

DOI: 10.7652/xjtuxb201401009

# 单喷嘴蒸汽射流凝结引起的压力振荡研究

武心壮<sup>1,2</sup>, 邱斌斌<sup>2</sup>, 种道彤<sup>2</sup>, 严俊杰<sup>2</sup>

(1. 国家核电技术公司上海核工程研究设计院, 200233, 上海;

2. 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:** 为了得到蒸汽在过冷水中浸没射流凝结引起的压力振荡规律, 针对不同的过冷水温度和轴向距离对压力振荡特性进行实验研究。实验系统主要包括蒸汽发生器、稳压罐、喷嘴、水箱、仪表、可视化系统和数据采集系统。测量得到了不同轴向位置的压力振荡峰值, 通过快速傅里叶变换得到了压力振荡的主频, 并分析了过冷水温度和轴向距离对压力振荡特性的影响规律。结果表明: 压力振荡峰值总体上随温度升高而增大, 但在水温较高时出现下降趋势; 主频随着水温的降低而增大, 但不随轴向距离的增大而变化。同时, 利用前人提出的公式对本实验条件下的主频进行了计算, 计算值与实验值具有相同的变化趋势, 且吻合得较好。

**关键词:** 压力振荡; 峰值; 主频

**中图分类号:** TK2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)01-0048-05

## Pressure Oscillation Induced by Steam Jet Condensation in Water Through a Nozzle

WU Xinzhuang<sup>1,2</sup>, QIU Binbin<sup>2</sup>, CHONG Daotong<sup>2</sup>, YAN Junjie<sup>2</sup>

(1. State Nuclear Power Corporation Ltd., Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai 200233, China;

2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710019, China)

**Abstract:** In order to obtain the pressure oscillation characteristics due to steam jet in water, an experiment was carried out to investigate the pressure oscillation characteristics at various axial positions and different water temperatures. The experimental system mainly consists of a steam generator, a surge tank, a nozzle, a water tank, instrumentations, a camera and a data acquisition system. The pressure oscillation amplitudes were measured and the main frequency was gained by the FFT method. The effects of the water temperature and position on the oscillation characteristic were analyzed. The results show that pressure oscillation amplitudes increased with water temperature, but a decreasing trend was found at high water temperatures. The main frequency decreased as water temperature increased, while the axial position had no effect on the main frequency. In addition, an existing correlation was used to predict the main frequency, and a good agreement was achieved between the predictions and the experiment data.

**Keywords:** pressure oscillation; peak magnitude; main frequency

由于蒸汽在过冷水中浸没射流凝结具有高效的混合与换热能力, 因此与其相关的设备广泛地用于

多种工业场合, 如能源行业中应用的汽水混合加热器、蒸汽-水喷射器<sup>[1-2]</sup>, 特别是核工业中轻水反应堆

收稿日期: 2013-03-29。 作者简介: 武心壮(1982—), 男, 博士, 高级工程师。 基金项目: 国家核电技术公司员工自主创新项目专项资金资助项目(SNP-KJ-CX-2011-0008); 国家自然科学基金资助项目(51125027)。

网络出版时间: 2013-10-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20131017.0827.011.html>

