

# 海水条件下蒸汽低速浸没射流压力振荡特性研究

滑永振<sup>1</sup>, 张瑞<sup>1</sup>, 曹安<sup>2</sup>, 孟兆明<sup>2,\*</sup>, 李建发<sup>1</sup>

(1. 中国核电工程有限公司 先进核能技术研究院, 北京 100840;

2. 哈尔滨工程大学 核科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对船舶等海上核动力装置以海水替代淡水作为抑压水池的冷却工质, 能有效解决淡水储备不足且获取不易的问题, 可提高船舶核动力装置的海洋适用性。但目前缺少海水条件下蒸汽浸没射流现象的研究, 对于海水条件下蒸汽低速浸没射流的压力振荡特性尚不清楚。本文通过实验研究, 逐一对比分析了蒸汽-海水射流的压力振荡强度、压力振荡频率与蒸汽-淡水射流的区别。结果表明, 蒸汽-海水射流与蒸汽-淡水射流之间存在差异, 尤其是水池内的压力振荡幅值, 在较低水温条件下蒸汽-海水射流的水池内压力振荡幅值大于蒸汽-淡水射流的, 在较高水温条件下蒸汽-海水射流的水池内压力振荡幅值相对较小。本文的研究有助于了解和掌握蒸汽-海水射流压力振荡特性, 为海水替代淡水作为抑压水池的冷却工质提供了技术支撑。

**关键词:** 核动力装置; 蒸汽射流; 海水; 压力振荡

中图分类号: TL334

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2025)05-1035-09

doi: 10.7538/yzk.2025.youxian.0072

## Study on Pressure Oscillation Characteristic of Steam Low-velocity Jet under Seawater Condition

HUA Yongzhen<sup>1</sup>, ZHANG Rui<sup>1</sup>, CAO An<sup>2</sup>, MENG Zhaoming<sup>2,\*</sup>, LI Jianfa<sup>1</sup>

(1. Advanced Nuclear Technology Research Institute, China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China;

2. College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In order to address the research gap in steam-seawater interactions and evaluate the feasibility of using seawater as a coolant in marine nuclear power systems, the pressure oscillation characteristics of steam low-velocity jet in seawater have been investigated. The motivation stems from the fact that seawater, covering 70% of the Earth's surface, offers practical advantages over freshwater for long-term maritime operations, yet its impact on steam jet dynamics remains poorly understood. The experiments focus on comparing pressure oscillations in seawater and freshwater under varying steam mass flow rates (20, 40, 60 kg/(m<sup>2</sup>·s)) and water temperatures (30-90 °C), with the goal of assessing system safety and performance. The experimental setup consisted of a steam supply system, a stainless-steel water tank, and instrumented nozzles equipped with high-frequency dynamic pressure sensors (sampling rate: 20 kHz). Steam was injected into seawater or freshwater-filled tanks, and pressure oscillations in both

收稿日期: 2025-02-13; 修回日期: 2025-04-07

基金项目: 核工业科学基金(中核工程 KY23093); 黑龙江省核动力装置性能与设备重点实验室基金(HLJS202201)

\* 通信作者: 孟兆明

the nozzle and tank were measured. Time-domain and frequency-domain analyses, including fast Fourier transform (FFT), were applied to characterize oscillation intensity and frequency. Repeatability tests confirmed data reliability. Key findings reveal that steam-seawater jets exhibit pressure oscillation behaviors similar to freshwater jets but with notable differences. At low steam mass flow rate ( $20 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) and temperatures below  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , seawater jets produce stronger oscillations due to higher density, which reduce pressure wave attenuation. In contrast, at higher mass flow rates ( $40\text{-}60 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ), nozzle pressure oscillations converge between seawater and freshwater, while tank oscillations in seawater show nonlinear trends—initially stronger but weaker at elevated temperatures. This shift is attributed to smaller, denser bubbles in seawater, which enhance pressure wave scattering. Frequency analyses show that both systems share similar dominant frequencies ( $10\text{-}200 \text{ Hz}$ ), decreasing with rising temperature due to slower bubble collapse. The study concludes that seawater can alter pressure oscillation intensity but does not significantly affect frequency patterns. For marine applications, seawater's higher density may amplify low-flux oscillations, but its bubble-suppressing properties could mitigate high-temperature effects. These insights advance the understanding of steam-seawater jet dynamics and support safer design options for marine nuclear cooling systems.

