

表面微结构的宽深比与占空比对马氏体 不锈钢空化和空蚀的影响

任倩楠^{1,2}, 胡红祥^{1*}, 郑玉贵¹

(1.中国科学院金属研究所, 沈阳 110016;
2.中国科学技术大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110016)

摘要: **目的** 探究表面微结构尺寸变化对空蚀过程的影响以及作用机制。**方法** 根据点阵型表面微结构的截面形状, 改变其宽深比和占空比, 用 Gambit 对其建立二维平面模型。使用 Fluent 软件对不同尺寸下微结构模型的空蚀过程进行模拟计算, 得到绝对压力、含汽率以及气泡运动速度等参数。最后根据模拟计算的结果, 在样品表面加工出不同占空比的微结构, 使用磁致超声振动空化设备, 在与数值模拟相同环境条件下进行空蚀试验, 采用失重法对模拟结果进行验证。**结果** 数值模拟分析显示, 微结构的宽深比和占空比对空蚀过程均有影响。当宽深比小于 2.5 时, 微结构底面的含汽率降至 0.1 以下, 沟槽内形成一层“液垫”, 减缓了空蚀。相较于其他占空比, 当占空比为 0.91 时, 含汽率最小, 保持在 0.4 以下, 样品表面同样形成“液垫”, 缓冲了气泡溃灭时作用在材料表面的冲击力。此外, 随着占空比的增大, 微结构表面的绝对压力与液体的饱和蒸汽压差距增大, 降低了空化程度, 同样起到了减缓空蚀的作用。不同占空比下的微结构样品和光滑样品的空蚀试验结果表明, 微结构样品的空蚀质量损失均小于光滑样品的空蚀质量损失, 且当占空比为 0.91 时, 空蚀质量损失最小, 为 5.95 mg, 远小于占空比为 0.71 和 0.38 时, 微结构样品。同样证明了表面微结构占空比越大, 材料的耐空蚀性能越好。**结论** 微结构宽深比主要影响微结构底面的含汽率, 而占空比影响样品表面的绝对压力和微结构顶面的含汽率。相较于光滑表面, 微结构样品可以有效减缓马氏体不锈钢的空蚀损伤。当宽深比较小、占空比较大时, 材料表面的含汽率保持在较低的水平, 有利于减缓空蚀损伤。

关键词: 空蚀; 表面微结构; 数值模拟; 含汽率; 绝对压力; 占空比; 宽深比

中图分类号: TG176 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)11-0067-13

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.11.006

Effect of Width-to-Depth Ratio and Duty Cycle of Surface Microstructure on Cavitation and Cavitation Erosion on Martensitic Stainless Steels

REN Qiannan^{1,2}, HU Hongxiang^{1*}, ZHENG Yugui¹

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. School of Materials
Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Shenyang 110016, China)

收稿日期: 2024-02-02; 修订日期: 2024-04-18

Received: 2024-02-02; Revised: 2024-04-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51971229); 辽宁省自然科学基金面上项目 (2023-MS-016)

Fund: The Natural Science Foundation of China (51971229); The Natural Science Foundation of Liaoning Provincial of China (2023-MS-016)

引文格式: 任倩楠, 胡红祥, 郑玉贵. 表面微结构的宽深比与占空比对马氏体不锈钢空化和空蚀的影响[J]. 表面技术, 2024, 53(11): 67-79.
REN Qiannan, HU Hongxiang, ZHENG Yugui. Effect of Width-to-Depth Ratio and Duty Cycle of Surface Microstructure on Cavitation and
Cavitation Erosion on Martensitic Stainless Steels[J]. Surface Technology, 2024, 53(11): 67-79.

*通信作者 (Corresponding author)

ABSTRACT: The work aims to investigate the effects of surface microstructure on cavitation erosion. In this paper, a series of dot array-shaped microstructures were successfully established by Gambit. Ansys Fluent was employed to simulate the cavitation of the flow domain around the surface microstructure with different geometry characteristics. Absolute pressure, volume fraction of vapor phase, and bubble movement velocity were utilized to characterize the cavitation and cavitation erosion. Finally, a cavitation erosion test was performed to confirm the simulation results with a magnetostrictive-vibration cavitation facility. The mass loss method was used to evaluate the cavitation erosion.

The results showed that both the width-to-depth ratio and the duty cycle of the microstructure affected the cavitation process. For the width-to-depth ratio of the surface microstructure, when it was less than 2.5, the volume fraction of the vapor phase on the bottom surface of the microstructure was reduced to less than 0.1. A layer of "liquid buffer" was formed in the groove, which could alleviate cavitation erosion. For the duty cycle of the surface microstructure, the volume fraction of the vapor phase was the smallest when the duty cycle was 0.91, remaining below 0.4. The "liquid cushion" was also formed on the surface of the sample, which absorbed the impact energy of the bubbles on the surface of the material as they collapse. As the duty cycle increased, the absolute pressure on the microstructured surface increased, reducing the degree of cavitation and similarly acting to slow down cavitation erosion.

The cavitation experiments were performed on microstructured samples at different duty cycles with smooth samples as a control group. It was found that the mass loss and the SEM morphology of cavitation erosion of samples with microstructures were lighter than those of smooth samples, implying that surface microstructures could effectively mitigate the cavitation erosion of materials. Combined with the analyses of the simulation results, it was concluded that the microstructure had different mechanisms to mitigate cavitation erosion under different duty cycles. At the duty cycle of 0.38, the microstructure pushed the bubbles away from the sample surface to mitigate cavitation erosion, and at duty cycles of 0.71 and 0.91, the microstructure mitigated cavitation erosion by reducing the vapor phase volume fraction.

When the duty cycle was 0.91, the mass loss of the microstructured samples was 5.95 mg, much smaller than that of the microstructured samples at the duty cycles of 0.71 and 0.38. It was also demonstrated that the larger the duty cycle of the surface microstructure, the better the cavitation erosion resistance of the material. In conclusion, the width-to-depth ratio of the surface microstructure mainly affected the vapor phase volume fraction of the bottom surface of the microstructure, while the duty cycle affected the absolute pressure across the surface and the vapor phase volume fraction at the top surface of the microstructure. It was proved that the surface microstructure could improve the cavitation erosion resistance of martensitic stainless steel. When the microstructure width-to-depth ratio was small and the duty cycle was large, the vapor phase volume fraction was low, which could further mitigate cavitation erosion.

In this paper, the effect of the width-to-depth ratio and duty cycle of the surface microstructure on the reduction of cavitation erosion is investigated in terms of numerical simulation as well as experimentally. Reasonable microstructure width-to-depth ratios and duty cycles are determined, and an intrinsic mechanism based on surface vapor phase volume fraction affecting cavitation erosion resistance is proposed. The vapor phase volume fraction is used as an indicator to provide a reference for subsequent quantitative control of the degree of cavitation erosion.

KEY WORDS: cavitation erosion; surface microstructure; numerical simulation; volume fraction of vapor phase; absolute pressure; duty cycle; width-to-depth ratio

空蚀是水利工程中常见的磨损形式之一^[1-3]。流体内部局部压强波动导致空泡生长并破裂,释放出冲击波或微射流作用在材料表面,使材料发生疲劳破坏^[4-5]。随着水利器械不断向高速化发展,空蚀几乎无法避免,被认为是水利器械的“癌症”。空蚀过程受流体性质^[6-7]、材料性能^[8-9]、部件结构^[10]、材料表面形貌^[11-12]等因素的影响,涉及流体力学、气泡动力学、材料学等多种学科,作用机制复杂^[13-14]。其中,材料表面形貌是影响空蚀发生、发展的重要因素之一^[15],但对其影响

机制还存在一定的争议。有研究表明,表面粗糙度的增加会促进空化的产生^[16-17]。但越来越多的研究证明,适当地提高表面粗糙度或设计合适的表面结构可以有效地抑制空蚀的发生^[18-20]。

非光滑表面已经被证实能有效降低冲刷磨损^[21-24],但在抗空蚀领域还没有完全开发。大多数的空蚀研究针对的是光滑表面^[1,25-26],仅有少部分的研究探索了非光滑表面对空蚀损伤的影响机制。Zhao 等^[27]和 Yang 等^[28]研究了光滑平面与激光刻蚀纹理表面的空

蚀行为,并辅以数值模拟对 2 种表面空蚀过程中的压力、含汽率等参数进行计算。他们发现,矩形结构的样品表面在空蚀过程中含汽率低,累计质量损失小,有减缓空蚀的效果。此外,数值模拟结果显示,微结构周期是影响空蚀过程表面含汽率、压力变化的重要参数。连峰等^[29]在表面加工出点阵状及直线型结构,发现样品的耐空蚀能力随着微结构间距的变化而改变。Kim 等^[30]用高速摄像机记录了水中气泡在脊状和凹槽状结构附近溃灭的过程,发现不同结构会影响气泡的溃灭方式,在沟槽结构附近,气泡坍塌引起的再入射流强度会降低。由此可见,针对微结构影响空蚀的研究局限在单一的形状或尺寸特征,尚难以得出微结构的设计原则,缺少对微结构高度、周期等多参数的综合把控,对不同尺寸下微结构在空蚀过程中的作用规律还不清楚。

