

换热器管道内漏故障状态与声发射信号特征 定量关系实验研究

李录平, 吴昊, 黄章俊, 晋风华

(长沙理工大学 能源与动力工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 换热器内漏故障一般以早期缝隙泄漏为特点, 为能早期发现并防治这些故障, 设计并搭建了换热器内漏声发射检测实验台。通过改变换热管入口压力的方式, 模拟缝隙泄漏口内外工质压差的变化引起的泄漏状态的改变。运用小波分解技术对 0.1~0.6 MPa 入口压力下所测得的所有实验数据进行分析, 揭示了不同入口工况下泄漏信号的声发射信号频谱特征及相关参数随压力变化的规律, 得到了实际声发射信号能量与泄漏量之间的定量关系式, 为换热器内部泄漏故障诊断提供了理论和实验依据。

关键词: 换热器; 内漏; 声发射信号; 小波分解

中图分类号: TK172.4 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.06.003

引言

换热器是火电厂的关键热力设备, 其中回热系统的表面式加热器(特别是高压加热器)处于高温、大压差、高应力等恶劣环境之中运行, 经常发生换热管道泄漏故障。若能对换热管道的运行情况进行实时监测, 提前判断换热管泄漏的大小及变化趋势, 既能有效防止事故扩大又能根据机组运行情况合理安排检修时间, 最大程度降低经济损失^[1]。

声发射技术作为一种动态无损检测手段, 具有对检测对象的变化敏感、不受检测对象工作条件限制、能有效避开低频信号干扰等优点^[2], 适用于电厂换热器的内漏检测。近年来, 国内外学者在基于声发射技术的换热管泄漏检测方面作了大量的研究工作, 但是这些研究工作以声发射信号分析为主, 换热管泄漏故障状态与声发射信号特征的定量关系的研究还鲜有文献报道, 正因为缺少此方面的研究成果, 导致换热管泄漏故障声发射检测技术尚未获得工程实际的广泛认可^[3]。

小波分析十分适合于对时变信号进行局部分

析, 对于分析含有瞬态现象的声发射信号尤为适合。本文基于声发射信号小波分析方法, 在实验室模拟了有泄漏和无泄漏两种模式的若干工况条件下的换热器内部流动状态, 并采集了上述模拟工况下的声发射信号, 利用小波分解方法对各工况下的声发射信号进行分析, 获得了声发射信号和泄漏量随入口压力变化的关系, 为声发射技术在换热器内漏在线检测中的实际应用指出了新的方向。

1 实验系统与实验方法

1.1 实验系统简介

本文所使用的实验台具体结构如图1所示。泄漏故障的模拟主要是在冷态工况下进行, 由水泵将进水升压后打入换热管中, 通过控制调节阀开度调节换热管进水口与壳内大气之间的压力, 形成压差使流体流经带有缝隙的管道时产生泄漏。模拟换热器本体由换热管道、外壳及折流板组成, 在换热管的入口处装有压力计来读取换热管入口压力。

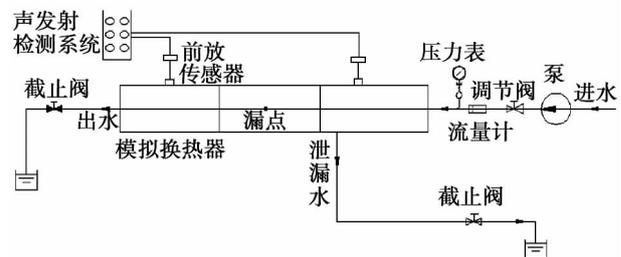


图1 模拟换热器内漏声发射信号检测实验台

Fig. 1 Acoustic emission signal test bench of inner-leakage in heat exchanger

本文开发出了声发射信号数据采集与小波分解程序。系统硬件由2个SR-150M型声发射传感

收稿日期: 2015-07-20; 修订日期: 2015-09-15

作者简介: 李录平(1963-), 男, 湖南邵阳人, 长沙理工大学教授。

器和一块 2 通道的 PCI-20612 并行数据采集卡构成,采集泄漏过程中的声发射信号,采样频率设定为 2 MHz。

实验台的主要功能有:

(1) 模拟表面式换热器内漏。本实验中备有两根 20 号碳钢管来分别模拟有缝隙和无缝隙两种模式下的流动工况,其中一根使用了线切割工艺将管道一侧切了一条长 30 mm、宽 0.2 mm 的漏缝,另一根完好;

(2) 模拟泄漏声发射信号参数、泄漏量和入口压力三者之间的关系。在本实验中依次采集换热管入口压力为 0.1~0.6 MPa 范围内以 0.1 MPa 为间隔,采集 6 个工况下的微小缝隙泄漏信号来判定泄漏是否发生,定性得出口压力变化和泄漏声发射信号特征之间的变化关系;待泄漏工况稳定后通过定时量取泄漏水的体积来计算泄漏率的大小;

(3) 模拟缝隙泄漏声发射信号在换热器上的传播特性。当压力管道存在缝隙产生泄漏时,将在缝隙处形成平面射流。这一射流不仅扰乱管外流体的流场,而且会对周围管道产生冲击作用,在管壁上产生应力波。这种波在管壁上传播直到换热器外壳被传感器采集到。为做到尽量与实际换热器泄漏声发射信号相似,实验台上换热管的管内水流速度控制在 10~20 m/s 范围内,使实验台内换热管管内流动雷诺数与电厂换热器实际运行时的雷诺数接近。

1.2 实验方法

先将带有 30 mm 长漏缝的实验管装入实验台中。通过调节换热管入口处的阀门开度使换热管入口水压分别保持在 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 和 0.6 MPa 处,分别进行实验和数据采集。待各工况点调整结束并运行稳定后,记录相关参数并采集相应工况下的声发射信号,并计算出泄漏流量。然后将无漏缝的换热管道装入实验台中,重复以上过程以作对比分析。

2 实验数据分析

2.1 小波消噪过程及计算方法

由于泄漏声发射信号的频率分布较宽,通常利用小波分析方法对所采集的泄漏信号进行频谱分析^[4]。通过将声发射数据采集系统采集到的含噪

信号分解到不同的频带,可以获取在不同的频带上被分析信号中的不同频率成分的特征。本文结合信号实际选用 Daubechies5 小波基对泄漏信号进行 5 层分解^[5],然后利用合适的阈值对 5 层信号进行小波降噪,最后进行信号重构、频谱分析及特征参数提取。小波消噪过程可按图 2 的流程进行。



图 2 小波降噪流程图

Fig. 2 Flow-chart of wavelet denoising process

设有 $\psi(t) \in L^2(R)$ ($L^2(R)$ 表示能量有限的信号空间) 经过傅里叶变换可将其转换为 $\hat{\psi}(\omega)$ 。当 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足允许条件:

$$C_\psi = \int_R \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

$\psi(t)$ 称为一个基本小波或者母小波,将函数 $\psi(t)$ 按照所需的要求进行伸缩和平移变换后,就能得到一个小波族函数:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

式中: a —伸缩因子; b —平移因子。

任意信号 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换可定义为:

$$W_f(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_R f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (3)$$

其逆变换为:

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int \int \frac{1}{a^2} W_f(a,b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (4)$$

在连续小波变换中,利用 $\psi_{a,b}(t)$ 可以得到任意信号 $f(t)$ 的连续小波变换 $W_f(a,b)$,利用 $W_f(a,b)$ 也可以将分解后的信号重构为 $f(t)$ 。

2.2 两种模式下声发射信号小波分析

2.2.1 信号多分辨分析

通过对两种模式(有泄漏模式和无泄漏模式)下所采集到的所有声发射信号,运用小波变换程序进行处理得到了图 3、图 4 的时域图和频域图。现将两种模式下具有代表性的 3 个工况(入口压力分别为 0.1、0.3 和 0.5 MPa)的频域特征进行对比分

析 如图 3、图 4 所示。频域图中的 d 为声发射信号经过小波降噪分解后得到的各层信号细节系数,其后所标注的数字为信号经过小波变换后对应的层数。经过小波分解声发射信号能被分解到多个层面