的卸压系统,例如先进反应堆 AP1000 中安全壳内换料水箱中的鼓泡器卸压即采用了蒸汽射流凝结换热的机理。

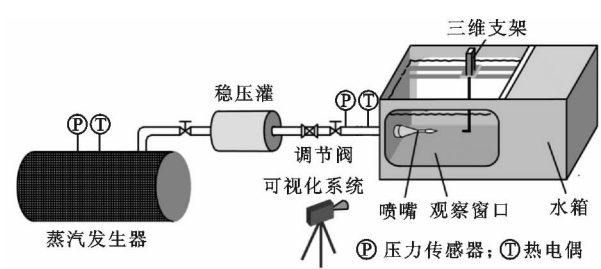
目前,国内外学者对蒸汽浸没射流流场参数的研究主要包括压力、温度和速度等,其中压力振荡特性是相关工业设备设计中关注的内容。美国学者 Simpson 在研究亚音速蒸汽浸没射流的过程中,观察到了周期性的界面运动,以及气泡生成、生长、分离的过程,并测得了压力脉动特性<sup>[3]</sup>。韩国学者 Youn 等研究了低蒸汽质量流率下间歇流区域的压力脉动特性,发现压力波的产生频率在 10~50 Hz 时随着蒸汽质量流率的增加而增加,但是几乎不受过冷水温度的影响<sup>[4]</sup>。韩国学者 Cho 等实验研究了多孔蒸汽射流压力波动特性,结果表明压力波动频率随着蒸汽质量流率和过冷度的增加而增大,并分析了与气泡动力学特性的关系<sup>[5]</sup>。此外,美国学者 Eden 等、刘光耀、潘冬冬等以及本文作者都先后对蒸汽射流流场中的压力分布进行了研究和分析<sup>[1-2,6-9]</sup>。

由于蒸汽浸没射流凝结引起的压力振荡是设备设计应关注的问题,但目前国内外对此相关的研究却比较匮乏,故本文针对不同的过冷水温度和轴向距离,对蒸汽浸没射流凝结引起的压力振荡特性进行实验研究,得到了上述参数对压力振荡特性的影响规律,为丰富汽液两相流理论积累了实验依据,并为相关的设备设计提供了一定的参考。

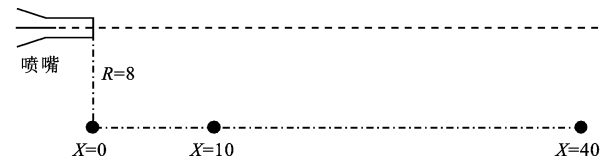
1 实验系统与方法

图 1 所示为蒸汽浸没射流凝结引起的压力振荡实验研究的系统示意图和测点布置示意图。实验系统主要包括蒸汽发生器、稳压罐、喷嘴、水箱、三维支架、压力传感器、热电偶、可视化系统和数据采集系统。本实验中直接测量的参数有饱和蒸汽压力、水箱中过冷水的温度,以及不同测点处的压力振荡特性。蒸汽参数由喷嘴入口的传感器测量得到,压力振荡特性参数由装在三维支架上的高频动态压力传感器测量,过冷水温度由装在水箱中的热电偶测量。

本实验在轴向位置布置了 3 个测点,以研究不同轴向位置的压力振荡特性,表 1 所示为详细的测点位置和汽水参数。实验中当汽水参数达到设定值后,移动三维支架上的压力探针测量设定轴向位置的压力振荡特性,本实验采用 NI 采集系统,采样频率为 5 kHz;高频动态压力传感器响应频率为 4 kHz,量程为 -100~100 kPa,满量程精度为



(a)实验系统示意图



(b)测点布置示意图

图 1 蒸汽射流凝结引起的压力振荡实验系统示意图

0.25%;K 型热电偶精度为 1℃。由于实验研究中存在不可避免的测量误差和系统误差,本文使用 Moffat 方法<sup>[10]</sup>和文献<sup>[11]</sup>中介绍的对快速傅里叶变换不确定度的计算方法来分别分析压力振荡幅值和振荡主频的不确定度。

表 1 实验条件

| 参数                                                         | 数值                |
|------------------------------------------------------------|-------------------|
| 出口直径 $d_e/\text{mm}$                                       | 8                 |
| 归一化径向距离 $R$                                                | 8                 |
| 归一化轴向距离 $X$                                                | 0、10、40           |
| 水温 $t_w/^\circ\text{C}$                                    | 20、30、40、50、60、70 |
| 蒸汽压力 $p_s/\text{MPa}$                                      | 0.2               |
| 蒸汽质量流率 $G_e/\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ | 298               |

注: $R$  和  $X$  分别为径向距离和轴向距离与喷嘴出口直径的比值。

对于直接测量量的不确定度

$$u = (u_a^2 + u_b^2)^{1/2} \tag{1}$$

$$u_a = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)} \right]^{1/2} \tag{2}$$

$$u_b = \Delta/3^{1/2} \tag{3}$$

式中: $u_a$  和  $u_b$  分别为直接测量量不确定度的 A 类分量和 B 类分量; $x_i$  为直接测量量; $\bar{x}$  为直接测量量的平均值; $n$  为测量次数; $\Delta$  为仪表误差。

