

文章编号:2095-6134(2017)02-0135-06

不凝结气体对蒸汽浸没射流压力振荡的影响^{*}

从跃磊,王迎春,陈伟雄,种道彤[†],严俊杰

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室,西安 710049)
(2016 年 4 月 19 日收稿;2016 年 6 月 29 日收修改稿)

Cong Y L, Wang Y C, Chen W X, 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.

摘 要 通过实验研究不凝结气体(空气)对蒸汽浸没射流压力振荡特性的影响。结果表明:不凝结气体存在时压力振荡强度比纯蒸汽浸没射流时明显减小。随空气质量分数的增加,压力振荡峰值的位置沿轴向后移。过冷水温低于 45 ℃ 时,峰值随空气质量分数的增加而增大;高于 50 ℃ 时,随空气质量分数的增加而减小;水温在 45 ~ 50 ℃ 之间时,峰值大致相同。压力振荡主频随空气质量分数、蒸汽质量流率和过冷水温度的增加而减小。
关键词 蒸汽浸没射流;不凝结气体;压力振荡强度;振荡频率
中图分类号:O359 **文献标志码**:A **doi**:10. 7523/j. issn. 2095-6134. 2017. 02. 002

Effect of non-condensable gas on pressure oscillation of submerged steam jet

CONG Yuelei, WANG Yingchun, CHEN Weixiong, CHONG Daotong, YAN Junjie
(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract Effect of non-condensable gas on pressure oscillation of submerged steam jet is studied experimentally. With the presence of non-condensable gas, the pressure oscillation intensity reduces significantly compared with that of pure steam. As the air mass fraction increases, the axial position of pressure oscillation peak shifts downstream. The oscillation intensity peak value increases with the air mass fraction when the water temperature is below 45 ℃, while it decreases when the water temperature is higher than 50 ℃. When the water temperature is within the range between 45 and 50 ℃, the peak value of oscillation intensity is almost invariant with the air mass fraction. Furthermore, the oscillation frequency decreases with the increase of the air mass fraction, steam mass flux, and subcooled water temperature.
Keywords submerged steam jet; non-condensable gas; pressure oscillation intensity; oscillation frequency

蒸汽在过冷水中射流凝结具有高效的传热传质能力和核工业等众多工业领域,如直接接触式换热器、水下推进系统,以及核反应堆的泄压系统等场合。

^{*} 国家自然科学基金(51476128, 51436006)和国家重点基础研究发展计划(2015CB251504)资助
[†] 通信作者, E-mail: dtchong@mail. xjtu. edu. cn

表 1 实验条件
Table 1 Experimental conditions

项目	实验条件
蒸汽质量流量 $G_{\text{cr}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	400 ~ 800
入口蒸汽压力 p_s/MPa	0.20 ~ 0.60
空气质量分数 $A/\%$	0 ~ 5
过冷水温度 $t_w/^\circ\text{C}$	20 ~ 65
喷嘴出口直径 d_e/mm	8.0
环境水压力 p_w/MPa	0.102
喷嘴浸没深度/mm	500
水箱尺寸/mm	3 000 × 1 000 × 1 200

