

真空状态下不锈钢管束的凝结试验研究

魏玉军, 孙奉仲, 史月涛, 高 明

(山东大学 能源与动力工程学院, 山东 济南 250061)

摘 要: 对不同真空和循环水雷诺数下, 经过表面改性处理的不锈钢管束与普通不锈钢管束的换热性能进行对比试验, 结果表明, 经过表面改性处理的不锈钢管束能促进珠状凝结的实现, 其汽侧凝结核系数可以提高 1~2 倍, 总体换热系数可以提高 50% 以上。试验的真空范围满足电厂凝汽器的真空范围, 因此处理过的不锈钢管束可以应用于火电厂。

关 键 词: 真空; 珠状凝结; 凝结核系数; 总体换热系数; 凝汽器

中图分类号: TK264.1 文献标识码: A

引 言

蒸汽凝结分为膜状凝结和珠状凝结两种方式^[1]。在珠状凝结过程中, 凝结表面不是被连续液膜所覆盖, 而是存在大小不同的分散液滴, 这些液滴之间不断合并, 大液滴不断脱落, 并冲刷着其路径上的其它液滴。这些特点, 使珠状冷凝具有较高的凝结换热系数。如果能够在工业应用中实现该过程将会大幅度减少换热面积, 从而既获得节能效果, 又降低设备成本, 有着显著的经济效益。

文献[2~7]对珠状凝结已进行了大量的试验研究, 但他们的试验研究一般是在常压下对单根铜管进行, 而实际中绝大多数使用的都是铜管束, 并且工业中很多场合的凝结过程要求在不同的真空状态下实现, 比如电厂汽轮机设备中的凝汽器。另外, 现代火力发电厂回热系统无铜化的趋势还使得凝汽器改用薄壁不锈钢管代替铜管。因此, 研究不同真空状态下不锈钢管束的换热性能更具有现实意义。

目前, 尚未发现对真空状态下不锈钢管束进行珠状凝结研究的报道, 本文首次对不同真空状态下, 经过表面改性处理的不锈钢管束和普通不锈钢管束换热性能进行对比试验研究, 以为真空状态下不锈钢管束的珠状凝结在火电厂的实际应用提供有益参考和借鉴。

1 试验装置

图 1 为试验系统图, 根据相似理论模拟汽轮机凝汽器设计制造。

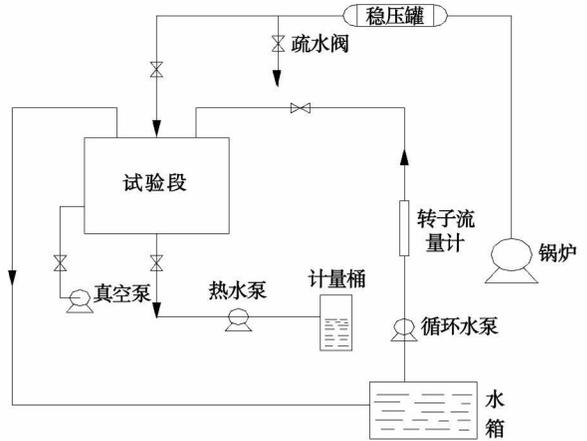


图 1 试验系统图

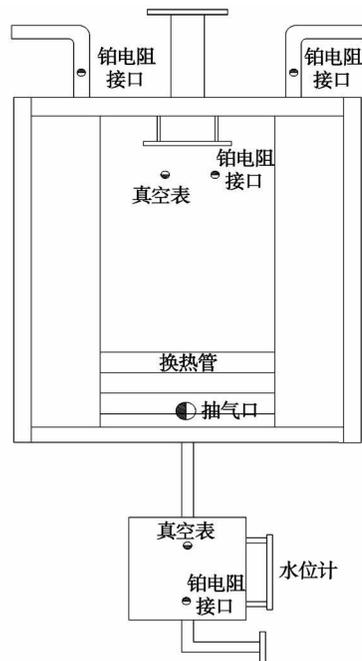


图 2 试验段示意图

图 2 为试验段示意图。换热管水平放置，主要分布在试验段的下部，其规格为 $\phi 19 \times 1.2 \text{ mm}$ ， $L = 375 \text{ mm}$ ， $n = 18$ ，其中有效换热长度为 329 mm 。管外蒸汽进入试验段，横掠试验管束，蒸汽量大小由阀门控制。冷却水源压力和温度稳定，水量大小由进口处的阀门控制。为进行对比试验，两个试验段都安装在同一试验系统中，其尺寸、结构和换热管的规格完全一样，换热管一台为普通不锈钢管，一台为经过表面改性处理的不锈钢管。

