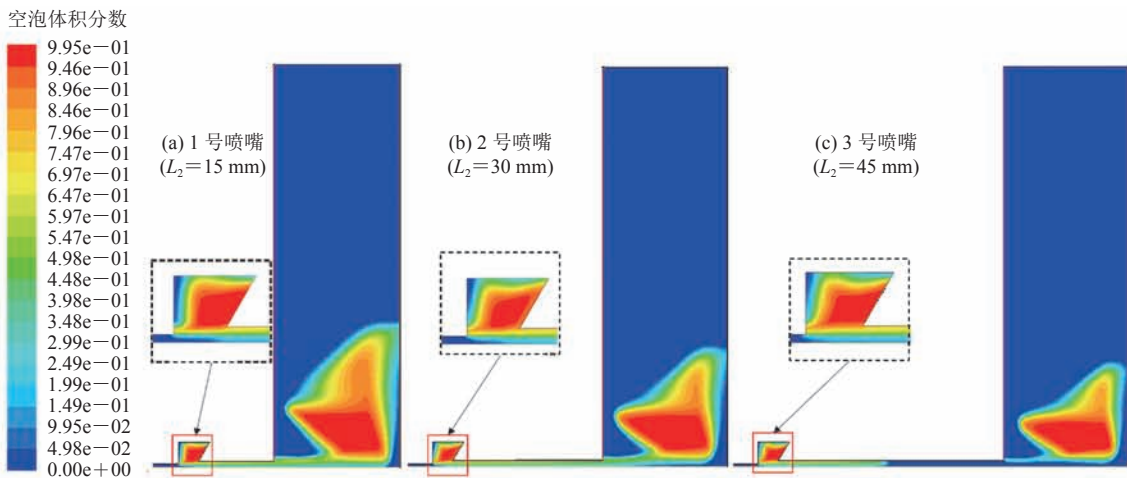


图 6 不同出口长度的喷嘴产生的空泡体积分云图

Fig. 6 Volume fraction of vapor for different outlet lengths

展随出口长度的变化显著不同：随着出口长度的增加，在喷嘴出口阶段空泡生成受阻，导致外部流场中生成的空泡作用范围逐渐减小。因此在本研究中，能产生最多空泡的喷嘴最佳出口长度为 15 mm。

4.2 喷嘴出口直径对空化效果的影响

本小节中，分别对出口直径为 1.8 mm、2.4 mm 和 3.2 mm 的喷嘴(1 号、4 号和 5 号)在入口压力为 20 MPa 时的内外流场进行了有限元模拟。三种情况下，经过 3 000 次迭代后喷嘴的内外流场中产生的空泡体积分布云图如图 7 所示。可以看出，在喷嘴内部流场中，喷嘴出口直径从 1.8 mm 增大到 2.4 mm 时，生成的空泡作用范围和体积分数增大；而喷嘴直径增大到 3.2 mm 时，生成的空泡作用范围减小，在共振腔外壁处生成的空泡非常有限。这表明喷嘴出口直径会直接影响共振腔内部空泡的发展。在喷嘴外部流场中，3 种喷嘴产生的空泡体积分数差别不大。由于目前选择对比的 3 个喷嘴出口直径数值已经过初步优化 ($d_2/d_1=1.5\sim 2.7$)，该结论不能直接否定出口直径对空化射流效果的影响。综合不同出口直径条件下内外流场中空泡的发展规律，本研究中最优

的喷嘴出口直径为 2.4 mm。

4.3 喷嘴共振腔空化直径对空化效果的影响

对于 1 号、6 号和 7 号喷嘴，共振空化直径分别为 10 mm、15 mm 和 20 mm。对 3 种情况的喷嘴内外流场进行了相应的数值模拟，生成的空泡体积分数预测如图 8 所示。可以看出，对于喷嘴内部流场，不同共振腔直径的喷嘴产生的空泡存在较大差异。空泡首先在共振腔与出口相交的地方出现，然后沿着斜角侧壁发展，最后发展到共振腔与入口相交一侧。当增大共振腔空化直径时，在相同的冲击能量作用下，生成的空泡主要集中在共振腔与出口相交一侧。对于外部流场，不同共振腔空化直径的喷嘴产生的空泡及其作用范围非常相似。因此，本研究中喷嘴的最佳共振腔空化直径为 10 mm。

