

# 垂直管内水蒸气与水接触时凝结所诱导的压力波特性实验研究

张佳<sup>1</sup>, 张超<sup>1</sup>, 徐强<sup>2</sup>, 郭烈锦<sup>2</sup>

(1. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

2. 西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室 陕西 西安 710049)

**摘要:** 实验研究了水蒸气直接接触凝结诱导的压力波特性。实验是在质量流速  $0 \sim 150 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 压力  $0.2 \sim 0.4 \text{ MPa}$  的饱和蒸汽条件下, 用直径为  $8 \text{ mm}$  的喷嘴, 将蒸汽喷入到存有凝结水的垂直管的流动模型中进行的, 管内水温 and 压力范围分别为  $30 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $0.11 \sim 0.15 \text{ MPa}$ 。实验通过检测壁面压力信号来捕获压力波动信号。系统分析了低蒸汽质量流速时, 压力波随时间的高幅值低频率变化规律。获得了压力波幅值随蒸汽质量流速和过冷水温度的定量变化关系。揭示了压力波动信号的概率密度、函数分布、偏度系数和峭度系数的变化规律。

**关键词:** 蒸汽凝结; 压力波; 喷嘴

中图分类号: O359 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.12.002

## 引言

汽-液的直接接触凝结将具有高效的传热传质能力, 在许多两相流系统中广泛存在。直接接触凝结所诱导的压力波会对工业系统设备产生强烈的影响, 掌握压力波特性变化规律对于系统的设计和安全运行具有重要意义, 很多学者对水蒸气直接接触凝结所诱导的压力波特性进行了研究。

以前的研究表明, 水蒸气通过喷嘴喷入水中进行直接接触凝结其所诱导的压力波特性主要受蒸汽质量流速、过冷水温度和喷嘴直径影响<sup>[1]</sup>。对于低蒸汽质量流速情况, Chan 等人给出了凝结区域图<sup>[2~4]</sup>; Kim 通过声学 and 可视化观察建立了很宽蒸汽质量流速范围的凝结区域图<sup>[5]</sup>; Cho 等人根据蒸汽质量流速和过冷水温度将直接接触凝结换热过程分为 6 个不同区域<sup>[6]</sup>: 间歇区、瞬态间歇区、凝结振

荡区、稳定凝结振荡区、气泡凝结振荡区和界面凝结振荡区。当蒸汽质量流速较低时, 直接接触凝结处于间歇区。在该区域蒸汽气泡周期性的形成和破碎。当气泡破碎的时候, 由于突然的凝结会产生一个负压, 过冷水则会进入喷嘴。接着蒸汽又将水慢慢地推出喷嘴以外。当蒸汽质量流速逐渐增加时, 就会进入外间歇区; Hong 等人研究了较高蒸汽质量流速下单孔射流的主频率随汽水参数的变化规律<sup>[7~8]</sup>。研究发现, 蒸汽质量流速小于  $300 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时, 压力波主频与蒸汽质量流速正相关, 当蒸汽质量流速小于  $300 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时, 压力波主频与蒸汽质量流速负相关; Qiu 等人研究发现, 压力振荡的主频随着水温的升高而减小<sup>[9~10]</sup>; 随着蒸汽质量流速的增大, 压力振荡的主频在凝结振荡区增大, 在稳定凝结区较小。

本研究对垂直管中水蒸气直接接触凝结所诱导的压力波特性进行了实验研究, 从概率统计分析的角度研究了水蒸气-水凝结所诱导的压力波动特性, 为进一步揭示管内水蒸气-水的凝结机理而积累实验依据。

## 1 实验装置及条件

实验系统包括工质循环及测量系统、实验段及实验数据采集几个部分组成。图 1 为实验系统图, 该实验系统主要由水蒸气和水两个回路组成, 汽路和水路可以分别独立进行调节。去离子水经水泵增压后进入电加热锅炉, 持续产生干度高于 99% 的蒸