气泡的溃灭是在毫秒间完成,仅通过试验对空蚀过程中各个物理参数进行监测十分有限,且成本较高。研究者多用高速摄影技术研究空泡场的运动特征^[30]。相比而言,数值模拟限制少,且能够在较短的时间内给出空蚀过程中更加全面详细的流场瞬态信息。因此,越来越多的研究人员通过该方法对试验结果进行复现或机理解释^[31-33]。Chen 等^[32]用 CFD 软件模拟了

气泡溃灭过程,证明了空蚀损伤的形成主要是由气泡溃灭产生的机械作用造成的。Arabnejad 等^[33]通过计算研究了引起片状空化的流体动力学机制,得到了与试验相吻合的结果。

鉴于此,本文将通过计算流体力学(CFD)的方法,研究不同宽深比和占空比的表面微结构特征与流场中压强、含汽率以及气泡运动之间的内在关联,厘清微结构尺寸对空蚀的影响规律。同时,采用振动空蚀试验法对关键规律和机制进行验证分析,最终确定微结构的几何设计依据。该工作从非光滑表面抵抗空蚀的角度为提高螺旋桨等过流部件的空蚀性能提供了新的思路和技术支撑。

1 试验

1.1 微结构尺寸设计

已有研究表明,具有一定周期性点阵状结构的表面形貌可以有效抑制空蚀的发生^[29]。微结构样品表面以及微结构的截面如图 1 所示。在进行此类微结构设计时,需确定 3 个参数来描述结构的形状和分布,其中 w 是微结构的宽度; d 是微结构的深度; λ 定义为微结构的波长。

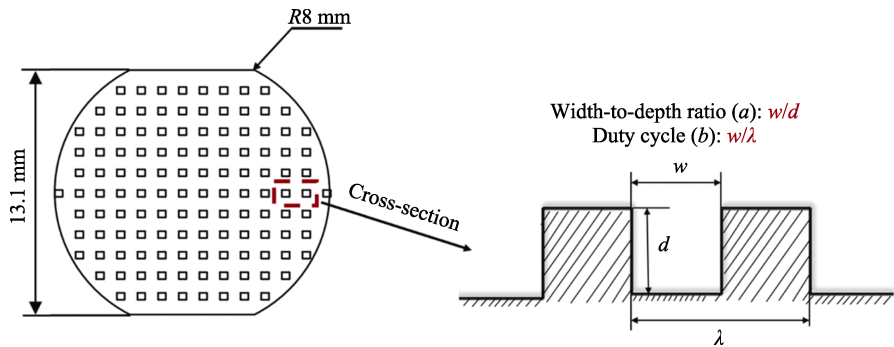


图 1 点阵状微结构表面、截面图及设计参数
Fig.1 Surface and cross section of regular dot array-shaped microstructure and design parameters

表 1 样品表面微结构参数的设置
Tab.1 Parameter of surface microstructures on samples.

$w/\mu\text{m}$	$d/\mu\text{m}$	$\lambda/\mu\text{m}$	$a(w/d)$	$b(w/\lambda)$
500	50	550	10	0.91
500	50	700	10	0.71
500	50	1 300	10	0.38
500	200	550	2.5	0.91
500	200	700	2.5	0.71
500	200	1 300	2.5	0.38
500	500	550	1	0.91
500	500	700	1	0.71
500	500	1 300	1	0.38
500	800	550	0.625	0.91
500	800	700	0.625	0.71
500	800	1 300	0.625	0.38

将 w 设为定值,通过改变 d 和 λ 的大小,研究微结构深度与周期对空蚀的影响。具体的参数设置如表 1 所示。Li 等^[34]在设计微结构时,提出宽深比和占空比 2 个参数,用来对不同结构进行优选。其中,宽深比是微结构宽度与深度的比值,占空比是微结构宽度与波长的比值。本文将采取宽深比(a)与占空比(b)来描述不同尺寸的表面微结构,并进行后续的分析。

1.2 模拟模型参数设置

为了实现对模拟结果进行验证,计算时的流场模型依据试验过程进行设置。使用 Gambit 软件建立表面微结构周围流域几何模型,并对其进行网格划分。流域模型及边界条件如图 2 所示。其中,DE 边代表空化设备中的振动头,在计算过程中上下运动,是运

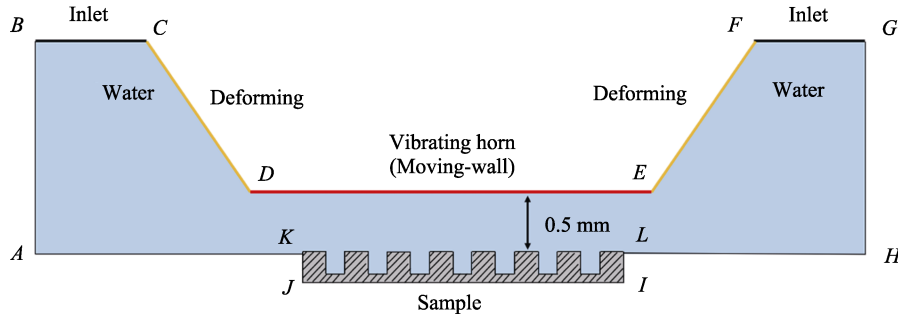


图 2 模拟微结构样品附近空化流场的模型

Fig.2 Geometric model of flow domain for cavitation simulation of microstructured sample

动边界。由于 CE 、 EF 边与运动边界 DE 相邻，因此将其设置为变形边界。微结构将样品分成高度不同的上下 2 个面，模型中， KL 代表样品上平面， JI 代表样品下平面。模拟计算时，样品保持不动。初始状态下， DE 边和 KL 边之间相距 0.5 mm。 BC 边和 FG 边设置为入口，与环境相连通，其余边设置为壁面。

由于流域结构比较复杂，流场采用非结构化网格。网格独立性验证结果如图 3 所示。选择不同大小的网格划分模型，并计算微结构顶面和底面的平均含汽率。当网格大小为 0.02~0.06 mm 时，微结构顶面和底面的平均含汽率变化不大，可以认为在该区间范围内，网格大小对模拟的影响很小，计算结果是稳定的。同时，网格越密，计算结果的精确度越高，因此采用大小为 0.02 的网格划分流场模型，并进行后续计算。

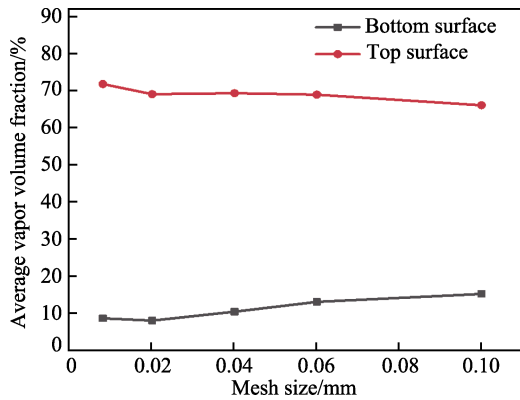


图 3 样品表面平均含汽率随网格大小的变化

Fig.3 Variation of average volume fraction of vapor phase with grid size

数值模拟计算过程在商用软件 Ansys Fluent 2022R1 上完成，使用非稳态求解器，用于检测空化场随时间的变化。湍流模型选择标准 $k-\varepsilon$ 模型，近壁处理选择 Standard Wall Function。

对于空化过程的模拟，采用 Euler-Euler 模型进行求解，选用均相模型 Mixture 模拟两相之间的状态，可以较充分地考虑到不同相之间的相互作用^[35-36]。用 Schnerr & Sauer 控制方程对液体内气泡的演变进行计算。该方程是以 Rayleigh 方程为基础，提出的一种空化传质模型，可以模拟空化云的循环形成、气泡云

坍塌引起的局部水压力峰等空化特征。Schnerr & Sauer 模型的稳定性高，容易收敛^[37-38]，通过求解 1 个或多个相的体积分数的连续性方程来实现相间界面的跟踪。对于气相，基于 Rayleigh-Plesset 方程有如下形式^[39-40]：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \bar{v}) = R_p - R_c \quad (1)$$

$$S = R_p - R_c \quad (2)$$

式中： α_v 为蒸汽体积分分数，即含汽率； ρ_v 为蒸汽密度； \bar{v} 为蒸汽速度； R_p 为蒸发源项； R_c 为冷凝源项； S 定义为源项，是气液两相之间的传质。

$$R_p = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_b} \sqrt{\frac{2(P_v - P)}{3\rho_l}}, P \leq P_v \quad (3)$$

$$R_c = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_b} \sqrt{\frac{2(P - P_v)}{3\rho_l}}, P > P_v \quad (4)$$

$$\rho = (1 - \alpha_v) \rho_l + \alpha_v \rho_v \quad (5)$$

式中： ρ_l 、 α_l 分别为液相的密度和体积分分数； ρ 为混合相的密度， P 和 P_v 分别为混合相和蒸汽相的压强。

空化模型采用 Schnerr & Sauer 方程，则式 (2) 中的源项可以写成：

$$S = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \frac{d\alpha}{dt} \quad (6)$$

则蒸汽的体积分分数就可以表示为^[41]：

$$\alpha_v = \frac{n_0 \cdot (4/3\pi R_b^3)}{1 + n_0 \cdot (4/3\pi R_b^3)} \quad (7)$$