2 试验数据处理

试验主要研究真空度和循环水雷诺数对不锈钢管束换热性能的影响。试验中，记录水蒸气进口温度、循环水进、出口温度和凝结水温度，计算凝结换热系数和总体换热系数。

单位时间内循环水吸收的热量为：

$$Q_1 = cm(T_2 - T_1) \tag{1}$$

式中： c —水的比热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ； T_2 —循环水出口温度， K ； T_1 —循环水入口温度， K ； m —循环水质量流量， kg/s 。

单位时间内通过管壁换热量为：

$$Q_2 = KF\Delta T \tag{2}$$

式中： ΔT —对数平均温压， K ； F —试验段总换热面积， m^2

不考虑换热损失， $Q_1 = Q_2$ ，得出系统总体传热系数 K ：

$$K = \frac{cm(T_2 - T_1)}{F\Delta T} \tag{3}$$

根据管内紊流换热的经验式可知：

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \tag{4}$$

由于试验中 $L/D < 60$ ，同时考虑入口效应，引入以下修正：

$$Nu' = c_l Nu = \left[1 + \left(\frac{D}{L} \right)^{0.7} \right] Nu \tag{5}$$

求得 Nu' ，可得到管内对流换热系数 h_i ：

$$h_i = \frac{Nu' \cdot \lambda}{D} \tag{6}$$

忽略管外污垢热阻，由式：

$$\frac{1}{K} = \frac{d_0}{h_i d_i} + \frac{d_0}{2\lambda} \ln \frac{d_0}{d_i} + \frac{1}{h} \tag{7}$$

式中： d_0 —换热管外径， m ； d_i —换热管内径， m 。

得到管外凝结换热系数：

$$h = 1 / \left(\frac{1}{K} - \frac{1}{h_i} \frac{d_0}{d_i} - \frac{d_0}{2\lambda} \ln \frac{d_0}{d_i} \right) \tag{8}$$

通过变换蒸汽压力和循环水流量，得出不同真

空度和循环水雷诺数下的凝结换热系数和总体换热系数。通过比较两种管束同工况下的凝结换热系数和总体换热系数，得出换热性能的优劣。

3 试验结果分析

由于试验条件的限制，试验所取雷诺数分别为 15 823、19 339、22 855 和 26 372，与工程实际相比，虽然较小，但是由于管内流动已经达到旺盛紊流状态，故可用来研究真空下的凝结过程。试验蒸汽压力分别为 0.03、0.04、0.05、0.06、0.07 和 0.08 MPa，相对于汽轮机凝汽器 0.03 ~ 0.06 MPa 的压力来说，能较好地满足要求。

