

叉排圆柱阵列自由段及顶端对流传热研究

董 华¹, 郭 玮¹, J. Kami²

(1. 青岛建筑工程学院 环境工程系, 山东 青岛 266033;

2. 威兹曼科学研究所 环境科学和能源研究部, 以色列 Rehovot 76100)

摘 要: 叉排圆柱阵列是大型太阳能热电站换热器的重要结构形式。换热器内部不同区域具有不同的换热特性。文中研究了圆柱阵列自由段的流动及换热特性, 推导出自由段和顶端的无量纲换热参数的拟合公式, 运用多区域和连续模型模拟的结果与实验数据相符良好。

关 键 词: 自由段; 顶端; 叉排圆柱阵列; 对流换热

中图分类号: TK123

文献标识码: B

1 引言

圆柱阵列结构以其有效地强化传热日益受到重视并在工业及能源等领域得到广泛应用^[1]。当前太阳能领域正在研究大型太阳能热电站换热器的型式, 腔体内与底部壁面固连的叉排圆柱阵列已被作为主要的研究对象。其实际几何结构剖面如图 1 所示。

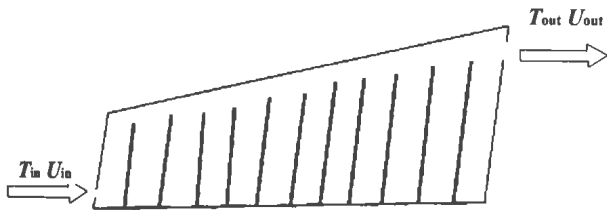


图 1 太阳能热电站换热器结构剖面示意图

由图 1 可见, 换热器的主体部分—圆柱阵列中的圆柱的高度并非一致, 而圆柱体上不同位置的换热系数并不相同^[2], 为此作者曾提出用多区域模型^[3]来评估换热器的换热特性。其设想是根据相应的流动和传热特征将过流区域划分为如图 2 所示的若干区域, 即底部壁面、底部壁面影响区、二维区域、自由段和顶端区域, 其中二维区域系指圆柱中部不受自由段和壁面影响的部分。在对这些区域的流动和换热特性逐一研究的基础上, 推导出各有关区域

的换热系数并根据能量平衡原理进行综合, 从而对换热器的特性进行研究, 把握换热器的整体性能。多区域模型的应用前提是对各有关区域换热过程的研究。本文拟对自由段和顶端的换热特性进行探讨, 并推导出相应的拟和公式。

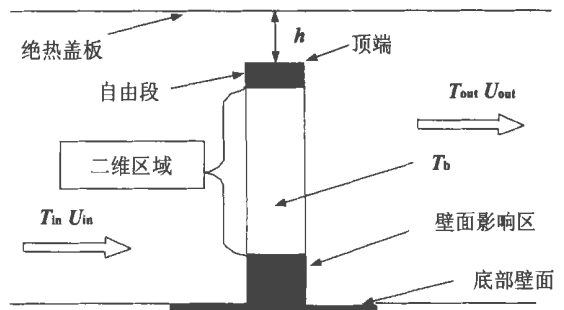


图 2 圆柱阵列换热器多区域模型示意图

2 单一圆柱顶端的换热

在单一圆柱具有自由段的情况下, 即上盖板与圆柱顶端存有距离时, 其自由段和顶端的换热远较二维流动情况复杂。一方面流体在流过自由段时由于间隙处的阻力较小而发生方向发生偏转, 并在偏转的同时加速; 另一方面, 掠过自由段的流体在圆柱顶端产生脱离及再接触现象。由此, 自由段和顶端的换热系数远大于圆柱中部区域的换热系数。Sparrow^[2]采用传质模拟的方法研究了顶端及其毗邻区域的传热特性, 其结果证实了这一结论。自由段和顶端的传热系数平均大于二维区域传热系数约 50%。图 3 是自由段和顶端与圆柱中段的传热无量纲参数对比。

由图 3 可见, 自由段的换热大于柱体中段换热且随着雷诺的增加与中段换热保持近似同步的增加。在流速较低时顶端的传热与圆柱中段接近, 其

收稿日期: 2001-07-10; 修订日期: 2001-09-24

基金项目: 山东省科技重点“地热综合利用关键技术的研究”基金资助项目(011150105)

