

低过冷流场中蒸汽水下 喷注直接接触冷凝声学特性研究

李勇, 林原胜, 肖颀*, 王苇, 李少丹, 魏志国

(武汉第二船舶设计研究所 热能动力技术重点实验室, 湖北 武汉 430205)

摘要:低过冷流场中蒸汽水下喷注直接接触冷凝(DCC)是核动力舰船冷凝器热井鼓泡除氧的热力基础,该过程涉及强湍动、相变、多相流等复杂行为,可诱发强烈的流场压力脉动与辐射噪声,是影响舰船声隐身性能的重要因素。针对该问题,本文通过实验对流场过冷度 2.8~14.7 °C 范围内蒸汽水下喷注 DCC 过程的汽羽流型演化和声学特性进行研究。结果表明,蒸汽质量流速和流场过冷度对汽羽流型演化具有不同的作用机制和影响规律。低过冷流场中,蒸汽水下喷注冷凝噪声具有宽频特征;流场过冷度极低时,低频噪声占辐射噪声的主导地位,随流场过冷度的增大,高频噪声的贡献逐渐提升。

关键词:低过冷流场;直接接触冷凝;汽羽流型;声学特性

中图分类号:TL33 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-6931(2020)08-1395-08

doi:10.7538/yzk.2019.youxian.0641

Investigation on Acoustic Characteristic of Direct Contact Condensation of Steam Injected into Water under Low Sub-cooled Water

LI Yong, LIN Yuansheng, XIAO Qi*, WANG Wei, LI Shaodan, WEI Zhiguo

(Science and Technology on Thermal Energy and Power Laboratory,

Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430205, China)

Abstract: Bubbling deaeration is widely applied in marine steam power system (MSPS), and direct contact condensation (DCC) of steam injected into water under low sub-cooled water is the thermodynamic foundation of this technology. The deaeration process involves complex thermal and hydraulic behaviors, such as violent turbulence, interfacial mass transfer, and multiphase flow etc., which induce significant pressure fluctuation and radiated noise. And it is an important element affecting the acoustic stealthiest of marine. In this paper, the two-phase flow regimes and acoustic characteristics of DCC of steam injected into water were studied for sub-cooled temperature ranging from 2.8 °C to 14.7 °C. It is found that both the steam mass flux and the sub-cooled temperature have significant influences on steam plume behaviors. Wide-band noise was

收稿日期:2019-08-26;修回日期:2019-10-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51706159,51706158)

作者简介:李勇(1984—),男,湖南益阳人,高级工程师,博士,核能科学与工程专业

*通信作者:肖颀, E-mail: zhiyan7@sina.com

网络出版时间:2020-01-16;网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20200115.1606.010.html>

observed during the low sub-cooled DCC process. Low-frequency component occupies the dominant position of radiated noise at very low sub-cooled temperature conditions. The contribution of high-frequency noise increases gradually with sub-cooled temperature.

Key words: low sub-cooled water; direct contact condensation; steam plume pattern; acoustic characteristic

舰船核动力装置运行过程需对给水进行深度除氧,以抑制管路和设备腐蚀^[1]。为节省舱室空间,常采用冷凝器热井鼓泡除氧方案,加热蒸汽以水下喷注的方式进入热井低过冷凝水空间并将其加热至近饱和温度,促使凝水中溶解氧析出。低过冷流场中蒸汽水下喷注直接接触冷凝(DCC)的深入研究,是优化舰船核动力装置鼓泡除氧的关键^[2-3]。相比传统中、高过冷流场中的蒸汽-水 DCC,该物理过程表现出新的特征:一方面,由于流场过冷度低、蒸汽凝结势小,射流汽羽流型结构及其演变呈现新的特征,是决定冷凝速率和除氧深度的关键因素;另一方面,该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,诱发强烈的流场辐射噪声,是制约舰船隐身性能提升的重要因素。

目前,蒸汽水下喷注 DCC 相关研究主要集中在中、高过冷流场环境^[4-8],低过冷流场环境的研究很少。由于流场过冷度的大幅降低,水下喷注汽羽的动态特性与中、高过冷流场环境