**Key words:** nuclear power unit; steam jet; seawater; pressure oscillation

蒸汽射流冷凝以其高效的传热传质速率被广泛应用于能源、化工和核电等工业领域中<sup>[1-3]</sup>。当前学者已对淡水条件下的蒸汽浸没射流相关特性开展了大量的实验研究和理论分析<sup>[4-6]</sup>,但很少有人关注过蒸汽-海水射流。地球表面 70% 被海洋覆盖,对于长期在海上运行的船舶核动力装置,直接采用海水作为抑压水池的冷却工质,可消除远洋航行中淡水补给的限制,有利于提高船舶核动力装置的海洋适用性和极端环境下的生存能力。然而由于目前缺少海水条件下蒸汽浸没射流现象的研究,对于海水条件下的蒸汽浸没射流现象的认知尚存在空白。蒸汽浸没射流冷凝发生时,特别是在低蒸汽质量流速条件下,会在水池及喷放管路内引起较强的压力振荡,较强的压力振荡会危及射流系统及相关设备的安全性。Liu 等<sup>[7]</sup>、Li 等<sup>[8]</sup>和 Laine 等<sup>[9]</sup>众多学者皆进行过淡水条件下蒸汽低速浸没射流压力振荡强度特性实验,测得的喷管内射流压力振荡强度幅值均可达到 MPa 等级,最高达到 3.9 MPa。他们研究还发现,压力振荡强度幅值随蒸汽质量流速的增大和水温的升高而减小。Aya 等<sup>[10]</sup>、Youn 等<sup>[11]</sup>和 Song 等<sup>[12]</sup>大量学者在淡水条件下蒸汽低速浸没射流实验中,发现蒸汽冷凝诱发的压力振荡频率在  $10\sim 200 \text{ Hz}$  之间,且压力振荡频率随着蒸汽质量流速的增大而增大,随着水温的升高而减小。然而,当

前尚未有学者在海水条件下开展过蒸汽低速浸没射流压力振荡特性研究。

Winkel 等<sup>[13]</sup>、Kawahara 等<sup>[14]</sup>和 Li 等<sup>[15]</sup>对海水中气泡开展研究发现,同等条件下海水中的气泡的平均直径只有淡水中的  $1/4$ 。这主要是因为海水中存在大量盐离子,受盐离子影响,海水中气泡的形状、尺寸等结构特征以及生成、长大、溃灭等演变过程相比于淡水发生了较大改变。根据刘新星<sup>[6]</sup>的研究,淡水中气泡尺寸越小,压力振荡强度越小。那么海水中蒸汽射流振荡强度是否比淡水中的小,利用海水替代淡水作为抑压水池的冷却工质是否能够提高系统安全性,有待进行深入探究。

为此,本文针对海水条件下蒸汽低速射流压力振荡特性开展实验研究,通过利用高频动态压力传感器来监测喷管内和水池内的压力振荡强度和压力振荡频率数据,对比分析海水条件下蒸汽射流的压力振荡强度、幅值以及频率与淡水条件下压力振荡特性存在的差异,从而掌握海水条件下蒸汽低速浸没射流压力振荡特性。

## 1 实验装置与数据处理

### 1.1 实验装置

实验装置回路如图 1 所示,实验装置主要由蒸汽供应系统、水池、喷管、实验测量及数据采集

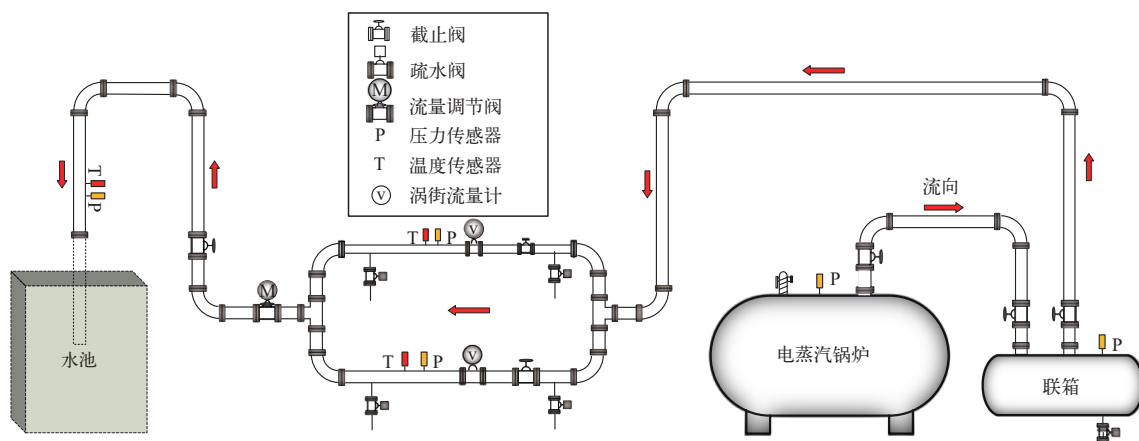


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

系统组成。蒸汽供应系统通过控制锅炉的运行压力及蒸汽管道上的阀组来提供满足实验需求的蒸汽。蒸汽经由喷管进入装有海水/淡水的水池,在管口形成射流气泡,实现对蒸汽-海水射流、蒸汽-淡水射流现象的构建。

蒸汽供应系统由内径为 40 mm 的主管路、两条内径分别为 25 mm 和 50 mm 的支路组成,以配合不同口径的涡街流量计得到更宽的流量测量范围。每个支路管道在流量计上游设置有隔离阀,在流量计下游支管汇合后的主管路上设有流量调节阀,以便根据实验所需蒸汽流量选择隔离其中一个支路并对蒸汽流量进行调节。电蒸汽锅炉、联箱和蒸汽回路都进行保温处理,以减小实验过程中因热量损失造成的蒸汽冷凝。沿蒸汽管路设置有疏水阀,用以排出实验预热阶段管路中的冷凝水。