作者简介: 董 华(1959—), 男, 安徽蒙城人, 青岛建筑工程学院教授。

© 1994-2018 China Academic Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

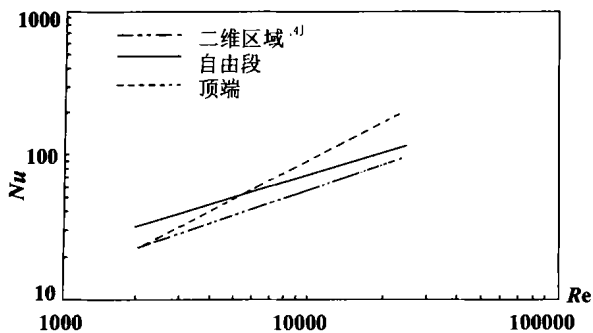


图3 自由段和顶端与圆柱中段的传热无量纲参数对比

原因在于工质低速流动条件下在顶端的分离较早且重新触及顶端的时间较迟,随着流速的增加,流体在顶端的分离推迟,再触的位置前移,使得顶端流体掠过的面积随着速度的增加越来越大,总传热大大增加。基于实验数据,本文对稳态条件下单个圆柱对流换热努塞尔数 Nu 与雷诺数 Re 及普朗特数 Pr 的关系进行了拟合,方程(1)和(2)给出了拟和的无量纲表达式。

$$Nu_{tip,s} = 0.038 Re^{0.86} Pr^{0.37}$$

$$2500 \leq Re \leq 25000 \quad (1)$$

$$Nu_{free,s} = 0.67 Re^{0.53} Pr^{0.37}$$

$$2500 \leq Re \leq 25000 \quad (2)$$

式中下标 $tip, free$ 分别表示顶端和自由段, s 表示单个圆柱。

3 圆柱阵列顶端的换热

上述方程只是单个圆柱自由段的换热表述,而阵列的情况有所不同。较之单个圆柱情况,圆柱阵列的顶部的换热系数的确定更为困难,但可以肯定的是由于处在三维流动区域,自由段和顶端传热系数的增加的趋势对单个圆柱或圆柱阵列都是如此,同时圆柱之间的间距也会影响换热。为此作如下假设:

(1) 单个圆柱的自由段和顶端换热系数与二维区域换热系数的比值与阵列情况下相应的比值保持不变(等比例);

(2) 圆柱阵列的自由段和顶端换热方程与二维区域的换热方程具有同样的形式(统一性),即:

$$\frac{Nu_{tip,s}}{Nu_{2d,s}} = \frac{Nu_{tip,a}}{Nu_{2d,a}}; \frac{Nu_{free,s}}{Nu_{2d,s}} = \frac{Nu_{free,a}}{Nu_{2d,a}} \quad (3)$$

$$Nu = C(Sy/Sx)^n Re^m Pr^l \quad (4)$$

Zukauskas 给出的无限长圆柱和圆柱阵列换热

方程,分别为 $Nu_{2d,s} = 0.26 Re^{0.6} Pr^{0.36[4]}$ 和 $Nu_{2d,a} = 0.35 (Sy/Sx)^{0.2} Re^{0.6} Pr^{0.36[3]}$, 式中 Sx, Sy 分别为圆柱纵向和横向间距, $Re = U_{max} D / \nu, U_{max} = U_{in} Sx / (Sx - D)$, 下标 $2d$ 和 a 分别表示二维和阵列情况。据此,可推导出圆柱阵列自由段和顶端换热方程。

$$Nu_{tip,a} = 0.05 (Sy/Sx)^{0.2} Re^{0.86} Pr^{0.36}$$

$$2500 \leq Re \leq 25000 \quad (5)$$

$$Nu_{free,a} = 0.9 (Sy/Sx)^{0.2} Re^{0.53} Pr^{0.36}$$

$$2500 \leq Re \leq 25000 \quad (6)$$

4 讨论与结论

完整的多区域模型除了需要自由段的换热系数外,另一个重要的问题是确定自由段的长度。传质模拟实验显示^[3],自由段的整体长度大约为圆柱直径的一半,而传热系数同中段有明显变化的长度限定在圆柱直径的四分之一以内。为进行对比分析,假定在传热过程中忽略辐射及其它热损失,可建立如下的多区域模型:

$$Q_{conv} = Q_{2D} + Q_{end} + Q_{free} + Q_{wall} + Q_{tip}$$

$$Nu_{conv} = C_{2d} Nu_{2d} + C_{end} Nu_{end} + C_{free} Nu_{free} + C_{tip} Nu_{tip} + C_{wall} Nu_{wall}$$

其中, $C_{2d} = A_{2d} / A, C_{end} = A_{end} / A, C_{free} = A_{free} / A, C_{tip} = A_{tip} / A, A$ 为总过流面积, $A_{free}, A_{tip}, A_{2d}$ 和 A_{end} 分别为图2所示相应区域的过流面积。

