

有限通道内蒸汽射流凝结压力振荡强度特性

杨小平¹, 陈旖¹, 宗潇¹, 周轮¹, 刘继平^{1*}, 严俊杰²

1. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049 西安;

2. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049 西安

* 联系人, E-mail: liujp@mail.xjtu.edu.cn

2016-04-12 收稿, 2016-05-02 修回, 2016-05-02 接受, 2016-07-08 网络版发表

国家自然科学基金(51176147)资助

摘要 蒸汽喷射器是一种汽液直接接触换热设备, 具有体积紧凑、换热强度大等优点, 在现代工业中有着很好的应用前景。但是, 由于其混合腔内汽相与液相直接接触凝结过程的不稳定性, 会造成装置运行时产生较大的噪音和振动, 不仅形成环境污染且危害设备安全, 限制了该装置的进一步推广。本文针对有限通道内蒸汽射流凝结所引起的压力振荡特性进行实验研究, 揭示噪音与振动产生的机理, 为蒸汽喷射器的设计与运行提供实验指导。实验获得了进汽质量流率 $150\sim 600\text{ kg/m}^2\text{ s}$ 、进水质量流率 $6\times 10^3\sim 18\times 10^3\text{ kg/m}^2\text{ s}$ 、进水温度 $15\sim 40^\circ\text{C}$ 下通道内的动态压力信号, 同时采用高速摄像机捕捉汽液相界面的行为和凝结流型。结果表明: 根据汽液相界面的行为特征可以将流型分为两大类——不稳定流型和稳定流型。对通道内动态压力的振荡强度特性进行研究, 发现随着进水质量流率增加, 压力振荡强度在稳定流型区变化不大, 但是在进入不稳定流型区以后迅速增大; 随着蒸汽质量流率增加, 振荡强度在不稳定流型区内逐渐增加, 进入稳定流型区后迅速降低, 然后在稳定流型区内再次增加; 随着过冷水温度的升高, 振荡强度在整个流型区域内缓慢增加。

关键词 有限通道, 蒸汽射流, 直接接触凝结, 压力振荡, 强度特性

蒸汽喷射器(steam jet injector, SJI)利用蒸汽通过拉法尔喷嘴形成高速汽流, 在狭窄混合腔内与过冷水流直接接触凝结(direct contact condensation, DCC)形成超音速汽液两相流, 通过一个扩散段后产生凝结激波, 实现热水压力突升。该装置较之传统的水泵、换热器, 具有体积小、无运动部件、无动力源、启动快等优点, 被广泛应用于如核反应堆蒸汽发生器的紧急给水系统、先进沸水堆的堆芯冷却系统、混合式加热器、供热系统、工业乏汽回收系统等工业场合^[1,2]。但是, 在SJI的实际运行中, 由于DCC过程的不稳定性而引起的压力振荡会造成装置和管道的振动, 同时产生噪音, 从而对设备造成危害。因此, 有必要研究有限通道内蒸汽射流凝结所引

起的压力振荡特性。

先前学者主要针对汽水参数、结构参数等对SJI的升压性能^[1~3]、装置效率^[4]和焓效率^[5]等的影响进行了研究。但是缺乏对其混合腔内高速蒸汽射流与过冷水直接接触凝结过程机理的研究。已发表的文献中对蒸汽射流凝结压力振荡特性的研究, 主要在大空间过冷水中开展, 针对低蒸汽质量流率下的间歇流^[6]、亚音速蒸汽射流^[7]、音速/超音速蒸汽浸没射流凝结压力振荡强度和主频规律展开研究^[8,9], 并给出相应的主频预测式。但是, 针对类似SJI这样有限空间内蒸汽射流凝结压力振荡特性的研究则相对缺乏。因此, 本文搭建了有限通道内蒸汽射流凝结压力振荡特性研究实验台, 采用高频动态压力传感器

引用格式: 杨小平, 陈旖, 宗潇, 等. 有限通道内蒸汽射流凝结压力振荡强度特性. 科学通报, 2017, 62: 730–736

Yang X P, Chen Y, Zong X, et al. Amplitude characteristics of pressure oscillation caused by steam jet condensation in a confined channel (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 730–736, doi: 10.1360/N972016-00041