存在很大差异,是影响汽羽流型演化、冷凝速率和声学特性的关键因素,目前还缺乏对其深入的了解和掌握。针对上述需求,本文通过开展低过冷流场中蒸汽水下喷注 DCC 声学特性研究,识别低过冷流场中喷注汽羽两相流型演化及参数影响规律,揭示流场热工水力行为与辐射噪声之间的内在关联,可为深化相关噪声控制理论与方法提供指导。

1 实验系统及原理

实验系统如图 1 所示,主要由蒸汽供应系统、低过冷实验水箱、参数测量系统等组成。

蒸汽从蒸汽发生装置产生后,经蒸汽总管分为两条支路:支路 a 的蒸汽通过稳压罐后经喷管水平通入低过冷实验水箱,在其中发生水下喷注、冷凝溃灭等复杂行为并诱发辐射噪声,是实验的主要研究对象;支路 b 的蒸汽经蒸汽冷却器冷却后,通过储液罐重新返回蒸汽发生装置。分别测量蒸汽总管和支路 b 的蒸汽流量,两者相减可得支路 a 向实验水箱的喷注流

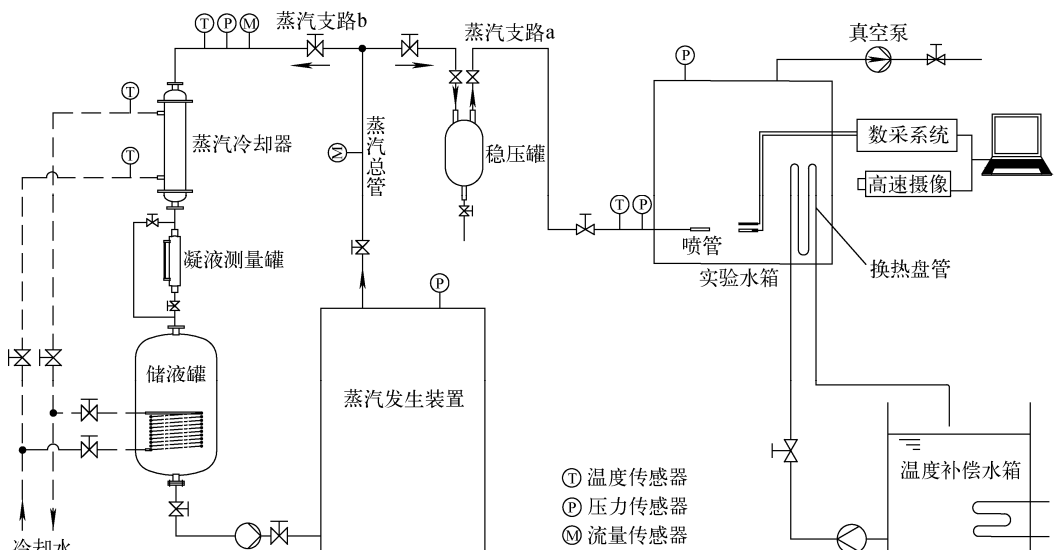


图 1 实验系统原理图

Fig. 1 Schematic of experiment system

量,从而解决小流量下蒸汽流量测量的难题。实验开始前,支路 a 全部蒸汽通过支路 b 经蒸汽冷却器冷凝后返回蒸汽发生装置,此时,蒸汽总管与支路 b 的蒸汽流量应一致。通过蒸汽冷却器底部的凝液测量罐,测得冷凝后的凝液体积流量,经换算用于修正蒸汽总管和支路 b 两台涡街流量计之间的偏差。在蒸汽管路、喷管出口位置、实验水箱内分别布置热电偶测点以获取相关位置的温度参数,热电偶使用前经恒温水浴标定。通过上述措施,减少实验参数测量误差,满足实验精度要求。此外,实验水箱内设置换热盘管和抽气系统,可精确调控水箱温度、压力。实验系统整体保温良好,蒸汽管路采取辅助加热以补偿向环境的散热,确保水箱入