4.4 喷嘴共振腔空化长度对空化效果的影响

为清楚地了解喷嘴的共振腔空化长度对空化水射流特性的影响，本小节对共振腔空化长度分别为 4 mm、10 mm 和 16 mm 的喷嘴内外流场进行了有限元仿真计算，得到 3 000 次迭代后喷嘴内外流场中生成的空泡体积分数预测云图，如图 9 所示。结果表明，喷嘴的共振腔空化长度对

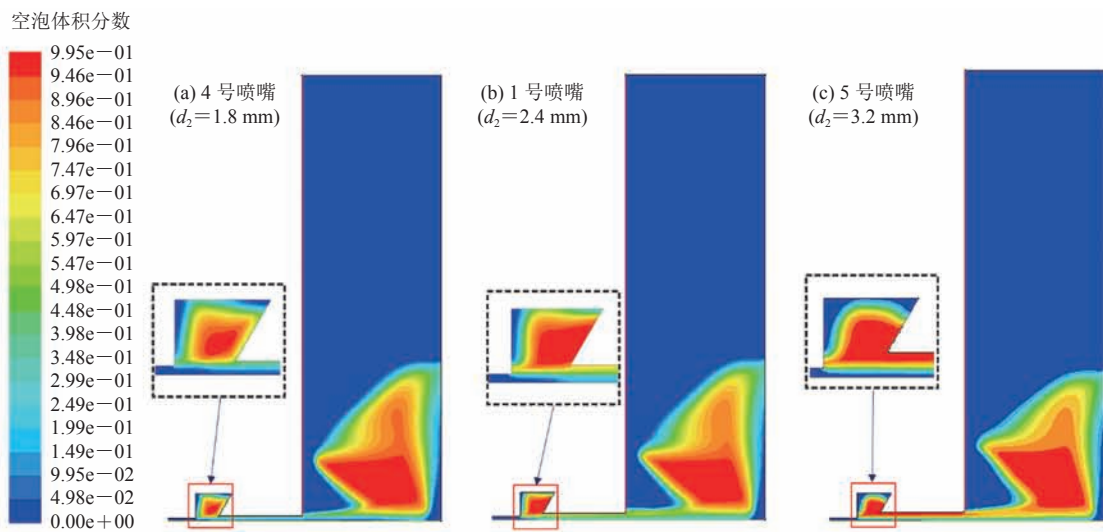


图 7 不同出口直径的喷嘴产生的空泡体积分数云图

Fig. 7 Volume fraction of vapor for different outlet diameters

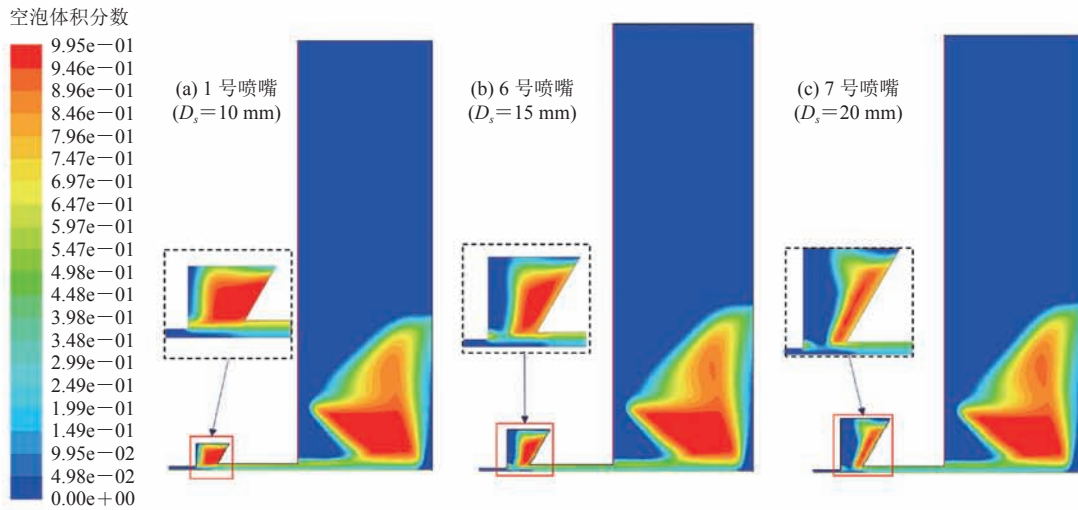


图 8 不同共振腔空化直径的喷嘴产生的空泡体积分数云图

Fig. 8 Volume fraction of vapor for different resonant cavitation diameters

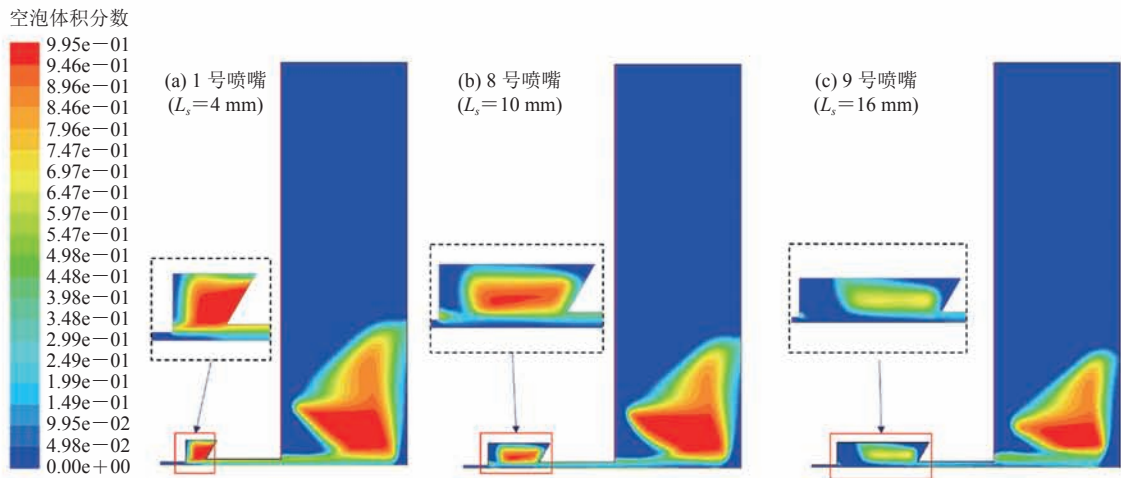


图 9 不同共振腔空化长度的喷嘴产生的空泡体积分数云图