3.1 凝结换热系数

图 3 所示为普通不锈钢管束凝结换热系数与真空度、雷诺数的关系；图 4 所示为经过表面改性处理的不锈钢管束凝结换热系数与真空度、雷诺数的关系。

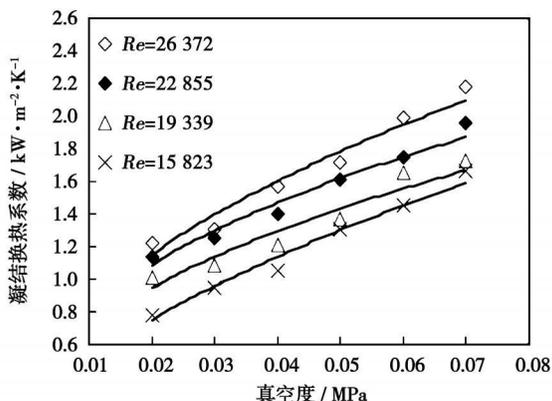


图 3 普通不锈钢管束凝结换热系数曲线

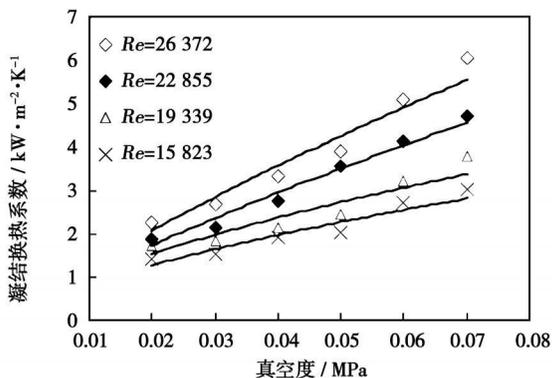


图 4 表面改性不锈钢管束凝结换热系数曲线

从图 3 和图 4 可以看出：

(1) 无论是普通不锈钢管束还是表面处理过的不锈钢管束，凝结换热系数均受到真空度的影响，且

都随着真空度的提高而增大。

(2) 当雷诺数为 26 372, 真空度为 0.07 MPa 时, 处理过的不锈钢管束的凝结换热系数是普通不锈钢管束的 2.8 倍, 真空度为 0.02 MPa 时, 前者是后者的 1.9 倍; 当雷诺数为 15 823, 真空度为 0.07 MPa 时, 处理过的不锈钢管束的凝结换热系数是普通不锈钢管束的 1.9 倍, 真空度为 0.02 MPa 时, 前者是后者的 1.7 倍。可见, 随着雷诺数的减小, 真空的影响也有所减小。

(3) 从曲线的斜率可以看出: 对普通不锈钢管束而言, 随着雷诺数的增加, 真空对凝结换热系数的影响逐渐增大, 但是增大幅度并不明显; 对表面处理过的不锈钢管束而言, 随着雷诺数的增加, 真空对凝结换热系数的影响越来越大, 而且增大趋势非常明显。

3.2 总体换热系数

图 5 所示为普通不锈钢管束总体换热系数与真空度、雷诺数的关系; 图 6 为表面处理过的不锈钢管束总体换热系数与真空度、雷诺数的关系。

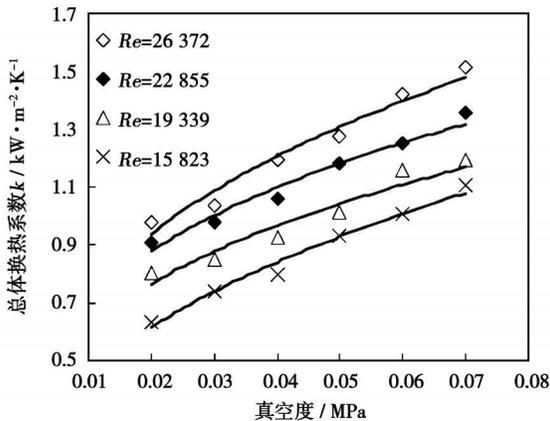


图 5 普通不锈钢管束总体换热系数曲线

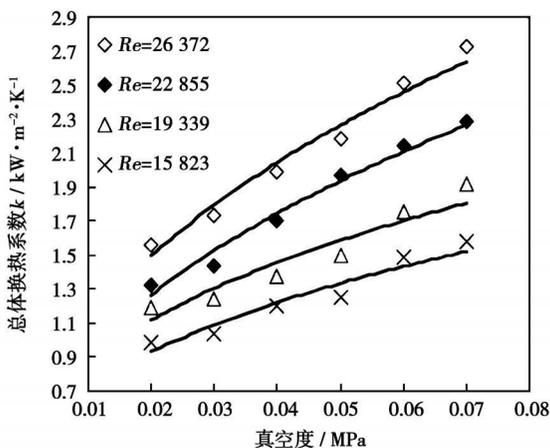


图 6 表面改性不锈钢管束总体换热系数曲线

从图 5 和图 6 可以看出:

(1) 无论是普通不锈钢管束还是表面处理过的不锈钢管束, 总体换热系数均受到真空度的影响, 且都随着真空度的提高而增大。

(2) 当雷诺数为 26 372, 真空度为 0.07 MPa 时, 处理过不锈钢管束的总体换热系数是普通不锈钢管束的 1.8 倍, 真空度为 0.02 MPa 时, 前者是后者的 1.5 倍; 当雷诺数为 15 823, 真空度为 0.07 MPa 时, 处理过不锈钢管束的总体换热系数是普通不锈钢管束的 1.55 倍, 真空度为 0.02 MPa 时, 前者是后者的 1.5 倍, 可见随着雷诺数的减小, 真空的影响也有所减小。

