

蒸汽射流直接接触凝结的界面及声压特性

徐强, 洪奥越, 李翔宇, 蒋帅之, 郭烈锦

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 蒸汽射流在液体中的直接接触凝结引发的剧烈界面振荡及声压振荡, 可能导致工业管道系统振动甚至失效, 采用高速摄像机与高频水听器, 捕捉了射流的界面演化行为及其诱导的声压。研究了3种典型凝结流型下射流界面的径向、轴向振荡与声压振荡特性, 并阐明声压振荡产生机理。研究发现: 声压波动的概率密度函数在间歇流型下呈左偏单峰分布, 在界面振荡流型下呈双峰分布, 而在稳定流型下呈对称单峰分布; 随蒸汽质量流速升高, 无量纲径向、轴向界面振荡强度及声压振荡强度整体呈下降趋势, 表现出极强的相关性。建立了基于声压参数的射流喷射长度预测模型, 预测值与实验值的误差在 $\pm 1\%$ 内。概率密度及相关性分析结果表明, 蒸汽射流凝结的声压振荡是由其界面振荡引起的。

关键词: 蒸汽射流; 直接接触凝结; 界面振荡; 射流喷射长度

中图分类号: O359 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202409004 **文章编号:** 0253-987X(2024)09-0030-08

Study on Interface and Sound Pressure Characteristics of Direct Contact Condensation of a Steam Jet

XU Qiang, HONG Aoyue, LI Xiangyu, JIANG Shuaizhi, GUO Liejin

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Direct contact condensation of a steam jet in flowing water in the pipe will cause intense interface oscillations and sound pressure oscillations. In this paper, a high-speed camera and a high-frequency hydrophone is used to capture the evolution of the jet interface and the induced sound pressure. The radial and axial oscillations and sound pressure oscillations of the jet interface under three typical condensation regimes is studied. Probability density function of sound pressure fluctuation shows a left-skewed unimodal distribution under the Chugging regime, a bimodal distribution under the Oscil-I condensation regime, and a symmetrical unimodal distribution under the Stable regime. The intensities of the interface oscillation and sound pressure oscillation decrease as the steam mass flux increases, indicating a strong correlation. A jet penetration length prediction model based on the sound pressure parameter is established, and the error between the predicted value and the experimental value is within $\pm 1\%$. Probability density and correlation analysis provide quantitative confirmation that the sound pressure oscillation of steam jet condensation is caused by its interface oscillations.

Keywords: steam jet; direct contact condensation; interface oscillation; sound pressure distribution; jet penetration length

蒸汽射流在管内过冷水流中的直接接触冷凝具有传热传质效率高等优点,被广泛应用于核反应堆、水下推进系统、液体推进剂火箭发动机等^[1-4]。大推力液氧煤油发动机采用先进的高压补燃循环,气氧通过涡轮驱动预压泵对主管路中的液氧预增压,有效防止液氧主泵气蚀。然而,涡轮排出的气氧喷射进入液氧泵间管路,发生气液两相射流直接接触凝结,该过程诱导的剧烈声压波动会引起液氧泵间管路系统声学不稳定,进而导致发动机推力脉动。因此,深入研究射流凝结的界面演化行为,阐明辐射噪声的产生机理对于提高发动机可靠性,确保其安全运行具有重要意义。

气氧-液氧及蒸汽-水的直接接触凝结都属于同一种物质不同相态间的物理过程,因此两种物质的凝结过程具有相似的物理机制,由于界面不稳定性导致的声压特性规律也具有相似性。考虑到液氧具有强氧化性,易与可燃物质发生剧烈反应导致火灾或爆炸,且必须存储在配备绝热层,具有足够的强度和密封性的高压容器中。相比之下,水具有稳定的性质、良好的安全性和经济性。

通过开展蒸汽-水直接接触凝结的机理性实验,在摸清实验基本规律的基础上,形成一套行之有效的研究气液直接接触凝结的测量分析方法,为开展气氧-液氧直接接触凝结的实验研究建立基础。同时,利用以蒸汽-水作为实验介质的两相射流凝结实验数据,可为建立气液射流直接接触凝结的数理模型提供依据。在验证实验数据与数理模型的一致性后,可进行气氧-液氧直接接触凝结过程的数值模拟研究。

对大空间水池内的蒸汽射流的界面演化行为,Chan和Lee^[5]首次建立了低蒸汽质量流速下蒸汽射流在过冷水池中的凝结流型图。Weiland和Vlachos等^[6]发现气泡流型及稳定流型两种典型流型。Khan等^[7]发现不稳定的射流界面以不确定方式导致压力振荡。对于蒸汽射流在管道过冷水流中的直接接触凝结过程,Xu等^[8-9]发现了4种不同的凝结状态,即不稳定间歇振荡、不稳定界面振荡(Oscil-I)、不稳定气泡振荡(Oscil-II)和稳定射流凝结。此外,在射流凝结过程中,会诱导一定频率的压力脉动及噪声辐射。当气液凝结诱发的压力或噪声频率低至一定值,接近或等于管道系统结构固有频率时将导致管道系统的共振,由此产生的恶劣破坏作用,会导致管道系统失效,甚至可能摧毁与之连接的其他热力系统设备。对于射流凝结引起的压力振荡,Cho等^[10]发现压力振荡振幅首先随水温缓慢增加,在60℃和80℃左右达到峰值,然后急剧下降。

