

新型矩形翼纵向涡发生器流动与换热实验研究

闵春华, 齐承英, 谢尚群, 孔祥飞

(河北工业大学 能源与环境工程学院, 天津 300401)

摘要: 在矩形翼的侧面粘贴一个小矩形辅翼, 构成一种新型矩形翼纵向涡发生器, 称为组合翼。在压力损失相等的条件下, 通过实验比较了矩形通道内组合翼与原始矩形翼纵向涡发生器的流动与换热特性。结果表明: 对于原始矩形翼, 其最佳攻角为 45° ; 与矩形翼相比, 组合翼的换热明显增强, 且阻力系数减小, 尤其当辅翼布置在矩形翼的上游时换热增强与阻力系数减小效果更加明显; 研究范围内, 辅翼攻角为 30° 时的流动与传热综合效果最佳。

关键词: 纵向涡发生器; 矩形通道; 强化传热; 压力损失; 组合翼; 矩形翼

中图分类号: TK172 文献标识码: A

引言

换热器广泛应用于化工、汽车生产、制冷、电子器件冷却、食品等多个领域。对于板翅式换热器, 板间流体的流动可认为是矩形通道内的流动^[1]。纵向涡发生器是一种有效的被动式强化传热、换热设备, 其主要形式包括三角形翼、矩形翼以及这两种形状的小翼^[2]。纵向涡发生器由于其优良的对流换热性能受到了各国学者的广泛关注。Eibeck和 Eaton通过实验发现纵向涡的形成能明显增强换热^[3]。Tiggelbeck等人发现在攻角较大时, 三角形小翼的换热性能优于矩形翼^[4]。Gentry和 Jacob等人采用蔡升华的方法发现在平板通道中布置三角形翼后, 在低 Re 下换热增强 $50\% \sim 60\%$ ^[5-6]。Liu等人在比较了 12 种结构的涡发生器后发现^[7], 在流动中产生的二次流对增强换热有重要影响。Torii等人则对三角形翼的布置方向进行了分析^[8]。为了进一步提高纵向涡发生器的强化传热性能, Vasudevan等人对冲孔三角形翼的强化传热特性进行了数值模拟, 得到了非常理想的结果^[9]。后来, Lawson和 Thole等人比较了冲孔和补充两种情况的强化传热特

性^[10]。

为进一步优化纵向涡发生器的强化传热特性, 本研究提出了一种新型的矩形翼纵向涡发生器, 并进行了实验研究。该新型翼的设计方法是在原始矩形翼 (这里称为主翼) 的侧面垂直布置一个相对较小的矩形翼辅翼, 将这种新型翼称为组合翼, 如图 1 所示。图中辅翼布置在主翼的上游, 通过后面的分析会发现, 辅翼布置在主翼的上游和下游对流动与换热特性有一定影响。主翼的攻角记为 α , 辅翼的攻角记为 β 。

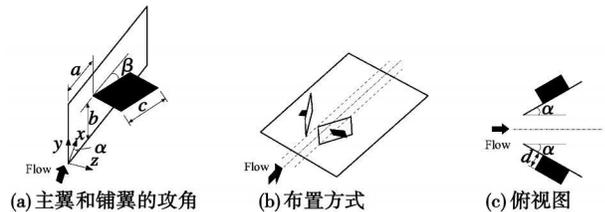


图 1 新型纵向涡发生器结构示意图

1 实验装置

实验装置为一开式吸风系统, 如图 2 所示。主要包括喇叭形入口、进口段、测试段、通道与风机的过渡段和引风机等。过滤网用于打碎较大的气团, 获得均匀的流程。

矩形通道主要由不锈钢制成, 其尺寸为 $600 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 640 \text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高), 主翼的尺寸为 $40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 厚), 辅翼的尺寸为 $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 厚)。为降低热损失, 通道外壁包有聚苯乙烯保温材料。涡发生器到加热器前端距离为 40 mm ; 辅翼在主翼上的位置为 $a=15 \text{ mm}$ 和 $b=20 \text{ mm}$ 。

收稿日期: 2009-03-02 修订日期: 2009-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50676027); 天津市应用基础及前沿技术研究计划基金资助项目 (09 JCYBJC07300)