口的喷注蒸汽处于饱和状态。实验系统和测量仪器主要参数列于表 1、2。

表 1 实验系统主要参数

Table 1 Main parameters of experimental system

参数	数值
实验水箱尺寸,mm	1 200×1 000×1 500
喷嘴直径,mm	6
蒸汽质量流速,kg/(m ² ·s)	9.2~231.1
水箱过冷度,℃	2.8~14.7
入口蒸汽压力,MPa	0.2(绝对压力)
实验水箱压力,MPa	0.05(绝对压力)
喷嘴浸没深度,mm	1 000

表 2 实验测量仪器主要参数

Table 2 Main parameters of experimental measuring instrument

测量仪器	型号	量程	精度等级
热电偶	T 型	0~350 ℃	±0.5 ℃
精密压力表		0~0.4 MPa	0.4 级
动态压力传感器	WMS-40P2J2L2M0	-0.1~0.2 MPa	<0.25%
涡街流量计	8800DR010	0.7~26.8 m/s	1.5 级
水听器	B&K 8105	0.1 Hz~100 kHz	(-205±2) dB (参考值 1 V/μPa)

实验过程中,借助蒸汽调节阀,控制向实验水箱的蒸汽喷注流量;通过喷管上游的温度、压力测点,实时监测蒸汽喷注参数。针对喷注蒸汽在实验水箱中的两相流型演化和辐射噪声行为,借助可视化摄像、微型热电偶、压力脉动传感器、高灵敏水听器等测量手段,分别对汽羽廓形、流场参数、声学特性进行测量。其中,汽羽流型采用在实验水箱两对侧面开设观察窗,一侧高速摄像拍摄、另一侧平板光源打光的方式进行。通过上述方法,获得汽羽演化特性与流场细致结构以及其与喷注参数、流场参数之间的影响关系,在此基础上,通过对噪声信号时频域特征的分析,进一步揭示辐射声学特性及其与流场参数、汽羽流型之间的内在关联。

2 结果分析

2.1 汽羽流型演化

蒸汽以水下喷注方式进入低过冷实验水箱,其流型受喷注参数、流场参数的共同影响。

由于流场过冷度低,冷凝换热能力较中、高过冷流场大幅减弱^[9-10],动力学因素对流型演化的影响更为显著。图 2 为蒸汽喷注压力 0.2 MPa(绝对压力)、实验水箱压力 0.05 MPa(绝对压力)、流场过冷度 6.9~7.5 ℃时不同入口蒸汽流速下的汽羽流型演化图像。图中, α 为汽羽锥角; l 为汽羽穿透距离。可看出,随入口蒸汽流速的增加,汽羽形态及穿透距离均发生显著变化。

蒸汽质量流速 9.2 kg/(m²·s)时(图 2a),蒸汽离开喷管后以振荡汽泡形态在流场中呈现,冷凝发生在汽泡表面与流场接触的两相界面。此时,蒸汽喷注流量和射流速度势均很小,蒸汽进入实验水箱后,在与周围流场压力差的作用下汽泡体积开始膨胀;随着汽泡体积增大,汽-水接触相界面增加,冷凝过程增强,汽泡在达到其最大尺寸后出现收缩。在压差力、惯性和相界面冷凝的协同作用下,汽泡呈周期性的生长与塌缩,在此过程中,汽泡形态还受表面