$$X = \frac{x}{d_e}, \tag{2}$$

$$R = \frac{r}{d_e}, \tag{3}$$

式中: x 为实际轴向距离,mm; r 为实际径向距离,mm; d_e 为喷嘴出口直径,mm。

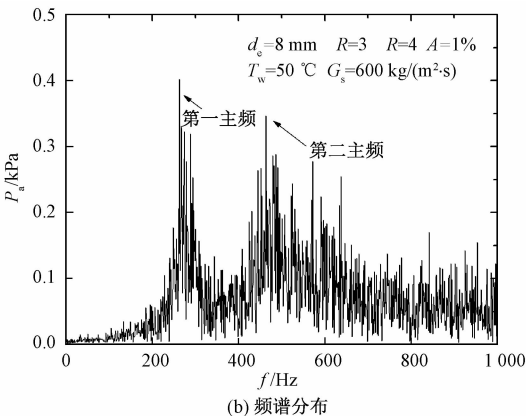
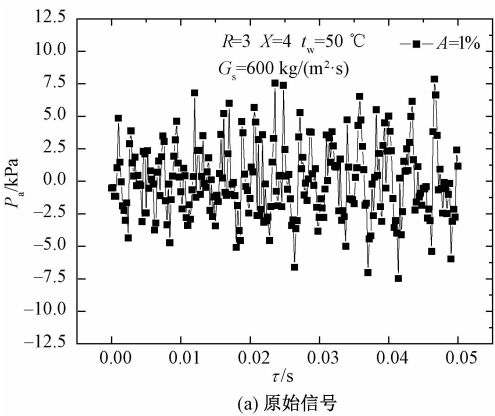


图 2 压力振荡原始信号和频谱分布

Fig.2 Original signals of pressure oscillation and the frequency spectrum distribution

2.2 实验结果的重现性

为验证实验结果的重现性,在相同工况下进行多次实验。对实验采集到的压力数据进行均方根处理和快速傅里叶变换,得到的振幅和频率的特性曲线如图 3 所示。可以看出,实验的振幅曲线和频率曲线均几乎重合,从而表明,本文的实验结果具有良好的重现性。

2.3 实验结果的不确定性分析

实验中存在不可避免的测量误差和系统误差,会影响实验结果准确性,所以需要对实验结果进行不确定度分析。本文使用 Moffat^[7]的方法对实验结果的不确定度进行分析。另外根据实验系统中测量仪器的精度,可以计算得出在本实验参数范围内蒸汽质量流率、空气质量流率、压力振荡

2 实验数据处理及实验结果的可靠性

2.1 实验数据处理

通过压力振荡原始信号的均方根值来描述压力振荡整体趋势的变化,均方根值公式如下

$$p_{\text{rms}} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - p_{\text{av}})^2 \right]^{1/2}, \tag{4}$$

式中: p_i 为压力瞬时值,kPa; N 为采点数量; p_{av} 为压力平均值,kPa,可通过下式计算获得

$$p_{\text{av}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i. \tag{5}$$

实验中将压力振荡原始信号进行快速傅里叶变换,即由时域信号转化为频域信号,从频域信号中直接获取压力振荡频率特性。图 2 所示为压力振荡原始信号的变化规律和时域信号经快速傅里叶变换后的频域信号,从图中可以看出压力振荡的强弱。

的振荡强度和振荡主频的最大不确定度分别为 1.0%、0.5%、16.2% 和 12.3%。

3 压力振荡实验结果与分析

本文在不同的空气质量分数、蒸汽质量流率和过冷水温度下,利用高频动态压力传感器测量射流流场中的压力分布,从而找出汽水参数,尤其是不凝结性气体对射流压力振荡的影响规律,为分析蒸汽浸没射流的流动和凝结特性提出实验依据。

3.1 压力振荡强度

不同空气质量分数下,压力振荡强度沿轴向无量纲距离的变化如图 4 所示。压力振荡幅值随轴向距离的增加先增大后减小。当蒸汽中含不凝结性气体时,压力振荡幅值比纯蒸汽压力振荡幅