Hong等^[11]研究了较高蒸汽质量流速下射流凝结的压力波主频随汽水参数的变化规律。研究发现蒸汽质量流速小于300 kg/m²·s时,压力波主频与蒸汽质量流速成正比,反之成反比。对于蒸汽射流在受限空间内的压力振荡,Xu等^[12]系统研究了4种典型凝结流型下的压力振荡随时间变化特性及流型转变时的压力波概率密度分布特性,揭示了在不同汽水参数及流动形态下,压力振荡强度及主频特性的变化规律。目前,针对蒸汽射流流场内压力波动的研究已经相当充分。然而,少有文献涉及蒸汽射流流场噪声的研究。

与压力传感器检测到的压力信号不同,水听器可在相当宽的频率范围内提供平坦的频率响应^[13]。此外,水听器在较为微观的气泡行为检测层面也表现优良。可被用于流体横流中气泡声信号的检测^[14-15]、气泡合并产生的声音^[16]及一对或小群气泡^[17]的声学研究。因此,许多学者利用声学信号对多相流系统内的流动状态及系统行为进行了研究。Ajbar等^[18]利用声波信号对气液两相流的流动状态进行了预测。数据分析结果表明,声波测量技术在识别气泡塔内流动状态方面具有一定的适用性。Al-Masry等^[19-20]采用声学及压力信号相结合的方法对气泡塔内流场的过渡点进行了识别,研究结果表明,声学测量有助于揭示气泡性质的重要信息,特别是气泡的大小和振荡频率。射流凝结过程伴随剧烈的相界面演化及气泡生成、聚并、破碎、溃灭等行为。因此,采用声学信号对射流凝结过程的相界面演化行为进行表征,是一种合适且有效的手段,但在这方面鲜有相关的研究报导。

总结上述文献可知,现阶段对于蒸汽射流冷凝界面的研究主要是基于射流形态的主观判断,鲜有研究涉及利用声学信号对射流凝结相界面演化行为的表征。本文采用高速摄像机捕捉射流界面的瞬态演化行为,利用数字图像处理技术提取并统计射流界面参数;利用高频水听器获得射流凝结流场内的声压信息;定量研究了射流凝结的界面振荡与声压振荡的内在关联;引入声压参数,建立射流喷射长度的预测模型。研究结果揭示了蒸汽射流流场内噪声的产生机理,为进一步分析界面的不稳定性提供了新思路。

1 实验系统及方法

1.1 蒸汽射流直接接触凝结实验系统

蒸汽射流直接接触凝结实验系统如图1所示。

该实验系统由以下 5 部分构成:过冷水循环系统、蒸汽供应系统、测试段、数据采集系统及图像采集系统。过冷水循环系统采用水箱及水泵实现过冷水的存储及循环。在过冷水循环管路上安装有调节阀及精度为 0.5% 的质量流量计,分别用于过冷水流量的调节与监测。水箱底部及测试段入口处装有加热器,循环管路末端装有冷却器用于过冷水温度控制。

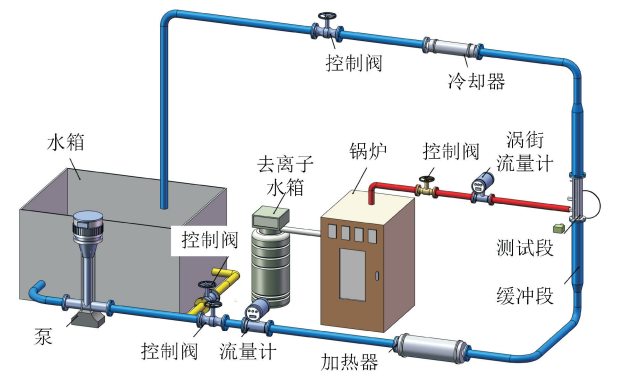


图 1 蒸汽射流直接接触凝结实验系统示意图
Fig.1 Schematic diagram of steam jet direct contact condensation experimental system

蒸汽供应系统主要由 72 kW 的锅炉提供饱和蒸汽。蒸汽供应管道外覆盖有保温泡沫以保证蒸汽的饱和状态。同时蒸汽供应管道安装有调节阀及精度为 0.5% 的涡街流量计用于蒸汽流量调控与监测。

测试段及喷嘴的几何结构如图 2 所示。其中过冷水的流通截面为 40 mm×40 mm 的正方形。两块长为 460 mm、宽为 40 mm 的石英玻璃作为测试段的前后壁面,为图像采集系统提供良好的透光度。饱和蒸汽经内径为 4.5 mm 的渐缩渐扩喷嘴进入测试段,喷嘴安装在距测试段底部 80 mm 处。蒸汽的