水池为长 1 m、宽 1 m、高 2 m 的不锈钢水箱。在水池内布有温度与压力测点,以便测量水池水温以及水池内的压力振荡特性,具体布置位置如图 2 所示。水池底部设有给排水管路,用于实验前水池上水和实验后水池排水。水池侧面设有溢流管路,用于保持实验过程中喷管的浸没深度不变。溢流管路内径为 40 mm,可确保实验过程中喷管浸没深度始终为 500 mm。

喷管材质为 304 不锈钢,管径为 40 mm,长度为 1 100 mm,喷管出口距水池底部 1 300 mm。喷管上布有压力测点,以便测量喷管内的压力振荡特性,具体布置位置如图 2 所示。

数据测量及采集系统主要由遍布实验装置的

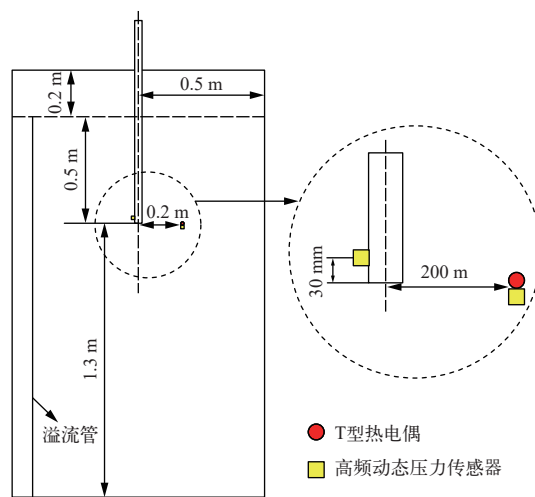


图2 水池温度、压力测点布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of water tank temperature and pressure measurement points

仪器仪表、NI 数据采集系统及上位机软件组成,测量仪器的参数和参数的不确定度如表 1 所列。使用 NI 数据采集系统以 10 Hz 的采样频率监测和记录蒸汽温度、压力、体积流量以及水温数据。水池与喷管内的动态压力采样频率设置为

表 1 测量仪器参数及参数不确定度

Table 1 Measuring instrument parameter and parameter uncertainty

测量仪器	测量参数	测量范围	相对不确定度/%
宽量程涡街流量计	蒸汽流量	30~360 m <sup>3</sup> /h	4.4
窄量程涡街流量计	蒸汽流量	8~60 m <sup>3</sup> /h	4.4
T 型热电偶	蒸汽温度、水温	-50~350 °C	1.0
压力传感器	蒸汽压力	0~1 MPa	1.7
高频动态压力传感器	动态压力	0~2 000 kPa	4

20 kHz, 1次采样时间为20 s。表2列出海水与淡水物性的对比。

表2 20 °C 下海水与淡水物性的对比

Table 2 Physical property comparison of seawater and freshwater at 20 °C

物性参数	参数值	
	海水(盐度 3.5%)	淡水(盐度 0%)
密度, kg/m <sup>3</sup>	1 024.911	998.015
比定压热容, kJ/(kg·°C)	3.999	4.184
表面张力, mN/m	73.519	72.736
黏度, mPa·s	1.077	1.002

## 1.2 数据处理

通过高频动态压力传感器测量得到的压力波动信号来研究蒸汽射流冷凝压力振荡特性。对采集得到的动态压力信号分别进行时域和频域处理。在时域上,用一段时间内动态压力的最大值 $p_{\max}$ 和最小值 $p_{\min}$ 表征瞬态压力振荡的强度。

$$p_{\min} = \min[p(m)] \quad (1)$$

$$p_{\max} = \max[p(m)] \quad (2)$$

式中,  $p(m)$ 为第 $m$ 个数据对应的压力, kPa。

在频域上,通过对连续的动态压力信号进行快速傅里叶变换(FFT),可将时域信号转换成频域信号。

$$p(m) = \sum_{n=0}^{N-1} p_n e^{-i \frac{2\pi m}{N} n} \quad (3)$$

为评估实验数据的可信性,本文在蒸汽质量流速为 $60 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、水温为 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下进行了重复测试。图3示出两次实验的压力振荡频谱分布。由图3可知,两次实验的主频大小相近,频谱

分布特征高度吻合,这表明本文实验结果具有良好的重复性,其数据高度可信。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 动态压力信号

当蒸汽质量流速为 $20 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,蒸汽的供应速率小于蒸汽的冷凝速率,喷管内压力快速降低导致池水倒吸至喷管内。随着喷管内蒸汽持续供给,其压力会持续增加,当蒸汽压力大于喷管内液柱的液体压力时,倒吸至喷管内的池水被蒸汽吹出。如此往返,池水会间歇式进出喷管内,即汽-液界面会在喷管和水池内交替出现,此时的动态压力信号如图4所示。由图4可知,不管是蒸汽-海水射流,还是蒸汽-淡水射流,水池内的动态压力变化均呈现出微弱波动并伴随多个尖峰值的特征。这是因为当喷管口的汽泡瞬时冷凝时,会在水池内产生一个较强的压力脉冲,而当喷管口有池水被吸入或喷出时,在水池内造成的压力波动较小。而对于喷管内的动态压力,蒸汽冷凝过