作者简介: 闵春华 (1974-), 男, 湖北仙桃人, 河北工业大学副教授, 博士。

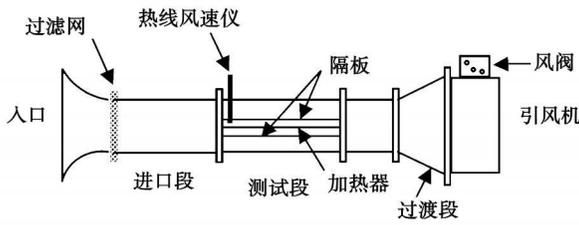


图 2 实验系统

加热器由两块铁板夹一电加热元件构成，这种结构能保证加热器向两侧均匀加热。通过通道侧壁上加工的槽道，将加热器固定在通道的中间，从而使通道分成上下对称的两个部分，涡发生器仅布置在上通道的加热板上。在上下通道插入隔板可调节实验通道的高度。实验中，上下通道的高度均固定为 40 mm。由于通道的对称性，通过比较上下通道的换热量即可分析涡发生器的强化传热特性；由于上下通道进口和出口分别共享相同的截面，因此可认为实验是在压降相同的条件下进行的。

利用热线风速仪测量上下通道进口流速，在上下通道进口各布置一根 T 型热电偶，在出口截面各均匀布置 27 根 T 型热电偶用于测量空气加热前后的平均温度。热电偶的误差为 0.2 °C，流速的误差为 0.01 m/s。通过空气带走的热量与电加热器输入的热量之间最大误差为 9%。

2 数据处理

R 的定义为：

$$Re = U_{low} D_e / \nu$$

式中：D_e—通道截面的当量直径；ν—空气的运动粘度；U_{low}—下通道的空气流速。

值得指出的是，实验中，涡发生器布置在上通道，其结构与形式发生改变时，与下通道比较，上通道的阻力系数发生改变，从而影响上下两个通道的流速。为分析问题方便，采用下通道的空气流速定义 Re。

输入的热量由电加热器的电流和电压计算，即 Q = IV

对流换热量定义为：

$$q = c_p \rho U_i (T_{out,i} - T_{in,i})$$

式中：c_p—空气定压比热；ρ—空气的密度；T_{out,i}、T_{in,i}—通道出口和进口空气温度；下角标 i 表示上通道或下通道。

为表征涡发生器的强化传热特性，定义强化传

热系数 R 为：R = (q_{up} - q_{low}) / q_{low}。阻力系数定义为：f = -D_e ΔP / L ρ U²。由于上下通道压力损失 ΔP、通道长度 L、当量直径 D_e 和空气密度 ρ 分别相等，因此上下通道的阻力系数之比为：ζ = f_{up} / f_{low} = U_{low}² / U_{up}²。Re、R 和 ζ 的不确定度分别为 2%、5% 和 1%。

3 结果与讨论

为证明实验系统的可靠性，在未布置涡发生器时，比较了上下通道的换热量，如图 3 所示。从图中可以看出，随着 Re 的增加，R 逐渐降低。这是因为 R 较小时，自然对流作用明显。虽然在 R 较大，但从后面的分析中可以看出，与纵向涡发生器的强化作用比较，这一差别很小，因此可证明实验系统的可靠性。

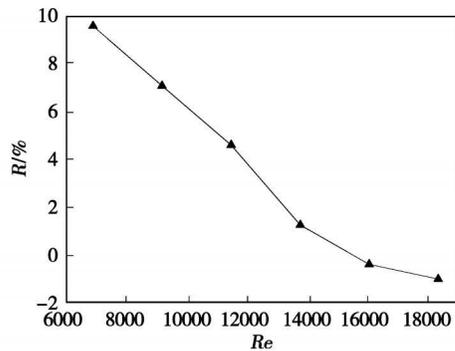


图 3 未布置涡发生器时上下通道换热比较

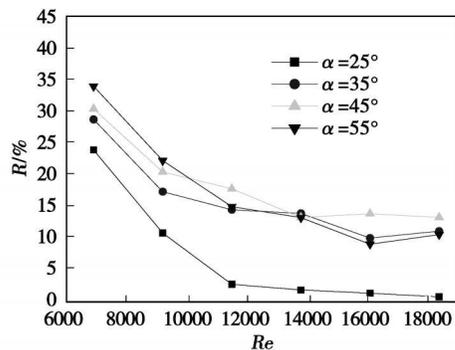


图 4 矩形翼的攻角对换热的影响

图 4 和图 5 为原始矩形翼的攻角对流动与换热特性的影响。从图中看出，在矩形翼的作用下，流动中产生纵向涡，增加了固体壁面与空气之间的对流换热。随着攻角的增加，矩形翼的强化传热效果增强，且 Re 较高时，攻角为 45° 时的换热效果稍优于攻角为 55° 的换热效果。对于攻角对阻力系数的影