获得不同工况下通道内某位置处的动态压力信号,并结合流型的可视化照片分析流型与压力振荡特性之间的关系,揭示压力振荡的产生机理,为寻找降低噪音和振动的方法提供指导。

1 实验系统简介

实验系统主要由电蒸汽锅炉、测试段、主副水箱、水泵、阀门、高速摄像机、照明光源、冷却塔、管路系统以及数据采集系统等组成,如图1所示。实验所需的饱和蒸汽由最大功率为330 kW,最大蒸汽量0.4 t/h的电锅炉产生,通过调整锅炉负荷和进汽调节阀,调节入口蒸汽参数。过冷水由给水泵从主水箱泵入测试段,通过调整进水调节阀的开度来调节过冷水流量。主水箱中过冷水的温度由蒸汽旁路进行加热,通过控制加热时间和蒸汽流量来控制过冷水温度。由于给水泵功率较大,给水泵在工作时易引起管道系统的振动,从而影响动态压力传感器的测试结果。因此,为了消除由给水泵引起的振动,在给水泵与实验段之间采用10 m长的软管连接。

图2所示为测试段简图。测试段主体为不锈钢,蒸汽喷嘴、水喷嘴和通道均为矩形截面结构,蒸汽喷嘴为拉伐尔喷嘴,喉部截面为8 mm×8 mm正方形,出口截面为10 mm×10 mm正方形;水喷嘴位于蒸汽喷嘴正上方,其出口截面为高8 mm×宽10 mm矩形,在出口截面前有长为10 mm的平直段,过冷水进入混合腔前的速度方向为水平方向。在测试段两侧,利用耐高温液体胶把两块厚度为15 mm的钢化玻璃进行

固定形成可视化窗口,钢化玻璃与通道和喷嘴侧面之间没有间隙,使得过冷水仅从蒸汽喷嘴的上方进入腔体,营造了准二维的平面流动结构。利用高速摄像机记录不同工况下腔体内的凝结流型,调整光源位置和强度以获得最佳的拍摄效果。

为了获得通道内的动态压力信号,在无量纲轴向距离为 $x/d_e=19.8$ 处的下壁面上安装了一支高频动态压力传感器(蒸汽喷嘴出口处为 $x/d_e=0$),其量程为0~300 kPa,精度等级0.25级,响应频率为20 kHz,传感器探头实物如图3所示。实验中温度的测量采用K型热电偶,量程0~200℃,精度为1℃;蒸汽流量的测量采用涡街流量计,量程 $7.5\sim 73.89\times 10^{-3}$ kg/s,精度等级1.0级;水流量的测量采用电磁流量计,量程0~2.78 kg/s,精度等级0.2级。实验过程中,动态压力信号数据采用美国NI公司生产的高精度采集模块配合工业控制机和Labview软件完成采集,采样频率设置为5000 Hz。表1所示为测试段的结构参数和本文的实验条件。

2 实验结果与讨论

2.1 流型分析

根据两相流波动理论,由于汽液两相之间所存在的浓度梯度、温度梯度以及速度梯度等巨大差异,使得汽液相界面产生剧烈的波动,这是汽液直接接触凝结不稳定性产生的根本原因。要深入研究其机理,必须研究在不同工况下汽液相界面的行为特征,