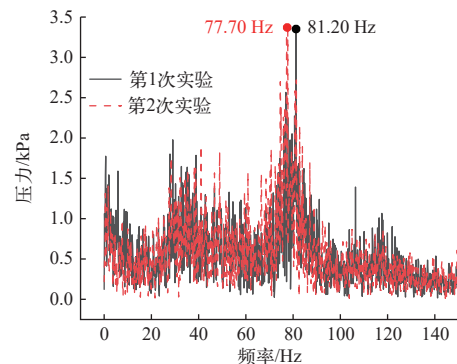


图3 重复性实验测试结果

Fig. 3 Reproducibility test result

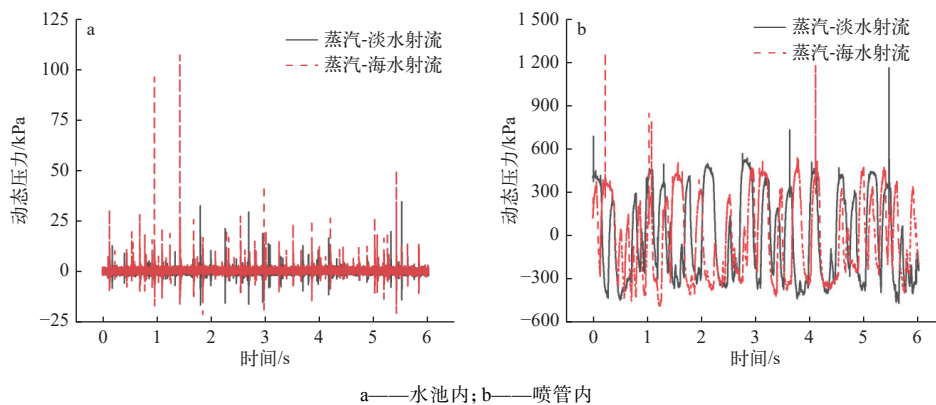


图4 水温 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 下蒸汽质量流速为 $20 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时的动态压力信号

Fig. 4 Dynamic pressure signal under steam mass flow rate of  $20 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  at water temperature  $40 \text{ }^\circ\text{C}$

程中均会在喷管内交替形成正负压,在喷管内测得的动态压力以一种类似正弦波的形式呈现上下波动的特征,频率约为 $1\sim 5$  Hz,振幅可达到数百kPa。在这种低频的大幅度压力波动的基础上,同时也出现了MPa级的压力脉冲,这是由管内蒸汽迅速冷凝后池水回流撞击引起的水锤造成的。

当蒸汽质量流速达到 $60\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,蒸汽的供应速率大于蒸汽的冷凝速率,汽-液界面始终在水池内,喷管内不再发生冷凝水锤,此时的动态压

力信号如图5所示。由图5可看到,不管是蒸汽-海水射流还是蒸汽-淡水射流,管内压力振荡的振幅相比于蒸汽质量流速为 $20\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时均有显著降低。由图5还可看到,随着水温上升,相同时间内的压力脉冲峰个数减少。这主要是因为随着水温升高,池水冷凝能力下降,导致蒸汽泡溃灭所需时间增加,进而使得由汽泡溃灭诱发的压力振荡脉冲间隔时间增大,即单位时间内压力脉冲峰个数减少。

