文章编号: 1006-4729(2007)02-0127-03

# 考虑热效应流体绕流柱体的流动分析

张丽华[1], 唐俊锐[2], 丁永航[3], 马昕霞[1]

(1.上海电力学院, 上海 200090; 2.磨锐泵(上海)有限公司, 上海 201100;
3.上海理工大学, 上海 200093)

摘 要: 对水横掠热柱体时旋涡脱落时的流动试验进行了分析. 研究表明, 考虑热效应后的旋涡脱落发生明显变化, 表现在旋涡脱落信号傅里叶变换峰宽的改变. 在一般换热器设计中往往忽略了壁面热效应, 应引起有关部门注意.

关键词: 旋涡脱落; 傅里叶变换; 加热柱体; 绕流
中图分类号: O35 文献标识码: A

# Flow Analysis of Cross Flow Cylinder in Heat Effect Liquid Flow

ZHANG Li-hua[1], TANG Jun-rui[2], DING Yong-hang[3], MA Xin-xia[1]

(1. *Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China*;
2. *Ensiver Moret (Shanghai) Co. Ltd, Shanghai 201100, China*;
3. *University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*)

**Abstract**: The vortex shedding characteristic on heated circular cylinder in water cross flow is examined experimentally in this paper. It is showed that allowing for heat effect, spectrum width of vortex shedding signal experiences considerable changes. But, heat effect of cylinder is ignored commonly, thus should be regarded by the designer.

**Key words**: vortex shedding; Fourier transform; heated cylinder; cross flow

汽液两相流体横掠柱体的工况,广泛存在于动力、能源、石油化工、制冷、航天等领域的工业设施中. 特别是核电站相变换热器中,许多工况处于液体横掠管子和管束并发生沸腾的两相绕流状况. 多年的理论和试验研究,积累了大量实验数据和资料. 由于数学工具和实验手段的限制,目前仍有不少问题未解决,而且工业进步和科技发展又提出了不少新课题,需要进一步探索.

国外 Hulin, Inoue, Ulbrich R, 以及国内的林宗虎、李永光等, 对汽液两相流体横掠柱体的研究做出了杰出贡献[1~7]. 但是, 通过检索和比较前人的工作发现, 已有的研究均为水-空气两相绕流, 没有考虑柱体加热的工况, 因此, 这些成果还不能适用于液体绕流热柱体并发生沸腾的工况. 本文对此工况进行了探索性研究, 研究结果对核电站中相变换热器及其他一些相应工业设备的高效节能、安全和稳定运行有重要意义.

## 1 实验系统及测量方法

### 1.1 实验系统

实验系统由水箱、水泵、调节阀、流量计、变压

收稿日期: 2007-03-28

稳流调整器、绕流柱体、旁路阀以及排污阀组成. 水由泵自下而上送入内经为 25 mm 试验管段后, 横掠流过外径为 10 mm 的柱体 6 为调节水流量, 在管路中设有旁路系统. 本实验绕流柱体由不锈钢管加工而成, 不锈钢管壁厚 2 mm, 中心是电源电压可调的发热元件, 管内部填充绝缘且导热性能良好的氧化镁粉. 柱体发热有效长度为 25 mm, 水平放置在竖直试验管段上. 将热电偶埋设在管的内壁, 测得绕流柱体的内表面温度.

### 1.2 旋涡检测与数据采集方法

旋涡的检测采用压电晶体法, 该方法具有灵敏度高、精度高等优点. 流体横掠柱体时, 旋涡脱落是在柱体两侧交替进行的[8]. 由于旋涡分离在柱体两侧产生压力脉冲, 探头上将产生交变应力, 埋设在探头体内的压电晶体元件受交变应力作用产生交变电荷. 检测放大器将交变电荷进行变换处理后, 输出脉冲信号. 安装位置如图 1所示.

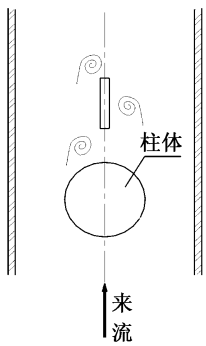



图 1 旋涡检测装置示意

信号数据的采集利用美国 NI公司开发的图形化编程软件 LabVIEW, 在采集的同时对脉冲方波信号进行傅里叶变换. 采集信号和傅里叶变换如图 2所示.