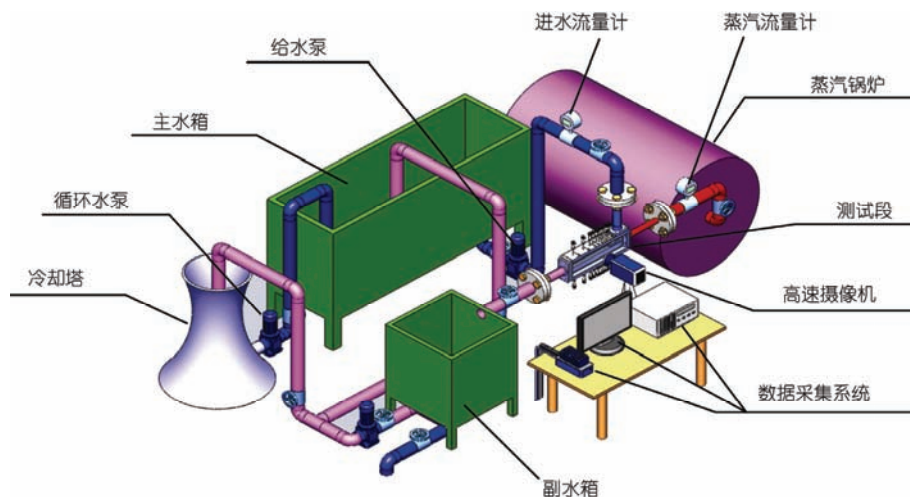


图1 (网络版彩色)有限通道内高速蒸汽射流凝结实验系统三维示意图

Figure 1 (Color online) 3D diagram of the experimental system for steam jet condensation in a confined channel

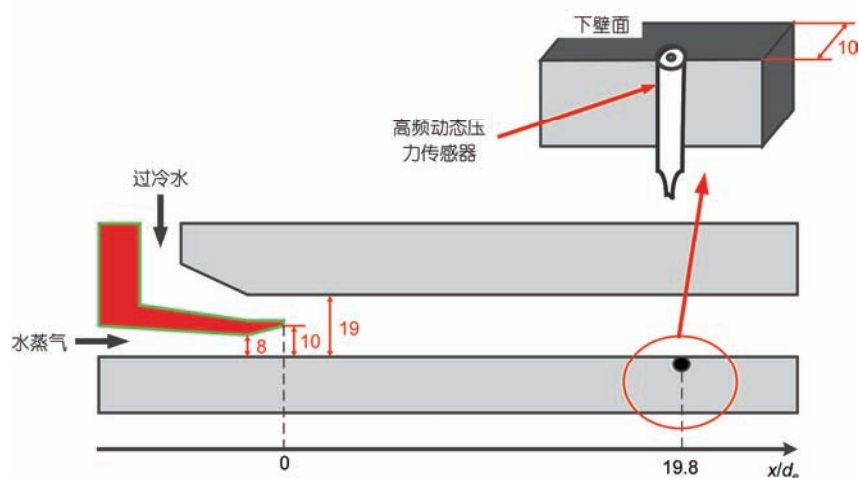


图2 (网络版彩色)实验段及测点布置简图

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of the test section and measuring point arrangement

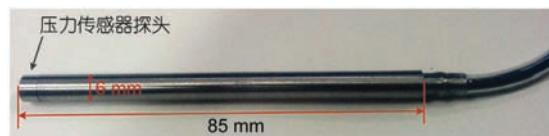


图3 (网络版彩色)高频动态压力传感器探头

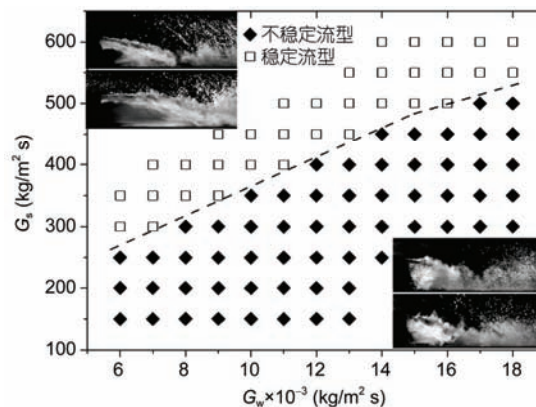
Figure 3 (Color online) Probe of the dynamic pressure transducer

表1 实验条件

Table 1 Test conditions

参数	值
进汽质量流量(蒸汽喷嘴喉部) G_s ($\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$)	150~600
进水质量流量(水喷嘴出口截面) G_w ($\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$)	$6 \times 10^3 \sim 18 \times 10^3$
过冷水温度 T_w ($^{\circ}\text{C}$)	15~40
水喷嘴出口截面 (mm)	10×8
蒸汽喷嘴喉部截面 (mm)	8×8
蒸汽喷嘴出口截面 (mm)	10×10
蒸汽喷嘴出口截面等效直径 d_e (mm)	10
矩形通道尺寸 (mm)	长250×宽10×高19