响,随着攻角的增加,阻力系数逐渐增加,且攻角为 55° 时的流动阻力明显高于攻角为 45° 的流动阻力。因此,综合流动与换热特性,在本研究的范围内,攻角为 45° 时效果最佳。这表明所产生的纵向涡与攻角存在一最佳的关系。在后面分析中,主要考虑主翼的攻角为 45° 时的情况。

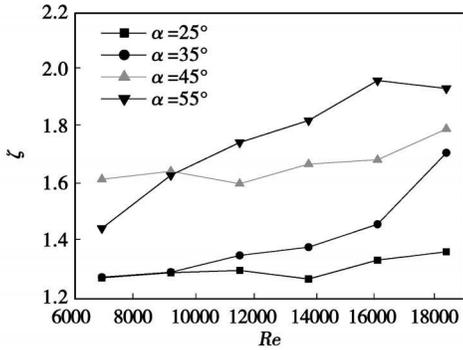
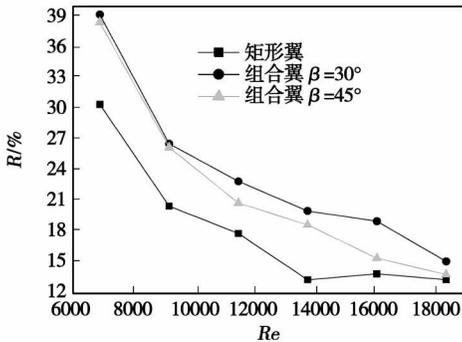
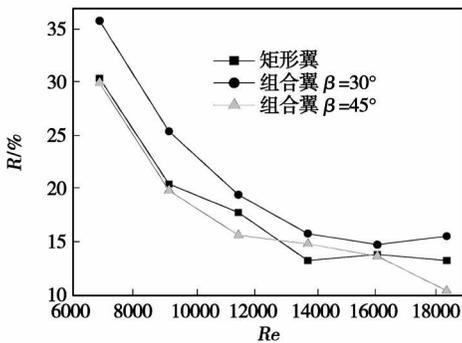


图 5 矩形翼的攻角对阻力系数的影响

图 6 为辅翼的攻角及其布置方式对传热特性的影响。从图中可以看出,与矩形翼相比,组合翼的作用使传热得到强化,表明组合翼的存在能有效控制旋涡的产生与发展,使旋涡更有效的与固体产生作用,增强传热性能;与辅翼布置在主翼的下游的情况相比,辅翼布置在主翼的上游有利于强化传热;与辅翼攻角为 45° 相比,辅翼攻角为 30° 时传热增强。