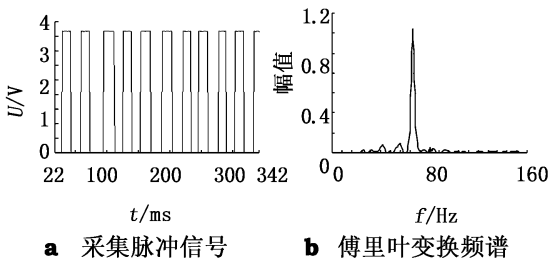



图 2 实验数据处理示意

## 2 试验数据及其分析

利用前述的实验系统和测量方法, 对外径为 10 mm 的圆柱进行了流体垂直向上横掠热柱体工况的试验. 加热电压 0 ~ 220 V; 数据的采样频率为 500 Hz, 采样数为 200. 改变流量和加热强度, 得到了一系列试验数据.

图 3至图 5是 $Re$为 6 264, 11 790, 25 451, 加热电压分别为 0 V, 100 V, 180 V, 220 V 时, 旋涡脱落信号傅里叶变换后峰值的变化组图, 图中, $T_b$为系统柱体表面温度.

由图 3, 图 4, 图 5可以看出, 旋涡脱落信号傅里叶变换的频谱图峰宽发生了改变, 说明加热对旋涡脱落有一定的影响. 随着雷诺数的增大, 峰宽先由宽变窄, 再由窄变宽. 峰宽变窄, 意味着旋涡以一固定频率脱落的能量增大, 使旋涡的脱落处于更稳定状态, 在尾迹形成稳定涡街; 峰宽变宽, 说明旋涡以较多的频率脱落, 容易诱发共振事故发生, 应引起有关部门的注意.

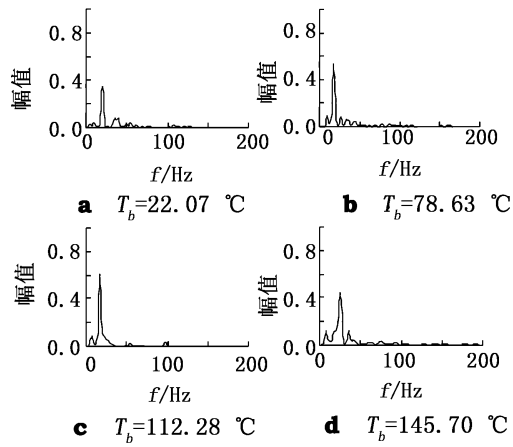



图 3 $Re$=6 264时的旋涡信号傅里叶变换频谱

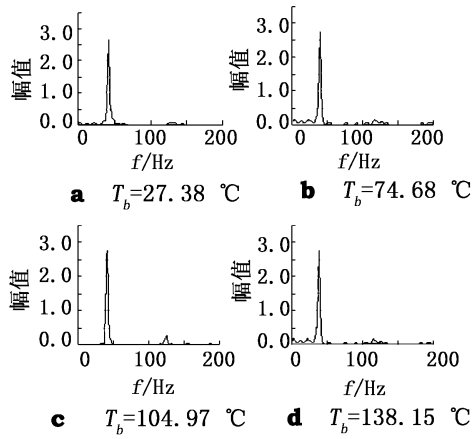



图 4 $Re$=11 790时的旋涡信号傅里叶变换频谱

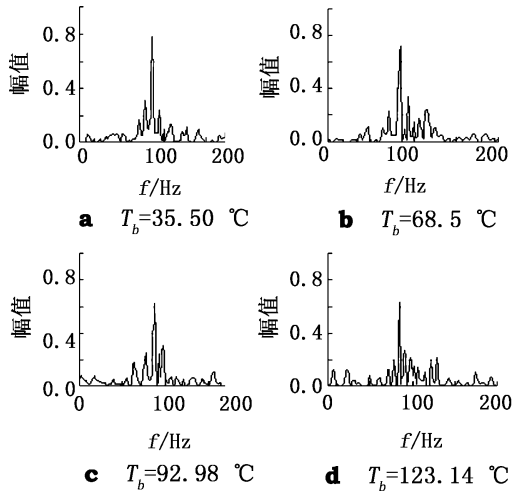



图 5 $Re$=29 253时的旋涡信号傅里叶变换频谱

图 6为不同雷诺数与加热强度工况下, 旋涡脱落信号傅里叶变换后峰值率的变化. 随着雷诺数的增大, 加热对峰值变化率的影响由陡峭变为平缓, 最后趋于平直.

