

垂直向上气液两相流中 T 形柱体两相斯托拉赫数的研究^{*}

(上海电力学院) 李永光

(西安交通大学) 林宗虎

[摘要] 试验研究了两种规格的 T 形柱体在垂直上升气液两相流中发生气液两相涡街时, 气液两相斯托拉赫数的变化规律。在测得大量数据的基础上, 得出了此时气液两相斯托拉赫数的通用关系式。研究表明, 气液两相斯托拉赫数在两相工况下为一变数, 与来流截面含气率、涡街发生体形状和特征尺寸、来流方向等因素有关。根据测得的两相涡街频率应用此关系式, 可将涡街发生体作为测量两相流流量与组分的测量元件。

关键词 气体-液体混合物 卡门涡 斯托拉赫数 柱
中图分类号 0359.1

1 前言

斯托拉赫数是研究流体绕流的一个重要特征参数, 对单相流体发生卡门涡街时, 斯托拉赫数的特性已有较多的研究^[1]。气液两相绕流工况在工业设备中常可遇到, 如电厂凝汽器、核电站中燃料棒子通道间的流动以及相变换热器中汽液两相混合物横向冲刷管子的流动工况等。研究气液两相斯托拉赫数, 不仅对防止诱发相变换热器管子振动等工程问题有重要应用价值, 而且对气液两相涡街的研究和发展有重大意义。此外, 人们通过对单相流体斯托拉赫数的研究, 制成了单相流体涡街流量计。由于这种流量计性能优良, 自问世以来, 迅速在世界各地得到广泛应用。对气液两相斯托拉赫数的研究, 可为利用气液两相涡街特性测量气液两相流流量与组分开辟一种新方法。由于气液两相流动的复杂性, 国内外对气液两相斯托拉赫数研究得甚少, Yokosawa (1986) 等^[2]在截面 $20\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ 矩形通道内, 试验研究了垂直上升气液两相流绕平板流动发生气液两相涡街时斯托拉赫数的变化规律, Hulin (1982)^[3]等在直径 120 mm 管内, 试验研究了垂直上升气液两相流绕两个梯形物体发生气液两相涡街

时, 气液两相斯托拉赫数的变化规律。本文在 50 mm 管内, 试验研究了垂直上升气液两相绕流两种规格的 T 形柱体、发生气液两相涡街时的斯托拉赫数特性。试验条件如下: 工质为水、空气; 温度为室温; 压强为相对压强 $0.0 \sim 0.2\text{ MPa}$; 水流量为 $0.0 \sim 26\text{ m}^3/\text{h}$; 截面含气率为 $0.0 \sim 0.40$; 试验段管子直径为 50 mm ; 流型为细泡状(其特征为在液相中带有散布在液体中的细小气泡^[7])。

2 实验系统及两相旋涡的检测

2.1 试验系统

试验工质由已测定流量的水和空气分别送入混合器形成混合物后送入试验段。混合器由两个同心圆筒组成, 内筒壁上开有许多小孔, 空气在内管流过, 水由两筒之间的环形通道流过, 空气由内管壁上的小孔喷入水流中以形成细泡状流动^[8], 试验装置总体图见文献[4]。

试验中采用的两相涡街发生体如图 1 所示, b 表示涡街发生体的宽度, 试验时将以上柱体分别放入试验段测试, 如图 2 所示。在图 2 中只画出了 B1 型柱体的位置, B2 型柱体的安装位置与 B1 型柱体的位置相同。