对于快速傅里叶变换引入的不确定度

$$u_{\text{rel}} = (u_{\text{rel1}}^2 + u_{\text{rel2}}^2)^{1/2} \tag{4}$$

$$u_{\text{rel1}} = (8m + 3)^{1/2} \sigma \tag{5}$$

$$\sigma^2 = 2^{-2B}/12 \tag{6}$$

$$u_{\text{rel}2} = \varepsilon / 8^{1/2} \quad (7)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{N \sin(\pi/2N)} \quad (8)$$

式中:  $u_{\text{rel}1}$  和  $u_{\text{rel}2}$  分别为叠形运算舍入误差引入的不确定度分量和窗函数以及栅栏效应引入的不确定度分量;  $\sigma^2$  为相对误差的方差;  $N$  为傅里叶变换长度;  $m = \text{lb}N$  为级数;  $B$  为计算机计算长度;  $\varepsilon$  为窗函数以及栅栏效应引入的最大误差。根据实验中使用的压力传感器等的精度以及上述不确定度的计算方法, 可以得到实验中压力振荡幅值和振荡主频的最大不确定度分别为 12.6% 和 12.8%。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 幅值

图 2 所示为  $X=0$ , 水温为 20、40 和 60 °C 时, 在时间 0.05 s 内的压力振荡特性。从图中可以明显看出压力振荡规律, 当水温比较低时, 压力振荡幅值比较小, 随着水温的升高, 压力振荡的幅值逐渐增大。这是由蒸汽凝结特性所决定的, 当水温比较低时, 过冷水的冷凝作用强, 蒸汽迅速被凝结, 汽液界

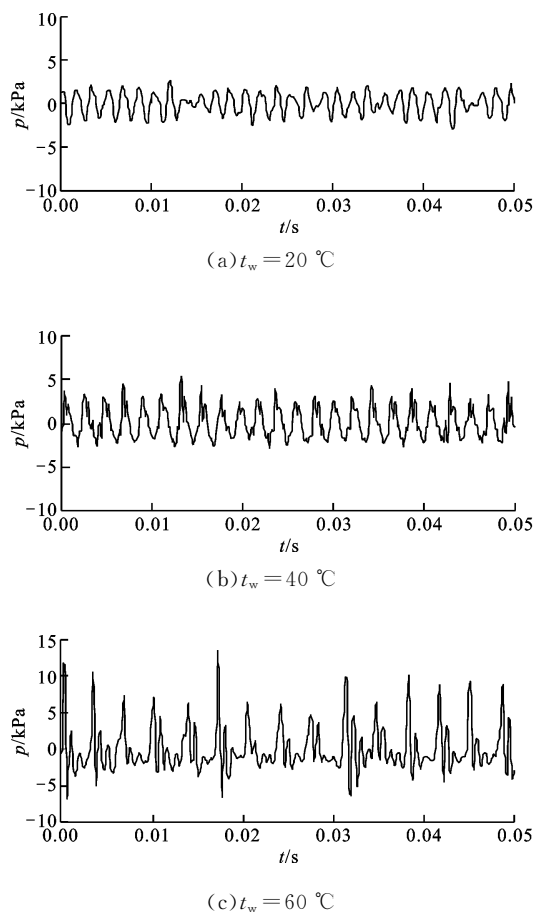


图 2 不同水温下的压力振荡特性 ( $X=0$ )

面小且稳定, 振荡幅值小; 当水温升高时, 冷凝作用减弱, 汽液界面增大并且不稳定, 振荡幅值大。为了便于分析, 图 3 给出了该蒸汽质量流率下, 不同水温对应的凝结形态。低水温时, 蒸汽射流形成了稳定的汽羽, 水温从 40 °C 到 50 °C 时, 汽羽逐渐不稳定, 特别是在高水温时, 汽羽逐渐发散, 所以蒸汽射流的压力振荡特性与凝结特性和凝结形态是一致的。