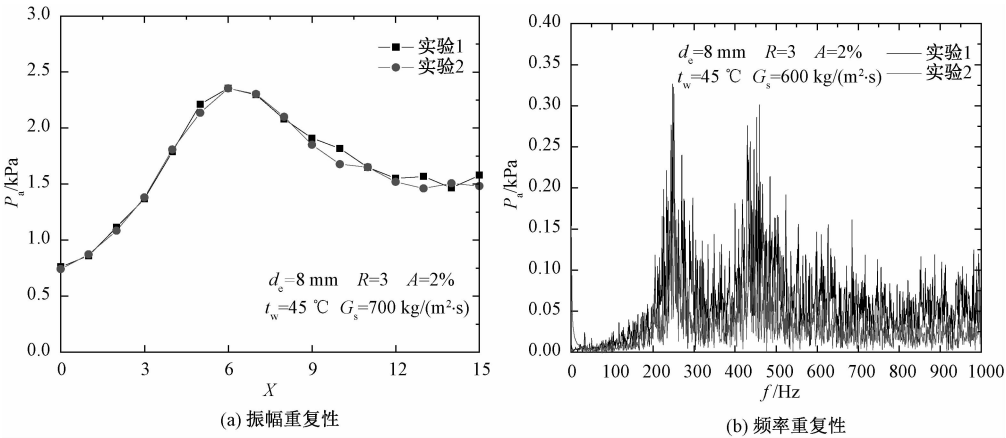


图 3 压力振荡振幅和频率的重复性

Fig. 3 Repeatability of amplitude and frequency of pressure oscillation

值明显变小,且随着水温的升高,两振幅的相对差值逐渐减小。可以看出,不凝结气体对于蒸汽浸没射流的影响随着水温的升高而减小。

压力振荡峰值随空气质量分数的增加,其位置沿轴向后移。这是由于空气质量分数增大总的

质量流率增加,汽羽长度增大,随着空气质量分数增加,导致包裹在蒸汽泡外的不凝结气体层加厚,汽泡的体积越来越大,使得蒸汽在过冷水中凝结的过程中,热阻增加,凝结换热能力降低,从而减缓了蒸汽泡溃灭过程,凝结所需时间增长,峰值后移。

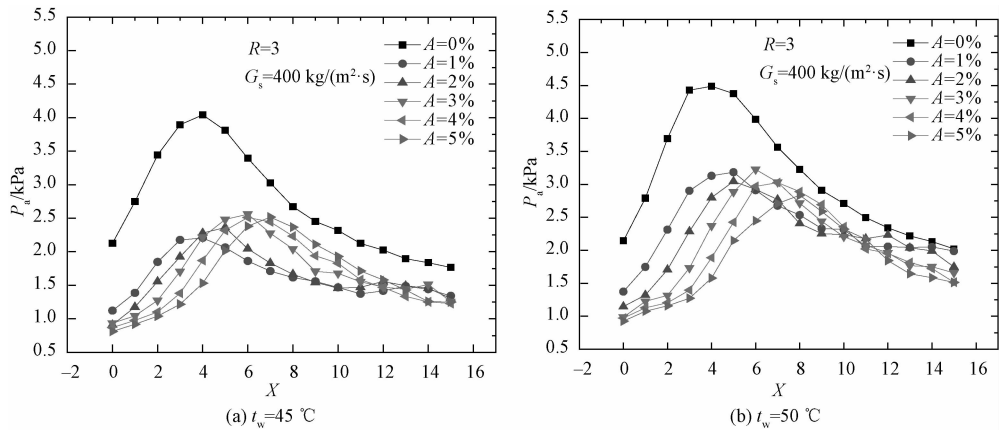


图 4 振荡幅值随轴向距离的变化

Fig. 4 Amplitude variation with axial distance

不同空气质量分数下,压力振荡强度随轴向无量纲距离的变化如图 5 所示。实验结果表明,在一定蒸汽质量流率和过冷水温度下,压力振荡强度随不凝结性气体含量的增加整体呈下降趋势,且当空气质量分数小于 2% 时,振荡幅值减小较快,由此可见,在空气质量分数小于 2% 时,对压力振荡幅值的影响较大。

当空气质量分数一定时,压力振荡峰值随水温的升高而逐渐增大,且峰值位置沿轴向位置后移。这是由于随过冷水温的升高,其冷却能力逐渐下降,凝结周期增长,故振荡幅值越来越大。另外,蒸汽质量流率为 $500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,不同空气质量分数下,压力振荡峰值随过冷水温的变化如图 6 所示。分析可知:在水温低于 $45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,压力振荡