即凝结流型。利用本文特殊设计的实验腔体,通过可视化窗口,利用高速摄像机直接捕捉到了不同工况下汽液相界面的行为特征。通过大量的实验,总结汽水参数对流型的影响规律,得到凝结流型分布图,如图4所示。该流型图适用的参数范围是进水温度 30°C ,进水质量流量 $6 \times 10^3 \sim 18 \times 10^3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$,蒸汽质量流量 $150 \sim 600 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ 。从图中可以看出,有限通道内的流型可划分为两大类:稳定流型和不稳定流型。当过冷水质量流量相对较低时,由于过冷水的冷凝能力有限,

图4 入口水温为 30°C 时的流型分布图Figure 4 Regime map at inlet water temperature of 30°C

蒸汽凝结速率相对较低,此时汽液相界面十分清晰且结构稳定,凝结流型表现为稳定流型。相反,当过冷水质量流量相对较高时,过冷水的相对冷凝能力较强,蒸汽在喷嘴出口附近迅速凝结,汽液相界面会由于过冷水周期性的侵入而变得极不稳定,无法形成固定结构,此时为不稳定流型。同理可以推知,当过冷水水温升高时,蒸汽凝结的驱动势就会降低,蒸汽的凝结变得困难,汽液相界面的面积也会相应增加。

2.2 压力振荡特性

许多学者已经证明,由于汽液直接接触凝结的不稳定性,会造成流场压力的周期性剧烈波动。为研究这种现象,需要对流场中的动态压力进行测量并分析其规律。本文采用高频动态压力传感器,在不破

坏流场的前提下对不同工况下通道内 $x/d_e=19.8$ 处的动态压力进行记录. 首先从压力的时域信号进行定性分析, 图5给出了 $G_s=350 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_w=15^\circ\text{C}$ 时, 在不同进水质量流率下的压力时序图. 当 $G_w=8000 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ 时, 压力振荡的幅值较小, 在 $\pm 25 \text{ kPa}$ 左右, 随着进水质量流率的增加, 压力振荡幅值逐渐增大, 至 $G_w=14000 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ 时, 压力振荡的幅值增加到 $\pm 80 \text{ kPa}$ 左右, 增加了约3倍多. 由于DCC过程的热阻主要集中在外侧, 随着进入有限通道内的过冷水质量流率增加, 水侧湍流强度增加, 从而增强了汽液相界面两侧的传热传质过程, 促进了凝结流型的转换. 当流型从稳定流型转换成不稳定流型后, 汽液相界面的形态变得很不稳定, 并出现周期性的剧烈波动, 这种波动造成了通道内大振幅的压力振荡.

图6给出了 $G_w=12000 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_w=30^\circ\text{C}$ 时, 不同进汽质量流率下的压力时序图. 随着进汽质量流率从250增加到 $350 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, 振荡幅值逐渐增加, 但增加的幅度并不大, 当进汽质量流率增加到 $400 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ 时, 振荡幅值突然减小. 对比图4会发现, 当 $G_s=400 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ 刚好处于不稳定流型与稳定流型转换的交界

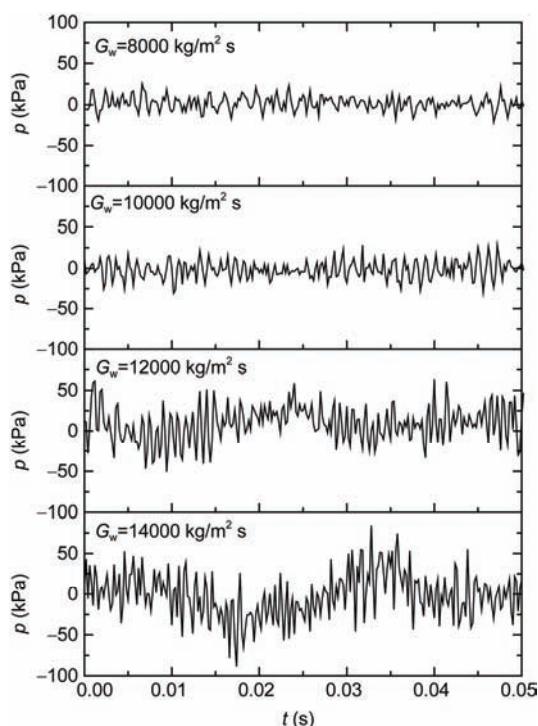


图5 不同进水质量流率下压力时序图($G_s=350 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_w=15^\circ\text{C}$, $x/d_e=19.8$)