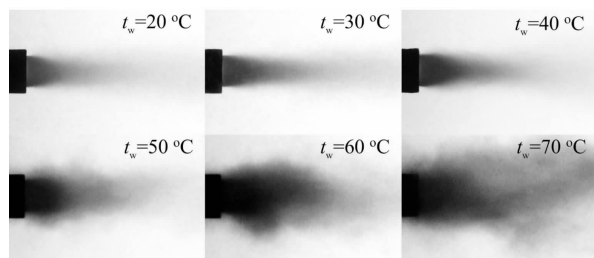


图 3 不同水温下的凝结形态

为了分析压力振荡幅值的规律, 本文定义压力振荡峰值  $p_{\text{max}}$  和均方根值  $p'$  如下

$$p_{\text{max}} = \max(p_1 \cdots p_N) \quad (9)$$

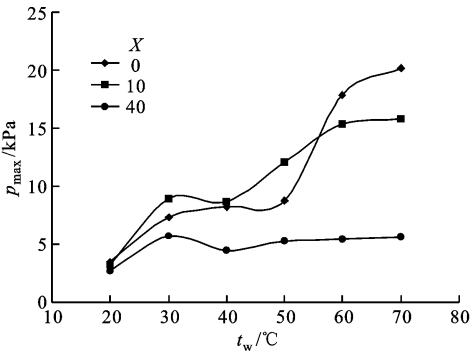
$$p' = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

式中:  $\bar{p}$  为压力振荡平均值, kPa;  $N$  为采点数量。峰值为所测量压力振荡的最大值, 均方根值用来描述压力振荡整体趋势的变化。

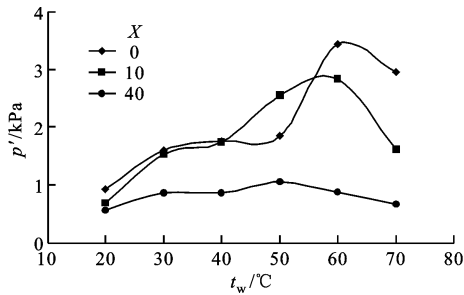
本文对 2 s 内的压力振荡特性进行分析, 图 4 所示为不同轴向距离时, 压力振荡峰值和均方根值随水温的变化规律。图 4a 中, 在本实验选取的近距离测点内, 压力振荡峰值在高水温时可达到 20 kPa, 当测点较远时, 压力振荡峰值约为 5 kPa。图 4b 反映了压力振荡均方根值的变化趋势。总体上, 压力随着温度的升高而升高, 但是当水温达到 60 °C 左右时, 压力开始出现下降的趋势。韩国学者 Cho 在介绍前人的研究结果时, 报告过类似的规律, 压力峰值出现在水温 60~80 °C 左右<sup>[5]</sup>。本文上述讨论中对压力振荡幅值随水温升高而增大进行了分析, 实际上, 当在水温逐渐升高趋于饱和温度的过程中, 冷凝能力逐渐降低, 蒸汽射流凝结现象越来越不明显, 从而由凝结产生的压力振荡会逐渐消失。因此, 随着水温上升到一定程度, 压力振荡幅值出现下降趋势。

### 2.2 频率

图 2 中描述的是蒸汽射流凝结引起的时间域压力振荡信号, 对于压力振荡频率可以用快速傅里叶变换 (FFT) 方法分析, 并用主频表征。傅里叶变换把复杂的信号考虑成由一定振幅、相位、频率的基本正弦 (余弦) 信号组合而成, 将函数向一组正交的正



(a)峰值随过冷水温度的变化



(b)均方根值随过冷水温度的变化

图 4 压力振荡峰值和均方根值随过冷水温度的变化

弦、余弦函数展开,傅里叶变换的目的就是找出这些基本正弦(余弦)信号中振幅较大信号对应的频率,从而找出复杂信号中的主要振动频率特点,快速傅里叶变换是傅里叶变换的快速算法。图 5 所示为  $X=0$  时,不同水温下压力振荡的频域特性。从图中可以看出,主频在 200~600 Hz 之间,且主频随着水温的降低而增大,这也可以直观地从图 2 的时间域压力振荡特性中看出。这是由于随着水温降低,冷水的过冷度增大,冷凝作用增强,蒸汽迅速被凝结,汽液界面处气泡存在的时间短暂,所以引起的压力振荡频率大。图 6 所示为在水温为 40 °C 时,不同归一化轴向距离下压力振荡的频域特性。从图中可以