其中，液相设置为水，其饱和蒸汽压为 3 540 Pa，大气压为 101 325 Pa，温度设为 25 °C。

DE 边为动边界，模拟空蚀试验机振动头的运动方式。根据设备运行参数，设定该边界的位移方程为正弦方程^[42]：

$$y = a \sin(2\pi f \times t) \quad (8)$$

求导后得到振动头的速度方程：

$$y = 2\pi f \times a \cos(2\pi f \times t) \quad (9)$$

式中： f 为振动头的振动频率， $f=20$ kHz； a 为振动头的振幅， $a=50$ μm ； t 为空化时间。将所有参数代入方程 (9) 后，可以得到振动头的运动方程为：

$$y = 2\pi \cos(4\,000\pi \times t) \quad (10)$$

模拟的振动头端部遵循式 (10) 进行运动, 与真实空蚀试验机的振动头运动方式相同。在动网格处理过程中, 采用平滑式网格重构法来保证计算的精确性。

1.3 空蚀试验

空蚀试验使用磁致伸缩振动空化设备 (XOQS-

2500, 中国), 超声振动频率为 20 kHz, 振幅为 50 μm 。试验在室温 (25 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ 、大气压 (101 325 Pa) 下进行, 试验介质为去离子水。空蚀试验装置如图 4 所示。通过夹具固定样品, 通过升降台调整样品位置, 确保样品表面在液面以下 15 mm 处, 与空蚀振动头之间的距离为 0.5 mm。同时, 外接循环水以保证试验温度恒定。

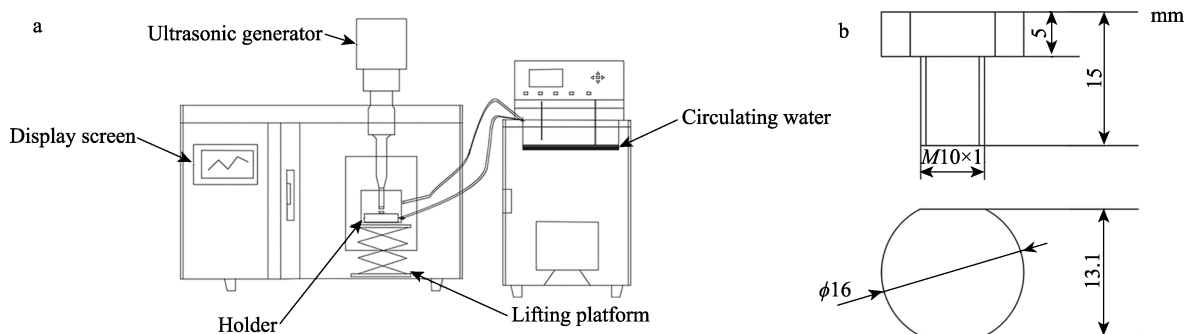


图 4 磁致伸缩振动空蚀试验机 (a) 及空蚀试样 (b)

Fig.4 Magnetostrictive-vibration cavitation facility (a) and cavitation erosion sample (b)

用于空蚀试验的材料为马氏体不锈钢 (S41500)。表面微结构采用线切割方法进行加工, 线切割参数: 脉间为 5 μs , 脉宽为 5 μs , 功放为 5 kW。为更好地体现出微结构样品耐空蚀性能的优异性, 以光滑样品为对照组进行比较。为保证所有样品表面的初始状态相同, 光滑样品表面用相同的线切割参数进行处理, 所有样品均不进行机械研磨。试验前的样品在超声波清洗机 (KQ-50B, China) 中分别用丙酮和酒精进行清洗, 以去除沉积物, 然后吹干备用。

使用精度为 0.1 mg 的分析天平 (GL224-1SCN, 德国) 称量样品空蚀 0 h 和 8 h 后的质量, 每次称量前, 样品需要在超声波清洗机 (KQ-50B, China) 中用酒精清洗、吹干。采用失重法判断不同样品的耐空蚀性能, 为确保数据的可靠性, 每组测试至少重复 3 次。将空蚀试验后的样品在超声波清洗机 (KQ-50B, China) 中用酒精清洗、吹干, 用扫描电子显微镜

(Quattro S, USA) 观察不同样品的空蚀形貌, 比较样品空蚀损伤程度的差异。

2 结果与讨论

2.1 绝对压力和含汽率

空化数常用来简单衡量空化发生的可能性^[43], 它除了与流体性质有关外, 还与流体内部的绝对压强有关。当流体内部绝对压力越接近流体的饱和蒸汽压, 发生空化的可能性越大^[44]。因此, 选取样品表面的平均绝对压强作为衡量样品表面空化程度大小的判据。

不同宽深比及占空比时微结构底面和顶面的平均绝对压力随时间的变化规律如图 5 所示。可以看出, 微结构底面和顶面的绝对压力的变化趋势相似, 空化开始后, 很短时间内出现了 1 次高压, 几乎达到 250 个大气压, 这可能是由于振动头产生的超声波与

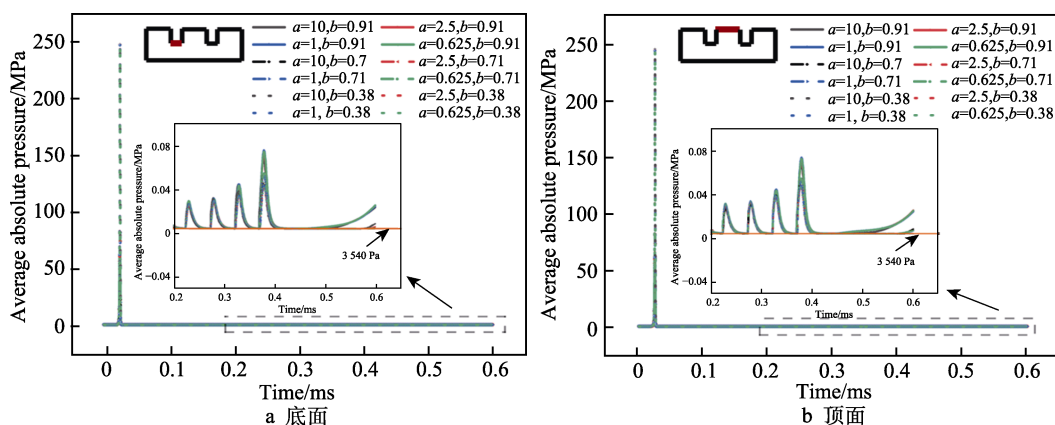


图 5 微结构底面和顶面平均绝对压力随时间的变化

Fig.5 Average absolute pressure versus time on bottom and top surfaces of surface microstructures: a) bottom surface; b) top surface

样品反射回的超声波叠加导致的超高压^[42]。在图 5 的放大图中,水平线是饱和蒸汽压的基准线。可以看到,在超高压之后,样品表面的绝对压力上下波动,且基本都在水的饱和蒸汽压(3 540 Pa)附近。这说明模拟计算中所有样品的表面均发生了空化现象,本文的讨论都是基于空化已经产生的前提下进行的。

从图 5 可知,在经历了 1 次超高压后,样品表面溶液进入均匀、稳定的空化状态。因此,在分析微结构样品某一时刻不同位置上的流场参数时,统一采用模拟计算最后时刻(0.6 ms)的状态进行分析比较。空蚀过程中,大量气泡周期性地生成、长大和溃灭。气泡溃灭瞬间释放出的能量反复作用在材料表面上,造成材料严重损伤^[45-46]。因此,气泡群在样品表面的分布决定了空蚀的程度和位置。本文将含汽率和气泡的运动速度作为判断空蚀程度的重要指标,这种方法也被其他文献广为采用^[27-28]。

0.6 ms 时,不同宽深比、占空比下微结构底面和顶面的含汽率如图 6 所示。在微结构底面,当宽深比为 10 时,含汽率最高;当宽深比为 2.5 时,含汽率骤降,流体内的气体体积分数降至 0.2 以下;当宽深比降至 1 时,微结构底面的含汽率几乎降为 0。这表

明随着宽深比的减小,即微结构深度的增加,沟槽内溶液的占比逐渐增大,微结构底面的空化作用逐渐减弱。对于微结构底面,其含汽率主要受宽深比的影响。当宽深比小于 1 时,微结构底面的含汽率几乎为 0,此时,改变占空比将不会对微结构底面的含汽率产生影响。在微结构顶面,宽深比对含汽率的影响不再明显,而主要受占空比影响。占空比越小,微结构顶面的含汽率越大,越容易造成严重的空蚀损伤。

综上所述,宽深比和占空比的改变分别影响微结构底面和顶面的含汽率。当对微结构尺寸进行选择时,尽量保证微结构顶面和底面的含汽率都处于较低的情况。为了进一步阐明宽深比和占空比对空蚀损伤的影响机制,后续将对各自的影响进行详细分析。

2.2 微结构宽深比对空化的影响

不同占空比下,样品表面含汽率随宽深比的变化趋势是相同的,均随着宽深比的减小而降低。因此,以占空比为 0.71 为例,进一步分析宽深比在空化过程中的影响。不同宽深比下微结构底面和顶面的平均绝对压力随空蚀时间的变化如图 7 所示。可以看出,宽深比不同时,绝对压力的变化趋势几乎重合,此时