峰值随空气质量分数的增加而逐渐增大;水温 $45 \sim 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间时,峰值大小大致相同;水温高于 $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,峰值随空气质量分数的增加而逐渐减小。

压力振荡是由于气液界面的波动而产生,此处可以通过不凝结性气体对气液相界面波动的影响来解释。当过冷水温度较低时,蒸汽被迅速凝结,汽羽长度相对较小。蒸汽中掺杂的少量空气将会阻碍气液界面传热,随着空气质量分数的增加,传热能力逐渐下降。汽羽形状膨胀,界面波动幅度增大。所以随着空气质量分数的增加,峰值逐渐增大。当过冷水温度较高时,过冷水冷凝能力下降,蒸汽不能够及时被冷凝,汽羽的长度增加,使得界面面积增加,流场中的影响范围增大,随着空气质量分数的增加,气液界面变得非常不

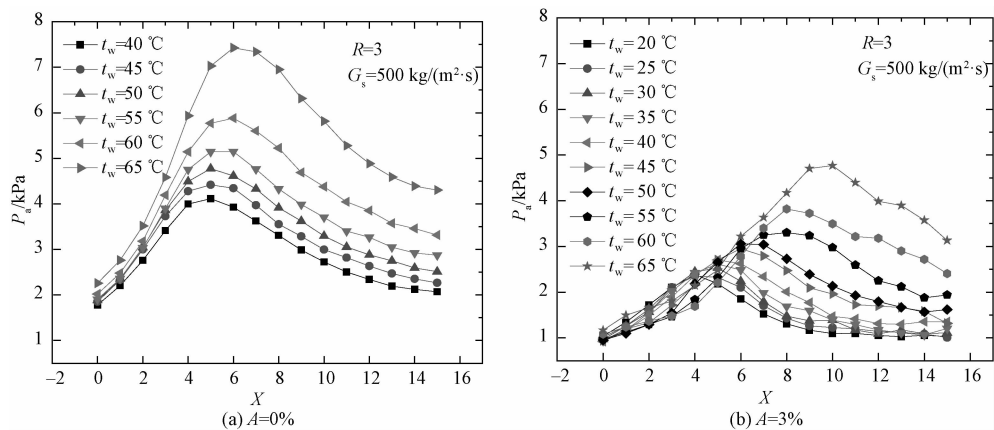


图 5 振荡幅值随过冷水温度的变化
Fig. 5 Amplitude variation with subcooled water temperature

稳定,波动愈加剧烈,汽羽边界形成不凝结性气体层,大量蒸汽被空气流携带向下游,所以随着空气质量分数的增加,峰值逐渐减小。

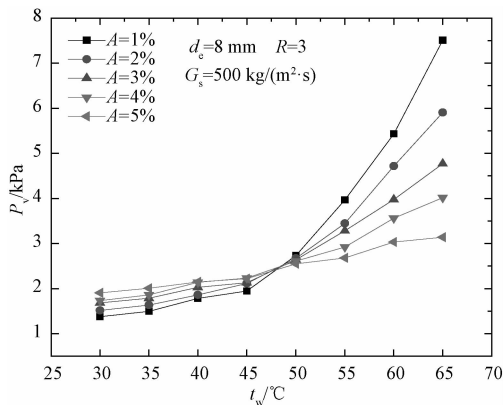


图 6 振荡峰值随过冷水温度的变化
Fig. 6 Variation in peak value with subcooled water temperature