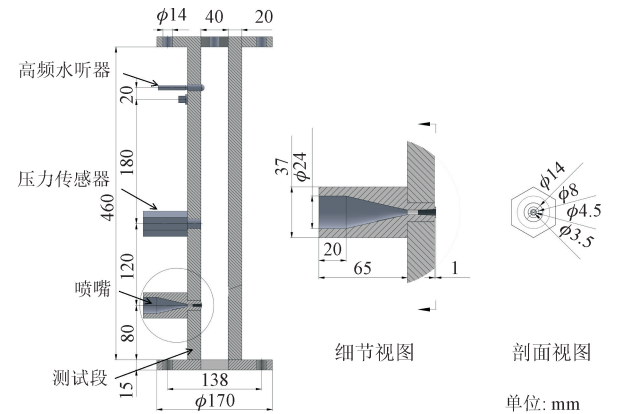


图 2 实验测试段及喷嘴的几何结构示意图
Fig.2 Schematic diagram of test section and geometry of the nozzle

入口压力及温度分别通过压力传感器及热电偶进行测量。同时在距测试段底部 200 mm 与 400 mm 的位置分别安装有压力传感器及高频水听器,用以监测测试段相关压力及声压波动特性。

图像采集系统采用 Photron FASTCAM Mini WX50 高速摄像机和尼康定焦镜头记录蒸汽射流冷凝的界面演化行为,10 000 帧拍摄时间为 4 s。在可视段后垂直布置了一个 LED 光源为摄像机提供均匀的光源背景。镜头距离蒸汽射流气羽 420 mm,在进行对焦后获得清晰的射流气羽图像。原始射流气羽图像的面积为 42.6×21.3 mm²,对应的分辨率为 512 像素×256 像素。同时采用 8 mm 外径的喷嘴,在射流气羽的瞬态图像里对应 96 个像素点,因此计算得到一个像素对应的真实长度为 0.083 33 mm。

数据采集系统主要包含温度、压力、质量流量及声压数据的采集。其中温度通过量程为 0~200 ℃、精度为±0.25 ℃的 K 型热电偶测量。压力通过量程为 0~5 bar、精度为±0.1% 的凯勒压力传感器测量。温度、压力及流量均通过 LabView 数据采集单元,采样频率为 5 000 Hz,其中温度信号通过 NI 9212 模块采集,压力及流量信号通过 NI 9253 模块采集。此外,声压信号通过安装在壁面上的高频响水听器 (B&K, 8103-D-100, 丹麦) 测量,通过 3052-A-030 模块采集,采样频率为 65.5 kHz。由于温度、压力等数据与声压数据分别通过不同采集软件采集,因此采用触发器实现温度、压力及流量数据与声压数据的同步采集。实验参数设置见表 1。

表 1 实验参数设置	
Table 1 Experimental parameter settings	
实验参数	数值和范围
蒸汽入口压力 p_s /MPa	0.15~0.70
蒸汽入口温度 T_s /℃	111~166
蒸汽质量流速 G_s /(kg·m ⁻² ·s ⁻¹)	50~600
过冷水质量流量 M_w /(kg·s ⁻¹)	0.96
过冷水温度 T_w /℃	30
注汽点过冷水压力 p_w /MPa	0.145
喷嘴出口直径 d_e /mm	4.5

蒸汽入口压力、温度与蒸汽质量流速的对应关系见表 2,喷嘴内径固定时,在一定的蒸汽入口压力和温度下,蒸汽质量流速近乎确定。将蒸汽质量流速作为本文的主要自变量,相当于考虑了蒸汽入口压力及温度对实验结果的影响。

表 2 蒸汽入口压力、温度与蒸汽质量流速的对应关系

Table 2 Relationship between steam inlet pressure, temperature and steam mass flux

蒸汽入口压力 p_s/MPa	蒸汽入口 温度 $T_s/^\circ\text{C}$	蒸汽质量流速 $G_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
0.15	111	50
0.16	113	100
0.20	120	150
0.24	126	200
0.30	133	250
0.36	139	300
0.41	145	350
0.47	149	400
0.52	154	450
0.58	158	500
0.64	162	550
0.70	166	600

1.2 数字图像处理技术

利用数字图像处理技术对原始气羽图像进行图像处理,如图 3 所示,主要包括中值滤波、图像填充及边缘检测等方法。采用 Otsu 阈值分割方法,按照图像的灰度特性,通过调整合适的阈值将真彩色图像从灰度模式转换为二值模式,如图 3(b)所示。由于参考背景与蒸汽射流气羽的灰度值差异较大,因此文中没有考虑参考背景对图像处理结果的影响。为提高图像质量,采用大小为 7×7 像素的滑动窗口的中值滤波器消除图片噪声,如图 3(c)所示。在此基础上,提取出感兴趣的射流气羽区域,如图 3(d)所示。随后通过 Cannon 边缘检测技术提取气羽界面,如图 3(e)所示。最后建立坐标系如图 3(f)所示。