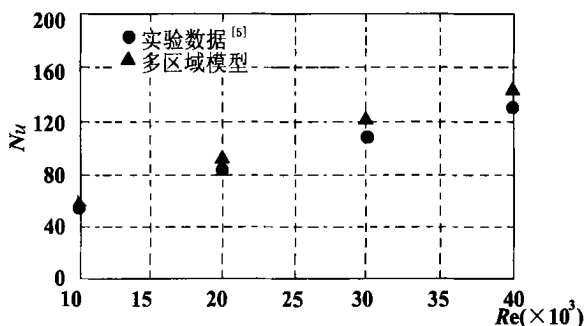


图4 模拟结果与实验数据的比较

Takao 等人^[6]曾选择径高比 $H/D = 4 \sim 6$ 的圆柱进行了实验研究并给出了总平均传热数据的拟和方程。为验证方程(1)和(2),采用多区域模型对 Takao 实验进行模拟,自由段的长度取为圆柱直径的四分之一。图4是模拟结果与实验数据的比较,其误差小于8%。

在阵列条件下自由段的长度不会与单个圆柱的情况有明显的差异^[4]。同样地采用多区域模型对 Sparrow^[7] 等人的实验进行模拟计算以验证方程(5)和(6), 实验和算例的径高比 $H/D = 3$, 无量纲间距分别为 $S_x/D = 3$, $S_y/D = 2.6$, 圆柱直径为 $D = 0.556$ cm, 自由段的长度亦为圆柱直径的四分之一。结果与实验相符很好, 误差在 5% 以内, 如图 5 所示。

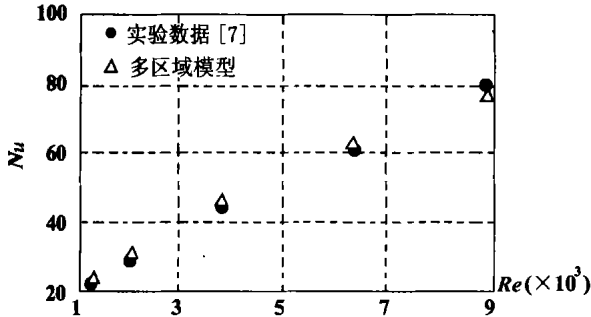


图 5 有限长圆柱阵列传热模拟结果与实验数据的比较

无论是单个圆柱或是圆柱阵列, 当顶部与盖板之间存在间隙时其自由段的传热系数均将增大。毫无疑问, 换热器的构造应考虑这一特点, 使圆柱的顶端和盖板之间保有合适的间隙。间隙的尺度的确定应从强化换热和减少流动阻力两方面加以考虑:

优化传热 —— 对传热的考虑主要有两个方面, 确保存有间隙时总换热量要大于或等于无间隙时的换热量, 间隙的过大或过小都有可能总换热量的减少。过大的间隙会大大改变换热器内部的速度分布, 间隙处局部流量会因此增加而使圆柱中段的流速降低, 从而导致整体换热系数的降低。同时, 由于速度分布的完全改观, 增加了精确计算雷诺数的难度。而若间隙过小, 甚至小于边界层的厚度, 则流体可能无法通过间隙, 顶端的局部换热下降, 从而影响整体的换热能力。因此, 圆柱顶部的间隙应限定在一个合理的范围。从追求最大换热的角度考虑可参

照下式确定间隙的大小。

$$Nu_{2d}(H - 0.18D) \leq Nu_{2d}(H - h - 0.09D) + (Nu_{free} + Nu_{tip})0.25D \quad (7)$$

$$\Delta P > \tau \quad (8)$$

降低流动阻力 —— 换热器的另一个要求是尽可能减少流动阻力以降低能耗。阻力减少可从圆柱阵列的安排方面加以考虑, 如采用顺排或混排, 此问题不在本文的研究范围。

在利用多区域模型进行圆柱阵列换热计算时应注意到方程(5)和(6)的应用限制, 即雷诺数的范围 $2500 \leq Re \leq 25000$ 及圆柱的宽高比 $H/D \geq 2$, 相应的纵向和横向无量纲间距亦应为 $1.5 \sim 5$ 。

在等比例和同一性假设基础上建立的圆柱顶端和自由段的换热方程较好地上述区域的换热强化特征。应用多区域模型和连续模型进行的模拟计算结果表明, 顶端和自由段换热方程的导出便于对变高度阵列的性能评估。

参考文献:

