

凝汽式汽轮机乏汽凝汽器传热强化的研究

陆应生 庄礼贤 邓先和 陈广怀 陈慕玲
(华南理工大学)

甄景权 刘幸泽
(广州汽轮机厂)

[摘要] 在对高效换热元件横纹管的强化机理,传热与流体力学特性进行了实验研究与分析探讨的基础上,对装机容量 1500 kW 凝汽式汽轮机组的光滑管和横纹管凝汽器进行了工业应用的性能试验,并提出了横纹凝汽器的应用前景。

关键词 传热强化 横纹管 汽轮机 凝汽器

中图分类号 TK264.11; TK124

0 前言

凝汽式汽轮机组乏汽凝汽器的传热强化采用高效换热元件横纹管,具有显著的传热效果。横纹管具有变截面的特殊结构,在管内形成横向突肋的同时管外形成相应的横向沟槽。试验研究表明,当管内冷却水流经横向突肋时在管壁附近产生轴向涡流,这种涡流使管内冷却水增加了边界层的扰动,促使边界层分离,从而有利于热量的传递。与此同时,乏汽在管外冷凝,凝结水的表面张力会使横纹管槽顶和槽谷之间形成一定的压力梯度,把凝结水压向槽谷,使槽顶处凝结水膜减薄,热阻减少。因此认为横纹管用于乏汽凝汽器具有双面强化传热的作用。本文旨在通过实验室基础研究,工业应用试验,为工业化生产应用提供设计依据。

1 横纹管的传热与流体力学特性研究

1.1 实验室基础研究

横纹管用于凝汽式汽轮机乏汽凝汽器传热强化的实验研究,首先是采用参数不同的透明有机玻璃横纹管和光滑管模型进行气泡流态显示试验。即利用电解原理和透明管直径方向上设置的铂电极产生的氢气泡对流体跟随性观察透明模型管内流体的流态,以达到定性及定量地研究横纹管对湍流的促进作用。流动显示试验结果证明横纹管内不存在象螺旋管内那样的螺旋流,只有轴向涡流和径向脉动。这些轴向涡流和径向脉动极有利于边界层的传热。通过测定管内流速及水温还可以计算出相应的雷诺数。其结果表明^[1],在雷诺数为 1285 时,光滑管内氢气泡所成形的抛物线平面开始摆动,雷诺数为 2316 时开始出现湍流,而节距较小的横纹管

* 广东省科委自然科学基金资助项目

本文联系人:陆应生 男 1952年生 副教授 510641 广州华南理工大学传热与节能国家教委开放研究实验室

收稿日期 1996-06-04 收修改稿 1997-01-05

在雷诺数为 1007时抛物线平面已开始摆动。雷诺数为 1155时已出现湍流。这个湍流雷诺数不仅比光滑管低而且比文献^[2]的参数相当的螺旋槽管的湍流雷诺数 1700低,这表明横纹管对管内湍流流动有更好的促进作用。

表 1 各种管型的临界雷诺数比较

管型	内径 d_1 mm	节径比 t/d_1	深径比 e/d_1	雷诺数			备注
				层流	临界	湍流	
光滑管	24.3			999	1285	2316	
螺旋槽管	19.8	0.556	0.04			1700	[1]
横纹管 A	24.3	1.235	0.70	912	1191	1641	
横纹管 B	24.3	0.412	0.70	899	1007	1155	

通过流态显示试验之后还采用低电压高电流把各种参数的黄铜横纹管当作发热体作加热管内流动水以此研究横纹管的传热与流体阻力特性并进行性能评价,再次证明横纹管的传热性能不仅优于光滑管而且优于参数相当的螺旋槽管^[2]。

为了火电厂核电站凝汽器的技术改造,以 102℃的饱和水蒸气管外冷凝管内为冷却水的九条不同参数横纹管的传热与流阻特性,并从热力学优化的角度研究管内、外熵增单元数, N_i 、 N_o 总熵单元数 Nu 与雷诺数 Re 关系^[3]。对最佳的横纹管进行性能评价的结果是:操作雷诺数 $Re = 15\ 000$,普兰德数 $Pr = 6$ 时,当传热速率和泵功率消耗与光管相等,可节省换热面积 38%;当传热面积与泵功率消耗与光管相等,可提高传热速率 30%;当传热速率与传热面积与光管相等泵功率消耗可减少 80%。

根据实验观察与数据分析,节距选择合适的横纹管,凝结水的表面张力起控制作用,凝结水被压向沟槽并且由沟槽下方滴落,传热性能很好;节距太大的横纹管,重力起控制作用,冷凝液不易从沟槽处滴落,其传热情况无异于光滑管。

热力学分析的结果表明九根横纹管的总熵增均小于光滑管,说明采用横纹管强化传热技术,不仅强化了传热过程,提高了传热系数而且还可以减少过程的火用损失。研究工作还以 $Pr = 6, Re = 12\ 000$ 为条件,以单位传热量的火用损失为目标函数进行横纹管的热力学优化,从而获得管外冷凝管内水被加热的最优参数。

1.2 工业应用试验研究

通过实验室基础研究大量可靠的数据分析,认为横纹管用于汽轮机凝汽器可以获得预期的效果,因此,拟在 1500 kW的凝汽式汽轮发电机的凝汽器上试用并进行工业应用试验。