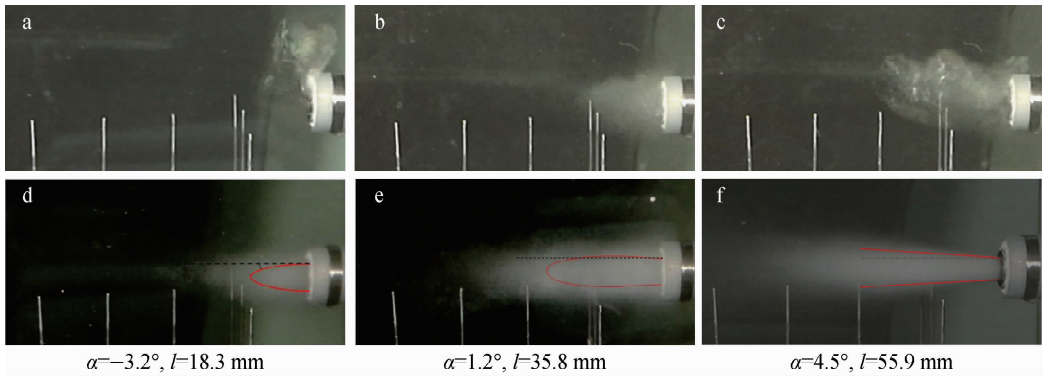


图2 不同蒸汽质量流速下汽羽流型演化

Fig. 2 Steam plume patterns of different steam mass velocities

张力、浮力、流场扰动等因素的共同影响而发生不规则变形,并在重力影响下有向上浮升的趋势。

蒸汽质量流速 $24.6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时(图 2b),蒸汽在喷管出口的射流速度势逐渐克服水箱阻力,流场形态由振荡汽泡转变为振荡的钝锥形汽羽。在与汽羽毗邻的热水层,受蒸汽射流混合效应影响,流场热水卷吸进入汽羽表层,使汽羽表面连续界面遭到破坏,宏观上表现为由气、液两相组成的混合泡群。泡群的出现,增大了汽、水两相之间接触面积,也增强了汽羽与流场之间的冷凝换热,使泡群具有塌缩溃灭的趋势,而来自喷管的补充蒸汽又使泡群具有生长膨胀的趋势。在两者的动态平衡下,汽羽整体呈周期性的凝结振荡。

蒸汽质量流速增至 $63.6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时(图 2c),蒸汽射流速度势进一步增大,汽羽在流场中的穿透距离也随之增长,宏观上表现为廓形不规则的脉动汽柱。汽柱中心为由蒸汽组成的汽核;汽核周围为射流卷吸流场热水形成的两相混合介质。受汽柱整体脉动的影响,气、液两相之间的动量、热量和质量传递均增强。一方面,增大了汽柱外层与毗连热水层之间的能质交换,流场中更多的热水进入汽柱内部并与之进行冷凝换热;另一方面,增强了流场湍动度及扰流效应,并导致汽羽整体呈不稳定的脉动状态。

蒸汽质量流速增至 $111.2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时(图 2d),喷注汽羽进入稳定冷凝阶段,其形状为锥形或椭圆形,并可观测到汽羽膨胀现象。由于射流夹带作用的持续增强,大量热水卷吸

进入汽羽内部,使之形成围绕汽核中心、数量众多的离散汽泡,进一步增大了气、液两相之间的冷凝接触面积。在蒸汽的持续冷凝下,外层汽泡不断坍塌并由内层蒸汽持续补充;在远离喷管的汽羽末端,大部分蒸汽已经冷凝,少量未冷凝蒸汽在流场中形成弥散的汽泡尾群并在流动过程中冷凝溃灭直至消失。

蒸汽质量流速达到 $191.8 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时(图 2e),汽羽形态由锥形演变为长锥形,穿透距离和膨胀直径均进一步增加,汽羽核心对表层汽泡约束能力降低,其整体廓形呈动态脉动并可观察到部分汽泡摆脱汽羽约束进入毗邻热水层;在远离喷管的汽羽末端,由于射流速度势的减弱和冷凝的持续进行,汽泡分散度很大,羽流尾部呈来回摆动,但整体仍呈收缩形态。总体而言,由于不稳定因素的增长,汽羽形状、分散度、稳定性等均发生较为显著的变化。

蒸汽质量流速达到 $231.1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时(图 2f),汽羽形态由长锥形演变为发散型。在喷管出口位置,蒸汽射流速度势发挥主导作用,汽羽未出现膨胀,其直径与喷管尺寸相当。在蒸汽的强射流卷吸作用下,流场热水被大量卷吸进入汽羽内部并夹带向前运动;随汽羽穿透距离的增加,射流速度势减弱,汽羽廓形逐渐发散、膨胀。被卷吸进入汽羽内部的水与蒸汽充分混合,形成弥散的两相状态,气、液两相之间发生持续的冷凝换热和传质行为,气相含率不断降低直至发展为弥散在流场中的泡群;在远离喷管的汽羽末端,泡群呈发散状的羽流形状。