Fig. 9 Volume fraction of vapor for different resonant cavitation lengths

外部流场和内部流场均有影响。对于内部流场, 增大共振腔空化长度后, 由于共振腔内部结构的变化, 空泡的生成受阻, 导致生成的空泡体积分数显著下降。对于外部流场, 增加共振腔空化长度, 产生的空泡作用范围减小。因此, 本研究中喷嘴的最佳共振腔空化长度为 4 mm。

4.5 射流靶距对空化效果的影响

在空化射流中, 射流靶距虽然不是喷嘴结构的组成部分, 但却对空化射流效果具有显著影响, 因此本小节对不同射流靶距的空化射流过

程进行了仿真对比。图 10 所示为 3 种射流靶距 (10 mm、25 mm 和 40 mm) 下 Helmholtz 喷嘴的内外流场中生成的空泡体积分数预测云图。可以看到, 改变射流靶距对内流场中空化气泡的生成会产生一定影响——增大射流靶距时, 喷嘴内部空化气泡增多。当射流靶距为 10 mm 时, 外流场中空化气泡的作用范围较为发散, 因此集中作用力稍为减弱; 当增大射流靶距到 25 mm 时, 外流场中空化气泡作用范围相对集中, 此时空化射流作用力较大; 当增大射流靶距到 40 mm 时, 外流