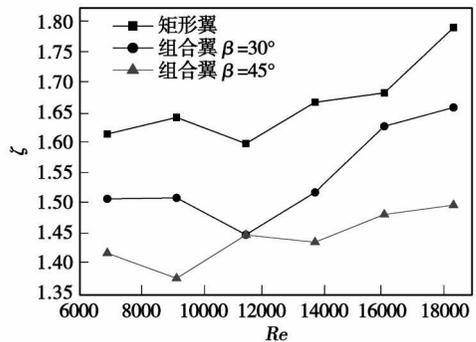
(a) 上游



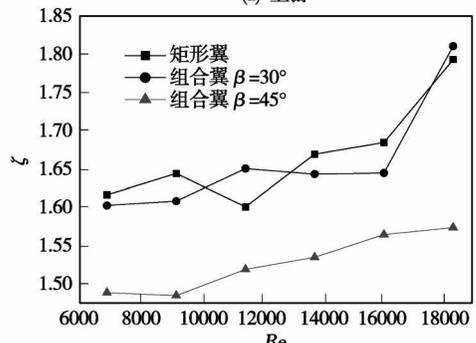
(b) 下游

图 6 组合翼对换热的强化作用

图 7 为组合翼辅翼的攻角及其布置方式对阻力系数的影响。从图中可以看出,组合翼的阻力系数小于矩形翼的阻力系数。这更说明组合翼对旋涡的控制作用;与辅翼布置在主翼下游的情况相比,辅翼布置在主翼的上游时阻力系数减小,这是因为对于矩形翼,下游空气流速较大,当辅翼布置在高速区时,必然增加流动阻力;与辅翼攻角为 45° 相比,辅翼攻角为 30° 时阻力系数增加。考虑到实验中,辅翼攻角为 30° 时与辅翼攻角为 45° 时的压降相同,而换热量高于攻角为 45° 的情况;另外,组合翼的流动与传热特性均优于矩形翼,因此可认为辅翼攻角为 30° 时流动与换热特性最佳。



(a) 上游



(b) 下游

图 7 组合翼对阻力系数的影响

4 结 论

在阻力相同的条件下测量了组合翼的流动与换热特性,得到主要结论为:

- (1) 对于原始矩形翼,在研究范围内,攻角为 45° 时流动与换热的综合效果最佳;
- (2) 对于组合翼,尤其是当辅翼布置在主翼上游时,能增强传热并降低流动阻力;
- (3) 在研究范围内,辅翼攻角为 30° 时的流动与传热综合效果最佳。

由于在矩形翼的侧面上增加辅翼来得到组合

翼,加工简单,因此具有推广价值。值得一提的是,组合翼增强传热与减小流动阻力的根本原因是能有效控制流动中旋涡的产生、形成与发展;另外,主翼的攻角、辅翼的攻角、主翼和辅翼的相对位置等都是影响组合翼流动与传热特性的重要因素,深入的研究有待进一步展开。

参考文献:

- [1] ZHU J X, FEBIG M, MIIRA N K. Numerical investigation of turbulent flows and heat transfer in a rib-roughened channel with longitudinal vortex generators [J]. *Int J Heat Mass Transfer* 1995, 38: 495—501.
- [2] PESHEEISM, SUBBARAO PM V, AGARWAL R S. Experimental study of the effect of winglet location on heat transfer enhancement and pressure drop in fin-tube heat exchangers [J]. *Applied Thermal Engineering* 2005, 25: 1684—1696.
- [3] EIBECK P A, EATON J K. Heat transfer effects of a longitudinal vortex embedded in a turbulent boundary layer [J]. *J Heat Transfer Transactions ASME* 1987, 109: 16—24.
- [4] TIGLEBECK S, MIIRA N K, FIEBIG M. Comparison of wing type vortex generators for heat transfer enhancement in channel flow [J]. *J Heat Transfer Transactions ASME* 1994, 116: 880—885.
- [5] GENIRY M C, JACOBI A M. Heat transfer enhancement by delta-wing vortex generators on a flat plate: vortex interactions with the boundary layer [J]. *Exp Therm Fluid Sci* 1997, 14: 231—242.
- [6] GENIRY M C, JACOBI A M. Heat transfer enhancement by delta-wing-generated tip vortices in flat-plate and developing channel flows [J]. *ASME J Heat Transfer* 2002, 124: 1158—1168.
- [7] LOU T M, CHEN C C, TSAI T W. Heat transfer and fluid flow in a square duct with 12 different shaped vortex generators [J]. *ASME J Heat Transfer* 2000, 122: 327—335.
- [8] TORIKI K, KWAK K M, NISHINO K. Heat transfer enhancement accompanying pressure-loss reduction with winglet-type vortex generators for fin-tube heat exchangers [J]. *Int J Heat Mass Transfer* 2002, 45: 3795—3801.
- [9] VASUDEVAN R, ESWARAN V, BSWAS G. Winglet-type vortex generators for plate fin heat exchangers using triangular fins [J]. *Numer Heat Transfer* 2000, 38: 533—555.
- [10] LAWSON M J, THOLE K A. Heat transfer augmentation along the tube wall of a powered fin heat exchanger using practical delta winglets [J]. *Int J Heat Mass Transfer* 2008, 51: 2346—2360.