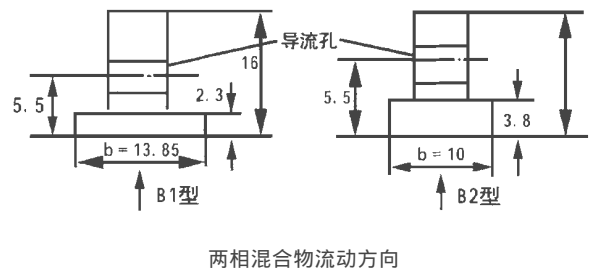
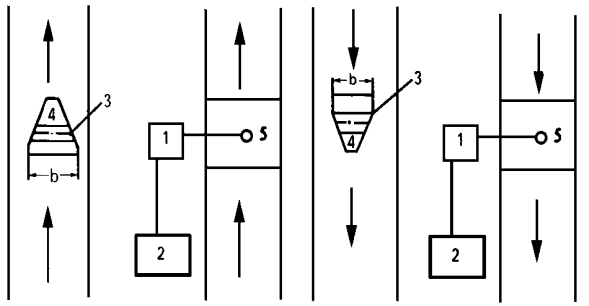


图 1 两相涡街发生体

收稿日期 1998-01-09 收修改稿 1998-07-27

^{*}国家自然科学基金资助项目 No. 1957205; 动力工程多相流国家重点实验室开放研究基金资助项目

^{*}上海市曙光计划资助项目



(a) 混合物垂直向上流试验段 (b) 混合物垂直向下流试验段

1—旋涡信号处理; 2—计算机; 3—热敏元件;
4—两相涡街发生体; 5—导流孔

图2 试验段

2.2 两相旋涡的检测

每当柱体两侧交替产生旋转方向相反的旋涡时柱体就交替地受到两个方向相反的压力, 若在物体上开有小孔(见图1), 则小孔中便会有流体往复流动, 称该小孔为导流孔。在本试验中, 每个涡街发生体上均开有导流孔, 孔内装有敏感元件热敏电阻, 仪表电路提供的恒定电流将热敏电阻加热到高于被测介质的温度, 当柱体两侧交替有旋涡脱落时小孔中便会有流体介质的往复流动, 对热敏电阻进行冷却, 使电阻值发生变化, 从而热敏电阻两端的电压也发生变化, 此电压变化信号经过放大、滤波、触发整形等环节, 输出二次仪表所需的矩形脉冲频率信号, 如图3所示, 此信号与管道内旋涡同步同频, 信号处理电路如图4所示。

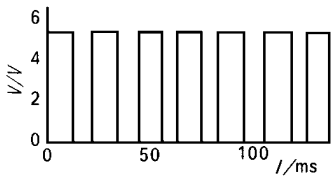


图3 矩形脉冲频率信号

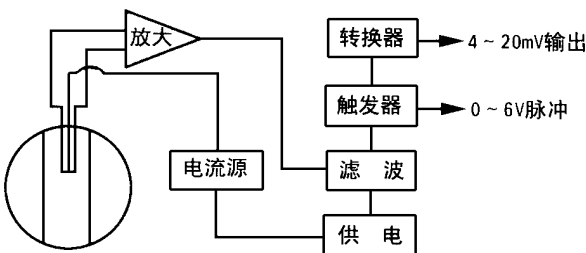


图4 旋涡检测器电子系统简图

热敏电阻阻值随温度升高而降低, 可用下式表示^[5]:

$$R_T = Ae^{B/T} \tag{1}$$

式中: T —绝对温度, K;

R_T —温度 T 时的电阻, Ω ;

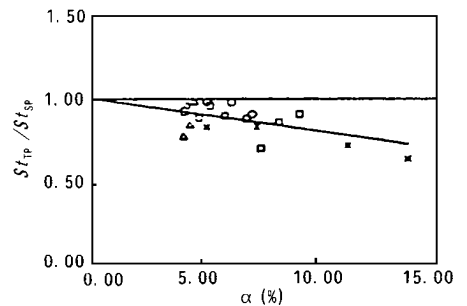
e —自然对数的底数;