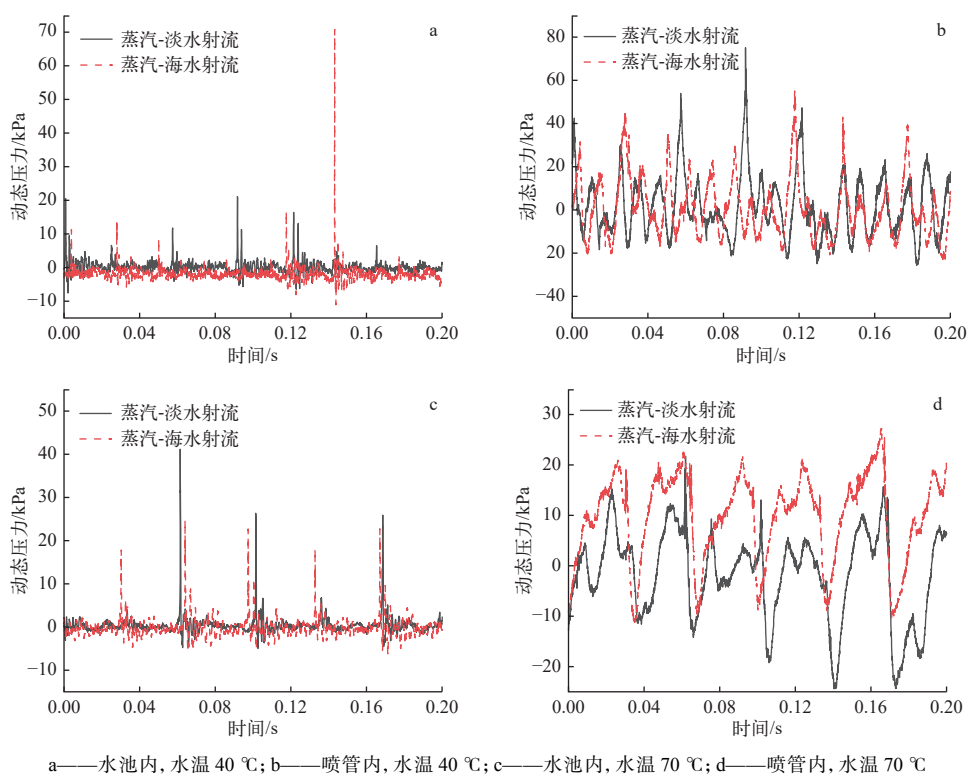


图5 蒸汽质量流速为 $60\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时的动态压力信号

Fig. 5 Dynamic pressure signal under steam mass flow rate of  $60\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$

蒸汽质量流速对动态压力变化曲线也有影响。当蒸汽质量流速为 $40\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、水温为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,汽-液界面始终在水池内,其动态压力信号如图6所示。对比图5、6可看到在同一水温条件下,当蒸汽质量流速从 $40\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 增加到 $60\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,不管是蒸汽-海水射流还是蒸汽-淡水射流,其压力脉冲间隔时间均减小。这主要是因为随蒸汽质量流速升高,汽泡生长所需时间变少,单位时间内汽泡溃灭次数更多,进而导致压力脉冲间隔时间更短。由图5、6还可看到,不管是蒸汽-海水射流还是蒸汽-淡水射流,其压力脉冲幅值均随蒸汽

质量流速的增大而增大。这主要是因为高蒸汽质量流速下,喷管口处蒸汽泡溃灭时的体积更大,而较大体积汽泡溃灭时会诱发更强的压力振荡。

## 2.2 压力振荡强度

取实验过程中在某一实验参数下记录的20s内动态压力的最大值(max)和最小值(min)表征压力振荡的瞬时冲击。不同实验参数下的压力振荡强度对比如图7所示。由图7可知,当蒸汽质量流速 $G$ 为 $20\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、水温低于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,水池和喷管内蒸汽-海水射流的压力振荡强度普遍要比蒸汽-淡水射流的大,这与动态压力信号呈现出的

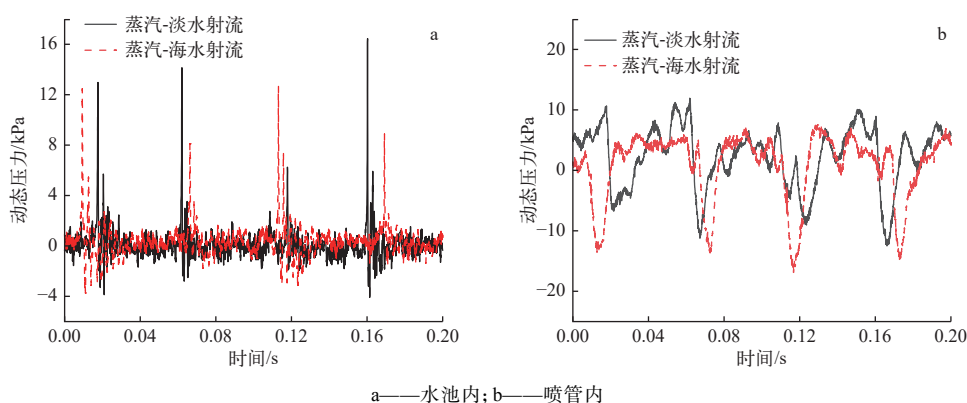
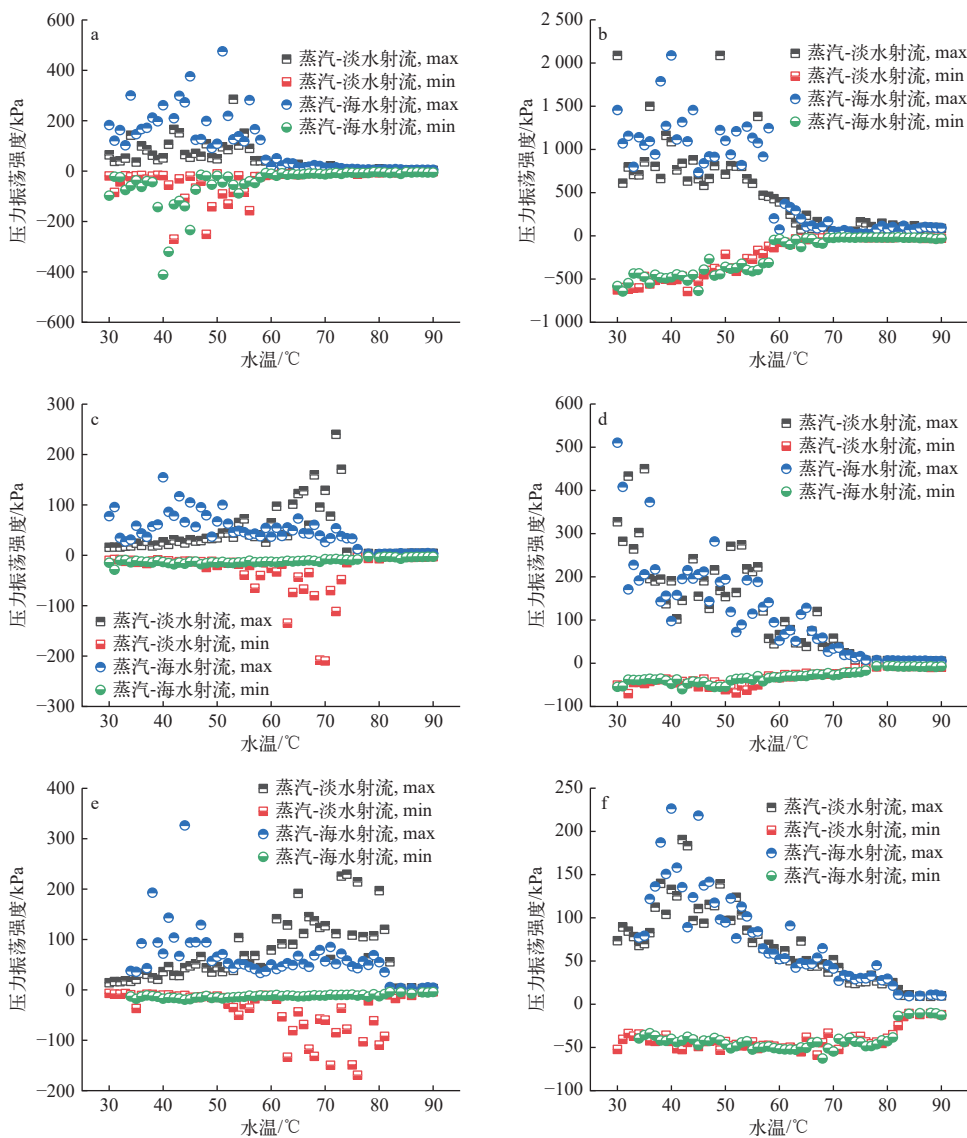