(本文责任编辑 孙显辉)

新技术、新工艺

用于故障诊断的光测弹性法

据《Теплоэнергетика》2009年2月号报道,对机械零件的结构应力—形变状态最有效和应用最广泛的试验研究方法是光测弹性法,这个方法对于研究复杂形状零件的应力集中是特别有效的。

不仅仅是零件的形状,而且当存在加渣、未焊透、裂纹形式的缺陷时都可以引起应力集中,出现这些缺陷的可能性也随动力机械尺寸的增加而增加。鉴于选用更高强度、低塑性材料的必要性,因此加大了零件脆性破坏的可能性。

提供了对动力装置中一些极重要的零部件:如反应堆壳体、壳体结合面上的螺纹接合、具有直排支管的压力总管、涡轮机轴、涡轮机静子和转子等零部件的 穿形焊接强度试验研究的结果。

根据试验研究结果得到的公式可用来计算具有裂纹的 穿形焊接接合的脆性静止的和循环的强度。

试验研究结果表明,光测弹性法用于解决带有裂纹的动力装置零件强度及相关的问题是有效果的。

(吉桂明 摘译)

bine-based cogeneration system is compared with the coal-fired and gas-fired boiler system, NO_x emissions are not reduced remarkably but other emissions are lowered conspicuously. The gas turbine system features a definite edge in comparison with the coal-fired and gas-fired boiler system and will enjoy bright prospects in case a rational design is ensured. Key words: gas turbine; heat and power cogeneration; boiler; performance comparison

有无后冷器的微燃气轮机 HAT循环性能比较 = A Comparison of the HAT (Humid Air Turbine) Cycle Performance of a Micro Gas Turbine With and Without an Aftercooler [刊, 汉] / WANG Bo; ZHANG Shi-jie; XIAO Yun-han, et al (Key Laboratory on Advanced Energy and Power Engineering Thermophysics Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25 (1), —39~42

Compared was the performance of a 80 kW micro gas turbine recuperative cycle after its conversion to a HAT (humid air turbine) cycle with and without an aftercooler. The needed increase in the heat exchanger area is given. The research results show that for the gas turbine under investigation, both the conversion efficiencies and power outputs of the HAT cycle system with and without an aftercooler are nearly the same. Compared with the HAT cycle having an aftercooler, the cycle without an aftercooler is equipped with a humidifier of a greater height and volume. The total heat exchange area (sum of the heat exchange areas of the aftercooler, humidifier and economizer), however, becomes smaller in the absence of the aftercooler. This means that the total investment will be lower and the configuration of the HAT cycle system more simple, thus making the system more compact and its control easier. Key words: HAT (humid air turbine) cycle; micro gas turbine; aftercooler

新型矩形翼纵向涡发生器流动与换热实验研究 = Experimental Study of the Flow and Heat Exchange in a Longitudinal Vortex Generator With a New Type of Rectangular Wing [刊, 汉] / MN Chun-hua; QI Cheng-ying; XIE Shang-qun, et al (College of Energy Source and Environment Engineering, Hebei Polytechnical University, Tianjin, China, Post Code: 300401) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25 (1), —43~46

With a small rectangular auxiliary wing being affixed at one side of the rectangular wing, called a combination wing, a new type of rectangular wing longitudinal vortex generator is formed. Under the condition of the pressure loss being identical, the flow and heat exchange characteristics of the combination wing longitudinal vortex generator and the original rectangular wing one in the rectangular passage were compared through experiments. The test results show that for the original rectangular wing, the optimum attack angle is 45 degrees. Compared with the rectangular wing, the combination one has a heat exchange conspicuously intensified with a reduced resistance coefficient. Especially when the auxiliary wing is installed at the upstream of the rectangular wing, there emerges a more conspicuous effectiveness in intensifying the heat exchange and reducing the resistance coefficient. In the range of the present study, the flow and heat exchange effectiveness will be optimum when the attack angle of the auxiliary wing is set at 30 degrees. Key words: longitudinal vortex generator; rectangular passage; intensified heat transfer; pressure loss; combination wing; rectangular wing

不同粒度煤粉的表面结构与燃烧特性研究 = Study of the Surface Structure and Combustion Characteristics of Pulverized Coal in Various Particle Sizes [刊, 汉] / XU Yuan-gang; ZHANG Cheng; XIA Ji, et al (National Key Laboratory on Coal Combustion, Central China University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25 (1), —47~50

Four particle sizes of Pingsan originated and Dayou originated coal were prepared. The surface structure and combustion characteristics of the pulverized coal in different particle sizes were investigated by using respectively the