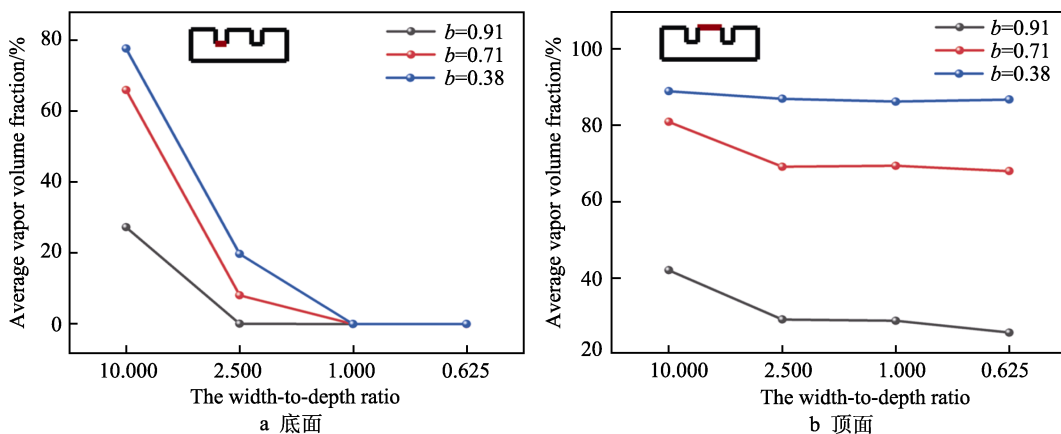


图 6 微结构底面和顶面的平均含汽率随微结构宽深比和占空比的变化

Fig.6 Variation of average volume fraction of vapor phase on bottom and top surfaces of surface microstructure with width-to-depth ratio and duty cycle: a) bottom surface; b) top surface

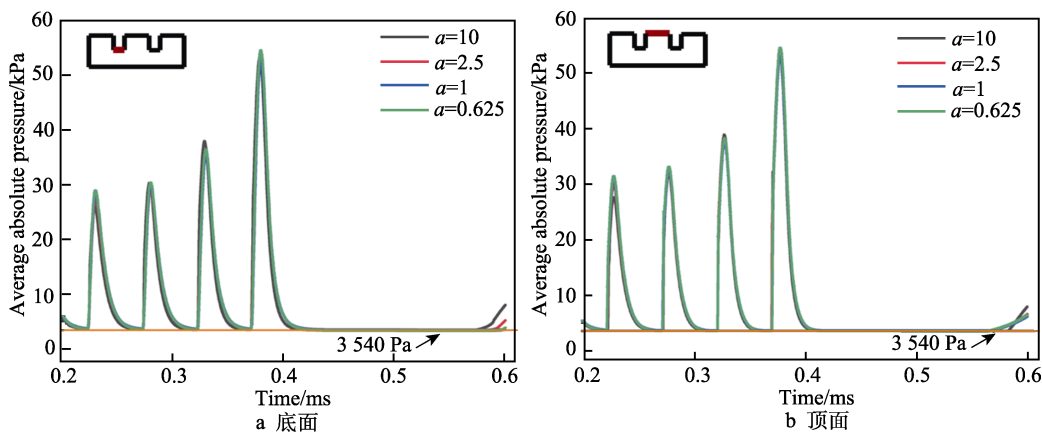


图 7 不同宽深比下微结构底面和顶面平均绝对压力随时间的变化

Fig.7 Variation of average absolute pressure on bottom and top surfaces of microstructure with time for different width-to-depth ratios: a) bottom surface; b) top surface

样品表面的压力值以及压力波动幅度相似。

微结构宽深比分别为 10、2.5、1、0.625 时, 样品表面附近的含汽率分布云图如图 8 所示。其中, 插图为样品表面中心位置微结构沟槽内部的含汽率分布。从图 8 可以看到, 不论何种深度, 样品中心位置的含汽率最高, 这与 Yang 等^[28]的模拟结果相同。

当宽深比较大时 (见图 8a), 微结构沟槽深度浅, 样品顶面和底面距离空蚀振动头端部的距离差异较小, 导致其在含汽率分布上的差异不大。当宽深比降

低时 (见图 8b、c), 沟槽深度加大, 样品顶面和底面之间的含汽率相差最大在 0.65 左右, 说明此时微结构底面和顶面所处的环境状态差异明显, 微结构影响了样品表面的流场分布。当微结构宽深比继续降低 (见图 8d), 沟槽深度进一步加大, 沟槽内大部分位置的含汽率都将低至 0.05, 说明沟槽内部几乎充满了液体。但无论宽深比如何变化, 微结构顶面的含汽率始终在 0.7~0.85。这说明微结构深度变化主要影响沟槽内部的流场情况。

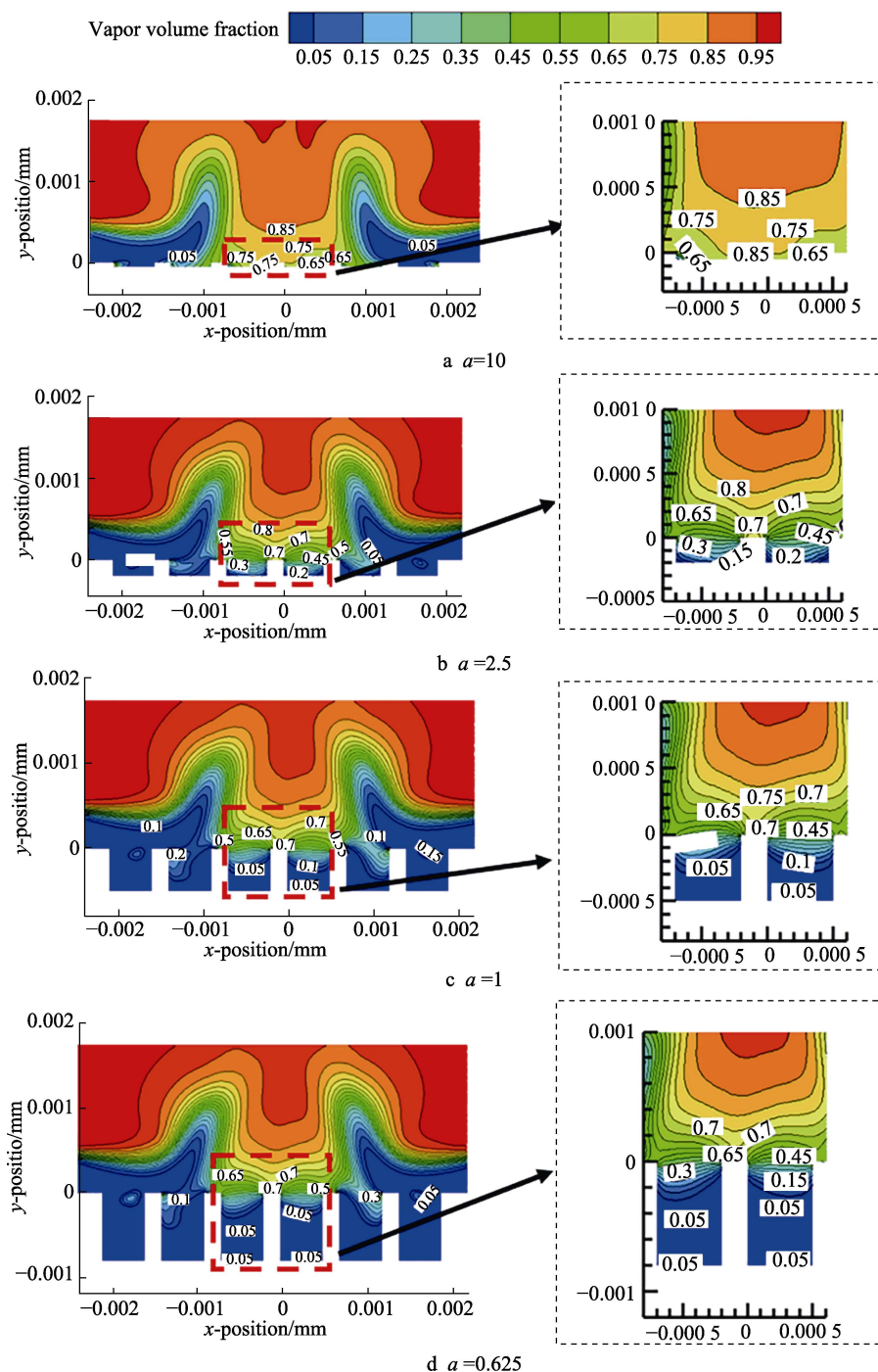


图 8 不同宽深比时样品表面含汽率分布云图

Fig.8 Contours of volume fraction of vapor phase near sample surface for different width-to-depth ratios

Li 等^[34]在模拟计算过程中也发现了类似的现象,他们认为微结构深度主要改变沟槽内部的压力分布以及涡流。此外,他们的研究还指出,当微结构宽深比在 1~2 时,可以减缓空蚀的构型比例,但主要模拟的是流动体系中的空化现象,与本文中的振动空化不完全相同。为了进一步确定振动空化过程能够减缓空蚀的表面形貌尺寸,增设了几组宽深比结构,以求得合适的宽深比范围。