收稿日期: 2015-09-17; 修订日期: 2016-05-20

基金项目: 优秀国家重点实验室专项基金资助项目(50823002)和重点基金资助项目(50536020)。

作者简介: 张佳(1984-), 男, 陕西西安人, 西安热工研究院有限公司工程师。

通讯作者: 徐强(1986-), 男, 陕西武功人, 西安交通大学讲师。

汽。然后蒸汽经过热器加热至干度为 100% 的饱和蒸汽,由漩涡流量计(利用漩涡和横向变动升力原理获得质量流量,精度为 1 级)计量后进入喷嘴,蒸汽管道外部都包有保温层。水相由离心泵加压后,由质量流量计(精度为 0.5 级)计量,然后从实验段下部进入垂直上升管。饱和水蒸气经过喷嘴进入管内过冷水中发生凝结,然后通过管道壁面安装的压力传感器测量水蒸气凝结所诱导的压力波信号,实验段结构及压力测点布置如图 2 所示。通过喷嘴进口安装的的压力和温度传感器可以获得喷嘴进口压力和温度参数。压力变送器精度为 0.1 级,测温的 K 型铠装热电偶直径为 1 mm,精度为 0.5 °C,实验参数范围如表 1 所示。

表 1 实验参数范围

Tab. 1 Range of experimental parameters

参数	范围
蒸汽压力 $p_s$ /MPa	0.2 ~ 0.4
蒸汽温度 $T_s$ /°C	110 ~ 130
蒸汽质量流速 $G_e$ / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	0 ~ 150
表观水速 $V_{sl}$ / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1.3
过冷水温度 $T_w$ /°C	30 ~ 70
系统压力 $p_w$ /MPa	0.11 ~ 0.15
喷嘴内径 $d_c$ / m	0.008
垂直上升管内径 $D$ /m	0.08

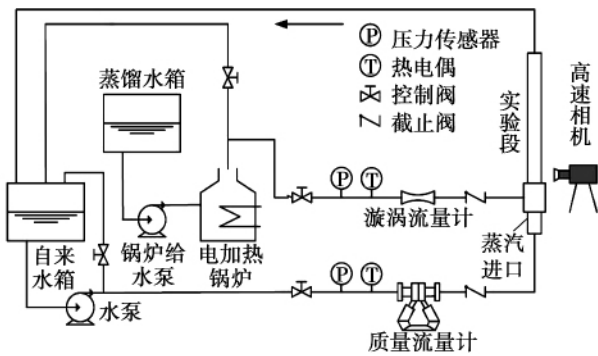


图 1 管内水蒸气直接接触凝结所诱导的压力波的实验系统

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

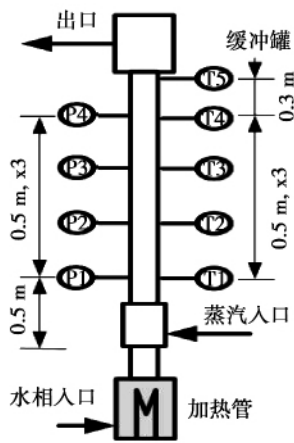


图 2 水蒸气-水两相流实验段结构及压力测点布置

Fig. 2 Schematic diagram of the test section and arrangement of pressure transducers

## 2 实验数据处理

为了描述压力振荡的强度变化规律,定义以下 4 个特征参数。

(1) 压力波动信号的标准差:

$$p_{sd} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2} \quad (1)$$

式中:  $p_i$ —去噪后的瞬时压力波动信号, kPa;  $\bar{p}$ —瞬时压力波动信号的平均值, kPa;  $p_{sd}$ —不确定度低于 0.5% kPa;  $\Delta p$ —统计区间对应的压力增加量, kPa。

(2) 概率密度函数分布 PDF

将采集到的压力信号看成一维离散随机信号,信号长度为  $N$ ,统计落入区间  $(p_i, p_i + \Delta p)$  中数据点数并记为  $N_i$ ,则由上面分析知落入该区间的样本点的近似概率(以频率表示)为:

$$p\{p \in (p_i, p_i + \Delta p)\} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_i}{N} \quad (2)$$