流场过冷度是影响蒸汽水下喷注 DCC 的

另一个重要因素。图3示出了蒸汽质量流速 $67 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、流场过冷度 $2.8 \sim 14.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 时水箱内喷注汽羽流型演化图像。从图3a~f,流场过冷度依次增大,汽羽廓形及穿透距离呈现新的特征。一般地,流场过冷度很低时,蒸汽与水之间冷凝换热能力很弱,且汽羽周围的热水层很容易达到近饱和温度,汽羽在流场中可维持

较长穿透距离;随流场过冷度的增加,气、液两相之间传热温差增大,有利于冷凝换热的进行,从而加快汽羽表层泡群的冷凝和溃灭,汽羽在流场中的穿透距离逐渐减小;当流场过冷度增至一定值后,蒸汽凝结势力与射流速度势达到平衡,进入稳定冷凝阶段,汽羽廓形发展为稳定的锥形,与文献[11-12]观测结果基本一致。

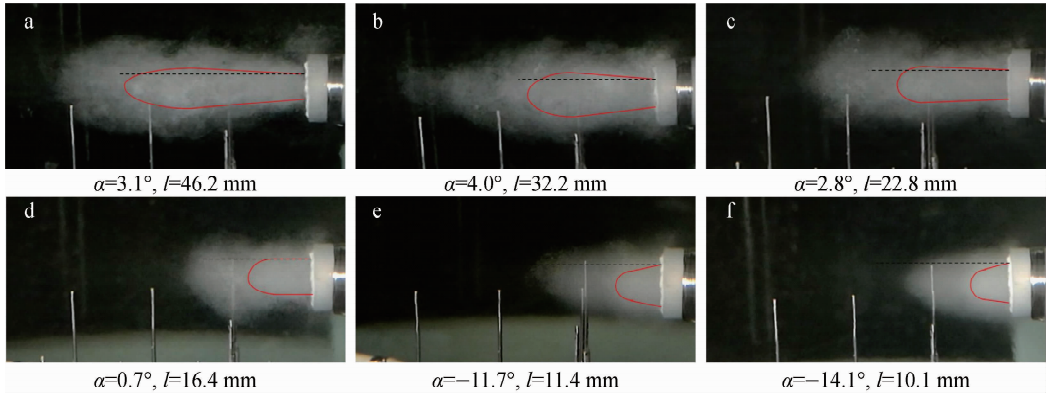


图3 不同流场过冷度下汽羽流型演化

Fig. 3 Steam plume patterns with different sub-cooled temperatures

结合本文实验参数和汽羽图像,具体分析如下。流场过冷度 $2.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 时(图3a),蒸汽与水之间冷凝换热能力很弱,射流速度势发挥主要作用。汽羽穿透距离长,汽羽表面呈扩散状振荡并出现不规则摆动,由此诱发流场速度和压力脉动。流场过冷度增至 $6.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 时(图3b),随气、液两相间冷凝换热能力增强,喷管出口附近汽羽显著膨胀,其整体廓形的分散度和穿透距离均降低;在汽羽末端,由于射流速度势减弱和蒸汽持续冷凝,气相体积分数减小,可观测到汽羽末端振荡和尾流泡群的出现。

流场过冷度 $8.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 时(图3c),汽羽整体呈表面不规则脉动的长汽柱,毗邻流场的水卷吸入汽羽区后与蒸汽进行搅混和冷凝换热,汽羽外层的大气泡破碎为数量众多的小气泡并弥散于流场中,在流动过程发生复杂的碰撞、聚并、冷凝、溃灭等行为,使汽羽整体呈动态波动。流场过冷度增至 $10.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 时(图3d),蒸汽凝结势进一步加强,汽羽整体呈振荡的短汽柱形态,穿透距离大幅减小,径向膨胀度也降低。

流场过冷度增至 $13.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 时(图3e),汽羽整体廓形发展为较为稳定的锥形或长锥形,其