A, B —与温度无关由材料成份及结构决定的常数, A 具有电阻量纲, Ω ; B 具有温度量纲, K。

在图5中当电压是高电位时表示柱体小孔中有流体流过, 低电位表示小孔中没有流体流过, 虽然此时柱体的另一侧仍有旋涡脱落, 但在本文中小孔被设计成只能从一个方向流进, 因此, 一个高电位表示柱体一侧的一个旋涡, 而一个低电位表示柱体另一侧的一个旋涡。当方波均匀, 即高电位与低电位的占空比相等时柱体后部尾流中的旋涡为卡门涡街, 这时从柱体两侧交替地周期性地有旋涡脱落。当用热敏电阻检测单相流体的旋涡时, 其误差为 $\pm 1\%$ 。

3 实验结果及分析

对于管流中的涡街, 管壁对涡街的形成和发展都有影响, 为进行比较, 选了两种规格 T 形柱体进行气液两相涡街试验。根据本文2所述的方法, 检测到的结果如图5所示, 这些结果表示了垂直上升气液两相流中, 当有稳定的气液两相涡街发生时, 两相斯托拉赫数 St_{TP} 的变化规律。B2 型物体没有检测到稳定的气液两相涡街(有关物体形状对气液两相涡街的影响参见文献[6]), 图中 St_{SP} 为单相流体斯托拉赫数, 其大小由实验确定, 在本文的实验工况下, 对 B1 型物体 St_{SP} 为 0.2365, 图中 St_{TP} 按如下方式来确定:



□ $Q_L = 25.0 \text{ m}^3/\text{h}$; Δ $Q_L = 18.1 \text{ m}^3/\text{h}$;
○ $Q_L = 14.0 \text{ m}^3/\text{h}$; \times $Q_L = 6.00 \text{ m}^3/\text{h}$

图5 气液两相混合物垂直上升流时 B1 型物体 St_{TP} 数与实验值的关系

根据对单相流体的研究, 单相流体斯托

拉赫数 St_{SP} 用下式表示:

$$St_{SP} = fb/u \quad (2)$$

式中 f —涡街频率, Hz; u —流体速度, m/s,

b —涡街发生体应流面宽度(见图 1), m.

在气液两相流中, 用类似方法表达两相斯托拉赫数, 由于本实验工况中, 含气量较小, 在两相流中式(2)中流速用液相流速 u_L 替换, u_L 可用下式表示:

$$u_L = \frac{Q_L}{A_L} = \frac{Q_L}{A(1-\alpha)} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)并用 u_L 替换 u , 这样有:

$$St_{TP} = \frac{fb}{u_L} = \frac{fbA(1-\alpha)}{Q_L} \quad (4)$$

式中 A —管道流通面积, m^2 ;

A_L —液相所占截面积, m^2 ;

α —来流截面含气率;

Q_L —液相体积流量, m^3/s ;

St_{TP} —气液两相斯托拉赫数.

式(4)中来流截面含气率 α , 根据 АРМАНДИ^[7] 的研究, 由下式计算:

$$\alpha = c\beta = \frac{cQ_G}{Q_G + Q_L} \quad (5a)$$

$$c = 0.833 + 0.05 \ln(9.8p) \quad (5b)$$

式中 β —体积含气率;

Q_G —气相体积流量, m^3/s ;

p —绝对压强, MPa.

图 5 中 St_{TP} 的实验关系曲线用下式表示:

$$St_{TP}/St_{SP} = 1.00 - \alpha \text{tg} \theta \quad (6)$$

在本实验工况下, 对 B1 型物体 $\text{tg} \theta = 1.984$.

从图 5 可以看出, 在实验范围内水流量 Q_L 对发生两相涡街的两相斯托拉赫数 St_{TP} 影响不大, St_{TP} 主要与截面含气率 α 有关, 当 $\alpha > 10\%$ 时, 涡街开始变得不稳定, 图 6 是当 $Q_L = 18 \text{ m}^3/\text{h}$, $\alpha = 16\%$ 时测得的脉冲信号图, 这时方波已不均匀, 物体两侧旋涡脱落所用时间不相等, 说明涡街已变得不稳定. B2 型物体在本实验工况内没有检测到稳定的气液两相涡街.