图6 水温70℃下蒸汽质量流速为40 kg/(m<sup>2</sup>·s)时的动态压力信号

Fig. 6 Dynamic pressure signal under steam mass flow rate of 40 kg/(m<sup>2</sup>·s) at water temperature 70℃



a——水池内,  $G=20 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; b——喷管内,  $G=20 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; c——水池内,  $G=40 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; d——喷管内,  $G=40 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; e——水池内,  $G=60 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; f——喷管内,  $G=60 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

图7 蒸汽低速浸没射流下的压力振荡强度

Fig. 7 Pressure oscillation intensity of steam low-velocity jet

特点是相一致的。导致蒸汽-海水射流压力振荡强度高于蒸汽-淡水射流,主要是因为海水的密度大于淡水(图8),压力波在密度较高的物质中传播时能量损耗更小。而在水温较低时,蒸汽冷凝会在喷管内诱发水锤,池水会进入喷管内,从而导致喷管内的压力振荡受到池水物性(密度)影响。当水温高于60℃时,蒸汽-海水射流的压力振荡强度与蒸汽-淡水射流的压力振荡强度都很微弱。这主要是因为此时水温较高,蒸汽在喷管口处形成1个体积几乎不变的大汽泡,既不会池水倒吸诱发水锤,也不会汽泡溃灭诱发压力脉冲,压力振荡主要由微弱的汽液界面振荡产生,仅有几kPa。

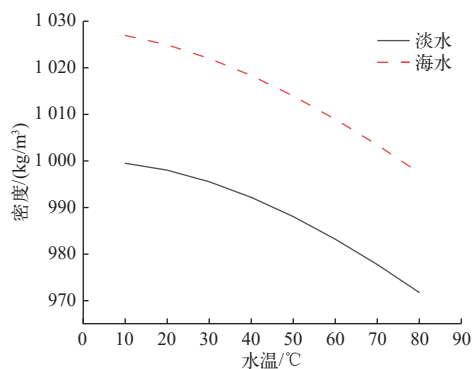


图8 海水与淡水密度的对比

Fig. 8 Comparison of density of seawater and freshwater

由图7还可知,当蒸汽质量流速为40 kg/(m<sup>2</sup>·s)和60 kg/(m<sup>2</sup>·s)时,蒸汽-海水射流与蒸汽-淡水射流的喷管内压力振荡强度无明显差异,这主要是因为在这两个流速下,蒸汽供应速率大于池水冷凝速率,喷管内不再发生冷凝水锤,池水也不再进入喷管内,即管内压力振荡强度不受池水物性影响,此时管内的压力振荡强度主要受管口处的蒸汽泡冷凝溃灭时汽泡体积大小影响,而在同一流速和水温条件下,蒸汽-海水射流与蒸汽-淡水射流的汽泡体积大小基本相同,进而导致喷管内压力振荡强度无明显差异。而对于水池内压力振荡强度,在这两个流速下,随着水温升高,先是蒸汽-海水射流压力振荡强度高,后是蒸汽-淡水射流压力振荡强度高,最后是两者的压力振荡强度相差无几。最后相差无几是因为高水温区,蒸汽冷凝不再发生汽泡溃灭,产生的压力振荡微乎其微。水温较低时,蒸汽-海水射流压力振荡强度比蒸汽-淡