本文分别定义声压振荡强度为 P 、轴向界面振荡强度为 L 、上半部径向界面振荡为 R_{upper} 、下半部径向界面振荡为 R_{lower} 。

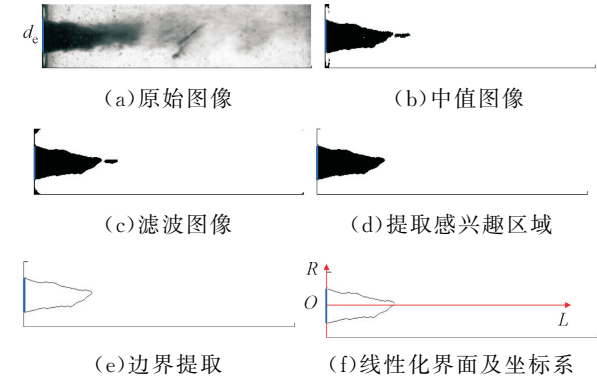


图 3 数字图像处理技术

Fig. 3 Digital image processing technology

将射流的周长线性化,分为上下两部分,即每个 z 坐标位置只允许有一个界面径向位置。每个 z 坐标位置对应的界面径向位置 $R_{\text{upper},z}$ 和 $R_{\text{lower},z}$ 可通过如下公式计算得到

$$R_{\text{upper},z} = k_i R_{\text{upper},z,i} \tag{1}$$

$$R_{\text{lower},z} = k_i R_{\text{lower},z,i} \tag{2}$$

式中: k_i 为图像实际尺寸与其像素的比值,本文中 $k_i = 0.083\,33\,\text{mm}/\text{像素}$ 。 $R_{\text{upper},z,i}$ 和 $R_{\text{lower},z,i}$ 为从中心线到射流上、下界面径向位置的像素之和。

射流气羽的轴向位置 L 即射流喷射长度可由下式计算得到

$$L = k_i L_i \tag{3}$$

式中, L_i 是射流边界最长轴线的像素之和。

2 结果与讨论

2.1 蒸汽射流凝结的界面演化行为及声压特性

射流界面的时空演化受多种因素,例如蒸汽质量流速、过冷水温度等^[21-23]的影响。借鉴 Xu 等^[9]在流型划分上的经验,依据不同凝结流型下蒸汽射流气羽的形貌以及相应流型下声压的概率密度函数(PDF)分布差异,本文基于蒸汽质量流速将凝结流型划分为 3 类。当 G_s 为 $50\sim 100\,\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,出现间歇凝结流型。在间歇凝结流型下,在供汽和冷凝的耦合影响下,射流气羽间歇性地进出喷嘴出口,其声压的 PDF 分布为明显的左偏单峰分布。当 G_s 为 $150\sim 200\,\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,出现界面振荡凝结流型。在界面振荡流型下,蒸汽持续从喷嘴喷出,与喷嘴直径相当的帽状气泡不断从气羽尾部脱落。该流型下的声压曲线为振幅较大的正弦波动形式,其声压的 PDF 呈双峰分布。当 G_s 为 $250\sim 600\,\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,出现稳定凝结流型。在稳定流型下,射流气羽可以保持一个几乎稳定的界面,声压波动幅度小,其 PDF 分布为 $0\,\text{kPa}$ 附近的对称单峰分布。当 G_s 为 $100\sim 150\,\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,凝结流型从间歇振荡流型向界面振荡流型转变。当 G_s 为 $250\,\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,凝结流型从界面振荡逐渐转变为稳定流型。

典型凝结流型下的界面行为及声压特性,如图 4 所示。在间歇凝结流型下,在供汽和冷凝的耦合影响下,射流气羽间歇性地进出喷嘴出口,其界面演化曲线如图 4(a)所示,气羽界面的轴向振荡幅度为 $0\sim 1.98d_e$,其平均长度为 $0.47d_e$ 。统计了 z 为 $0.19d_e$ 的径向界面振荡,可以看出:上半部气羽的径向界面振荡在 $0\sim 0.65d_e$ 范围内,其平均长度为 $0.13d_e$;气羽上部界面的径向振荡为 $0\sim 0.94d_e$,平均长度为 $0.26d_e$;气羽下部界面的径向振荡为 $-0.5d_e\sim 0d_e$,平均长度为 $-0.42d_e$;气羽的上、下界面的径向振荡产

生明显差异是由于过冷水对气羽的纵向冲击,同时界面振荡长时间为 0 是过冷水流入喷嘴的结果。如图 4(b)所示,由于过冷水突然进入喷嘴导致极低的声压负峰产生。此后,在气羽生长期声压振荡幅度逐渐减小。该流型下声压振荡的 PDF 在 0 kPa 附近呈现出明显的左偏单峰分布,如图 5(a)、5(b)所示。根据 Xu 等^[8]的拟合模型,声压振荡可以通过渐近分段的广义曲线拟合模型,即 GCAS 模型精确地拟合,其气羽界面的轴向振荡的 PDF 分布也可通过 GCAS 模型精确拟合,如表 3 所示。