(3) 偏度系数表征的是压力波动信号 PDF 分布的对称程度,定义为  $Sk$ (无量纲):

$$Sk = \frac{1/N \sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^3}{\sigma^3} \quad (3)$$

(4) 峭度系数描述的是 PDF 分布中心区域的扁平程度,定义为  $Ku$ (无量纲):

$$Ku = \frac{1/N \sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^4}{\sigma^4} \quad (4)$$

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 压力波的时间历史分析

图 3 给出了 1 s 内的压力波动随时间的变化关系,图 4 给出了其中的两个大周期的细节压力波动随时间的变化关系。首先,从图 4 来分析压力波动在整个间歇凝结流型周期内的细节变化情况。将蒸汽泡破碎时刻作为周期的起点,在蒸汽泡破碎的瞬间,液体冲入喷嘴通道内,形成一个很高的负压,该负压能够低至  $-60$  kPa 左右。此后由于系统的阻尼作用,压力又很快升高,然后逐渐衰减。在外界压力阻尼衰减的过程中,一方面,液塞温度迅速升高引起汽液界面传热恶化;另一方面,液塞将持续流出的蒸汽堵在管内,这两个原因均导致被液塞堵塞在喷嘴内的蒸汽压力迅速升高,当喷嘴内压力升高到大于管外压力时,就会将液塞连同气体推出喷嘴。然后,从喷嘴出口喷出的蒸汽泡由于不能维持其凝结体积,又重复塌陷破碎,该过程就会重复进行。

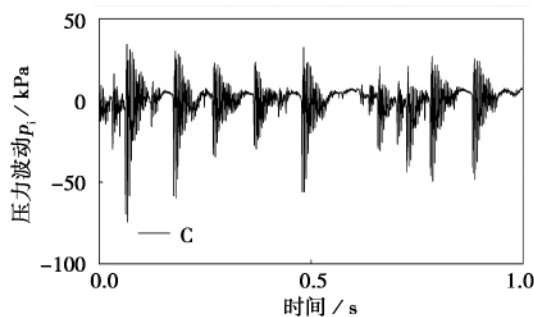


图 3 典型不稳定间歇凝结流型时的压力波动随时间的变化关系

Fig. 3 Waveforms of pressure oscillation in the chugging regime

图 3 给出了许多连续的间歇周期的压力波动随时间变化,这些都是由图 4 中一个个间歇周期组成的。从图 3 还可以看出,不同间歇周期单元的阻尼衰减时间几乎差不多,然而每个小周期压力处于平均值零附近经历的时间差异较大。例如图 3 中有的间歇周期之间的压力处于平均值零附近经历的时间几乎为零,而有的则很大甚至比所在间歇周期一半的时间还长。不同间歇周期的最大负压值和正压值差异也较大,这说明喷嘴外形成的蒸汽泡大小也具有随机的特点,因此形成的压力脉冲强度也差异很