水射流的高,主要是因为海水密度比淡水高,压力波在海水中传播衰减程度弱导致的。水温较高时,蒸汽-海水射流压力振荡强度比蒸汽-淡水射流的低,主要是因为高水温区,池水对蒸汽的冷凝能力下降,蒸汽泡溃灭后在水池内形成了大量小汽泡,尤其是海水受盐离子影响,海水中汽泡体积更小,难以聚并,存留时间更长。这导致水温较高时,相比于淡水条件,海水条件下水池内充斥满了小汽泡,密集的汽泡群会通过散射和干涉效应增强压力波的衰减,从而使得蒸汽-海水射流的压力振荡强度较小。

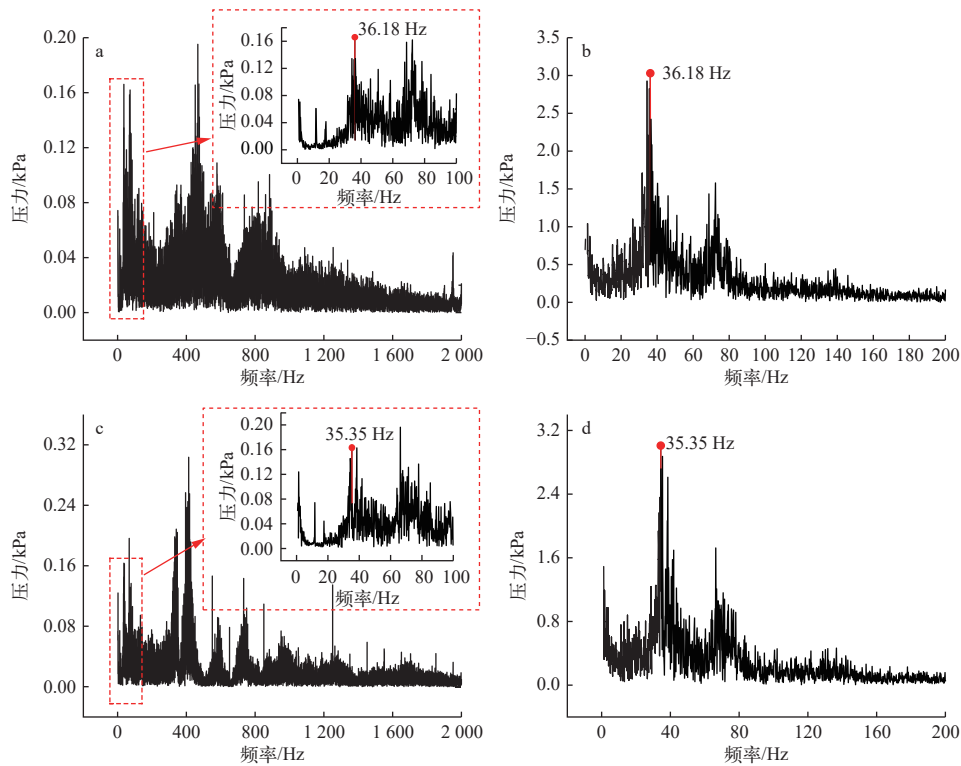
### 2.3 压力振荡频率

为分析蒸汽射流的压力振荡频率特征,利用FFT将动态压力信号时域信号转换成频域信号。图9示出蒸汽质量流速为60 kg/(m<sup>2</sup>·s)条件下蒸汽-淡水射流与蒸汽-海水射流的压力信号频谱。由图9可见,不管是蒸汽-淡水射流还是蒸汽-海水射流,频谱中的频率分布都非常集中,并且在水池和喷管内测得的压力信号主频基本相同,说明压力振荡的来源相同。从图9还可看到:水池中的压力信号频谱除了在低频区集中分布,少部分压力信号在高频区也均匀分布,低频区是由喷管口处的大汽泡溃灭导致,高频区是由大汽泡溃灭后产生的小汽泡破裂造成;蒸汽-海水射流的喷管内压力振荡频谱分布与蒸汽-淡水射流的基本相同,而水池内的存在一些差异。水池内的压力振荡频谱差异主要是因为海水池中的小汽泡与淡水池中的存在较大差异,受盐离子影响,海水池中的小汽泡更小、更密集。

蒸汽质量流速为60 kg/(m<sup>2</sup>·s)时水温对蒸汽射流压力振荡频率的影响如图10所示。由图10可见,不管是蒸汽-淡水射流还是蒸汽-海水射流,压力振荡频率均随水温的升高而下降。这主要是因为随着水温升高,蒸汽冷凝速率逐渐下降,汽泡体积逐渐增大,汽泡溃灭所需时间增加,即汽泡冷凝溃灭诱发的压力振荡频率降低。