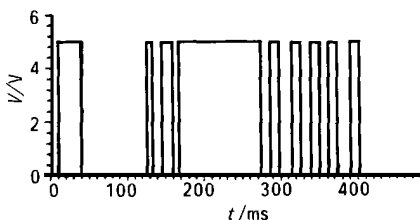


图 6 $Q_L = 18 \text{ m}^3/\text{h}$, $\alpha = 16\%$ 脉冲信号图

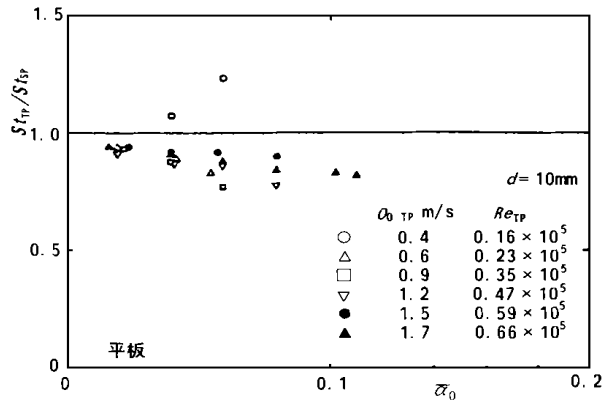
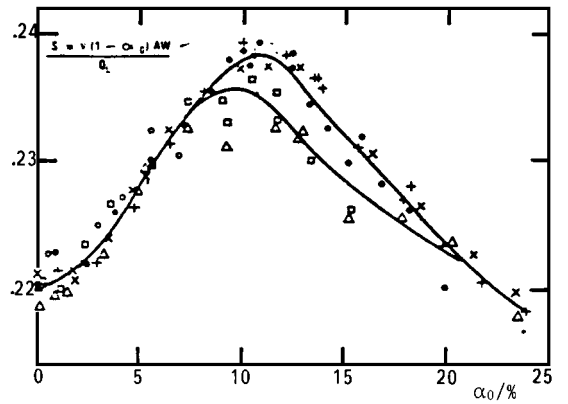


图 7 Yokosawa^[2] 的实验曲线 (St_{TP} 数与实验值的关系)



● $Q_L = 100 \text{ m}^3/\text{h}$; \times $Q_L = 80 \text{ m}^3/\text{h}$; \circ $Q_L = 60 \text{ m}^3/\text{h}$;
 \triangle $Q_L = 40 \text{ m}^3/\text{h}$; \square $Q_L = 30 \text{ m}^3/\text{h}$

图 8 Hulin^[3] 的实验曲线 (St_{TP} 数与实验值的关系)

由图 7 和 8 可以看出, 所得 St_{TP} 的变化规律与本文实验所得基本相同, St_{TP} 的变化规律同样可用式(6)表示, 对 Yokosawa 的实验 $\text{tg} \theta = 2.31$, 对 Hulin 的实验 ($\alpha > 10\%$ 时涡街已不稳定, 其实验曲线的得出详见文献[3]) $\text{tg} \theta = -0.89$. 在 Hulin 的实验中 $\text{tg} \theta$ 为负值, 其原因可能是 Hulin 的实验用了两个梯形柱体作为涡街发生体. 式(6)中 $\text{tg} \theta$ 的取值应与涡街发生体形状、规格、气液两相混合物流动方向等有关, 关于这方面的研究, 作者还在继续进行, 研究的结果将提交有关刊物审查发表.

现对式(6)进行误差分析, 考虑式(6)的两种误差, 既曲线拟合误差和系统误差(包括测试仪器误差和读数误差), 这两种误差分别为 11.5% 和 6.72%, 这样, 式(6)的误差约为 18.22%.