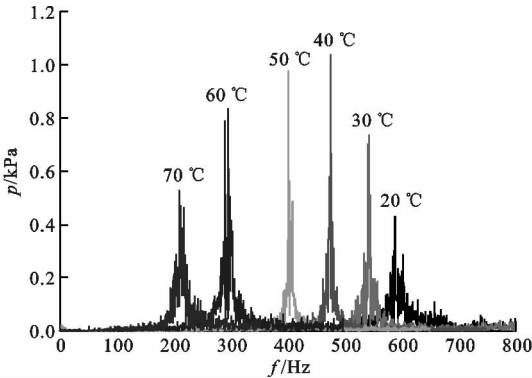


图 5 不同水温下压力振荡的主频( $X=0$ )

看出,虽然随着轴向距离的增大,幅值逐渐减小,但是主频相同。这也说明在压力振荡的传播中,能量逐渐减小,但是频率不变。

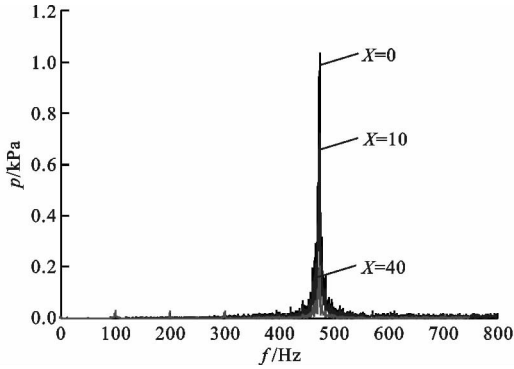


图 6 不同归一化轴向距离下压力振荡的主频( $t_w=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Fukuda 在对蒸汽凝结引起的压力振荡的频率研究中得到主频正比于冷水过冷度  $\Delta t$ ,反比于喷嘴直径  $d_e$ ,并提出了计算主频的简单关系式<sup>[12]</sup>

$$f=60\Delta t/d_e\tag{11}$$

本文利用上述关系式计算得到的频率与本实验压力振荡 FFT 分析得到的主频比较结果如图 7 所示,计算值与实验值的变化趋势一致,并且吻合得较好,误差在  $\pm 8\%$  以内。

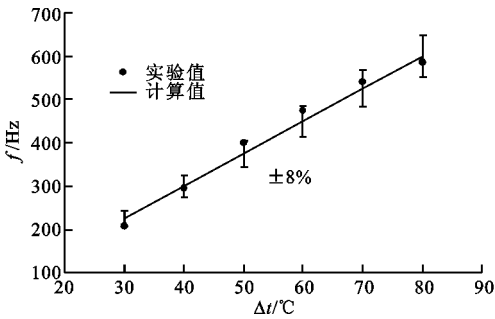


图 7 压力振荡频率计算值和实验值的比较

3 结 论

本文针对不同位置和过冷水温度,对饱和蒸汽在过冷水中浸没射流凝结引起的压力振荡特性进行了实验研究,主要结论如下。

(1)蒸汽射流的压力振荡特性与凝结特性和凝结形态是一致的。当水温较低时,压力振荡幅值较小,随着水温的升高,压力振荡的幅值逐渐增大。

(2)压力振荡幅值随着温度的升高而增大,但是当水温达到 60 °C 左右时,压力开始出现下降的趋势。这是由于在水温逐渐升高趋于饱和温度的过程中,蒸汽射流凝结现象越来越不明显,由凝结产生的

压力振荡会逐渐消失,从而随着水温上升到一定程度,压力振荡幅值出现下降趋势。

(3)主频随着水温的降低而增大,这是由于水温降低时,冷水的过冷度大,蒸汽迅速被凝结,汽液界面处气泡存在的时间短暂,所以引起的压力振荡频率大。当水温相同时,主频不随轴向距离的增大而变化,这也说明在压力振荡的传播中,能量逐渐减小,但是频率不变。