Figure 5 Dynamic pressure with different inlet water mass flux at $G_s=350 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_w=15^\circ\text{C}$, $x/d_e=19.8$

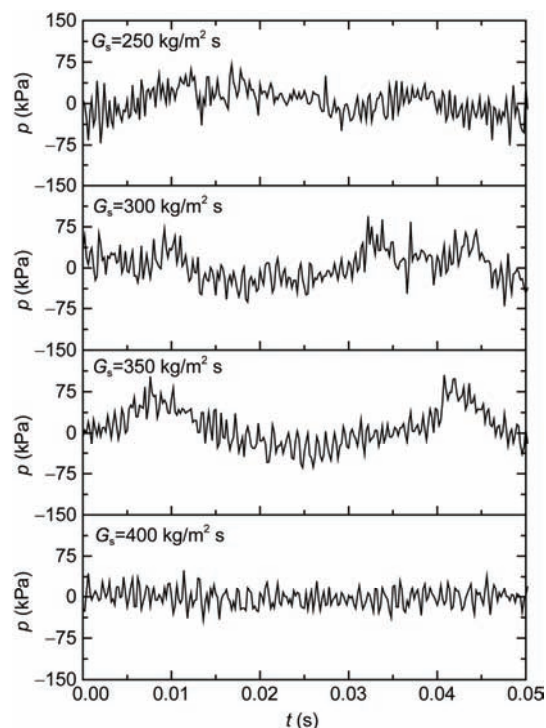


图6 不同进汽质量流率下压力时序图($G_w=12,000 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_w=30^\circ\text{C}$, $x/d_e=19.8$)

Figure 6 Dynamic pressure with different inlet steam mass flux at $G_w=12000 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_w=30^\circ\text{C}$, $x/d_e=19.8$

线上, 是一种过渡流型, 此时汽液相界面处于稳定与不稳定之间, 所以其振荡幅值小于不稳定流型, 却大于稳定流型.

图7所示为 $G_s=400 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $G_w=14000 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ 时进水温度对动态压力的影响. 随着水温的增加, 压力振荡的幅值略有增加, 但是增加的趋势不明显, 这可能是由于选取的水温均相对较低, 此时水温变化对汽液相界面影响还不够显著.

2.3 压力振荡强度

通过压力信号的时序图, 仅可以定性分析通道内的压力振荡特性. 为定量描述, 本文选取动态压力信号的均方根值表征有限通道内汽水直接接触凝结所引起压力振荡的强度, 其表达式如下:

$$p_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - p_{\text{ave}})^2}, \quad (1)$$

式中, N 为采样点数, 本文中, 取 $N=30000$; p_i 为某一时间点上的压力值, kPa ; p_{ave} 为压力的平均值, kPa .

压力的平均值由下式表示:

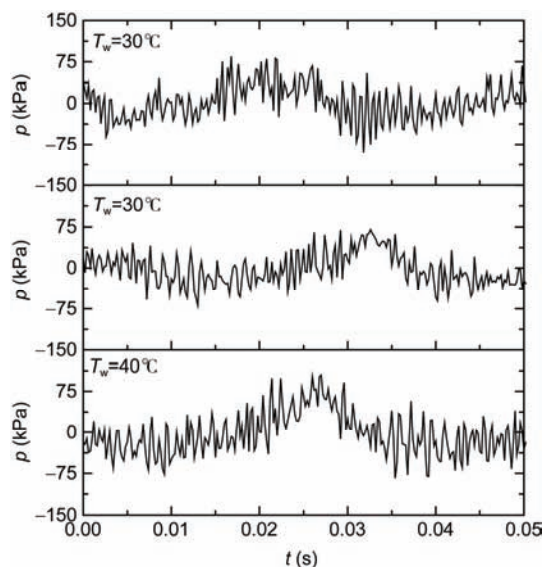


图7 不同进水温度下压力时序图($G_s=400 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $G_w=14000 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $x/d_e=19.8$)