含汽率随宽深比的变化曲线如图 9 所示。可以看出,当宽深比范围为 10~2.5 时,微结构槽底含汽率随宽深比的变化较大;当宽深比的范围为 0.5~2.5 时,微结构底面的含汽率很低,几乎降至 0.1 以下,而顶面的含汽率变化较小,基本维持在 0.7 左右。含汽率低意味着样品表面空泡稀疏,空泡溃灭时对材料产生的冲击频率将大大减小。因此,当宽深比达到 0.5~2.5 时,推测材料的空蚀程度将会降低^[27,47]。

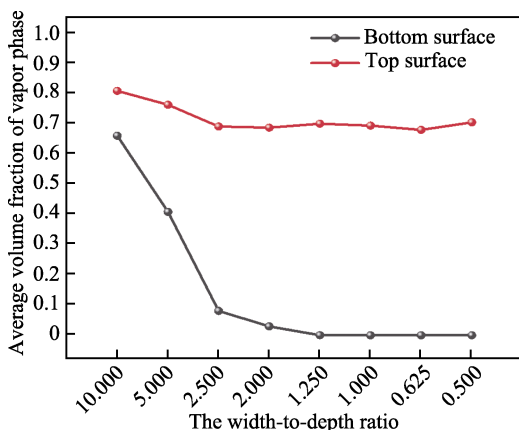


图 9 不同宽深比时微结构底面和顶面含汽率的变化规律

Fig.9 Variation of average volume fraction of vapor phase on bottom and top surfaces of microstructure at different width-to-depth ratios

从数值模拟的结果可以看出,宽深比变化时,微结构主要通过改变样品表面的含汽率影响空蚀程度

(见图 6 和图 9)。由于微结构存在高度差,微结构沟槽顶部和底部的空化流场并不完全相同。

从图 9 可以看出,当宽深比小于 2.5 时,微结构顶面和底面的含汽率相差很大,说明微结构对空化流场产生了影响,通过减小样品表面的平均含汽率来降低气泡溃灭时作用在材料表面的冲击频次,从而起到减缓空蚀损伤的作用。当深度较大时,沟槽内部的液体将保持较低的空化程度,形成一层“液垫”保护材料^[48]。

当宽深比大于 2.5 时,由于微结构的深度很浅,此时微结构顶面和底面的空化流场相似,且宽深比越大,微结构顶面和底面的含汽率越相近,即微结构顶面和底面所处的环境差别越小。当宽深比大于 2.5 并无限增大时,微结构深度无限减小,等同于光滑表面。此时,微结构对空化流场的改变不再明显,微结构底面的含汽率逐渐与顶面相同,失去了微结构带来的优势。

宽深比越小,意味着微结构的深度越大,有可能会显著恶化材料的力学性能,增大表面粗糙度,这都不利于表面微结构在过流部件上的应用。当宽深比进一步减小到 2.5 以下时,宽深比的变化对顶面和底面的含汽率基本没有影响,均处于低含汽率状态下。在设计微结构时,可以在满足材料功能性完备的前提下,控制表面微结构的宽深比小于 2.5,以达到减缓空蚀的作用。因此,本文后续的分析以宽深比为 2.5 为例,进一步讨论占空比在空蚀过程中的影响。

2.3 微结构占空比对空化的影响

占空比决定了微结构单元的疏密程度。占空比越大,微结构单元分布越密集;反之,微结构单元分布则越稀疏。不同占空比时,微结构底面和顶面的平均绝对压力变化如图 10 所示。随着微结构占空比从 0.91 减小至 0.38,微结构底面和顶面的平均绝对压力均减小。样品表面的空化程度与绝对压力有关,绝对压力越靠近液体的饱和蒸汽压,发生空化的概率越大。因

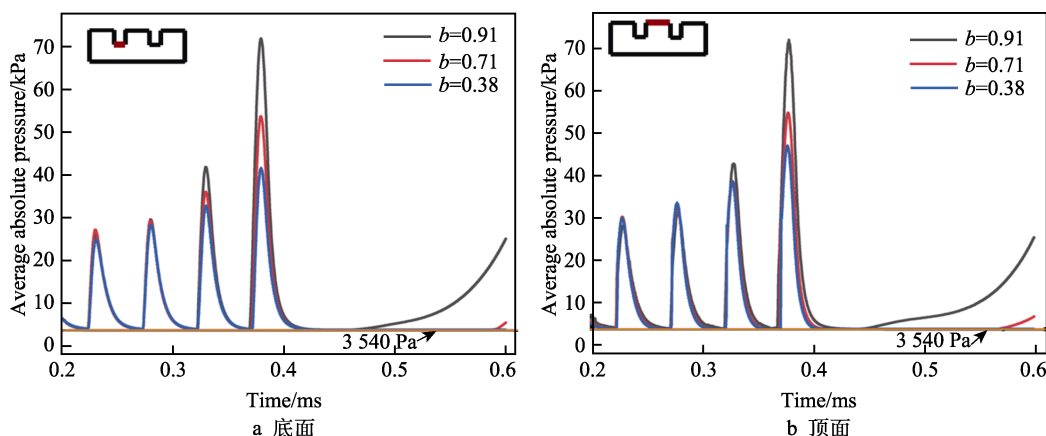


图 10 不同占空比时微结构底面和顶面平均绝对压力随时间的变化

Fig.10 Variation of average absolute pressure on bottom and top surfaces of microstructure with time for different duty cycles: a) bottom surface; b) top surface

此, 占空比越小, 样品表面发生空化的概率越大^[49]。

不同占空比下样品表面含汽率的分布云图如图 11 所示。所有微结构都显示, 样品中心位置的含汽率最高, 这与图 8 中表现出的规律是一样的。当占空比为 0.91 时 (见图 11a), 微结构单元分布比较密集, 此时微结构顶面和底面之间的差别很小。在样品中心位置处, 含汽率达到 0.4, 其他位置的含汽率都趋近于 0, 即几乎被溶液充满。说明样品表面的气泡含量很少, 且存在“液垫”, 可以吸收气泡溃灭时产生的冲击, 大大减缓空蚀损伤。随着占空比逐渐减小, 微结构单元越来越稀疏, 样品表面的含汽率增大, 占空比为 0.38 时 (见图 11c), 含汽率最高可以到达 0.9, 并且气泡分布的范围也更广, 高含汽率的位置几乎覆盖样品整个表面。含汽率可以作为判断空泡在样品表面溃灭频率的依据, 较低的含汽率意味着样品表面会较少受到气泡溃灭产生的作用力, 减缓空蚀的发生。因此, 较大的占空比有助于降低空蚀的可能性。

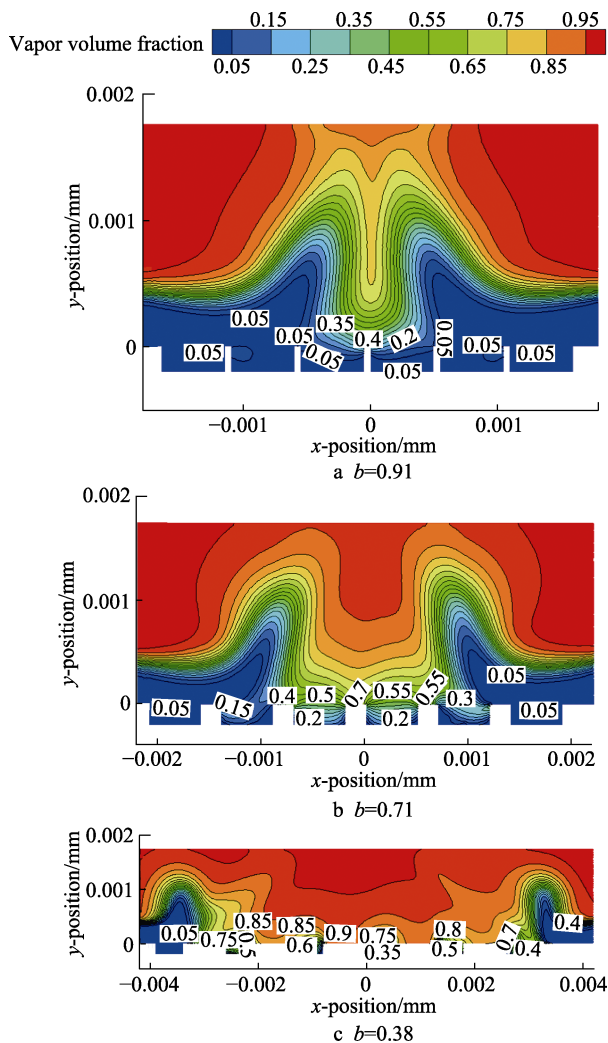


图 11 不同占空比时样品表面含汽率分布云图
Fig.11 Contours of volume fraction of vapor phase near sample surface at different duty cycles

从以上的分析可知, 占空比降低, 表面绝对压力

降低, 发生空化的可能性越大, 导致样品表面含汽率增加, 说明绝对压力和含汽率对空蚀过程的影响趋势是一致的。此外, 空蚀过程中, 样品表面的气泡并非静止不动, 而是处于移动状态。气泡在样品表面的运动规律同样也影响着空蚀的分布。Hickling 等^[50]模拟表明, 振动空化下气泡的尺寸一般为 100 μm 左右。因此, 本文分别选择距离微结构底面和顶面 100 μm 处的位置分析气泡的运动。