穿透距离及表面形态均发生小幅振荡;由于冷凝换热持续增强,汽羽外层区域气、液两相之间传热传质速率加大,汽羽体积有塌缩的趋势,但来自喷管的蒸汽持续向汽羽补充以维持其体积;在蒸汽喷注与蒸汽冷凝两种机制的协同作用下,汽羽处于动态平衡状态。流场过冷度达到 $14.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 后(图3f),汽羽整体发展为稳定的锥形,流场进入稳定冷凝阶段。

2.2 噪声时域特征分析

图4为与图3工况相对应的冷凝噪声时域特征曲线。流场过冷度 $2.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,喷注蒸汽与流场之间的冷凝换热能力很微弱,蒸汽在离开喷管进入流场后,受射流速度势和压差膨胀的双重影响,汽羽流型呈扩散状振荡,由此诱发流场速度和压力的宏观脉动,导致声压时域曲线呈明显的低频周期特性(图4a)。此时,声压时域曲线较为光滑,其变化周期约 0.05 s ;各周期之间声压振幅出现波动,最小振幅 $\pm 500 \text{ Pa}$,最大振幅 $\pm 1300 \text{ Pa}$,该振幅变化与汽羽流型振荡相关。流场过冷度增至 $6.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,蒸汽与流场之间的冷凝换热能力有所增强,相界面质量、能量交换速率和运动速度均增大,声压信号分

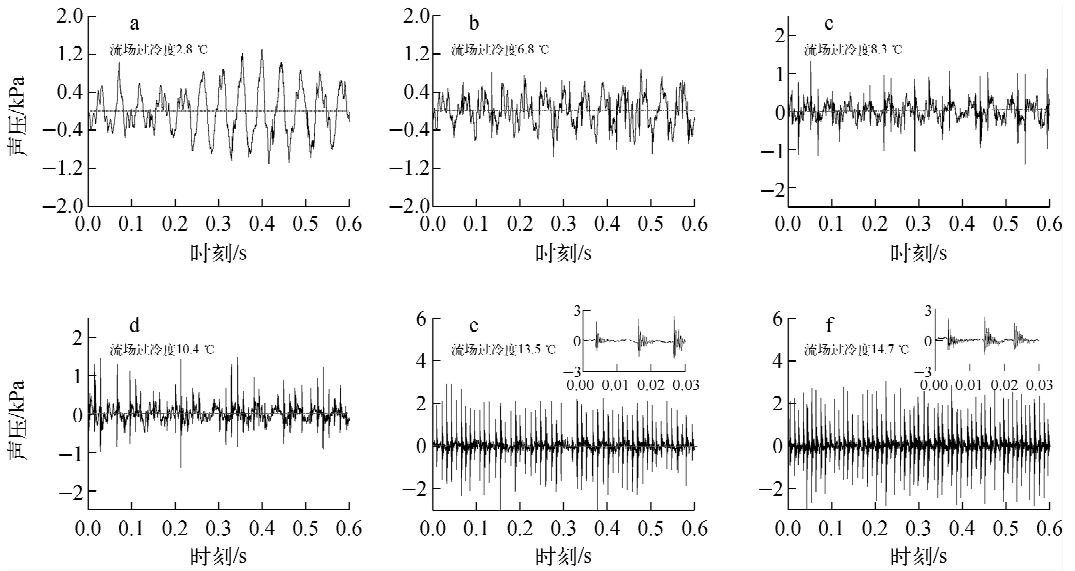


图4 不同流场过冷度下冷凝噪声声压时域特征

Fig. 4 Time domain features of condensation noise with different sub-cooled temperatures

布变紧凑,振幅减小至 ± 900 Pa,同时,声压时域曲线上叠加有振幅较小的锯齿状信息,表明冷凝伴随的高频信息有所增强,但整体上仍可较为直观地显示出低频特征(图4b)。

随流场过冷度的升高,蒸汽冷凝换热能力增强。结合对汽羽流型的分析,流场过冷度 8.3 °C时,汽羽整体呈不规则的长汽柱形,处于汽羽外层的蒸汽在流场中与液相混合,离散气泡逐渐增多,形成泡状羽流。气、液两相之间存在复杂的流动搅混、气泡变形、冷凝溃灭等行为,导致流场速度扰动和压力脉动加剧,并对其声学特征产生影响,使声压时域曲线振幅回升至 $\pm 1\ 200$ Pa,同时,声压信号分布紧密、锯齿增多,说明在低频信息的基础上叠加了丰富的高频信息(图4c)。流场过冷度增至 10.4 °C时,汽羽与流场之间传热传质行为进一步加强,声压时变曲线中的高频特征更为显著,声压信号分布更加紧凑,振幅增至 $\pm 1\ 500$ Pa(图4d)。