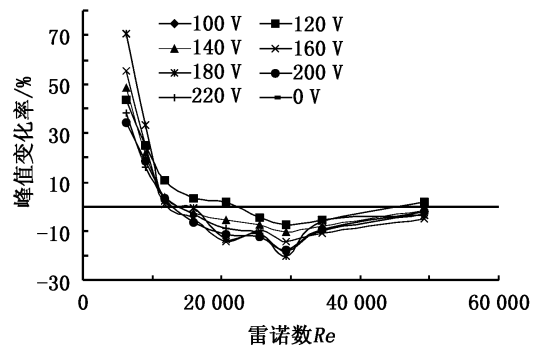



图 6 峰值变化百分数随雷诺数与加热强度的变化趋势

峰值变化率 $\eta_f$ 为

$$\eta_f=\frac{h_2-h_1}{h_1}\times 100\%$$

式中: $\eta_f$——频率变化率;

$h_1$——加热前旋涡脱落信号傅里叶变换后尖峰值;

$h_2$——加热后旋涡脱落信号傅里叶变换后尖峰值.

发生这一现象可能主要与壁面热效应有关. 根据过增元的热流体学理论[9], 加热不仅改变了流体的粘性和密度, 同时还会在柱体表面形成热阻以及附加的热绕流现象. 在低雷诺数时, 同样加热强度下, 圆柱体表面温度很高, 最高温度超过 140 ℃, 此时热阻和热绕流作用明显, 并且由于流体流速比较低, 流体对圆柱体表面附近层流撕裂作用比较小, 所以在低雷诺数时加热会增强旋涡脱落的稳定性; 而在高雷诺数时, 圆柱体表面的温度比较低, 表面温度大部分在 100 ℃左右, 同时由于流速高, 流体流动更容易破坏柱体表面的层流层, 被撕裂的表面层混合因过冷沸腾产生的汽泡一起卷入旋涡, 使得旋涡脱落处于非稳定状态.

## 3 结束语

(1)考虑热效应后的旋涡脱落发生较为明显变化, 表现在旋涡脱落信号傅里叶变换尖锋宽度的改变. 在一般换热器设计中往往忽略了壁面热效应, 与实际工况不符.

(2)在雷诺数较小时, 信号傅里叶变换频谱图峰宽变窄, 尖峰值变大, 说明加热容易使旋涡脱落处于稳定状态. 当雷诺数较大时, 信号傅里叶变换频谱图峰宽变宽, 尖峰值变小, 说明加热使得旋涡以较高的频率脱落, 容易诱发共振事故的发生.

参考文献:

[1] Hulin J P, Fierfort G, Condol R. Experimental study of vortex emission behind bluff obstacles in a gas liquid vertical two phase flow[J]. Int J Mutiphase flow, 1982, (8): 474-490.

[2] Inous A. Studies on two phase cross flow, Part I: Flow Characteristics Around a Cylinder[J]. Int J Mutiphase flow, 1986, 12: 185-202.

[3] Ulbrich R, Mewes D. Vertical Upward gas liquid two phase flow across a tube bundle [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1994, 20(2): 249-272.

[4] 林宗虎, 李永光, 卢家才, 等. 气液两相流旋涡脱落特性及工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.

[5] 李永光. 气液两相涡街特性研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1995.

[6] Li yong guang, Lin zong hu. Stability of vortex street in gas liquid two phase flow [J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, (6): 49-55.

[7] 李永光, 林宗虎, 闰福华. 垂直向上气液两相流中两相斯托拉赫数的研究[J]. 力学学报, 2001, 33(1): 96-101.

[8] Achenbach E. Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in cross flow up to $Re=5\times10^6$[J]. J Fluid Mech, 1968, 3(4): 625-639.

[9] 过增元. 热流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992, 145-176.