上进行观察,使得频域特征更加明显,在进行信号重构时可以自由选择特征信号,避免噪声信号,保证了故障特征信号的可靠性。

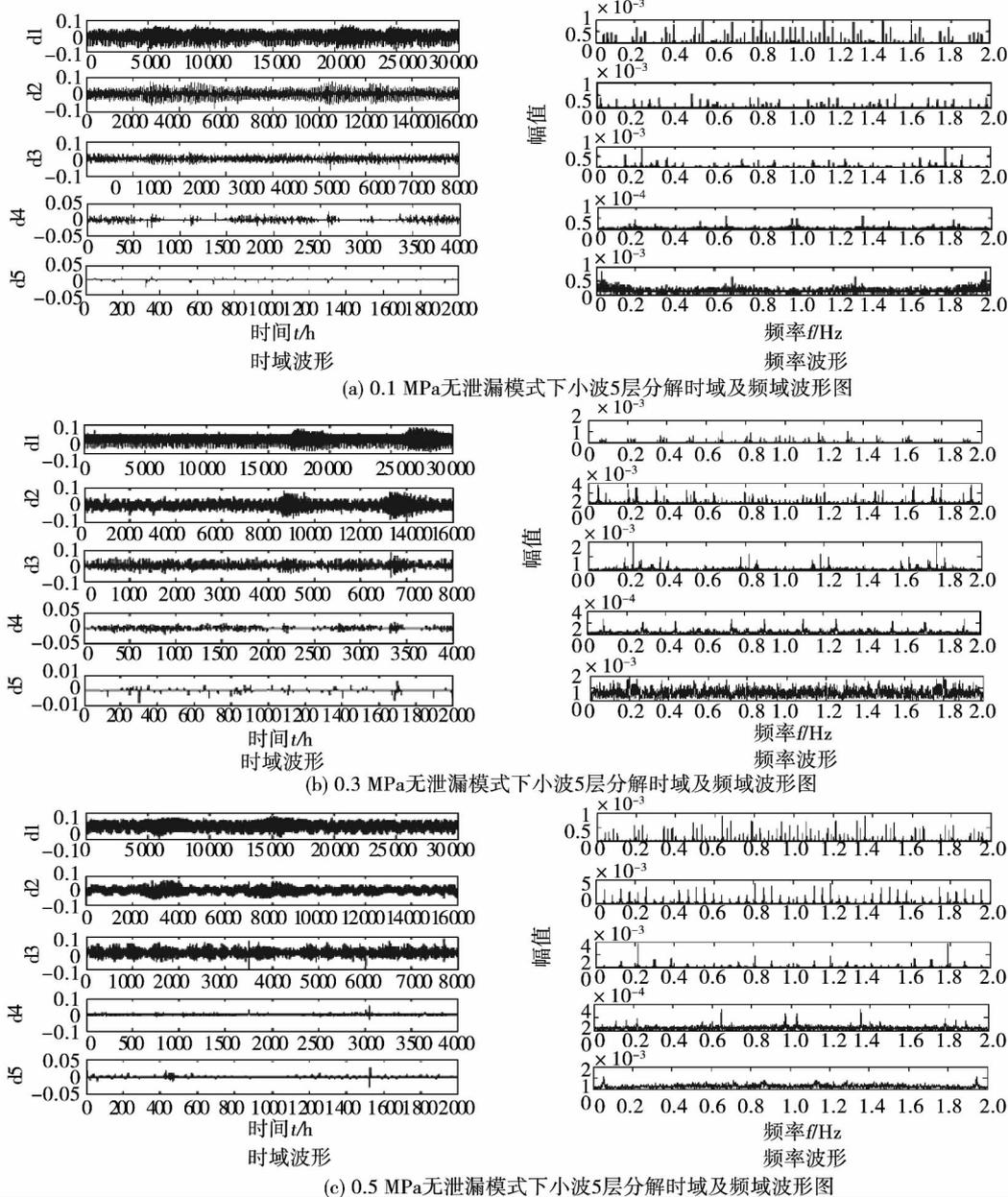


图 3 无泄漏模式下小波 5 层分解图

Fig. 3 Signal wavelet 5-layer decomposition diagram under no leaking mode

从图 3、图 4 中可以看出,改变换热管的入口压力(其实质效果等同于改变换热管内的水流速度和泄漏口的泄漏水流量)对各层信号的频域分布范围影响不大,只对各层信号的幅值变化有较大的影响。各对应工况下的泄漏信号频域分布呈现如下特点:

- (1) 换热管的泄漏声发射信号频率分布范围很广,频带很宽,跨度从几 Hz 到几 MHz,两种模式下的声发射信号频谱图有着明显的区别;
- (2) 从两种模式下的各层信号时域分布图和频域分布图可以看出:无泄漏模式下时域图和频域图

波形无明显特征,信号分布呈随机性特点;在泄漏模式下,各层信号随入口压力的增大信号幅值不断增加,在2、3、4和5层信号频域图上可以看到明显的尖峰,其信号频带基本固定,不随入口压力的变化而变化,其幅值与水压力呈正比例关系,主要频带范围

为 600 ~ 1 400 kHz;

(3) 对比同一工况下两种模式的各层信号在3、4和5层上均能看到分离出的特征信号,且特征信号幅值随入口压力的增加而增加。

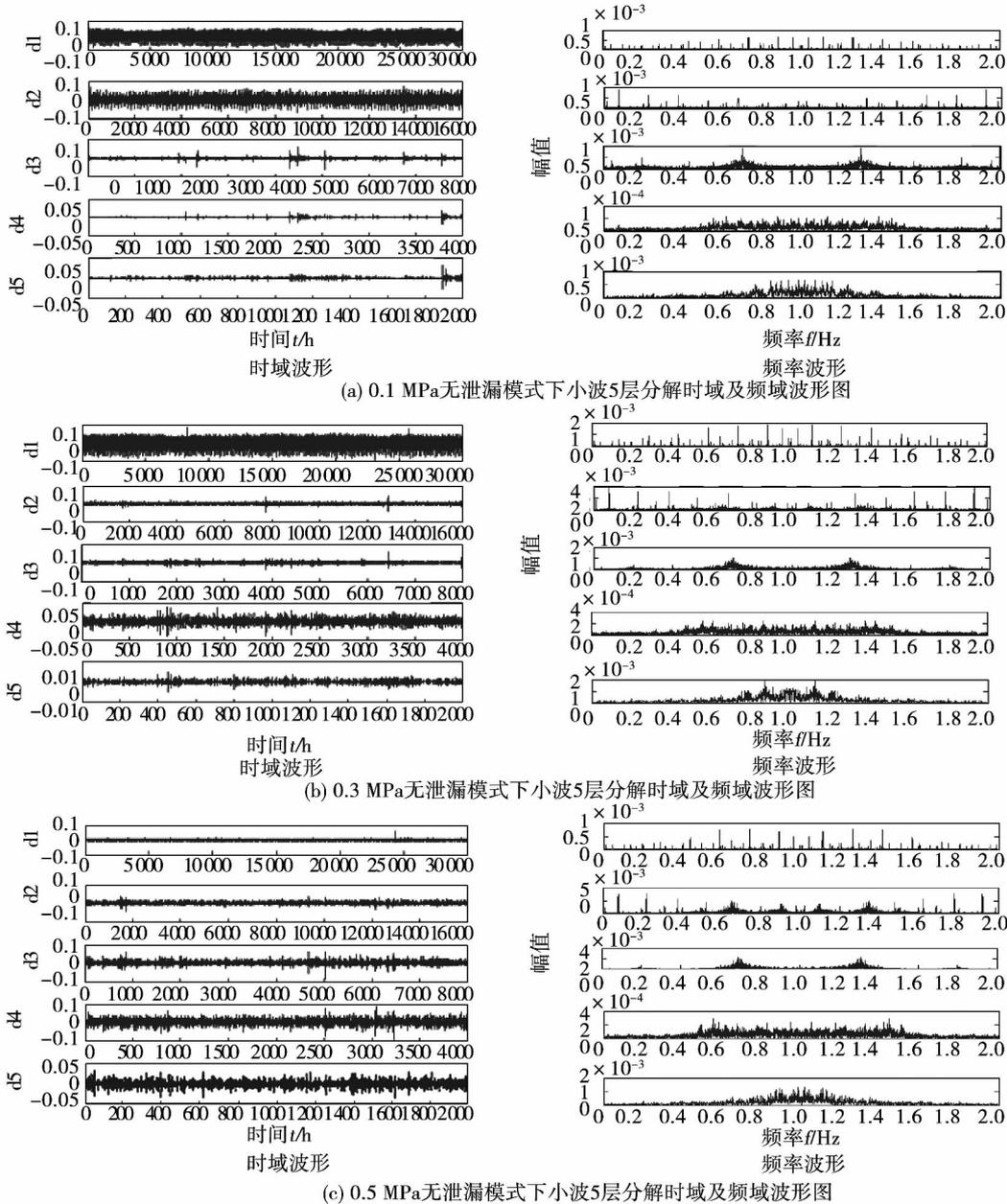


图 4 缝隙泄漏模式下小波 5 层分解图

Fig. 4 Signal wavelet 5-layer decomposition diagram under gap leaking mode

2.2.2 信号能量值分析

能量特征值通常被作为定量研究连续型信号的重要特征参数,缝隙泄漏声发射信号作为连续信号

通常也不例外,声发射信号的能量值通常可用信号的均方根值表示。当对声发射信号进行离散后其 RMS 值(能量值)数值计算公式如下^[6]:

$$E_s \propto RMS = \left(\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n]^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中: N —采样点数; $x[n]$ —声发射信号在每一采样点上的采样值。

根据信号能量计算公式可知, 将各层信号的幅值平方沿频率长度积分的值可视为本层的能量值。由于在不同模式下采集到的声发射信号所包含的信息成分不同, 声发射信号经过小波分解后, 其在各个分解尺度的分布就存在一定的差异, 这种差异主要是由目标声源的不同特征造成的。两种泄漏模式下对应各工况的信号小波分解后各层信号平均能量值计算结果及存在缝隙泄漏情况下各工况对应的泄漏量值变化趋势如图 5 ~ 图 6 所示。

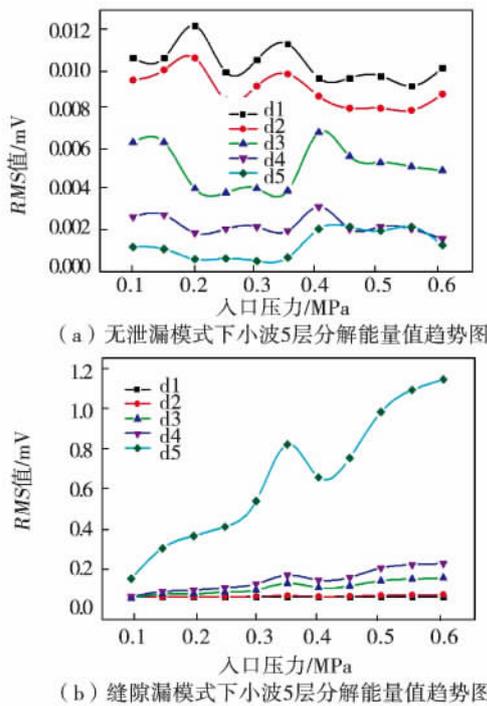


图 5 两种模式下小波 5 层分解能量值趋势图
Fig. 5 Energy value trend of signal five-layer wavelet decomposition under two modes

由图 5、图 6 可知: 在无缝隙泄漏模式下, 小波 5 层分解能量值波动具有随机性, 没有明显规律, 重构信号能量值几乎没有变化, 对入口压力变化不敏感; 在缝隙泄漏模式下小波 5 层分解能量值及重构信号能量值均随着入口压力的增加而增加, 重构信号能量值与入口压力之间存在指数关系, 满足关系式:

$$E_{cg} = 0.634P^{1.135} \quad (6)$$

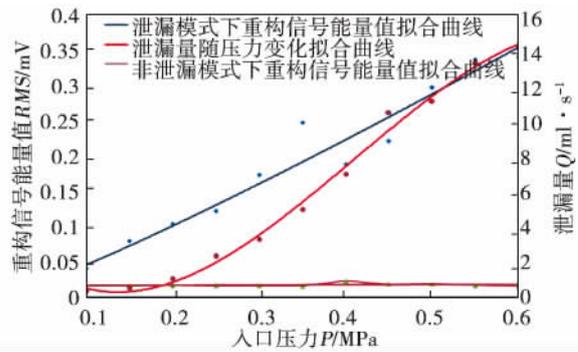


图 6 重构信号能量值及泄漏量随压力变化拟合曲线

Fig. 6 The fitted curves for energy of reconstructed signals and leakage with inlet pressure

经数据拟合, 泄漏量随压力变化满足如下关系式:

$$Q = 32.52P^2 + 8.23P - 1.427 \quad (7)$$

3 数值模拟结果与实验结果对比分析

将实验数据与数值模拟的数据对比可以发现^[7], 实验中所检测到的声发射能量随压力增长的变化趋势与模拟计算得出的泄漏射流具有的能量随工况的变化趋势十分相似, 这使得缝隙泄漏数值模拟结论与声发射检测实验结论得到了互相印证, 并从这些结论中可以得到一些内在的联系。

3.1 模拟曲线与实验曲线的对比分析

图 7 为相同工况下模拟计算得到的曲线与实验得到的曲线的对比。

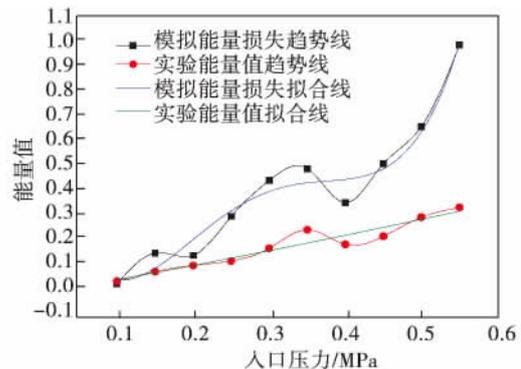


图 7 实验及模拟能量值随入口压力变化趋势
Fig. 7 The trend of experimental and simulated energy values with the inlet pressure

由图 7 中可知,在不同入口压力下经过数值模拟所得到的能量损失趋势线与声发射实验经小波分解降噪再重构之后所获得的信号能量趋势线走势及波动形状基本相似,总体上均是随着入口压力的增加而增加,通过两种方法所获得的数据具有较高的统一性。结合模拟数据经过多项式拟合和幂指数拟合方式,可以得到两能量值在相同的缝隙泄漏状态下随压力变化的关系式如下:

$$E_m = -37.3P^5 + 250P^4 - 254.7P^3 + 95.4P^2 - 12.8P + 0.6 \tag{8}$$

$$E_s = 0.626P^{1.146} \tag{9}$$

上式中, P 为换热管入口的入口压力,通过将入口压力与实测信号能量带入式(9)即可定性的判定泄漏是否存在。

3.2 换热器内漏定量诊断关系式导出

结合式(8)~式(9),可以建立实测声发射信号能量与泄漏量之间的定量关系式。

具体求法如下,

先建立所检测到的实验信号能量与模拟能量损失之间的关系:

$$E_m = 66.59E_s^3 - 33.9E_s^2 + 7.436E_s - 0.251 \tag{10}$$

根据数值模拟实验中的能量泄漏率与泄漏量之间的关系式,结合式(10)可得实际声发射信号能量与泄漏量之间的定量关系:

$$Q_x = (19.17E_s^3 - 9.76E_s^2 + 2.14E_s - 0.072)^{0.365} \tag{11}$$

式中: Q_x —理论泄漏量; E_s —实测信号能量值。关系式(11)建立起了实测声发射信号特征指标与换热器内漏流量之间的映射关系,利用该式可以诊断换热器内漏状态。

4 结 论

通过设计和搭建模拟换热器内漏声发射信号检测实验台,并对两种模式下所获得的实验数据进行分析,得到如下结论:

(1) 换热器内漏声发射信号频带很宽,跨度从几 kHz 到几 MHz。泄漏声发射信号的频率分布与漏缝的几何尺寸(形状,当量尺寸)、流道的材质及

光滑度、流体的密度及流动状态等因素有关;

(2) 泄漏模式下,泄漏声发射信号经小波变换分解获得的频域信号,具有较稳定的频域分布,频域图中的峰值频率基本不随入口压力的变化而变化,而其幅值随压力的升高而增加,同时得到了泄漏量和重构信号能量值随压力变化的拟合关系式;

(3) 随着工质入口压力的升高,泄漏声发射信号的各层能量值和重构信号的平均幅值都呈增长趋势。其中,泄漏声发射信号的各层能量值增长最为明显。这说明随着泄漏量的不断增加,被检出的机会越来越大。

参考文献:

[1] 张 晓,李录平. 高压加热器内部泄漏故障声发射检测的研究进展[J]. 汽轮机技术, 2010, 52(2): 81-84.
ZHANG Xiao, LI Lu-ping. The research progress of the detection of acoustic emission on high-pressure heater's internal leakage [J]. Turbine Technology, 2010, 52(2): 81-84.

[2] Sikorska J Z, Mba D. Challenges and obstacles in the application of acoustic emission to process machinery [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2008, 222(1): 2041-3009.

[3] 焦敬品,何存富. 管道声发射泄漏检测研究进展[J]. 无损检测, 2003, 25(10): 519-523.
JIAO Jing-pin, HE Cun-fu. Advance in acoustic emission techniques for pipeline leak detection [J]. Nondestructive Testing, 2003, 25(10): 519-523.

[4] 李兆南,龚 斌. 压力管道泄漏声发射信号频谱特性实验研究[J]. 声学技术, 2007, 26(3): 422-426.
LI Zhao-nan, GONG Bin. Experimental study on spectral characteristics of acoustic emission from pressure pipe leakage [J]. Technical Acoustics, 2007, 26(3): 422-426.

[5] 朱益军. 基于声发射检测的滑动轴承状态诊断技术研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2011.
ZHU Yi-jun. Research on condition diagnosis technology of hydrodynamic bearing based on acoustic emission detection method [D]. Chang sha: Chang Sha University of Science & Technology, 2011.

[6] 王新颖. 承压阀门内漏声学检测方法研究[D]. 大庆:大庆石油学院, 2007.
WANG Xing-ying. The research of acoustics testing method for pressurized valves leakage [D]. Da qing: Daqing Petroleum University, 2007.

[7] 吴 昊,李录平. 液体压力管道缝隙泄漏流场数值模拟[J]. 汽轮机技术, 2014(6): 429-431.
WU Hao, LI Lu-ping. Numerical simulation of flow field in pressure pipecrack leakage [J]. Turbine Technology, 2014(6): 429-431.

(姜雪梅 编辑)

旋涡泵研究现状及存在的问题分析 = **Research Status and Existing Problems of Vortex Pump** [刊 汉] QUAN Hui ,LI Jin ,LI Ren-nian ,FU Bai-heng(College of Energy and Power Engineering ,Lanzhou University of Technology ,Lanzhou ,Gansu ,China ,Post Code: 730050) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . -2016 , 31(6) . -1 ~7

With the development of the national economy ,the application span of the vortex pump is gradually expanding as well and the study of the vortex pump has significant theoretical and application value. In this review paper ,the classification and characteristics of the vortex pump are introduced first ,followed by the discussion on the research status at home and abroad from the perspectives of the flow mechanism ,design method ,cavitation performance ,mechanical properties and special purpose. Secondly ,the existing problems in the related research are analyzed from the various aspects of research methods ,the conversion of research results ,test methods and so on. Finally ,the scopes which have significant value and need to be further improved in the research and application of the vortex pump are prospected according to the aforementioned research results. It is believed that the studies of the seal performance ,mechanical properties ,internal vortex generation and evolution mechanism and control method ,the characteristics and control method of noise and vibration of the vortex pump by using the advanced instrument may be the focus of the vortex pump research. **Key words:** Vortex pump ,research status ,existing problems ,analysis