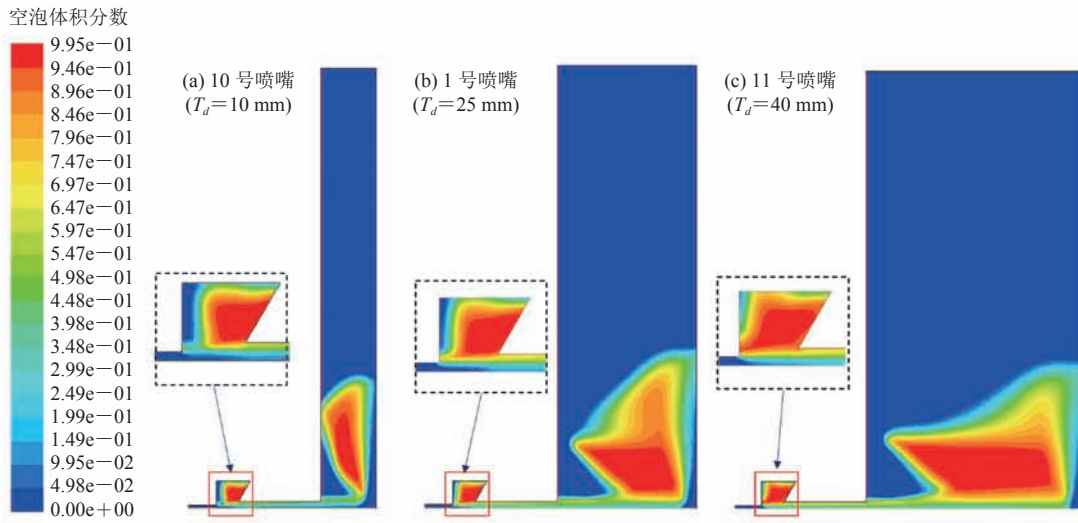


图 10 不同射流靶距的喷嘴产生的空泡体积分数云图

Fig. 10 Volume fraction of vapor for different target distance

场中空化气泡体积分数大于 90% 的部分作用范围稍为减弱, 但比 10 mm 射流靶距下的空化射流效果好。由此可见, 射流靶距对空化作用具有显著影响。实际应用中, 需要根据清洗目标的具体要求(包括需要的最小蚀除冲击力及清洗面积等)选择最合适的射流靶距。

5 与国内外相似研究的对比分析

虽然已有很多文献对 Helmholtz 喷嘴结构优化进行了实验和数值仿真研究, 但大多数研究都是侧重于实验蚀除效果^[11-13]、射流频率特性^[10]或仿真分析速度及压力分布^[19,21]等, 而针对空泡生成的研究仍很少。陈理^[17]针对风琴管喷嘴模拟了液相变化过程, 表明空泡生成从出口处发展长大, 与本文针对 Helmholtz 喷嘴内外流场中计算的气泡发展趋势相似。

同时, 李文珂^[12]通过蚀除实验对比不同出口长度条件下 Helmholtz 喷嘴的蚀除冲击效果, 证明增加出口长度会减小蚀除冲击力; 刘梓光^[13]也通过蚀除实验证明减小共振腔空化直径会增大蚀除冲击力。周维^[21]也通过蚀除实验

发现存在蚀除冲击力最大的最佳射流靶距。本文通过初步数值仿真证实减小出口长度或共振腔空化直径会显著增加空泡生成的体积分数, 从而增大空泡爆破产生的冲击力; 除此之外, 数值仿真结果也证实不同射流靶距条件下生成空泡的体积分数和作用范围存在较大差异, 本文结论与上述文献实验研究相符, 这也间接验证了本文数值仿真的可靠性。

6 结 论

本文通过数值模拟, 研究了 Helmholtz 喷嘴的各种结构参数, 包括出口直径、出口长度、共振腔空化长度、共振腔空化直径及射流靶距, 对空化水射流过程中空泡发展的影响。数值仿真研究表明, 在内部流场中, 空泡首先在共振腔与出口相交的地方出现, 然后沿着斜角侧壁发展, 最后发展到共振腔与入口相交一侧。在外部流场中, 空泡首先在喷嘴出口处产生, 然后沿四周扩散。因此, 需要保证喷嘴结构适合空化的生成和发展。通过对比研究表明, 在本研究设定的参数范围内, 出口长度、共振腔空化直径和共振腔空

化长度越小, Helmholtz 喷嘴内外流场中产生的空泡越多, 对冲击射流的增强作用越大; 出口直径大小对空泡体积分数的影响不明显; 同时, 射流靶距对空化作用具有显著影响, 需要根据清洗目标的具体要求选择最合适的射流靶距。本文仅对 Helmholtz 喷嘴结构参数对空化水射流性能的影响进行了定性研究, 今后有必要采用正交实验法确定 Helmholtz 喷嘴的多个结构参数的最佳组合, 并通过相应的空化射流实验对数值仿真结果进行验证。