Figure 7 Dynamic pressure with different inlet water temperature at $G_s=400 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $G_w=14000 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $x/d_e=19.8$

$$p_{\text{ave}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \quad (2)$$

图8给出了进水质量流率对压力振荡均方根值 p_{RMS} 的影响规律. 随着进水质量流率的增加, p_{RMS} 在稳定流型区内变化不大, 但是, 流型从稳定区进入到不稳定区以后, p_{RMS} 迅速增加. 从图中可以明显看出, 在 $T_w=40^\circ\text{C}$, $G_w=10000 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ 时, p_{RMS} 约为 13 kPa, 而当 $G_w=11000 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ 时, 流型进入不稳定区, p_{RMS} 迅速增加到约 25 kPa, 增加了约 2 倍. 这表明当 SJI 运行在不稳定流型区时, 装置将承受较大的冲击载荷, 此时产生的噪音和振动也较大. 因此, 在装置运行时, 应尽量避免不稳定流型区. 此外, 也可以通过往蒸汽中掺混适量不凝结气体, 降低凝结换热强度, 从而使不稳定流型转化成稳定流型的方法来降低振荡强度, 本文作者已进行了一些初步探索^[10].

图9给出了 p_{RMS} 随蒸汽质量流率的变化规律. 随着蒸汽质量流率的增加, p_{RMS} 在不稳定流型区逐渐增加, 形成过渡流型时, p_{RMS} 略有降低; 当进入稳定流型区以后, p_{RMS} 迅速降低, 在稳定流型区, 随着蒸汽质量流率增加, p_{RMS} 逐渐增加. 在稳定流型区和不稳定流型区内, 保持进水质量流率不变的同时增加进汽质量流率, 蒸汽携带的能量也增加, 形成的压力振荡强度也增加. 此外, 可以明显看出, 随着蒸汽质量流率增加, 稳定流型区内的 p_{RMS} 甚至会超过不稳定

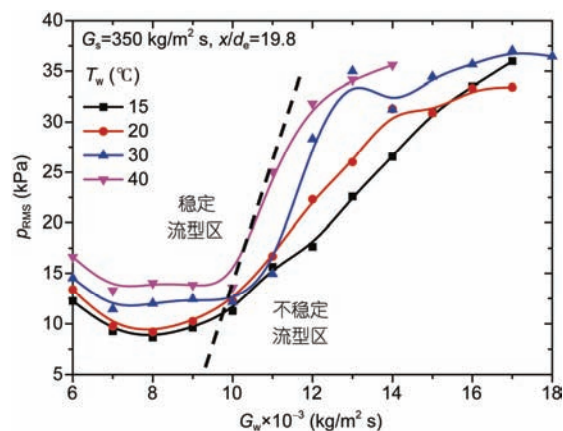


图8 (网络版彩色) 进水质量流率对 p_{RMS} 的影响 ($G_s=350 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $x/d_e=19.8$)

Figure 8 (Color online) p_{RMS} with different inlet water mass flux at $G_s=350 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $x/d_e=19.8$

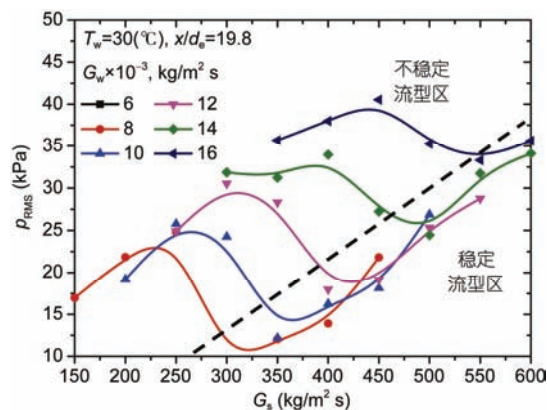


图9 (网络版彩色) 进汽质量流率对 p_{RMS} 的影响 ($T_w=30^\circ\text{C}$, $x/d_e=19.8$)

Figure 9 (Color online) p_{RMS} with different inlet steam mass flux at $T_w=30^\circ\text{C}$, $x/d_e=19.8$

流型区.