4 结论

(1) 在本实验条件下, 气液两相斯托拉赫数 St_{TP} 按

直接蓄冰系统蓄冷过程动态模型研究

(中国科学技术大学) 方贵银

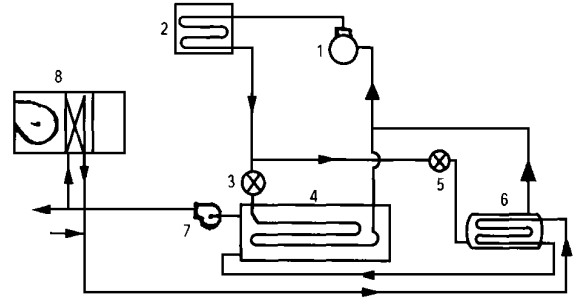
[摘要] 分析了直接蓄冰系统的动态特性,建立了相应的物理模型,并利用该模型得出了蓄冰半径及蓄冷率随时间的变化规律,模型预测值与实测值吻合较好。该模型可为直接蓄冰系统的设计及优化提供理论依据。

关键词 空调蓄冷 直接蓄冰系统 动态特性

中图分类号 TB612

1 前言

直接蓄冰系统是空调蓄冷工程中常用的一种方式,与间接蓄冰系统相比,其结构紧凑、投资省、换热效率高,省去了二次载冷剂侧的换热,并且可与空调机组构成一体,如图 1 所示为直接蓄冰系统工作原理图。低谷时,机组进行蓄冰贮冷;高峰时,机组溶冰供冷,这样可使空调机组在高峰时段不开或少开。



1—压缩机 2—冷凝器 3—夜间蓄冰用膨胀阀
4—蓄冰槽 5—白天空调用膨胀阀 6—蒸发器
7—循环泵 8—风机盘管空调器

图 1 直接蓄冰系统工作原理图

收稿日期 1998-03-17 收修改稿 1998-06-07

式(6)的关系式变化。 St_{TP} 与来流流量关系不大,而主要与截面含气率 α 有关, St_{TP} 与 α 的关系可近似用直线表示,该直线的斜率与来流方向、涡街发生体形状、大小等有关。

(2)气液两相混合物中含气量太多将破坏涡街,使旋涡的形成和脱落受到影响,与单相流相比,气液两相流更不易形成稳定的涡街。

(3)应用式(6)的关系式,根据测得的涡街频率,可将涡街发生体用作测量两相流流量与组分的测量元件。

参考文献

- [美]白苹文斯 R D. 流体诱导振动. 北京:机械工业出版社, 1983: 15.
- Yokosawa M, et al. Studies on two-phase cross flow, Part III: Characteristics of unsteady flow behavior. Int. J. Multiphase Flow, 1986, 12(2): 185~202.
- HuIn J P et al. Experimental study of vortices emission behind bluff

obstacles in a gas liquid vertical two-phase flow. Int. J. Multiphase flow, 1982, 8: 475~490.

- 李永光,林宗虎,王树众. 气液两相流体涡街中旋涡结构的特性研究. 西安交通大学, 1996, 30(2): 35~41.
- 吴永生,方可人编. 热工测量及仪表. 北京:水利电力出版社, 1983: 64.
- 李永光,卢家才,王树众,林宗虎,王弥康. 柱体形状对气液两相涡街的影响. 应用力学学报, 1996, 13(2): 1~7.
- 林宗虎编著. 气液两相流和沸腾传热. 西安:西安交通大学出版社, 1987: 66.
- 林宗虎编著. 气液固多相流测量. 西安:西安交通大学出版社, 1987: 298.