(4)利用前人给出的关系式计算得到的频率与本文得到的主频变化趋势一致,并且吻合得较好,误差在 $\pm 8\%$ 以内。

## 参考文献:

- [1] 武心壮,潘如东,严俊杰. 蒸汽浸没射流凝结引起的冲击特性研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(5): 805-808.  
WU Xinzhuang, PAN Rudong, YAN Junjie. Research on impact characteristic of steam jet in water [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(5): 805-808.
- [2] 武心壮,李文军,严俊杰. 音速蒸汽浸没射流凝结轴向全压分布特性研究[J]. 核动力工程, 2012, 33(6): 76-80.  
WU Xinzhuang, LI Wenjun, YAN Junjie. Research on axial total pressure distributions of sonic steam jet in subcooled water [J]. Nuclear Power Engineering, 2012, 33(6): 76-80.
- [3] SIMPSON M E, CHAN C K. Hydrodynamics of a subsonic vapor jet in subcooled liquid [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1982, 104(2): 271-278.
- [4] YOUN D H, KO K B, LEE Y Y, et al. The direct contact condensation of steam in a pool at low mass flux [J]. Journal of Nuclear and Technology, 2003, 40(10): 881-885.
- [5] 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.
- [6] EDEN T J, MILLER T F, JACOBS H R. The center-line pressure and cavity shape of horizontal plane choked vapor jets with low condensation potential [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1998, 120(4): 999-1007.
- [7] 刘光耀,严俊杰,潘冬冬,等. 超音速蒸汽浸没射流汽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.
- [8] 潘冬冬,武心壮,严俊杰,等. 超音速蒸汽浸没射流尾部速度的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(8): 1324-1326.  
PAN Dongdong, WU Xinzhuang, YAN Junjie, et al. Experimental study on velocity distribution for the tail of supersonic steam jet [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(8): 1324-1326.
- [9] WU X Z, YAN J J, LI W J, et al. Experimental study on a steam-driven turbulent jet in subcooled water [J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240(10): 3259-3266.
- [10] MOFFAT R J. Describing the uncertainties in experimental results [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1988, 1(1): 3-17.
- [11] 宋琼,朱长春,牛宝良. 基2快速傅里叶变换引入的不确定度估算[J]. 计量学报, 2004, 3(25): 281-283.  
SONG Qiong, ZHU Changchun, NIU Baoliang. The uncertainty evaluation of base 2 fast Fourier transfer [J]. Acta Metrologica Sinica, 2004, 3(25): 281-283.
- [12] FUKUDA S. Pressure variations due to vapor condensation in liquid: II Phenomena at larger vapor mass flow flux [J]. Journal of the Atomic Energy Society of Japan, 1982, 24(6): 466-474.

## [本刊相关文献链接]

- 韩辉,何雅玲,唐桂华. 硫酸蒸气在换热器表面沉积特性的数值研究. 2013, 47(11): 7-13. [doi: 10. 7652/xjtuxb201311002]
- 王斯民,文键. 无短路区新型螺旋折流板换热器换热性能的实验研究. 2012, 46(9): 12-15. [doi: 10. 7652/xjtuxb201209003]
- 李瑜,李亮,钟刚云,等. 末级透平对低压缸气动和凝结特性的影响. 2012, 46(7): 16-20. [doi: 10. 7652/xjtuxb201207004]
- 张侨禹,赵红利,侯予. 间壁式筛网网格换热器的性能分析. 2012, 46(1): 24-29. [doi: 10. 7652/xjtuxb201201005]
- 郭宪民,王善云,汪伟华,等. 环境参数对空气源热泵蒸发器表面霜层影响研究. 2011, 45(3): 30-34. [doi: 10. 7652/xjtuxb201103005]
- 何伟峰,戴义平,马庆中,等. 环境风影响下直接空冷单元背压预测研究. 2011, 45(1): 15-20. [doi: 10. 7652/xjtuxb201101004]

(编辑 荆树蓉)