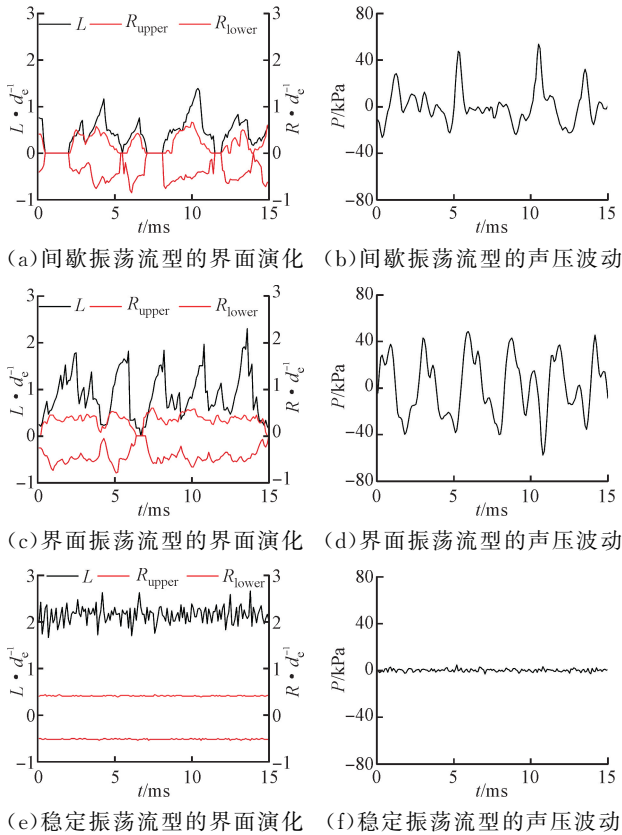


图 4 典型凝结流型下的界面演化及声压波动规律
Fig. 4 Interface evolution and sound pressure fluctuation under typical condensation regimes

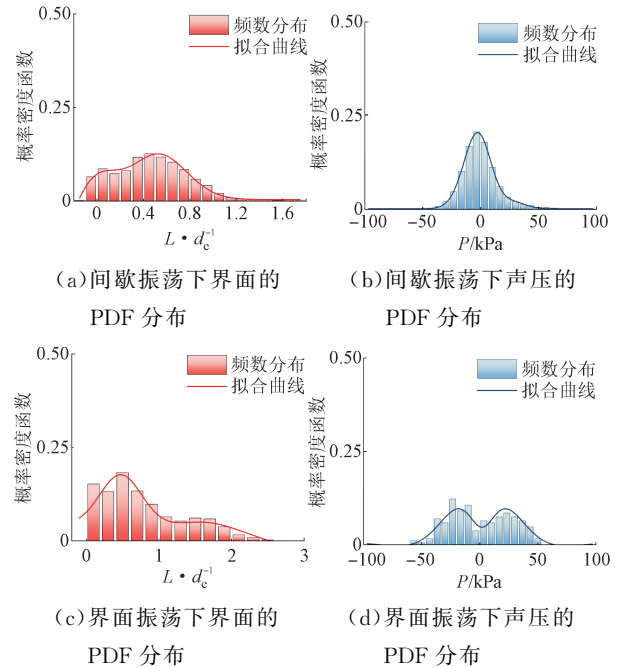
表 3 界面及声压 PDF 分布的拟合模型
Table 3 The fitting model of PDF distribution of interface and sound pressure

流型类型	界面 PDF 的拟合模型	声压 PDF 的拟合模型
间歇振荡	GCAS	GCAS
界面振荡	PsdVoigt1	PsdVoigt1
稳定流型	PearsonⅦ	PearsonⅦ

当供汽速率大于蒸汽冷凝速率,但不足以保持相对稳定的两相界面时,出现界面振荡凝结流型。在该流型下,喷嘴出口形成帽状气泡。从喷嘴出口到射流末端的长度一般在喷嘴的内径范围内。如图

4(c)所示,界面振荡流型的气羽界面轴向振荡幅度为 $0 \sim 2.74d_e$,其平均长度为 $0.78d_e$ 。气羽上部界面的径向振荡为 $0 \sim 0.94d_e$,平均长度为 $0.31d_e$ 。气羽下部界面的径向振荡为 $-0.98d_e \sim 0d_e$,平均长度为 $-0.42d_e$ 。同时其声压波动呈近似正弦曲线,如图 4(d)所示。在界面振荡流型下声压振荡的 PDF 呈现出双峰分布,可通过 Pseudo-Voigt 模型,即 PVoigt1 模型拟合,其峰值较间歇流型较低,表明界面振荡流型的声压振荡强度高于间歇流型。根据表 3 所示,气羽界面的轴向振荡的 PDF 分布也可通过 PsdVoigt1 模型精确拟合。

当蒸汽质量流速较高且过冷水的过冷度较高时,射流气羽可以保持一个几乎稳定的界面,而不会有大气泡从界面脱落,将该凝结状态定义为稳定流型。在该流型下,射流气羽后为一个两相区。小的蒸汽泡不断地从气羽尾部落下,与过冷水均匀混合,最终在距离喷嘴出口较远的地方凝结并完全湮灭。如图 4(e)所示,该凝结流型下气羽界面的轴向振荡幅度为 $1.65d_e \sim 3.05d_e$,其平均长度为 $2.21d_e$ 。 z 为 $0.19d_e$ 处上半部气羽的径向界面振荡在 $0.39d_e \sim 0.44d_e$ 范围内,其平均长度为 $0.42d_e$ 。气羽上部界面的径向振荡为 $0 \sim 0.94d_e$,平均长度为 $0.26d_e$ 。气羽下部界面的径向振荡为 $-0.55d_e \sim -0.50d_e$,平均长度为 $-0.52d_e$ 。表明射流界面的轴向及径向振荡较其余两种凝结流型最为稳定。同时稳定流型下声压振荡幅度最低,其 PDF 分布为 0 kPa 附近的对称单峰分布,其峰值远高于其他两个凝结流型。该流型下声压及界面的 PDF 都可通过 PearsonⅦ模型精确拟合,如图 5 所示。