参 考 文 献

- [1] 麻春英. 舰船防污方法研究进展 [J]. 化工新型材料, 2019, 47(7): 31-34.
Ma CY. Research and development of marine antifouling method [J]. New Chemical Materials, 2019, 47(7): 31-34.
- [2] 陈彦臻, 胡以怀. 船体清洗机器人的开发现状与展望 [J]. 船舶工程, 2017, 39(10): 62-69.
Chen YZ, Hu YH. Development status and prospect of ship hull cleaning robot [J]. Ship Engineering, 2017, 39(10): 62-69.
- [3] Zhang FF, Sun XR, Li ZP, et al. Influence of processing parameters on coating removal for high pressure water jet technology based on wall-climbing robot [J]. Applied Sciences, 2020, 10(5): 1862.
- [4] Qin M, Ju DY, Oba R. Investigation of the influence of incidence angle on the process capability of water cavitation peening [J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 201(3/4): 1409-1413.
- [5] 曹泽平, 刘桓龙, 谢迟新. 新型环流式空化喷嘴的空化及清洗特性 [J]. 液压与气动, 2020(3): 136-144.
Cao ZP, Liu HL, Xie CX. Cavitation and cleaning characteristics of new annular cavitation nozzles [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020(3): 136-144.
- [6] 谢成雨, 蔡毅, 云丹丹, 等. 高压水射流喷嘴设计仿真研究 [J]. 煤矿机械, 2016, 37(8): 6-9.
Xie CY, Cai Y, Yun DD, et al. High pressure water jet nozzle design simulation [J]. Coal Mine Machinery, 2016, 37(8): 6-9.
- [7] 赵文亮. 水下空化射流冲蚀技术及实验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
Zhao WL. The erosion technology and experiment on submerged cavitating jet [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [8] 蔡腾飞, 潘岩, 马飞, 等. 喷嘴出口结构参数对风琴管射流空化作用的影响 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(18): 150-156.
Cai TF, Pan Y, Ma F, et al. Effects of outlet geometry of organ-pipe nozzle on cavitation due to impingement of the waterjet [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(18): 150-156.
- [9] Tuna BA, Rockwell D. Self-sustained oscillations of shallow flow past sequential cavities [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2014, 758: 655-685.
- [10] 韩健, 蔡腾飞, 潘岩, 等. 风琴管喷嘴和赫姆霍兹喷嘴射流特性分析 [J]. 煤矿安全, 2017, 48(7): 134-147.
Han J, Cai TF, Pan Y, et al. Study on jet's characteristics of organ nozzle and Helmholtz nozzle [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(7): 134-147.
- [11] 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 XM. Influence factors simulation study of the self-excited oscillation pulsed jet device and nozzle structure optimized design [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [12] 李文珂. 喷嘴结构参数对自激脉冲空化射流的影响研究 [D]. 济南: 山东大学, 2015.
Li WK. Research on the influence of structural parameters of self-excited pulse cavitation jet nozzle [D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [13] 刘梓光. 用于清洗的空化水射流喷嘴的实验研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2009.
Liu ZG. Experimental study on cavitation water jet nozzle for cleaning [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2009.
- [14] 罗冲. 空化泡及空化水射流的数值模拟 [D]. 杭

- 州: 浙江工业大学, 2016.
- Luo C. Numerical simulation of a cavitation bubble and cavitation water jet [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
- [15] 邓松圣, 沈银华, 李赵杰, 等. 空化射流喷嘴流场的数值模拟 [J]. 后勤工程学院学报, 2008, 24(2): 42-46.
- Deng SS, Shen YH, Li ZJ, et al. Numerical simulation on internal flow field in nozzle with cavitations water jet [J]. Journal of Logistical Engineering University, 2008, 24(2): 42-46.
- [16] Liu WC, Kang Y, Zhang MX, et al. Self-sustained oscillation and cavitation characteristics of a jet in a Helmholtz resonator [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2017, 68: 158-172.
- [17] 陈理. 空化射流喷嘴结构参数的优化 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.
- Chen L. Optimization of structural parameters of cavitation jet nozzle [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017.
- [18] 韩启龙, 马洋. 喷嘴结构对高压水射流影响及结构参数优化设计 [J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(3): 68-74.
- Han QL, Ma Y. Influence of nozzle structure on high pressure water jet and optimization design of nozzle structure parameter [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(3): 68-74.
- [19] 李兴, 黄永春, 黄承都, 等. 基于 Fluent 亥姆霍兹自振空化喷嘴流场的数值模拟 [J]. 大众科技, 2019, 21(3): 29-32.
- Li X, Huang YC, Huang CD, et al. Numerical simulation of flow field of Helmholtz self-resonating cavitation jet nozzle based on Fluent [J]. Popular Science & Technology, 2019, 21(3): 29-32.
- [20] 王健. 低频自激脉冲射流发生机理及其频率调制研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- Wang J. Study on the mechanism of low-frequency self-excited pulse jet flow and the frequency modulation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
- [21] 周维. 基于轮式清洗爬壁机器人的空化射流仿真及实验研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2018.
- Zhou W. Simulation and experimental study of cavitation jet based on wheeled wall-climbing robot for cleaning [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2018.