(3) 从曲线的斜率可以看出: 对普通不锈钢管束而言, 随着雷诺数的增加, 真空对总体换热系数的影响逐渐增大, 但是增大幅度并不明显; 对表面处理过的不锈钢管束而言, 随着雷诺数的增加, 真空对总体换热系数的影响越来越大, 而且增大趋势非常明显。

3.3 换热性能分析

随着真空度提高, 换热效果增强。分析其原因为: 真空度提高, 蒸汽在管束中流动更均匀, 从而能够更好地与管壁进行凝结换热; 蒸汽流速加快, 对管子表面的液滴或液膜的冲刷作用越大, 能够使冷凝液尽快脱离管子表面, 从而增加有效换热面积, 增强换热。另外, 不凝气体会对凝结换热产生不利影响, 恶化换热效果。而随真空度提高, 真空泵功率需不断加大, 抽气量也随之增加。此过程中, 不凝气体会随抽气不断被排出, 其含量会随真空的升高而降低, 这也进一步强化了冷凝效果。

经过表面改性处理的不锈钢管束与普通不锈钢管束相比, 其汽侧凝结换热系数可以提高到 2~3 倍, 这表明其很可能已经实现了珠状凝结。通常认为珠状凝结的凝结换热系数要达到膜状凝结的 10 倍以上, 但本试验凝结换热系数相比偏低, 即管束并没有完全实现珠状凝结, 这符合实际过程, 完全的珠状凝结是不存在的。

经过表面改性处理的不锈钢管束近似实现了珠状凝结, 凝结效果好, 所以换热段内不断的有新蒸汽进入。内部的冷凝蒸汽温度要高于普通不锈钢管换热段内的蒸汽温度, 而较高的蒸汽温度有利于蒸汽在管子表面的凝结。因此, 相对于普通不锈钢管束而言, 随着雷诺数的增加, 真空对表面处理过的不锈钢管束换热性能的影响更加明显。

4 结 论

(1) 通过本凝结试验发现, 对于经过表面改性处理的不锈钢管束和普通不锈钢管束, 凝结换热系数和总体换热系数都随着真空度的提高而增大, 都随着雷诺数的增大而增大, 并且真空对前者换热性能的影响要远大于对后者的影响; 在相同的真空度和雷诺数下, 经过表面改性处理的不锈钢管束的凝结换热系数和总体换热系数都大于普通不锈钢管束。

(2) 目前电厂凝汽器的换热管束大部分是铜管和普通不锈钢管, 铜管束的价格比较昂贵, 而不锈钢管的导热热阻较大, 本项研究为不锈钢管代替铜管奠定了基础; 当冷却水为淡水的时候, 不锈钢管在遭受均匀腐蚀、应力腐蚀破裂、冲击腐蚀等方面都要优于铜管^[8], 因此随着表面改性技术的不断成熟, 经过表面改性处理的不锈钢管完全可以替代铜管, 应用

于电厂中的凝汽器, 提高凝汽器的真空度。

参考文献:

- [1] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [2] MA XUE HU. Filmwise condensation heat transfer enhancement with dropwise and filmwise coexisting condensation surface[J]. China Journal of Chemical Engineering, 1998, 6(2): 95-102.
- [3] ZHAO QI. Dropwise condensation of steam on ion implanted condenser surface[J]. Plant Recovery System & CHP, 1994, 14(5): 525-534.
- [4] 王乃华, 李淑英, 骆仲决, 等. 镍基渗层管表面实现珠状凝结的研究[J]. 动力工程, 2002, 22(3): 1804-1807.
- [5] 唐桂华, 庄正宁, 王建伟, 等. 不凝气体存在时水平单管外膜状凝结换热的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2002, 34(11): 31-35.
- [6] 马学虎, 徐敦顺. 实现水蒸气滴状冷凝的表面材料研究[J]. 大连理工大学学报, 1994, 34(6): 662-666.
- [7] 杨杰辉, 程立新. 在复合镀层表面上实现滴状冷凝传热的研究[J]. 化学工程, 1996, 24(4): 38-41.
- [8] 张卓澄. 大型电站凝汽器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.