## 3 结论

本文在蒸汽质量流速为20、40、60 kg/(m<sup>2</sup>·s),水温为30~90℃条件下开展了实验研究,对比分析海水中蒸汽低速浸没射流的动态压力振荡强度、压力振荡频率与淡水中蒸汽低速射流的区



a——蒸汽-淡水射流,水池内; b——蒸汽-淡水射流,喷管内; c——蒸汽-海水射流,水池内; d——蒸汽-海水射流,喷管内  
图9 水温 65 °C 下的蒸汽射流压力振荡频谱

Fig. 9 Pressure oscillation spectrum of steam jet at water temperature 65 °C

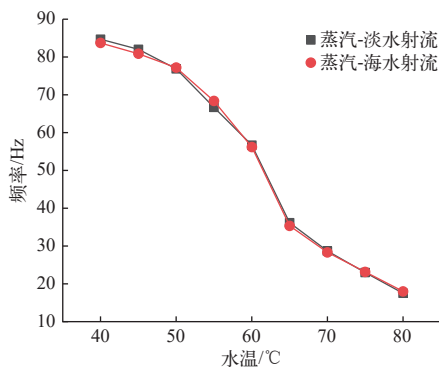


图10 水温对蒸汽射流压力振荡频率的影响  
Fig. 10 Influence of water temperature on main frequency of steam jet pressure oscillation

别。本文研究结果有助于了解掌握海水条件下蒸汽射流压力振荡特性, 所得到的主要结论如下: 1) 蒸汽-海水射流的动态压力特性与蒸汽-淡水射流的存在相似性; 2) 当蒸汽质量流速为  $20 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、水温小于  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 蒸汽-海水射流的压力波动强于蒸汽-淡水射流的, 当蒸汽质量流速增至  $40 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  和  $60 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时, 两者喷管内压力波动趋同, 而水池中蒸汽-海水射流的压力波动随水温升高呈现先强后弱于淡水射流的非线性变化; 3) 蒸汽-海

水射流的压力振荡频谱与蒸汽-淡水射流的存在相似性, 且二者的压力振荡主频无明显差异, 均随水温升高逐渐减小。

#### 参考文献:

- [1] 从跃磊, 王迎春, 陈伟雄, 等. 不凝结气体对蒸汽浸没射流压力振荡的影响[J]. 中国科学院大学学报, 2017, 34(2): 135-140.  
CONG Yuele, WANG Yingchun, CHEN Weixiong, et al. Effect of non-condensable gas on pressure oscillation of submerged steam jet[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 34(2): 135-140(in Chinese).
- [2] 汪广怀, 孙露, 王畅, 等. 蒸汽浸没射流与凝结数值仿真分析[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(4): 135-142.  
WANG Guanghuai, SUN Lu, WANG Chang, et al. Numerical simulation of steam submerged jet and condensation[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14(4): 135-142(in Chinese).
- [3] YU J, MA X, LI M, et al. Study on thermodynamics and flow characteristics of jet condensate in subcooled flowing liquid[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 47: 103040.

- [4] 李伟超. 含空气蒸汽浸没射流特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
- [5] 全标, 蒋孝蔚, 陈志辉, 等. 抑压式安全壳的抑压特性研究[J]. 核动力工程, 2014, 35(2): 114-117.  
QUAN Biao, JIANG Xiaowei, CHEN Zhihui, et al. Research on suppressant characteristics of suppression containment[J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35(2): 114-117(in Chinese).
- [6] 刘新星. 不同背压下的低速蒸汽射流冷凝特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- [7] LIU X, YU M, LI W, et al. Characteristics of fluid and pressure oscillations induced by steam injected through a vertical blow down pipe under different vessel pressures [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2022, 173: 109123.
- [8] LI W, WANG J, ZHOU Y, et al. Investigation on steam contact condensation injected vertically at low mass flux, Part I: Pure steam experiment[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 131: 301-312.
- [9] LAINE J, PUUSTINEN M, RASANEN A. NKS-281: PPOOLEX experiments on dynamics of free water surface in the blowdown pipe[R]. Finland: Lappeenranta University of Technology, 2013.
- [10] AYA I, NARIAI H. Boundaries between regimes of pressure oscillation induced by steam condensation in pressure suppression containment[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1987, 99: 31-40.
- [11] YOUN D H, KYUNG B K, LEE Y Y, et al. The direct contact condensation of steam in a pool at low mass flux[J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2003, 40(10): 881-885.
- [12] SONG D, ERKAN N, JO B, et al. Dimensional analysis of thermal stratification in a suppression pool[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2014, 66: 92-100.
- [13] WINKEL E S, CECCIO S L, DOWLING D R, et al. Bubble-size distributions produced by wall injection of air into flowing freshwater, saltwater and surfactant solutions[J]. *Experiments in Fluids*, 2004, 37(6): 802-810.
- [14] KAWAHARA A, SADATOMI M, MATSUYAMA F, et al. Prediction of micro-bubble dissolution characteristics in water and seawater[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2009, 33(5): 883-894.
- [15] LI Y, REN S, ZHANG S, et al. Bubble characteristics in subcooled flow boiling of seawater[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 430: 132019.