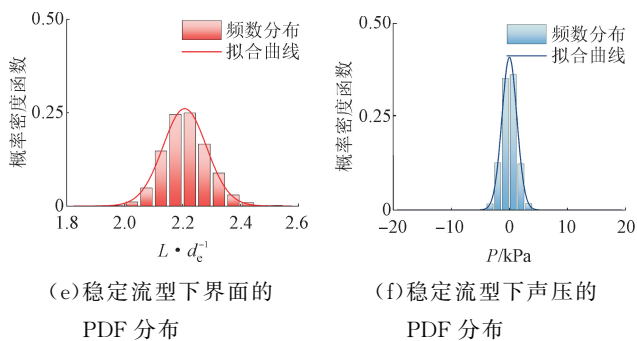


图 5 典型凝结流型下界面演化及声压波动的 PDF 分布特征

Fig. 5 PDF of interface evolution and sound pressure oscillation under typical condensation regimes

2.2 界面及声压振荡随蒸汽质量流速的变化

图 6 给出了气羽的径向、轴向界面振荡强度及声压振荡强度随蒸汽质量流速的变化。 $Re_w = 29\,974$, $T_w = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_w = 145\text{ kPa}$ 。通常情况下,采用物理量的标准差、平均值、最大值及最小值来衡量物理量的振荡强度,标准差可用于数据集离散程度的描述。为消除气羽径向、轴向平均长度的影响,定义无量纲径向界面振荡 $R \cdot R_m^{-1}$ 及无量纲轴向界面振荡 $L \cdot L_m^{-1}$,其中 R_m 代表气羽上部、下部界面的平均直径, L_m 代表气羽轴向界面平均长度。

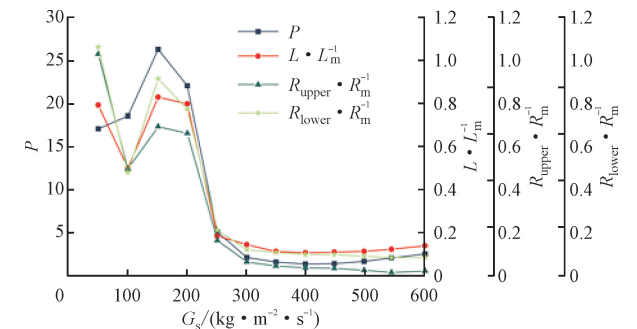


图 6 界面及声压振荡强度随蒸汽质量流速的变化

Fig. 6 Variations of the intensities of interface oscillations and sound pressure oscillations with steam mass flux

随着蒸汽质量流速 G_s 的增加,声压振荡强度 P 呈现先上升后快速下降的趋势。在 G_s 为 $250\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 后,降速放缓。当 G_s 为 $50 \sim 100\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,凝结流型处在间歇凝结流型内,随着 G_s 的增大, P 呈现缓慢增大趋势,这是由于在低 G_s 时的 P 主要受喷嘴内外压差的影响,是流体动力学压差主导控制的现象。当 G_s 为 $150 \sim 200\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,处在界面振荡流型内,随着 G_s 的增大 P 快速下降,但在界面振荡流型内的 P 整体高于间歇凝结流型。继续增大 G_s 至稳定流型,此时

P 快速衰减至极低水平。无量纲径向界面振荡 $R \cdot R_m^{-1}$ 及无量纲轴向界面振荡 $L \cdot L_m^{-1}$ 与 P 随 G_s 的变化规律类似。

统计学通常利用相关系数来描述物理量间的相关程度。因此,本文采用相关系数定量分析气羽径向、轴向界面振荡及声压振荡间的关系,结果见表 4。射流声压振荡强度与界面振荡强度之间呈强相关性,与无量纲界面轴向振荡 $L \cdot L_m^{-1}$ 的相关系数最高为 0.97,与无量纲下界面径向振荡 $R_{\text{lower}} \cdot R_m^{-1}$ 的相关系数次之,与无量纲上界面径向振荡 $R_{\text{upper}} \cdot R_m^{-1}$ 的相关系数最低为 0.89,但也处在强相关性的范围内。界面的轴向振荡与径向振荡间也体现为强相关性,相关系数不低于 0.96。

表 4 声压振荡与界面振荡的相关系数分布
Table 4 Correlation coefficient distribution of sound pressure oscillation and interface oscillation

参数	相关系数			
	P	$L \cdot L_m^{-1}$	$R_{\text{upper}} \cdot R_m^{-1}$	$R_{\text{lower}} \cdot R_m^{-1}$
P	1.00	0.97	0.89	-0.92
$L \cdot L_m^{-1}$	0.97	1.00	0.96	-0.98
$R_{\text{upper}} \cdot R_m^{-1}$	0.89	0.96	1.00	-0.99
$R_{\text{lower}} \cdot R_m^{-1}$	-0.92	-0.98	-0.99	1.00