流场过冷度增至 13.5 °C时,声压时域曲线呈现明显的中高频特征。通过对时程坐标的放大,可发现声压时域信号具有周期性特征,其周期 0.01 s、最大振幅约 $\pm 3\ 000$ Pa。在1个周期内,首先出现1个高振幅声学信号,随后伴随多个振幅逐渐衰减的声学信号;当振幅衰减至0后,进入下一个声压振荡周期(图4e)。流场过冷度达到 14.7 °C,声压时域曲线的整体特征与

图4e相似,但声压信号从最高振幅衰减至0所经历的振荡周期增多。结合对汽羽流型的分析,这是因为随流场过冷度的进一步增加,气、液两相之间冷凝换热能力大幅增强;汽羽在流场中的穿透距离减小而汽羽内气泡破碎、聚并、冷凝、溃灭等介尺度行为也更强烈,两者共同决定了声压时域曲线向高频特征的演变(图4f)。

2.3 噪声频域特征分析

在噪声时域特征分析的基础上,进一步对其频域特征进行分析。图5为对应图3工况点的噪声频谱特征曲线。可看出,低过冷流场中蒸汽水下喷注DCC噪声具有宽频特征,在 10 Hz~ 10 kHz范围内未出现明显的强特征线

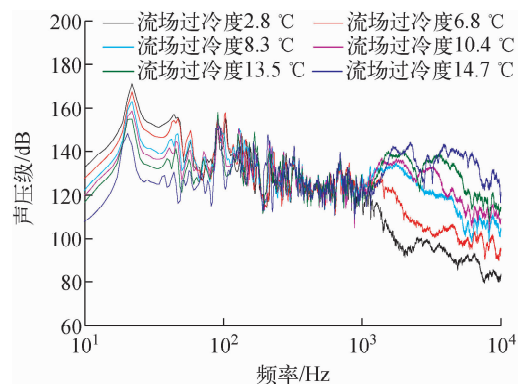


图5 不同流场过冷度下冷凝噪声声压频域特征
Fig. 5 Frequency features of condensation noise with different sub-cooled temperatures

谱。从工况点 a~f, 随流场过冷度的依次增大, 噪声频谱曲线的低频段和高频段呈不同的变化规律: 在 10~100 Hz 的低频区域, 辐射噪声随流场过冷度的增大而逐渐降低; 在 1~10 kHz 的高频区域, 辐射噪声随流场过冷度的增大而提高; 而在 100 Hz~1 kHz 频率范围内, 噪声频谱特征随流场过冷度变化不敏感。从图 5 还可看出, 流场过冷度很低时, 低频噪声占辐射噪声总级的主导地位; 随流场过冷度的增大, 低频噪声所占份额逐渐降低, 高频噪声的作用开始显现。

结合对汽羽流型演化特征的分析, 从机理上探讨低过冷流场中蒸汽水下喷注 DCC 声学特性的变化规律。蒸汽水下喷注时, 其辐射噪声主要来源于喷注汽羽整体振荡等宏观行为以及汽泡生长、聚并、破碎、溃灭等动态行为导致的流场速度与压力脉动, 而由蒸汽射流速度梯度和湍流直接产生的噪声相对较小^[13-15]。流场过冷度很低时, 喷注蒸汽在流场中以周期性膨胀-收缩的振荡型汽羽为主导, 离散汽泡较少; 汽羽宏观脉动对周围流场扰动大, 其诱发的声学行为具有明显的低频特征。随流场过冷度的增大, 冷凝换热能力增强, 汽羽穿透距离缩短, 汽羽体积宏观脉动减弱, 使辐射噪声低频区域声压级逐渐降低, 但另一方面, 流场过冷度增大后, 由于汽羽外层区域离散汽泡增多, 以及汽羽与流场之间冷凝换热速率增大, 汽泡破碎、冷凝溃灭等行为加剧, 导致辐射噪声高频区域声压级逐渐增加。