空气质量分数为 2% 时,不同蒸汽质量流率下,压力振荡强度随轴向无量纲距离的变化如图 7 所示。由图中可以看出,压力振荡幅值随蒸汽

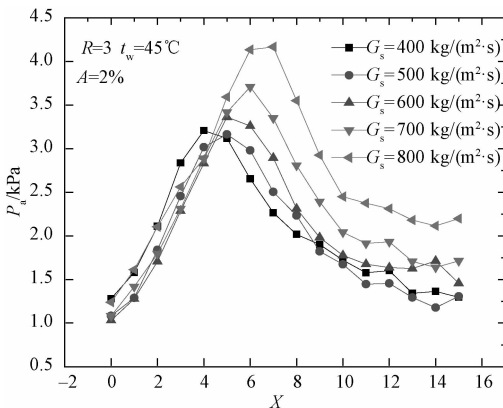


图 7 振荡幅值随蒸汽质量流率的变化
Fig. 7 Amplitude variation with steam mass flux

质量流率的增加,峰值位置沿轴向后移。当空气质量分数一定时,压力振荡峰值随蒸汽质量流率的增加而逐渐增大。当蒸汽质量流率为 $400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,凝结形态接近凝结振荡区,压力振荡峰值略高于 $500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的压力振荡峰值。

3.2 压力振荡主频

压力振荡第一主频随空气质量分数的变化如图 8 所示。

实验结果表明,第一主频随空气质量分数的增大而减小,且空气质量分数较小时对蒸汽凝结压力振荡影响较为明显。由于不凝结性气体的存在,冷凝热阻变大,凝结时间增长,故使得振荡频率减小。当空气质量分数一定时,第一主频随过冷水温度的增加而逐渐减小,而且减小速度逐渐减缓。这是由于过冷水温度的升高导致其冷凝能力下降,使得凝结所需时间增加即凝结周期的增大,故第一主频逐渐减小。

当空气质量分数一定时,第一主频随蒸汽质量流率的增加而逐渐减小,且减小速度逐渐减慢。这是由于蒸汽质量流率的增加,汽羽的长度随之增加,相同时间内过冷水的冷凝能力下降即凝结所需时间增长,故压力振荡周期增加,第一主频逐渐减小。

同样,对压力振荡第二主频做统计分析,第二主频随空气质量分数的变化如图 9 所示。结果表明,第二主频同样随着空气质量分数的增加而逐渐减小。当空气质量分数一定时,第二主频随过冷水温的增加而逐渐减小,随蒸汽质量流率的增加而逐渐减小,产生的原因与第一主频类似。

4 结论

通过对含有不凝结性气体的蒸汽浸没射流进

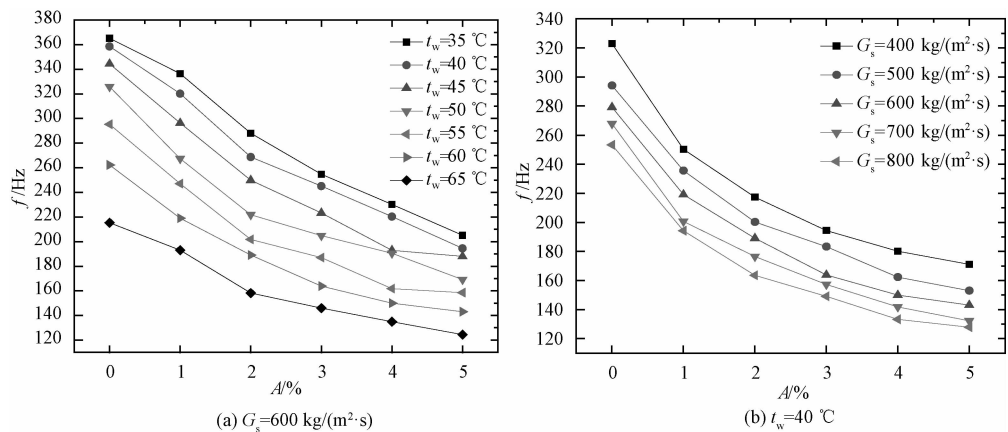


图 8 第一主频随空气质量分数的变化
Fig. 8 Variation in the first frequency with air mass fraction