大。间歇周期的差异和压力波幅值的波动都反映了低蒸汽质量流速时凝结的高度不稳定特性。

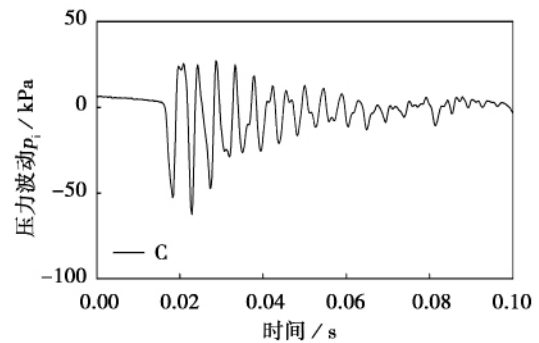


图 4 典型不稳定间歇凝结流型时的压力波动随时间的变化关系

Fig. 4 Waveforms of pressure oscillation in the chugging regime

综上所述,压力波动在间歇周期内以及间歇周期之间经历时间和幅值的差异,刻画了低蒸汽质量流速时凝结高度不稳定的本质特性。

#### 3.2 压力波的幅值分析

由图 5 可知,随着蒸汽质量流速的增大,压力波标准差呈现先增大后减小的趋势,并且标准差随蒸汽质量流速增长的速率要高于其达到最大值之后减小的速率。标准差达到局部最大值的蒸汽质量流速与过冷水温度无关,在达到最大值之前的标准差也几乎和过冷水温度无关,这充分说明了低蒸汽质量流速时的压力波动标准差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。然而在标准差过了极大值点后,标准差随着过冷水温度的增大逐渐增大,并且随着蒸汽质量流速的增大,标准差降低的趋势越来越不明显。当过冷水温度升高到  $T_w = 70$  °C 时,极大值之后的衰减过程则完全消失了。这是由于过冷水温度较高时,两相界面凝结诱导的压力波动强度逐渐增大,而流量过低引起的间歇压力波动强度几乎与温度无关。实际测量到的是这二者叠加的结果,温度较高时两相界面凝结诱导的压力波动起主导作用,因此极大值之后的标准差降低趋势越来越不明显,以至于最终消失。

#### 3.3 压力波的统计分析

图 6 给出了不稳定间歇凝结流型的 PDF 分布特征。对于低蒸汽质量流速,其 PDF 分布是明显的尖锐单峰结构,峰值达到 1 左右且偏于信号平均值

零的右侧,单峰对应着较长时间的喷嘴通道内液塞流出以及喷嘴外蒸汽泡膨胀过程。这反映了一个小周期内,气泡破碎产生极大负压之后,压力迅速攀升到极大正压值,然后在平均值附近逐渐衰减并且持续较长时间。由于负压的极大值要高于正压的极大值,因此将平均值拉向较低的水平,导致较低的压力波动值频率大于零。

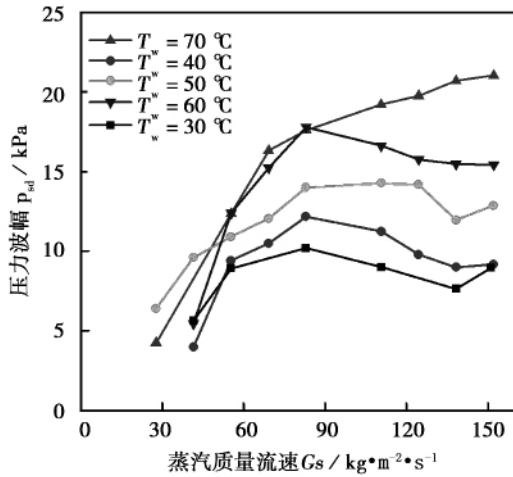


图 5 压力波幅值随蒸汽质量流速的变化规律  
Fig. 5 Variation of  $p_{sd}$  with steam mass flux

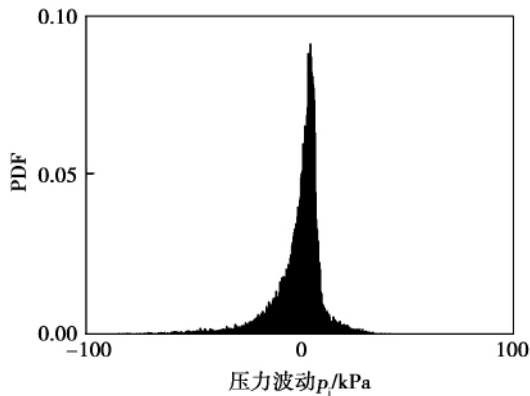


图 6 不稳定间歇凝结流型的 PDF 分布特征  
Fig. 6 PDF for the Chugging condensation regime

图 7 为压力波偏度系数随蒸汽质量流速的变化规律。随着蒸汽质量流速的增大,偏度系数迅速增大并最终接近于零。当蒸汽质量流速较低时,偏度系数为负值且绝对值较大,这说明此时压力波动在平均值以下的数值所占比例较高,这与概率密度函数分布图反映的情况一致。