图10所示为进水温度对 p_{RMS} 的影响规律. 从图中可以看出, 随着进水温度从 15°C 增加到 40°C , p_{RMS} 缓慢增加, 但是增加的幅度并不大, 增幅均在 10 kPa 以内(图8中也可以看出). 同时, 把本文实验结果与 Qiu 等人^[9] 对大空间内蒸汽射流凝结的研究结果进行了对比, 可以看出, 在有限通道内, p_{RMS} 受水侧进水质量流率的影响较为明显, 在进水质量流率相对较高时, p_{RMS} 远大于相近条件下的大空间蒸汽射流凝结实验结果, 有限通道壁面承受更大的冲击载荷, 装置可能产生的噪音和振动也会更大.

3 结论

蒸汽喷射器以高速蒸汽为动力源, 与过冷水在

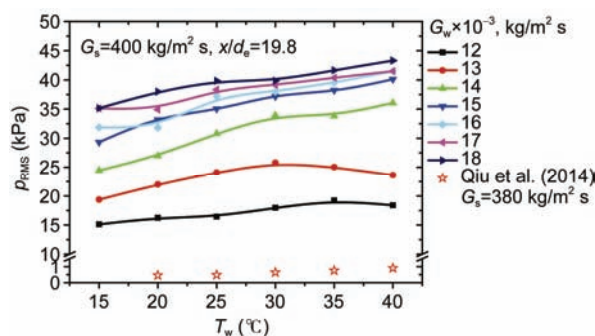


图 10 (网络版彩色)进水温度对 p_{RMS} 的影响($G_s=400 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $x/d_e=19.8$)
Figure 10 (Color online) p_{RMS} with different inlet water temperature at $G_s=400 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $x/d_e=19.8$

混合腔内直接接触凝结, 最终实现水的加热和升压等目的, 具有体积紧凑、换热强度大、无运动部件等优点, 在能源、化工、核电、动力等工业领域具有广泛的应用前景。然而, 由于汽液两相在有限通道内直接接触凝结的不稳定性, 会引起装置噪音和振动, 不仅造成环境污染, 而且危害设备安全。因此, 本文针对有限通道内蒸汽射流凝结引起的压力振荡强度特性进行实验研究, 为寻找降低噪音和振动的

方法提供指导, 得到以下结论。

(1) 利用高速摄像机获得了不同工况下汽液相界面的行为特征和凝结流型。通过大量实验, 发现在有限通道内, 根据汽液相界面的行为特征, 可以将汽水直接接触凝结流型分为稳定流型和不稳定流型两大类。并经过汇总得到了基于蒸汽质量流率和过冷水质量流率的二维流型分布图。

(2) 汽水参数对有限通道内压力振荡特性影响显著。随着进水质量流率增加, 压力振荡强度在稳定流型区变化不大, 但是, 进入不稳定流型区以后, 压力振荡强度迅速增加, 此时通道壁面承受较大的冲击载荷。增加进汽质量流率, 流型逐渐从不稳定流型转换为稳定流型。在不稳定流型区和稳定流型区内, 压力振荡强度随着进汽质量流率的增加而增加。对于处在流型区域交界线上的过渡流型, 其压力振荡强度介于不稳定和稳定流型之间。压力振荡强度随着水温升高逐渐增加。通过与大空间蒸汽射流凝结的实验研究结果进行对比, 发现在相近的水温和进汽质量流率下, 由于受到进水质量流率的影响, 有限通道内蒸汽射流凝结引起的压力振荡强度远大于在大空间中。