3 结论

本文围绕低过冷流场中蒸汽水下喷注 DCC 过程汽羽流型演化及其声学特性开展研究, 取得如下主要结论。

1) 蒸汽以水下喷注方式进入低过冷流场形成两相汽羽, 其流型演化受喷注参数、流场参数的共同影响; 通过实验研究, 分别获得不同蒸汽质量流速和流场过冷度下喷注汽羽典型流型图像及其演化规律。

2) 低过冷流场中蒸汽水下喷注 DCC 噪声具有宽频特征。流场过冷度很低时, 低频噪声占辐射噪声的主导地位; 随流场过冷度的增加, 高频噪声在噪声总级中的贡献逐渐提升。

3) 流场过冷度很低时, 蒸汽凝结势小, 汽羽体积脉动诱发的流场扰动是导致低频噪声的重要因素; 随流场过冷度增加, 蒸汽凝结势增大, 离散汽泡破碎、溃灭等宏观行为是导致高频噪声升高的主要因素。

参考文献:

- [1] 彭敏俊. 船舶核动力装置[M]. 北京: 原子能出版社, 2009.
- [2] 朱国情, 程刚, 倪何, 等. 某型船用除氧装置动态数学模型和仿真[J]. 计算机仿真, 2009, 26(7): 104-108.
ZHU Guoqing, CHENG Gang, NI He, et al. Dynamic mathematic model and simulation for a certain type naval deaerator[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 26(7): 104-108(in Chinese).
- [3] 陆文俊, 袁益超. 鼓泡式热力除氧器实验研究[J]. 汽轮机技术, 2011, 53(1): 59-62.
LU Wenjun, YUAN Yichao. Experimental study of the bubble type deaerator[J]. Turbine Technology, 2011, 53(1): 59-62(in Chinese).
- [4] WITH A D. Steam plume length diagram for direct contact condensation of steam injected into water[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009, 30: 971-982.
- [5] YAN J J, WU X Z, CHONG D T. Experimental study on pressure and temperature distributions for low mass flux steam jet in subcooled water[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52: 1 493-1 501.
- [6] XU Q, GUO L J, CHANG L. 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.
- [7] DAHIKAR S K, SATHE M J, JOSHI J B. Investigation of flow and temperature patterns in direct contact condensation using PIV, PLIF and CFD[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65: 4 606-4 620.
- [8] 唐继国, 阎昌琪, 孙立成, 等. 蒸汽流量对蒸汽直接接触冷凝的影响[J]. 航空动力学报, 2016, 31(7): 1 610-1 666.
TANG Jiguo, YAN Changqi, SUN Licheng, et al. Effect of vapor injection rate on direct contact

- condensation of vapor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(7): 1 610-1 666(in Chinese).
- [9] SOON J H, GOON C P, SEOK C, et al. Condensation dynamics of submerged steam jet in subcooled water [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2012, 39: 66-77.
- [10] CHAN C K, LEE C K. A regime map for direct contact condensation[J]. *International Journal of Multiphase*, 1982, 8: 11-20.
- [11] KIM H Y, BAE Y Y, SONG C H, et al. Experimental study on stable steam condensation in a quenching tank[J]. *International Journal of Energy Research*, 2001, 25: 239-252.
- [12] KHAN A, HAQ N U, CHUGHTAI I R, et al. Experimental investigations of the interface between steam and water two phase flows[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 73: 521-532.
- [13] TANG J G, YAN C Q, SUN L C, et al. Effect of liquid subcooling on acoustic characteristics during the condensation process of vapor bubbles in a subcooled pool[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2015, 293: 492-502.
- [14] 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.
- [15] 马宪国. 蒸汽水下喷注噪声的理论分析及实验研究[J]. *华北电力大学学报*, 2003, 30(1): 35-40.
- MA Xianguo. Emission behavior of acoustic noise of steam jet in subcooled water and experimental study[J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2003, 30(1): 35-40(in Chinese).