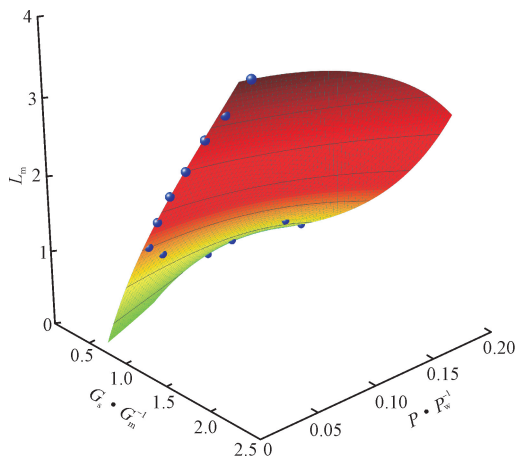
2.3 蒸汽射流喷射长度预测模型

射流喷射长度是热工系统设备结构设计的重要依据,如蒸汽喷射器中扩散通道的长度。因此,定量描述蒸汽气羽的形状和尺寸对于工业应用有十分重要的意义^[24-25]。由前所述,无量纲蒸汽喷射长度 L_m 与声压振荡强度 P 表现出极强相关性。根据文献[9]研究结果,蒸汽质量流速对蒸汽喷射长度也有重要影响作用。因此考虑声压振荡强度及蒸汽质量流速两个关键参数,利用 rational Taylor 非线性曲面拟合模型,建立了无量纲蒸汽喷射长度 L_m 的预测关联式

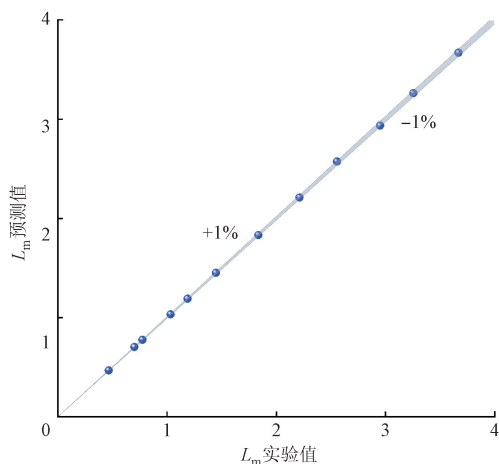
$$L_m = (-4.32 + 6.56(G_s/G_m) + 61.04(P/P_w) - 157.78(P/P_w)^2 - 27.63(G_s/G_m)(P/P_w))/(1 + 1.27(G_s/G_m) + 17.39(P/P_w) - 0.21(G_s/G_m)^2 - 25.37(P/P_w)^2 - 8.35(G_s/G_m)(P/P_w)) \quad (4)$$

式中: G_m 为标准蒸汽质量流速, $275\text{ kg/m}^2\text{s}$; P_w 为过冷水压力, 0.145 MPa 。同时, G_s/G_m 在 $0.18 \sim 2.18$ 的范围内,而 P/P_w 在 $0.01 \sim 0.18$ 的范围内, L_m 在 $0.47 \sim 3.67$ 的范围内。预测曲面如图 7(a) 所示,蓝色小球代表实验测得的射流喷射长度。预测误差如图 7(b) 所示,射流喷射长度 L_m 的大部分实

验数据与预测值的误差在 $\pm 1\%$ 的范围内,预测值也处在 $0.47\sim 3.67$ 的范围内。



(a)射流喷射长度预测模型



(b)射流喷射长度预测误差

图7 射流喷射长度预测模型及其预测误差

Fig.7 Jet penetration length prediction model and its error

3 结 论

本文采用高速摄像机与高频水听器,捕捉了射流界面的演化及其诱导的声压。主要分析了间歇振荡、界面振荡及稳定流型下射流界面与声压振荡特性及其内在关联,得出的主要结论如下。

(1) 获得了3种典型凝结流型下的界面演化及声压特性,通过PDF分析发现,声压分布在间歇流型下呈左偏单峰分布,在界面振荡流型下呈双峰分布,而在稳定流型下呈对称单峰分布。

(2) 描述了界面振荡强度及声压振荡强度随蒸汽质量流速的变化规律。随蒸汽质量流速升高,无量纲径向、轴向界面振荡强度及声压振荡强度整体呈下降趋势,界面振荡与声压振荡之间具有强相关性。

(3) 建立了引入声压参数的无量纲射流喷射长度的预测模型,预测值与实验值的误差在 $\pm 1\%$ 内。通过对界面及声压振荡的概率密度分布及相关系数的定量分析,可知蒸汽射流凝结的声压振荡是由其界面振荡引起的。

参考文献:

- [1] 武心壮,邱斌斌,种道彤,等.单喷嘴蒸汽射流凝结引起的压力振荡研究[J].西安交通大学学报,2014,48(1):48-52.
WU Xinzhuang, QIU Binbin, CHONG Daotong, et al. Pressure oscillation induced by steam jet condensation in water through a nozzle [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(1): 48-52.
- [2] 刘光耀,严俊杰,潘冬冬,等.超音速蒸汽射流气羽形状及压力分布的实验研究[J].工程热物理学报,2010,31(5):781-784.
LIU Guangyao, YAN Junjie, PAN Dongdong, et al. Research on the steam plume shape and pressure fields of supersonic steam jet in subcooled water [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31 (5): 781-784.
- [3] 李海波,田茂诚,屈晓航.不凝气体对蒸汽射流冷凝影响的数值研究[J].化工学报,2020,71(S2):135-141.
LI Haibo, TIAN Maocheng, QU Xiaohang. Numerical investigation of influence of non-condensable gas on steam jet condensation [J]. CIESC Journal, 2020, 71 (S2): 135-141.
- [4] 王方年,秦欢,陈薇,等.过冷水中超音速蒸汽射流形状特征及冷凝传热[J].动力工程学报,2017,37(11):918-924.
WANG Fangnian, QIN Huan, CHEN Wei, et al. Shape feature and condensation heat transfer of supersonic steam jet in subcooled water [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2017, 37 (11): 918-924.
- [5] CHAN C K, LEE C K B. A regime map for direct contact condensation [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1982, 8(1): 11-20.
- [6] WEILAND C, VLACHOS P P. Round gas jets submerged in water [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2013, 48: 46-57.
- [7] KHAN A, SANALLAH K, TAKRIFF M S, et al. Pressure stresses generated due to supersonic steam jet induced hydrodynamic instabilities [J]. Chemical Engineering Science, 2016, 146: 44-63.
- [8] XU Qiang, YE Shuyan, CHEN Yanshuang, et al.

- Condensation regime diagram for supersonic and subsonic steam jet condensation in water flow in a vertical pipe [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 130: 62-73.
- [9] XU Qiang, GUO Liejin, CHANG Liang. Mechanisms of pressure oscillation in steam jet condensation in water flow in a vertical pipe [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 110: 643-656.
- [10] CHO S, CHUN S Y, BAEK W P, et al. Effect of multiple holes on the performance of sparger during direct contact condensation of steam [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2004, 28(6): 629-638.
- [11] HONG S J, PARK G C, CHO S, et al. Condensation dynamics of submerged steam jet in subcooled water [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2012, 39: 66-77.
- [12] XU Qiang, LIU Weizhi, LI Wensheng, et al. Experimental investigation on interfacial behavior and its associated pressure oscillation in steam jet condensation in subcooled water flow [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 145: 118779.
- [13] TANG Jiguo, YAN Changqi, SUN Licheng. Feature of acoustic sound signals involved in vapor bubble condensation and its application in identification of condensation regimes [J]. *Chemical Engineering Science*, 2015, 137: 384-397.
- [14] DEANE G, CZERSKI H. The acoustic excitation mechanism of bubbles released from a nozzle [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, 123(S5): 3558.
- [15] CHICHARRO R, VAZQUEZ A. The acoustic signature of gas bubbles generated in a liquid cross-flow [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, 55: 221-227.
- [16] MANASSEH R, RIBOUX G, RISSO F. Sound generation on bubble coalescence following detachment [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2008, 34(10): 938-949.
- [17] FEUILLADE C. Acoustically coupled gas bubbles in fluids: time-domain phenomena [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2001, 109(6): 2606-2615.
- [18] AJBAR A, AL-MASRY W, ALI E. Prediction of flow regimes transitions in bubble columns using passive acoustic measurements [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2009, 48(1): 101-110.
- [19] AL-MASRY W A, ALI E M, AQEEL Y M. Effect of antifoam agents on bubble characteristics in bubble columns based on acoustic sound measurements [J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61(11): 3610-3622.
- [20] AL-MASRY W A, ALI E M, AL-KALBANI M N. Prediction of regime transitions in bubble columns using acoustic and differential pressure signals [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2007, 133(1/3): 139-149.
- [21] 岳晓宇, 王禄涛, 种道彤, 等. 不稳定蒸汽射流凝结振荡实验研究 [J]. *动力工程学报*, 2019, 39(11): 900-905.
- YUE Xiaoyu, WANG Lutao, CHONG Daotong, et al. Experimental investigation on condensation oscillation characteristics of unstable steam jet [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2019, 39(11): 900-905.
- [22] HONG Aoyue, XU Qiang, JIANG Shuaizhi, et al. Experimental study of interface behavior and sound pressure oscillation of direct contact condensation of a steam jet in flowing water [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2024, 150: 111054.
- [23] CLERX N, VAN DEURZEN L G M, PECENKO A, et al. Temperature fields induced by direct contact condensation of steam in a cross-flow in a channel [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2011, 47(8): 981-990.
- [24] ZHAO Quanbin, CHONG Daotong, CHEN Weixiong, et al. Review: steam cavity characteristics of steam submerged jet condensation at SC regime [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2020, 130: 103560.
- [25] 邱斌斌, 赵全斌, 赵伟月, 等. 蒸汽射流压力振荡主频分析及强度特性 [J]. *化工学报*, 2014, 65(S1): 39-43.
- QIU Binbin, ZHAO Quanbin, ZHAO Weiyue, et al. Frequency analysis and amplitude characteristics of pressure oscillation for steam jet [J]. *CIESC Journal*, 2014, 65(S1): 39-43.

(编辑 武红江)