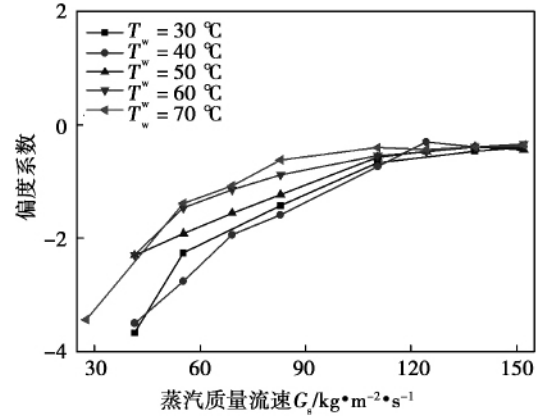


图 7 压力波动信号的偏度系数随蒸汽质量流速的变化规律

Fig. 7 Variation of skewness coefficient with steam mass flux

从变化趋势上看,峭度系数与偏度系数的变化规律相反。图 8 中对于蒸汽质量流速非常低的情况,峭度系数极高,表明其 PDF 分布非常尖锐,意味着喷嘴通道内液塞积聚喷发以及蒸汽泡在喷嘴外膨胀的时间很长。峭度系数随着蒸汽质量流速的增大而迅速减小并最终接近于零。

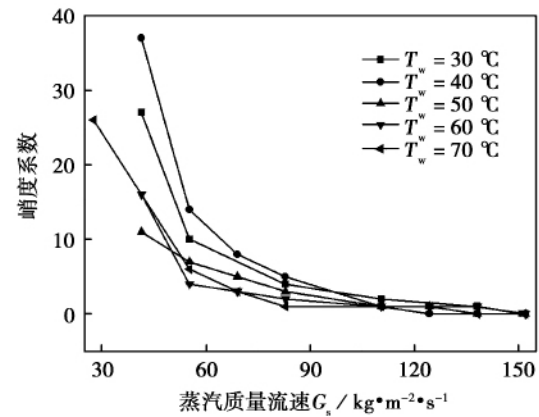


图 8 压力波动信号的峭度系数随蒸汽质量流速的变化规律

Fig. 8 Variation of kurtosis coefficient with steam mass flux

#### 4 结 论

本文研究了管内水蒸气直接接触凝结所诱导的压力波动特性。主要结论如下:

- (1) 水蒸气以较低质量流速发生直接接触凝结

时,压力波呈现低频大幅的波动规律,反映了低蒸汽质量流速时凝结高度不稳定的本质特性;

(2) 随着蒸汽质量流速的增大,压力波标准差呈现先增大后减小的趋势,并且标准差随蒸汽质量流速增长的速率要高于其达到最大值之后减小的速率;

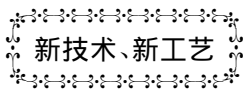
(3) 对于低蒸汽质量流速,概率密度函数分布为明显的尖锐单峰结构。随着蒸汽质量流速的增大,偏度系数迅速增大并最终接近于零,峭度系数迅速减小并最终接近于零。

参考文献:

[1] KERNEY P, FAETH G, OLSON D. Penetration characteristics of a submerged steam jet [J]. *AIChE Journal*, 1972, 18 (3): 548 - 553.  
 [2] Chan C K, C K B Lee. A regime map for direct contact condensation [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1982, 8(1): 11 - 20.  
 [3] NARIAI H, AYA I. Fluid and pressure oscillations occurring at direct contact condensation of steam flow with cold water [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1986, 95: 35 - 45.  
 [4] AYA I, NARIAI H. Boundaries between regimes of pressure oscil-

lation induced by steam condensation in pressure suppression containment [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1987, 99: 31 - 40.  
 [5] KIM H Y, CHO S, SONG C H, et al. Experimental study on characteristics of steam condensation in a sub-cooled water pool [J]. *Energy Engineering Journal*, 1999, 8(2): 298 - 308.  
 [6] YOUN, HYUN D. 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.  
 [7] 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.  
 [8] HONG S J. Modeling of pressure oscillation for submerged condensing steam jet in choked condition [J]. *Proceedings of the 3rd IASME/WSEAS Int Conf on HEAT TRANSFER, Thermal Engineering and Environment*, 2005: 332 - 337.  
 [9] QIU B, TANG S, Yan 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.  
 [10] QIU B, YAN J, LIU J, et al. Experimental investigation on the second dominant frequency of pressure oscillation for sonic steam jet in subcooled water [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, 58: 131 - 138.