- [1] SPIRKL W, RIES H, KRIBUS A. Performance of surface and volumetric solar thermal absorbers [J]. *J Solar Energy Engineering*, 1997, **119**: 152-155.
- [2] SPARROW E M, SAMIE F. Measured heat transfer coefficients at and adjacent to the tip of a wall-attached cylinder in crossflow — application to fins [J]. *J of Heat transfer*, 1981, **103**: 778-784.
- [3] DONG H, KRIBUS A. The multi-zone convection model of the heat transfer of staggered pin fin arrays [R]. ESERO2, Weizmann Institute of Science, 1999.
- [4] ZHUKAUSKAS A. Heat transfer from tubes in cross flow [J]. *Advances in heat transfer*, 1972, **8**: 46-86.
- [5] ZHUKAUSKAS A. Heat transfer in tube banks in cross flow [M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1988.
- [6] TAKAO KAWAMURA. Heat transfer from a finite circular cylinder on the flat plate [J]. *Bulletin of JSME*, 1984 **23**: 233.
- [7] SPARROW E M, RAMSEY J W. Heat transfer and pressure drop for a staggered wall-attached array of cylinders with tip clearance [J]. *Int J heat mass transfer*, 1978, **21**: 1369-1377.

(辉 编辑)

新技术

诊断叶片破坏的金属磁性记忆法

据《Гтяжелое ма шиностроение》2001 年 10 月号报道, 基于利用金属磁性记忆效应的检查方法, 及时确定在最大应力条件下工作并被破坏的叶片。

对叶片上磁场多年的研究表明, 该区域内存在磁场法向分量 H_p 符号稳定的变更线。正是这个诊断参数 ($H_p=0$ 的线) 奠定了金属磁性检查法的基础。

研究表明, 金属磁性记忆法能可靠地诊断动力装置部件内金属局部破坏区。 (思 娟 供稿)

mid air turbine cycle, off-design operation, performance analysis

船用汽轮机带冠叶片动力特性研究 = **A Study of the Dynamic Characteristics of Marine Steam Turbine Shrouded Blades** [刊, 汉] / LI Jian-zhao, WEN Xue-you, LIN Zhi-hong (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), YU Zeng-bo (Harbin Steam Turbine Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150046) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 126 ~ 128

With the help of a large-sized finite-element general program MSC/NASTRAN the dynamic characteristics of the shrouded blades of a steam turbine are studied and the treatment of boundary conditions, the "tenseness" between shrouds as well as the load-bearing conditions of the blades discussed. In addition, the analysis of a specific example is conducted to expound the above-cited points. **Key words:** steam turbine, shrouded blade, vibration, finite element

叉排圆柱阵列自由段及顶端对流传热研究 = **Research on the Convection Heat Transfer of the Free Section and Top of a Staggered Cylindrical Array** [刊, 汉] / DONG Hua (Environmental Engineering Department, Qingdao Institute of Architectural Engineering, Qingdao, China, Post Code: 266033), KARNI J (Department of Environmental Science & Energy Research, Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel, Post Code: 76100) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 129 ~ 131

A staggered cylindrical array represents a major structural form of heat exchangers for a solar energy-based thermal power station. Various zones inside a heat exchanger have different heat-exchange features. The authors have studied the free end flow and heat exchange characteristics of the staggered cylindrical array and derived the fitting formula of non-dimensional heat-exchange thermal parameters of the free section and top end. The results of simulation through the use of a multi-zone and continuous model are in good agreement with test data. **Key words:** free section, top end, staggered cylindrical array, convection heat exchange

固体废弃物热解半焦特性的研究 = **A Study of the Pyrolytic Semicoke Characteristics of Solid Waste** [刊, 汉] / LI Ai-min, WANG Zhi (Shenyang Aeronautical Industrial Institute), LI Shui-qing, YAN Jian-hua, CEN Ke-fa (Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 132 ~ 138

Studied is the chemical composition and reaction activity of pyrolytic semicoke of solid waste. The property of the material itself and the final temperature of the pyrolysis will have a direct influence on the productivity of semicoke, the residual quantity of such elements as C, H, N and S in the semicoke as well as the reaction activity of CO₂ of the semicoke. Moreover, under identical conditions and on the basis of component ratio the algebraic sum of mixed material and that of single material are approximately equal. **Key words:** solid waste, pyrolysis, semicoke, rotating kiln, reaction activity

H₂O—O₂ 自由基簇射结合化学吸收脱除烟气中的 NO_x = **Removal of NO_x from Flue Gases by DC Corona H₂O—O₂ Radical Shower in Conjunction with Chemical Absorption** [刊, 汉] / LIN He, GAO Xiang, LUO Zhong-yang, CEN Ke-fa (Thermal Energy Engineering Institute under the Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 139 ~ 142

A study is performed of the removal of NO_x from flue gases by DC corona H₂O—O₂ radical shower in conjunction with alkali solution (26% by weight of NaOH in water) scrubbing. The results of the study show that a steady streamer corona can be obtained by adjusting the flow rate of oxygen fed into nozzle electrodes. The vapor in the oxygen exercises an influence on the V-1 characteristics of the corona discharge. Both HNO₂ and HNO₃ are simultaneously generated in a reactor