(编辑 董 斌)

机组运行分析

汽轮机高压和中压转子在曲径密封区域内热应力状态的计算

据《Электрические станции》2008年1月号报道, 应力限制启动速度和持续时间, 应制定监测热应力状态, 并控制启动的 T-250/300-240 型汽轮机转子内的“临界区域”, 是高压转子中间密封进口区域及其中间的热力小槽, 以及1号中压转子前端部密封内沿蒸汽通路的第四个槽。

启动时, 在高压转子内第二个最大热应力区域是中间密封的出口区域。

高压转子内的温度应力仅在开始阶段限制启动的温度, 在发电机同步和已开始加载后, 1号中压转子内的温度应力限制负荷升高的速度。

在开始阶段, 借助于转子在尽可能最低的转速下(不大于 500 r/min)进行预热, 就有可能降低高压转子的温度应力。

给出了在应力集中区域转子有限元模型的部分图、计算的高压转子特征点温差变化曲线、从冷态启动经过 50 min 后1号中压转子的温度场、计算的高压转子和1号中压转子内切向和轴向温度应力变化曲线、高压转子中间密封出口区域内轴向和切向温度应力的等值线图。

(吉桂明 供稿)

真空状态下不锈钢管束的凝结试验研究= **Experimental Study of the Condensation Process in a Stainless Steel Tube Bank under a Vacuum State**[刊, 汉]/WEI Yu-jun, SUN Feng-zhong, SHI Yue-tao, et al (College of Energy Source and Power Engineering, Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 577 ~ 580

At different vacuities and circulating water Reynolds numbers, a contrast experiment has been performed of the heat exchange performance of a surface-denatured stainless steel tube bundle and a common stainless steel one respectively. The results of the study show that the surface denatured stainless steel tube bundle can accelerate the realization of droplet condensation, enhancing the condensation heat exchange coefficient at the steam side by 1 to 2 times and the overall heat exchange coefficient by over 50%. As the vacuum range of the test can meet that of condensers in power plants, the stainless steel tube bundle thus treated can be used for thermal power plants. **Key words:** vacuum, droplet condensation, condensation heat exchange coefficient, overall heat exchange coefficient, condenser

非接触式汽轮机转子表面温度直接测量方法研究= **A Study of a Non-contact Type Direct Method for Measuring Turbine Rotor Surface Temperatures**[刊, 汉]/WANG Kun, LIU Chao, HUANG Shu-hong (College of Energy Source and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 581 ~ 585

A precise measurement of rotor surface temperatures is of major importance for the safe and economic operation of high-parameter steam turbines. A good anti-interference performance makes it possible for colorimetric temperature measurements to enjoy a splendid use prospect in high and intermediate temperature measurement applications. In the light of the foregoing, a measurement method was proposed to directly test the turbine rotor surface temperature by using optical fiber conduction and colorimetric theory. It has been found that if a PbSe detector working in a wave band around 3.8 μm is chosen, the temperature measurement system can operate in a range from 300 $^{\circ}\text{C}$ to 800 $^{\circ}\text{C}$, capable of effectively eliminating the interference of steam environment on the rotor wall temperatures, resulting in a relatively small temperature measurement error and meeting the needs for turbine rotor surface-temperature measurements. The influence of high parameter environment on the measurement system can hopefully be solved by using the technical means of small-diameter infrared optical fiber conduction. **Key words:** rotor temperature measurement, colorimetric temperature measurement, PbSe photoelectric detector, heat release electric detector, Matlab

跨音风扇转子弯掠结合的数值优化设计= **Numerical Optimization design of a Transonic Fan Featuring a Skewed-swept Rotor**[刊, 汉]/WANG Xiang-feng, HAN Wan-jin (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 586 ~ 590

To study the influence of skewed-swept blades on the aerodynamic performance of a fan, an optimized design of transonic fan rotor NASA Rotor 67 was conducted by using a full three-dimensional flow field simulator program based on Reynolds-averaged Navier-Stokes equation and a genetic algorithm-based numerical optimization program. At first, an experimental verification was performed of the solver program of the three-dimensional Navier-Stokes equation which has been developed. The optimization program incorporating an overall optimization-searching ability and combining the genetic algorithm with a response plane method has been substantially improved. With a maximum total pressure ratio serving as a design objective, an aerodynamically optimization design was conducted of the NASA Rotor 67 featuring skewed-swept two degrees of freedom by using the above-mentioned optimization method. It has been found that the combined use of skewed and swept blades can effectively improve the flow conditions in the flow field. With mass flow rate and adiabatic efficiency strictly meeting relevant constraint conditions, the total pressure ratio can be increased by 1 percentage point. This indicates that the above optimization method is feasible. **Key words:** transonic fan rotor, optimization design, genetic algorithm, response plane