参考文献

- Yan J J, Shao S F, Liu J P, et al. Experiment and analysis on performance of steam-driven jet injector for district-heating system. *Appl Therm Eng*, 2005, 25: 1153–1167
- Zhang Z, Chong D T, Yan J J. Modeling and experimental investigation on water-driven steam injector for waste heat recovery. *Appl Therm Eng*, 2012, 40: 189–197
- Deberne N, Leone J F, Duque A, et al. A model for calculation of steam injector performance. *Int J Multiphas Flow*, 1999, 25: 841–855
- Narabayashi T, Yamazaki Y, Kobayashi H, et al. Flow analysis for single and multi-nozzle jet pump. *JSME Int J B-Fluid T*, 2006, 49: 933–940
- Cai Q, Tong M, Bai X. Exergy analysis of two-stage steam-water jet injector. *Korean J Chem Eng*, 2012, 29: 513–518
- Nariai H, Aya I. Fluid and pressure oscillations occurring at direct contact condensation of steam flow with cold water. *Nucl Eng Des*, 1986, 95: 35–45
- Fukuda S. Pressure variations due to vapor condensation in liquid, (ii) phenomena at large vapor mass flux. *J Atom Energ Soc Jpn*, 1982, 24: 466–474
- Hong S J, Park G C, Cho S, et al. Condensation dynamics of submerged steam jet in subcooled water. *Int J Multiphas Flow*, 2012, 39: 66–77
- Qiu B B, Tang S, Yan J J, et al. Experimental investigation on pressure oscillations caused by direct contact condensation of sonic steam jet. *Exp Therm Fluid Sci*, 2014, 52: 270–277
- Yang X P, Chong D T, Liu J P, et al. Experimental study on the direct contact condensation of the steam-air mixture in subcooled water flow in a rectangular channel. *Int J Heat Mass Tran*, 2015, 88: 424–432

Summary for “有限通道内蒸汽射流凝结压力振荡强度特性”

Amplitude characteristics of pressure oscillation caused by steam jet condensation in a confined channel

YANG XiaoPing¹, CHEN Yi¹, ZONG Xiao¹, ZHOU Lun¹, LIU JiPing¹ & YAN JunJie²

¹Ministry of Education Key Laboratory of Thermal Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

²State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

* Corresponding author, E-mail: liujp@mail.xjtu.edu.cn

Steam jet injector is a prospective device with advantages of impact volume, strong heat transfer, without moving part, which can be applied in various industrial fields such as nuclear/conventional power plant, heat-supply system and heat recovery system, etc. However, as the steam jet injector is driven by high speed steam jet condensation in subcooled water flow in the mix chamber, the instability of steam-water direct contact condensation will lead to loud noise and severe vibration. Thus, loud noise will evolve into environmental pollution, and vibration will endanger the equipment, which prevent the promotion of this device in industrial applications. Moreover, the published works generally involved in the pressure oscillation caused by steam jet condensation in large space water pool, where the water was considered to be stagnant. However, the case becomes more complex when direct contact condensation occurs in a confined channel like in a steam jet injector, where the effect of turbulence on water side and wall can not be ignored. Thus, the reported results can not be applied in the present condition. So it is necessary to study the mechanism of the instability of steam-water direct contact condensation in a confined channel. In this paper, experimental investigation was performed on the amplitude characteristics of pressure oscillation caused by direct contact condensation in a confined channel, aiming at revealing the mechanism of noise and vibration and providing some guidance for the design and operation of the steam jet injector. In order to better observe the behavior of the steam-water interface, a special visualized test section was designed and a high speed camera was applied. The dynamic pressure data was obtained by a dynamic pressure transducer arranged on the wall of channel. Three main inlet parameters, including steam mass flux, water mass flux and water temperatures were tested in the ranges of 150–600 kg/m²s, 6×10^3 – 18×10^3 kg/m²s and 15–40°C, respectively. The results indicated that when direct contact condensation occurred in a confined channel, flow patterns could be divided into two categories-unstable and stable flow patterns with respect to the interface behavior. The effect of the inlet parameters on amplitude characteristics of pressure oscillation was discussed. With the increase of water mass flux, the amplitude altered slightly in stable flow pattern region, but increased suddenly and dramatically in unstable region. With the increase of steam mass flux, the amplitude increased a little in unstable region, but decreased suddenly in stable region and then increased again. And the increase of water temperature led to the increasing of amplitude in all flow pattern regions. In a word, the equipment would bear stronger impact load when operating in unstable flow pattern region.

confined channel, steam jet, direct contact condensation, pressure oscillation, amplitude characteristics

doi: 10.1360/N972016-00041