作者简介 李永光,男,1957年生,西安交通大学热能工程专业博士,1995年9月—1997年9月在上海理工大学动力工程及工程热物理博士后流动站做博士后研究工作。现在上海电力学院工作,曾主持中国博士后科研基金项目,上海市自然科学基金项目,上海市曙光计划研究项目。已在国内外较著名刊物上发表论文20余篇,获得过西安交通大学科技成果一等奖;国家教委科技进步二等奖。通讯处: 200090 上海电力学院动力系热动教研室

热经济学的辉煌发展= **Impressive Developments in Thermoconomics** [刊, 中] /Cheng Weiliang, Wang Jiakuan (North China Electrical Power University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14 (2). — 79~82

A new approach in energy-saving theory and technology, i. e., thermoconomics, is expounded in this paper. In narrating its origin, evolution, intended uses and applications, the authors give a brief description of its currently emerging variegated patterns. Thermoconomics can be viewed as a product, resulting from a combination of thermodynamic analysis and economic factors. In the light of the grim situation of environmental protection on a global scale the authors have made an in-depth study of the thermoconomics, discovering the existence of an impassable chasm. The latter finds its expression in the absence to date of a method for solving the biomass entropy. Without such a method for solving the biomass entropy it is virtually impossible to secure a solution for the biomass exergy, let alone a method for solving an ecosystem balance. The first half of this paper mainly describes the thermoconomics while the remaining half focuses on some tentative efforts for solving biomass exergy without resorting to a determination for the biomass entropy. **Key words:** thermoconomics, ecosystem, information roundup

煤中碱金属及其在燃烧中的行为= **Various Forms of Alkali Metal in Coal and Its Behavior During Coal Combustion** [刊, 中] /Zhang Jun, Han Chunli, Liu Kunlei, et al (Southeastern University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14 (2). — 83~85

A summarizing was conducted of the forms of alkali metal in coal, and its release and reaction during coal combustion studied. With the existing issues in current research being pinpointed the authors emphasize the necessity for their in-depth research in the future. **Key words:** coal, alkali metal, release, reaction

钙基脱硫剂掺加粉煤灰在 450 °C~850 °C 下的脱硫研究= **A Study on the Effect of Desulphurization of Calcium Sorbent by the Adding of Pulverized-coal Ash** [刊, 中] /Pang Yajun (Beijing Electrical Power College), Xu Xuchang (Qinghua University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14 (2). — 86~88

By mixing pulverized-coal ash with caustic lime in a drop-tube furnace tests were conducted for enhancing SO₂ removal rate. The test results show that the mixing of caustic lime with the pulverized-coal can result in an enhancement of the SO₂ removal rate and the calcium utilization rate of the calcium-based sorbent. This effect is dependent on the reaction temperature. An optimum effect can be achieved when the reaction temperature ranges from 550 °C to 700 °C. Also studied was the effect of the mixing mode of pulverized-coal ash with the caustic lime on the SO₂ removal rate and the calcium utilization rate of the calcium-based sorbent. **Key words:** drop-tube furnace, caustic lime, pulverized-coal ash, desulphurization, reaction temperature, mixing mode

垂直向上气液两向流中 T 形柱体两相斯托拉赫数的研究= **A Study of T-shaped Cylinder Gas-liquid Two-phase Strouhal Number in a Vertically Upward Gas-liquid Two-phase Flow** [刊, 中] /Li Yongguang (Shanghai Electrical Power Institute), Lin Zonghu (Xi'an Jiaotong University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14 (2). — 89~91

Tested and studied in this paper is the variation relationship of gas-liquid two-phase Strouhal number when a gas-liquid two-phase vortex street occurs for two types of T-shaped cylinder in a vertically upward gas-liquid flow. On the basis of a huge quantity of measured data obtained is a universal relation of the gas-liquid Strouhal number for the above-cited case. The study results indicate that the gas-liquid two-phase Strouhal number under the two-phase operating conditions is a variable. The magnitude of this variable depends on such factors as the incident flow void fraction, vortex street generating body shape, characteristic dimensions and the incident flow direction, etc. On the basis of the measured two-phase vortex street frequency and by the use of the above-mentioned relation the vortex street generating body may serve as an element for measuring the two-phase flow rate and components. **Key words:** gas-liquid mixture, Karman vortex, Strouhal Number, column

直接蓄冰系统蓄冷过程动态模型研究= **A Study of the cold storage Process Dynamic model for an Ice Direct**