不同占空比时, 微结构底面和顶面的气泡速度分布如图 12 所示。首先, 观察气泡在 x 方向的速度分布规律, 用于讨论气泡在样品表面水平方向上的运动规律。在微结构底面 (见图 12a), 占空比不同时, 气泡的运动方向不同, 但气泡运动的速度绝对值都很小。这说明在沟槽内部, 所有条件下气泡的横向运动并不剧烈, 气泡之间的相互作用较少。相比之下, 微结构顶面附近的气泡群运动剧烈程度提高了 1 个数量级 (见图 12c)。横向运动趋势随占空比的增大而减小。当占空比为 0.38 时, 气泡在水平方向的运动最剧烈。同时, 样品表面的含汽率也处于高值 (见图 11c), 这就意味着高体积分数的气泡群覆盖了样品表面的大部分面积, 极大地增加了样品表面的空蚀概率。

不论是在微结构底面 (见图 12b) 还是顶面 (见图 12d), 当占空比为 0.91 和 0.71 时, 气泡在 y 方向的速度都是负值, 表明气泡在向着靠近样品的方向运动; 而当占空比为 0.38 时, 气泡在 y 方向的速度变为正值, 表明气泡在向远离样品表面的方向移动。结合该占空比下含汽率分布云图 (见图 11c) 推测, 气泡运动方向的改变可能是由于样品表面含汽率升高, 气泡之间相互作用, 导致气泡朝着含汽率较少的位置移动。

由此可知, 在模拟计算的 3 种占空比模型中, 当占空比为 0.38 时, 样品表面的绝对压力最小, 发生空化的可能性最大。此外, 样品表面的含汽率最高, 增加了空蚀发生的可能性。同时, 在该条件下, 由于含汽率高, 气泡向着含汽率低的位置移动, 使得气泡在 y 方向的运动速度变为正值。

2.4 微结构尺寸对空蚀影响机制的验证和分析

综合不同宽深比和占空比条件下的模拟计算, 筛选出了占空比为 0.91、0.71、0.38 的 3 种点阵型表面微结构样品, 以光滑样品对照组, 进行了 8 h 的空蚀试验, 并对试验后样品的损伤形貌进行表征。质量损失试验结果如图 13 所示。可以看到, 不同占空比下, 样品的中间位置损伤最严重, 边缘区域的损伤很轻。这与模拟结果相同, 空蚀损伤较轻的区域正是含汽率较低的区域, 反之亦然。因此, 可以证实含汽率可以作为表征空蚀损伤大小的一个重要指标。

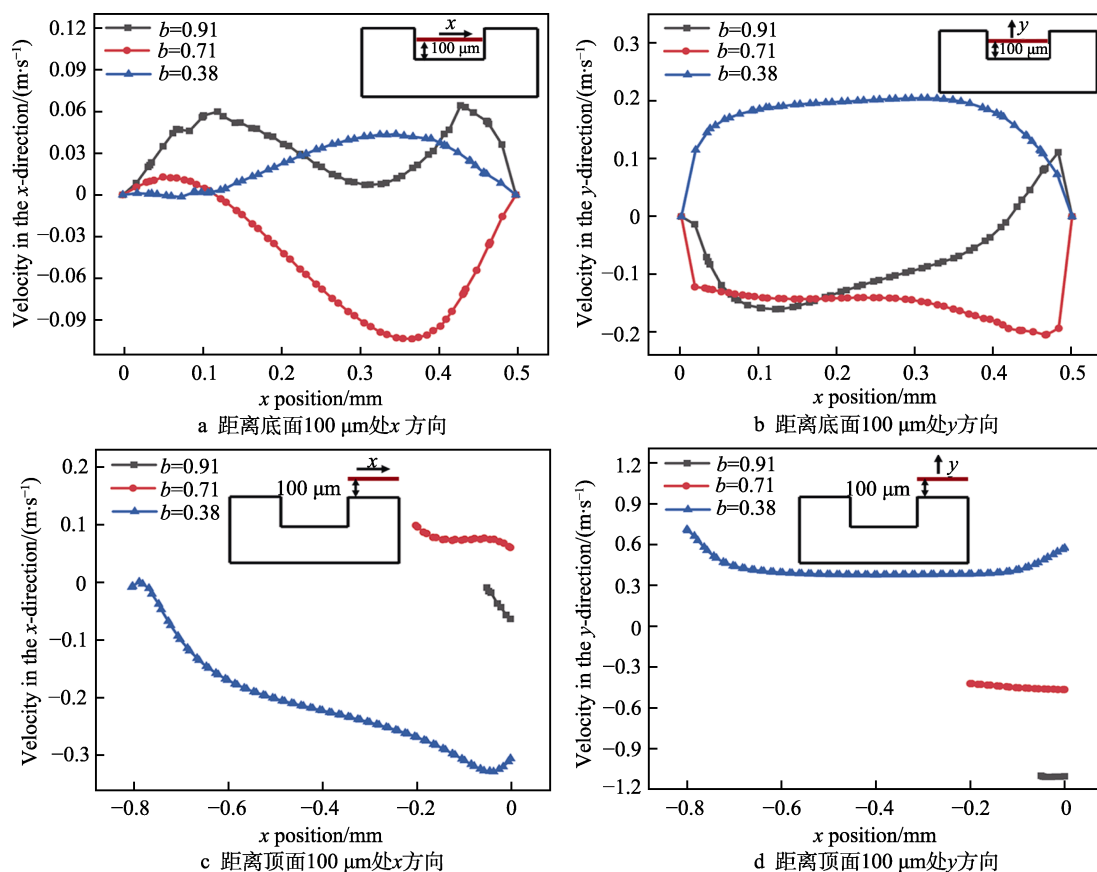


图 12 不同微结构样品在距离底面和顶面 100 μm 处气泡在 x 方向和 y 方向的速度分布
Fig.12 Velocity distributions of bubbles in x -direction and y -direction at 100 μm from bottom and surfaces for different microstructured samples: a) x -direction at a distance of 100 μm from the bottom; b) y -direction at a distance of 100 μm from the bottom; c) x -direction at a distance of 100 μm from the top; d) y -direction at a distance of 100 μm from the top

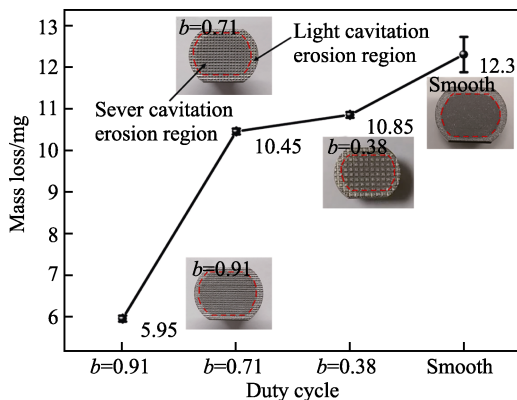


图 13 空蚀 8 h 后光滑样品和不同占空比的微结构样品的质量损失以及宏观形貌
Fig.13 Cumulative mass loss and morphology of smooth and different duty cycles microstructures samples after cavitation erosion for 8 h

此外,从图 13 还可以看出,光滑样品的空蚀质量损失大于微结构样品,说明当微结构占空比为 0.38、0.71、0.91 时,可以提高材料的耐空蚀性能。随着占空比的减小,样品的质量损失增大。当占空比达到 0.91 时,微结构样品空蚀 8 h 后的质量损失仅有 5.95 mg,比占空比为 0.71、0.38 时分别减少了 43%、45%,样品的耐空蚀性能大大提高。这说明在相同的

空蚀时间下,占空比越大,材料的累积质量损失越小,空蚀损伤程度越低。同样地,模拟结果显示,当占空比为 0.91 时,样品表面绝对压力最高,含汽率最低,推测出空蚀程度最低。通过模拟和试验对比可知,本文所采用的数值模拟方法可以准确预测不同表面微结构的空蚀损伤趋势。同时也证实了,在一定宽深比(小于 2.5)条件下,占空比较大的点阵型表面微结构更利于降低空蚀损伤。

试验过程中,微结构顶面与光滑样品表面在同一水平位置,与空蚀振动头之间的距离相等,因此,选取微结构顶面的空蚀损伤形貌与光滑样品作对比。空蚀 8 h 后,光滑样品和不同占空比下微结构样品顶面的空蚀损伤形貌如图 14 所示。可以看出,光滑样品受到了严重的空蚀损伤(见图 14a),表面分布着大量的裂纹和深坑,显示出典型的蜂窝状损伤形貌^[51-53]。对于微结构样品,不论占空比如何变化,样品表面的损伤程度均明显轻于光滑样品(图 14b、c),这与质量损失结果的规律相符。

当占空比为 0.91 时(见图 14b),样品表面有一些材料剥落和隆起,没有发现较大的空蚀坑。当占空比为 0.71 时(见图 14c),微结构样品表面开始出现了许多浅坑,样品的空蚀损伤程度明显变大。当占空