( 单丽华 编辑)



## MAN 6.5 MW 重型燃气轮机

MAN Diesel & Turbine 于 2012 年推出了 6.5 MW 重型 MGT6100/6200 燃气轮机。

单轴 MGT6100 发电用燃气轮机和双轴 MGT6200 机械驱动用燃气轮机被设计成快速启动,在不到 10 min 时间内可从零到满负荷输出功率、也可连续负荷运行和高效率地部分负荷运行。

撬装的 MGT6200 的自由动力涡轮以 12 600 r/min 最大转速运行,直接驱动高速气体压缩机。

MGT6100 发电用燃气轮机和 MGT6200 机械驱动用燃气轮机的技术规范和额定性能:

型号	推出年份	ISO 基本负荷额定功率/kW	热耗率 /kJ · (kWh) <sup>-1</sup>	效率 /%	压比	质量流量 /kg · s <sup>-1</sup>	涡轮转速 /r · min <sup>-1</sup>	排气温度 /°C	大约的尺寸	
									大约的重量/kg	L × W × H (长 × 宽 × 高) / m × m × m
MGT6100	2012	6 520	11 246	32.0	15.0	28.0	1 500 / 1 800	465	/	/
MGT6200	2012	6 900	7 891	34.0	15.0	28.1	12 000	460	/	/

( 吉桂明 摘译)

一种多种群混合搜索微分进化算法优化换热网络 = A Differential Evolution Algorithm with Hybrid Search Strategy based on Multi-population for Heat Exchanger Network Synthesis [刊, 汉] DUAN Huan-huan, CUI Guo-min, CHEN Jia-Xing, CHEN Shang (Research Institute of New Energy Science and Technology, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(12). - 1~6

The basic differential evolution (DE) algorithm dropped into the local optimum when applied in the synthesis of heat exchanger networks. To solve this phenomenon of premature convergence, a DE algorithm incorporated with a hybrid search strategy based on multi-population was proposed in this paper. Firstly, the opposite population of initial population was repeatedly used to improve the diversity of the population. Accordingly, the population was updated using different optimization strategies to improve the ability of local exploration. The results showed that this novel method could further enrich the population diversity and overcome the flaw of premature convergence. Moreover, the convergent speed and the stability of the algorithm were significantly enhanced. **Key words:** differential evolution algorithm, multi-population, hybrid search, heat exchanger network

垂直管内水蒸气与水接触凝结所诱导的压力波特性实验研究 = An Experimental Investigation on the Pressure Oscillation Induced by the Steam Jet Condensation in Water Flow within a Vertical Pipe [刊, 汉] ZHANG Jia, ZHANG Chao (Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi Province, China, Post Code: 710054), XU Qiang, GUO Lie-jin (State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi Province, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(12). - 7~11

An experimental investigation on the pressure oscillation induced by the steam jet condensation in water flow in pipes was conducted in this work. The saturation vapor with mass flow rate  $0 \sim 150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  and pressure  $0.2 \sim 0.4 \text{ MPa}$  was injected into the water flow in the vertical pipe through a nozzle of diameter 8 mm. The water temperature and pressure ranges of the pipe flow are  $30 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$  and  $0.11 \sim 0.15 \text{ MPa}$ , respectively. The pressure fluctuation signal was captured by detecting the wall pressure signal. This paper systematically analyzed variations of the pressure wave which had low frequency and high amplitude with time at low steam mass flow rate, and presented the quantitative changes of pressure oscillation amplitude with steam mass flow rate and subcooled water temperature. And also included was the probability density function distribution, the variation of skewness coefficient and kurtosis coefficient of pressure fluctuation signal. **Key words:** steam condensation, pressure wave, the nozzle