直接接触相变换热中单泡滴生长及传热特性 = **The Growth Rate and Heat Transfer Performance of Single Bubble in Direct Contact Heat Transfer with Phase Change** [刊 汉] HUANG Jun-wei ,WANG Wei-chao(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering ,Yunnan Agricultural University ,Kunming ,China ,Post Code: 650201) ,WANG Hui-tao (Faculty of Metallurgical and Energy Engineering ,Kunming University of Science and Technology ,Kunming ,Yunnan ,China ,Post Code: 650093) ,XU Jian-xin(State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization ,Kunming University of Science and Technology ,Kunming ,Yunnan ,China , Post Code: 650093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . -2016 31(6) . -8 ~14

Based on the research status quo of the single bubble growth and heat transfer in direct contact heat transfer process and the energy balance equation including both convection and conduction from the continuous liquid to the bubble with the opening angle spheres model ,an improved physical geometry model of single bubble growth rate and evaporation was proposed. The effect of Pr number ,St number ,and Ja number were examined. The results show good agreement between the presented model and the others in literature. The average deviation is 19% compared with Mahood's model ,and 28% with Batty's model. **Key words:** direct-contact heat transfer; single bubble ,growth rate ,Nusselt number

换热器管道内漏故障状态与声发射信号特征定量关系实验研究 = **Experimental Study on Quantitative Rela-**

Relationship between Leakage Fault State of Heat Exchanger and its AE Emission Signal Feature [刊, 汉] LI Lu-ping, WU Hao, HUANG Zhang-jun, JIN Feng-hua, RAO Hong-de (School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan, China, Post Code: 410014) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . - 2016, 31(6). - 15 ~ 20

Based on the early characteristic of heat exchanger internal leakage, mainly aperture leakage, an experimental test rig for detecting the inner-leakage of heat exchanger through acoustic emission signal was designed and built. The effect of differential pressure between aperture ends on leakage was simulated by changing the inlet pressure of the heat exchanger. The experimental data obtained under inlet pressures of 0.1 MPa ~ 0.6 MPa were analyzed by Wavelet decomposition techniques. Then the relationship between inlet pressure and spectrum characteristics for the acoustic emission signal of aperture leakage under different entrance conditions was determined. The quantitative correlation between leakage and acoustic emission energy was fitted as follows: $Q_x = (19.17E_s^3 - 9.76E_s^2 + 2.14E_s - 0.072)^{0.365}$. This correlation can provide a theoretical and experimental reference for detecting the internal leakage of heat exchanger. **Key words:** heat exchanger, internal leakage, acoustic emission signals, wavelet decomposition

乙醇-水双工质脉动热管传热性能实验研究 = Experimental Study on the Thermal Performance of Ethanol-water Double-medium Pulsating Heat Pipe [刊, 汉] LV Shao-fan, SU Lei (College of Energy Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu, China, Post Code: 211816) ZHANG Hong (Changzhou Institute of Technology, Changzhou, Jiangsu, China, Post Code: 213002) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . - 2016, 31(6). - 21 ~ 26

Through experimental study of pulsating heat pipe with ethanol-water double working medium in air-cooled mode, the effects of heating power, volume ratio, and filling ratio on heat pipe oscillation and heat transfer performance have been discussed. Under the experimental conditions, results show that with power less than 100 W, filling ratio, volume ratio, and heating power have relatively apparent effects on heat transfer performance of heat pipe, while under medium or high power, the stability of such heat pipe is related to volumetric quota of liquid water. The thermal resistance decreases with the increase of water quota. When water quota is below 21%, heat pipe has relatively poor stability and its power upon occurrence of instability decreases with the decrease of water quota. The thermal performance of heat pipe with 50% ~ 70% filling ratio is better than the one with 30% filling ratio, while the heat pipe of equal volume ratio demonstrates the worse oscillating characteristics and heat transfer performance. **Key words:** double working medium pulsating heat pipe, heat transfer performance, oscillating characteristics

半圆形微通道内纳米流体流动与传热特性 = Heat Transfer and Flow Characteristics of Nanofluids Flowing