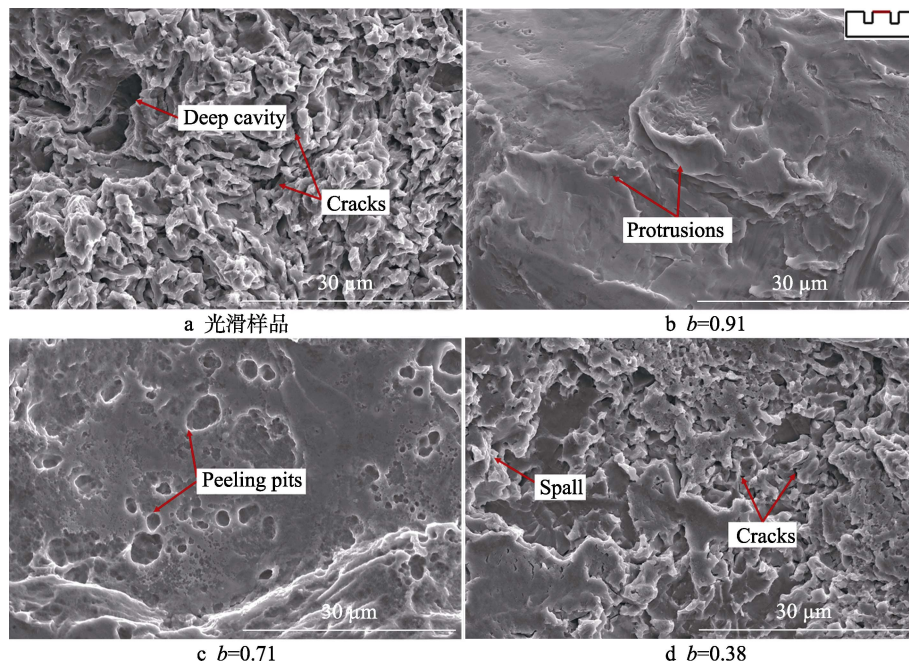


图 14 空蚀 8 h 后光滑样品和不同占空比的微结构样品顶面的微观形貌图
Fig.14 SEM morphologies of smooth samples and top surface of microstructures samples of different duty cycles after cavitation erosion for 8 h

比为 0.38 时 (见图 14d), 样品表面的损伤变得严重, 表面出现大量裂纹以及材料剥落现象, 部分位置已呈蜂窝状。此时的损伤程度明显比占空比为 0.91、0.71 时严重, 但严重程度不及光滑样品。

结合质量损失结果可知, 相较于光滑样品, 表面微结构可以有效地减缓空蚀损伤。此外, 根据模拟计算得到的含汽率和气泡运动等参数可知, 微结构样品表面损伤程度与含汽率高低密切相关, 样品表面含汽率越高, 空蚀损伤越严重。当占空比为 0.38 时, 样品表面的气泡向上运动, 一定程度上拉开了与样品之间的距离, 大大降低了样品表面受到的冲击, 使其空蚀损伤轻于光滑样品。相较于其他占空比的微结构样品, 占空比为 0.38 时, 样品表面的含汽率最高, 即使其表面气泡向着远离样品的方向运动, 样品的空蚀质量损失和损伤形貌仍然是所有微结构样品中最严重的。这说明含汽率是判断材料空蚀损伤程度最主要的因素。

综合模拟和试验结果可知, 微结构宽深比通过影响微结构底面的含汽率从而改变材料的耐空蚀性能, 占空比会改变样品表面的绝对压力、含汽率以及气泡运动等, 进而影响空蚀过程。不同尺寸的微结构样品均可以减缓空蚀损伤, 且作用机制并不相同。点阵型表面微结构尺寸影响空蚀过程的机制如图 15 所示。

当微结构宽深比较大, 占空比较小时 (见图 15a), 此时微结构单元深度浅, 且分布稀疏。样品表面附近的绝对压力接近液体的饱和蒸汽压, 空化程度高。同时, 样品表面的含汽率高, 导致其空蚀损伤高于其他微结构样品。但此时样品表面的气泡有向上运动的趋势, 和光滑样品相比, 减缓了空蚀。当微结构宽深比

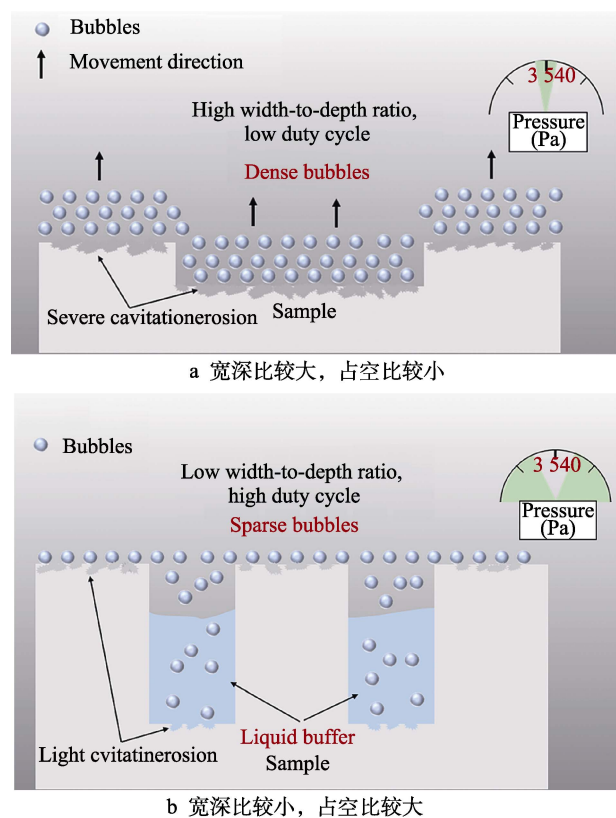


图 15 微结构尺寸对空蚀的影响机理

Fig.15 Mechanism of effect of microstructure size on cavitation erosion: a) larger width-to-depth ratios, and a smaller duty cycle; b) small width-to-depth ratios, and large duty cycle

较小, 占空比较大时 (见图 15b), 此时微结构单元深度大, 且结构单元分布密集。样品表面附近的绝对压力与液体的饱和蒸汽压相差较大, 降低了空化程

度。同时,样品表面的含汽率低,微结构沟槽内部形成一层“液垫”,对气泡的溃灭起到了缓冲作用,减小了空蚀损伤,从而提高材料的耐空蚀性能。

3 结论

本文通过数值模拟的方法研究了微结构宽深比以及占空比在空蚀过程中的影响机制,并进行了试验验证。得出以下主要结论:

1) 点阵型微结构的宽深比主要影响微结构底面的含汽率。当宽深比小于2.5时,微结构底面含汽率低,沟槽内部形成“液垫”起到减缓空蚀的作用。

2) 点阵型微结构的占空比主要影响微结构顶面的含汽率,占空比增大,导致样品表面的绝对压力增大,含汽率降低,空蚀损伤减小,是微结构设计过程中的重要因素。不同占空比的抗空蚀性能由高到低排序为 $b=0.91$, $b=0.71$, $b=0.38$ 。

3) 相较于光滑表面,微结构表面可以有效减缓马氏体不锈钢的空蚀损伤。当占空比较小($b=0.38$)时,气泡向远离样品的方向运动,减轻空蚀损伤;当占空比较大($b=0.91$ 、 0.71)时,样品表面的含汽率降低,可降低空蚀损伤程度。

参考文献:

- [1] LI L, QIAO Y X, ZHANG L M, et al. Effect of Surface Damage Induced by Cavitation Erosion on Pitting and Passive Behaviors of 304L Stainless Steel[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2023, 30(7): 1338-1352.
- [2] ZHAO T, WANG L, ZHANG S, et al. Effect of Synergistic Cavitation Erosion-Corrosion on Cavitation Damage of CoCrFeNiMn High Entropy Alloy Layer by Laser Cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 472: 129940.
- [3] KAN K, BINAMA M, CHEN H X, et al. Pump as Turbine Cavitation Performance for both Conventional and Reverse Operating Modes: A Review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 168: 112786.
- [4] 李伟, 梁川. 水利水电工程抗空蚀材料研究新进展[J]. 四川水力发电, 2000, 19(2): 78-81.
LI W, LIANG C. Recent Development of Research on Cavitation-Resistant Material in Water Conservancy and Hydropower Project[J]. Sichuan Water Power, 2000, 19(2): 78-81.
- [5] WEN H G, YAO Z F, WU Q, et al. Investigation of Cavitation Erosion Caused by Laser-Induced Single Bubble Collapse near Alloy Coating Surface[J]. Journal of Hydrodynamics, 2023, 35(5): 876-886.
- [6] SONG Q N, LI H L, XU N, et al. Selective Phase Corrosion and Cavitation Erosion Behaviors of Various Copper Alloys in 3.5% NaCl Solutions with Different pH Values[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(10): 3039-3053.
- [7] PRIYADARSHI A, KRZEMIEN W, SALLOUM-ABOU-JAOUDE G, et al. Effect of Water Temperature and Induced Acoustic Pressure on Cavitation Erosion Behaviour of Aluminium Alloys[J]. Tribology International, 2023, 189: 108994.
- [8] ZHANG Z Q, ZHAO L Y, SI C R, et al. Microstructure Development and Cavitation Erosion Resistance Enhancement of Additive Manufactured Hastelloy C276 Alloy Coating on Martensitic Stainless-Steel via Directed Energy Deposition[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 171: 110395.
- [9] XU J, PENG S, LI Z Y, et al. Remarkable Cavitation Erosion-Corrosion Resistance of CoCrFeNiTiMo High-Entropy Alloy Coatings[J]. Corrosion Science, 2021, 190: 109663.
- [10] ABDALLAH H K, BEN-MANSOUR R, LI S J. Numerical Study of Erosion Phenomena with the Presence of Cavitation at Deflector Jet Servo-Valve[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2024, 49(2): 2797-2811.
- [11] CHEN Q, LIU Y Q, WU Q, et al. Global Cavitation Patterns and Corresponding Hydrodynamics of the Hydrofoil with Leading Edge Roughness[J]. Acta Mechanica Sinica, 2020, 36(6): 1202-1214.
- [12] TAO R, XIAO R F, FARHAT M. Effect of Leading Edge Roughness on Cavitation Inception and Development on Thin Hydrofoil[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(11): 921-926.
- [13] GENG L L, CHEN J, DE LA TORRE O, et al. Numerical Simulation of Cavitation Erosion Aggressiveness Induced by Unsteady Cloud Cavitation[J]. Applied Sciences, 2020, 10(15): 5184.
- [14] 雷晨庆, 袁烁, 林乃明, 等. 钛合金空蚀损伤及防护的研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(10): 128-142.
LEI C Q, YUAN S, LIN N M, et al. Research Progress on Cavitation Erosion Damage and Protection of Titanium Alloy[J]. Surface Technology, 2022, 51(10): 128-142.
- [15] CHEN D R, WANG J D, CHEN H S. Key Factors to Induce Cavitation-Erosion[C]// 5th China International Symposium on Tribology/1st International Tribology Symposium of IFToMM. Beijing: Peoples R China, 2008.
- [16] XU W H, HE X K, HOU X, et al. Influence of Wall Roughness on Cavitation Performance of Centrifugal Pump[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2021, 43(6): 314.
- [17] UDEPURKAR A P, CLASEN C, KUHN S. Emulsification Mechanism in an Ultrasonic Microreactor: Influence of Surface Roughness and Ultrasound Frequency[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 94: 106323.
- [18] SVENNBERG U, ASNAGHI A, GUSTAFSSON R, et al. Experimental Analysis of Tip Vortex Cavitation Mitigation by Controlled Surface Roughness[J]. Journal of Hydrodynamics, 2020, 32(6): 1059-1070.
- [19] NIE M X. Cavitation Prevention with Roughened Surface[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(10): 878-880.
- [20] LI Y, XU Z, CHEN H, et al. Effect of Transverse Surface Topography on Cavitation Erosion[C]// 5th China International Symposium on Tribology/1st International Tribology Symposium of IFToMM. Beijing: Peoples R China, 2009.
- [21] CHEN Z X, HU H X, ZHENG Y G, et al. Effect of Groove Microstructure on Slurry Erosion in the Liquid-Solid Two-Phase Flow[J]. Wear, 2021, 466/467: 203561.
- [22] CHEN Z X, HU H X, GUO X M, et al. Effect of Groove Depth on the Slurry Erosion of V-Shaped Grooved Surfaces[J]. Wear, 2022, 488/489: 204133.

- [23] ZHAO L Q, HU H X, ZHENG Y G, et al. Behavior and Mechanism of Slurry Erosion to Grooved Surface at Different Angles[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 656: 130410.
- [24] HAN Z W, ZHU B, YANG M K, et al. The Effect of the Micro-Structures on the Scorpion Surface for Improving the Anti-Erosion Performance[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 313: 143-150.
- [25] HU H X, ZHENG Y G. The Effect of Sand Particle Concentrations on the Vibratory Cavitation Erosion[J]. *Wear*, 2017, 384/385: 95-105.
- [26] E M, HU H X, GUO X M, et al. Comparison of the Cavitation Erosion and Slurry Erosion Behavior of Cobalt-Based and Nickel-Based Coatings[J]. *Wear*, 2019, 428/429: 246-257.
- [27] ZHAO E L, YANG H F, SUN B, et al. Cavitation Erosion Properties of Microscale Texture Surfaces Induced by Laser Processing Technique[J]. *Journal of Laser Micro*, 2018, 13: 238-243.
- [28] YANG H F. Laser Induced Rectangular Microstructures for Surface of Cavitation Erosion Resistance[J]. *Journal of Laser Micro*, 2017, 12(2): 146-152.
- [29] 连峰, 张会臣, 高玉周, 等. 表面纹理和表面膜对 Ti6Al4V 合金空蚀特性的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011, 40(5): 793-796.
- LIAN F, ZHANG H C, GAO Y Z, et al. Influence of Surface Texture and Surface Film on Cavitation Erosion Characteristics of Ti6Al4V Alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 40(5): 793-796.
- [30] KIM D, KIM D. Underwater Bubble Collapse on a Ridge-Patterned Structure[J]. *Physics of Fluids*, 2020, 32(5): 053312.
- [31] ZHANG S F, QIAN Z D, JI B. Estimation of Cavitation Erosion Area in Unsteady Cavitating Flows Using a Modified Approach[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 262: 112229.
- [32] CHEN H S, LI J, CHEN D R, et al. Damages on Steel Surface at the Incubation Stage of the Vibration Cavitation Erosion in Water[J]. *Wear*, 2008, 265(5/6): 692-698.
- [33] ARABNEJAD M H, SVENNERBERG U, BENSOW R E. Numerical Assessment of Cavitation Erosion Risk Using Incompressible Simulation of Cavitating Flows[J]. *Wear*, 2021, 464/465: 203529.
- [34] 李永健. 空蚀发生过程中表面形貌作用机理研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- LI Y J. Study on Mechanism of Surface Topography Effects on Generation of Cavitation Erosion[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [35] LIANG J W, LUO X H, LIU Y S, et al. A Numerical Investigation in Effects of Inlet Pressure Fluctuations on the Flow and Cavitation Characteristics Inside Water Hydraulic Poppet Valves[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 103: 684-700.
- [36] ZHANG Y P, ZHANG R, TIAN W X, et al. Numerical Prediction of CHF Based on CFD Methodology under Atmospheric Pressure and Low Flow Rate[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 149: 881-888.
- [37] NIEDŹWIEDZKA A, LIPÍŃSKI S, KORNET S. Verification of CFD Tool for Simulation of Cavitating Flows in Hydraulic Systems[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2017, 19(5): 653-665.
- [38] JIN T, TIAN H, GAO X, et al. Simulation and Performance Analysis of the Perforated Plate Flowmeter for Liquid Hydrogen[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(6): 3890-3898.
- [39] CUI L H, MA F, CAI T F. Investigation of Pressure Oscillation and Cavitation Characteristics for Submerged Self-Resonating Waterjet[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(15): 6972.
- [40] SAUER J, WINKLER G, SCHNERR G H. Cavitation and Condensation - Common Aspects of Physical Modeling and Numerical Approach[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2000, 23(8): 663-666.
- [41] MOUVANAL S, CHATTERJEE D, BAKSHI S, et al. Numerical Prediction of Potential Cavitation Erosion in Fuel Injectors[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2018, 104: 113-124.
- [42] 孙冰. 基于 FLUENT 软件的超声空化数值模拟[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
- SUN B. Numerical Simulation of Ultrasonic Cavitation Based on FLUENT[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2008.
- [43] SIMPSON A, RANADE V V. Modelling of Hydrodynamic Cavitation with Orifice: Influence of Different Orifice Designs[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, 136: 698-711.
- [44] SALEHI S, MAHMUDI MOGHADAM A, SOORI S. Effect of the Pipe Bend of the Morning Glory Spillway on the Cavitation Number[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2023, 92: 102375.
- [45] FUJISAWA N, FUJITA Y, YANAGISAWA K, et al. Simultaneous Observation of Cavitation Collapse and Shock Wave Formation in Cavitating Jet[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 94: 159-167.
- [46] PENG K W, TIAN S C, LI G S, et al. Cavitation in Water Jet under High Ambient Pressure Conditions[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 89: 9-18.
- [47] QIAN J Y, XU J X, FANG L, et al. Effects of Throttling Windows on Cavitation Flow of Sleeve Control Valve[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2023, 189: 109841.
- [48] KARUNAMURTHY B, HADFIELD M, VIEILLARD C, et al. Cavitation Erosion in Silicon Nitride: Experimental Investigations on the Mechanism of Material Degradation [J]. *Tribology International*, 2010, 43(12): 2251-2257.
- [49] XU S J, WANG J, CAI B H, et al. Investigation on Cavitation Initiation in Jet Pump Cavitation Reactors with Special Emphasis on Two Mechanisms of Cavitation Initiation[J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(1): 013308.
- [50] HICKLING R, PLESSET M S. Collapse and Rebound of a Spherical Bubble in Water[J]. *The Physics of Fluids*, 1964, 7(1): 7-14.
- [51] LI Z, HAN J S, LU J J, et al. Vibratory Cavitation Erosion Behavior of AISI 304 Stainless Steel in Water at Elevated Temperatures[J]. *Wear*, 2014, 321: 33-37.
- [52] WEI Z, WU Y P, HONG S, et al. Ultrasonic Cavitation Erosion Behaviors of High-Velocity Oxygen-Fuel (HVOF) Sprayed AlCoCrFeNi High-Entropy Alloy Coating in Different Solutions[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2021, 409: 126899.
- [53] DING H Q, QIU Y J. Improvement of the Cavitation Erosion Resistance for Cr₃Si Film on Stainless Steel by Double Cathode Glow Discharge[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 191: 012040.