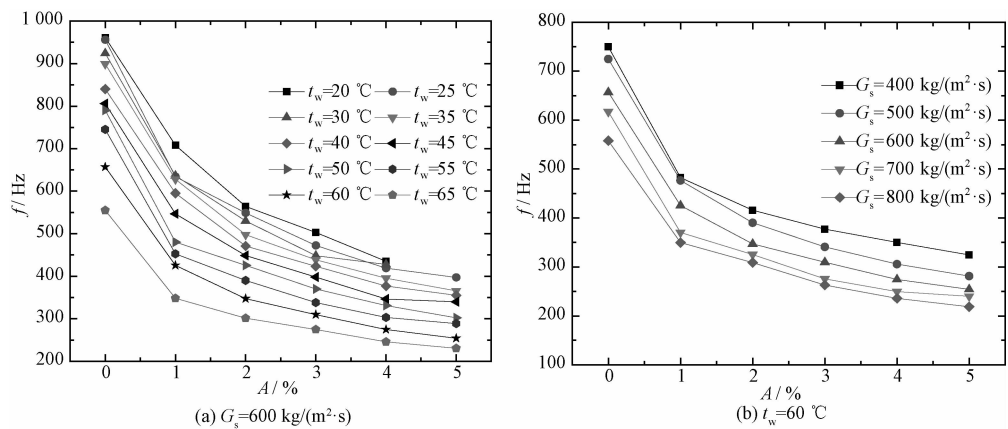


图 9 第二主频随空气质量分数的变化
Fig. 9 Variation in the second frequency with air mass fraction

行实验,研究不凝结性气体对蒸汽浸没射流压力振荡特性的影响,得到以下主要结论:

- 1) 当蒸汽中含不凝结性气体时,压力振荡强度明显比纯蒸汽时小,且随着水温的升高,两振幅的差值相对逐渐减小。压力振荡峰值随空气质量分数的增加,其位置沿轴向后移。
- 2) 水温低于 45 °C 时,峰值随空气质量分数的增加而逐渐增大;高于 50 °C 时,随空气质量分数的增加而逐渐减小;水温在 45 ~ 50 °C 之间时,峰值大致相同。当空气质量分数一定时,峰值随水温 and 蒸汽质量流率的增加而逐渐增大,且其位置沿轴向后移。
- 3) 压力振荡第一主频和第二主频均随着空气质量分数的增加而逐渐减小。当空气质量分数一定时,主频均随冷水温度和蒸汽质量流率的增加而逐渐减小,而且减小速度逐渐减缓。

参考文献

[1] Cho S, Song C H, Park C K, et al. Experimental study on dynamic pressure pulse in direct contact condensation of steam jets discharging into subcooled water[C] // 1st Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety. Pusan, Korea, 1998 : 291-298.

[2] Qiu B B, Tang S, Yan J J, et al. Experimental investigation on pressure oscillations caused by direct contact condensation of sonic steam jet [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 52:270-277.

[3] Qiu B B, Yan J J, Liu J P, et al. Experimental investigation on pressure oscillation frequency for submerged sonic/supersonic steam jet[J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 75: 388-394.

[4] Song C H, Cho S, Kwon T S. The effect of non-condensable gas on dynamic pressure induced by steam-water direct contact condensation[R] // Proc 5th Int Symp Heat Transfer Int. Beijing, China, 2000.

[5] Song C H, Cho S, Kwon T S, et al. The effect of non-condensable gas on dynamic pressure induced by steam-water direct contact condensation [J]. Asme-Publications-Pvp, 2001, 421: 193-200.

[6] Kim K Y, Jeo S, Song C H, et al. The effect of the uncondensable gas on direct contact condensation in a pool[R] // Proceedings of the KNS spring meeting. 2000.

[7] Moffat R J. Describing the uncertainties in experimental results[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1988, 1(1):3-17.