试验设备、流程与方法

现场试验中的光滑管凝汽器安装于广东珠江糖厂的自备电站,横纹管凝汽器安装于广东南海里水造纸厂自备电站。对于横纹管凝汽器的设计思想是:水室之隔板做成可拆式,加上隔板可作双水程运行,藉此可考察水速提高对总传热系数的影响;折去水室隔板,可作单水程运行,藉此可考察在与光滑管大致相同的冷却水压力降条件下横纹管的传热性能。为此,在设计和制造时,横纹管凝汽器增加了一些管线阀门,仪表和测点。运行时,来自汽轮机后缸温度,排汽温度,冷凝水温度均用刻度为 1℃的水银温度计测量,冷却水进出口压力降用弹簧压力表测量。

横纹管凝汽器在运行一段时间后停机,用毛刷通洗管内污垢后投入运行并测定其性能,然后连续运行 37天(888小时)再测定其性能,藉此考察横纹管的抗污垢特性。

2 工业应用试验结果分析

在采用皮托管测定冷却水流速时,一方面由于水量过大,另一方面由于水质较差(含有

造纸过程中排入河流中纤维)使皮托管的小孔常被堵塞,因此不能或不完全能测到冷却水的流量。在计算传热量及传热系数时以皮托管测得的冷凝水量为依据,而以泵房水泵铭牌标明的水量计算的结果仅作参考。

对冷凝侧,以后缸的温度及冷凝水的平均温度作为冷凝温度来计算对数平均温差。又由于控制热阻在冷却水侧,故计算总传热系数时以光滑管的传热内表面积为基准

2.1 通过数据处理结果分析看出:横纹管用于乏汽凝汽器有着显著的强化效果。当作单水程运行,管内水速及冷凝压降大致与作双水程运行的光滑管凝汽器相同时,其传热系数达 $14.47 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$,是光滑管的传热系数 $10.68 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 的 1.43 倍。那么,在热负荷与传热温差不变情况下,使用横纹管代替光滑管的传热面积节约率为:

$$\Delta F\% = \left(1 - \frac{1}{1.43}\right) = 26\%$$

2.2 当横纹管凝汽器采用双水程运行,管内水速达到 1.95 m/s ($Re = 36144$) 时,总传热系数为 $15.05 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 只提高到光管的 1.4 倍,可节省传热面积 29%,而冷却水的总压降升至 0.35 kg/cm^2 为光滑管 0.144 kg/cm^2 的 2.43 倍。随着管内传热的高度强化,管外冷凝负荷也增加,这会起引起冷凝液膜的增厚,使得控制热阻由冷却水侧移到冷凝侧,所以,尽管管内水速提高了,总传热系数提高甚微。因此,我们不能片面追求传热面积的节约量去提高冷却水的流速,导致泵功率消耗的增加。

2.3 对于管外蒸汽的冷凝与管内冷却水作对流传热的工况,控制热阻在冷却水侧。在横纹管内,冷却水流经凸肋后会沿着整个截面产生轴向涡流群(也称边界层分离流)能有效地破坏层流层,因而使节距选择合适的横纹管能连续有效地强化冷却水的对流传

热。对于管外由于横向沟槽的存在,冷凝水的表面张力会在槽顶和槽谷之间形成一定的压力梯度 $\epsilon\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)/S$,其中 ϵ 为冷凝水的表面张力, R_1 为波峰冷凝水膜的曲率半径, R_2 为槽处冷凝水膜的曲率半径, S 为槽顶至槽谷之间的距离,把冷凝水压向槽谷,再由重力作用下滴落,这样槽顶处冷凝水膜减薄热阻减少。另外,如图 1 所示,一定量的冷凝水,在横纹管上是沿直线下落距离短,在螺旋槽管上是走斜线下落距离长,所以对于冷凝水的排除,横纹管要比螺旋槽管顺畅。这也是横纹管传热性能优于螺旋槽管的重要原因之一。

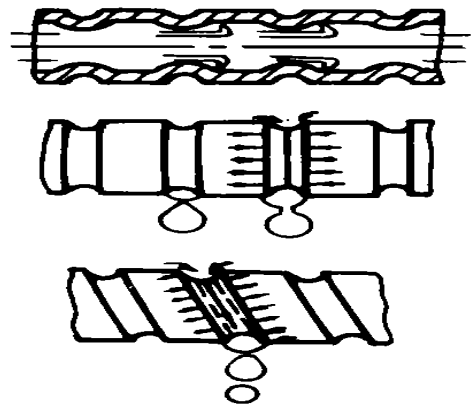


图 1 横纹管的管内、外流态示意图

2.4 管内冷却水压力降,尽管横纹管内的水速与光滑管一样同为 1.2 m/s ,但总的压力降仍比光管的小(因光管长度长了而且双程运行多了一流入管口和流出管口的局部阻力损失),这表明在泵功率消耗相同的情况下,实现传热强化以达到省材节能的目标是可行的。

2.5 工业现场试验还特意考察了横纹管的抗污垢特性,在连续运行了 3 天(888 小时)之后查定的总传热系数降低到 $12.13 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$,对于光滑管则由开始时的 $9 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 降低并稳定在 $7.112 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$,下降 2%;当水速为 1.65 m/s 时横纹

管的总传热系数由 $10.8 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ h} \cdot ^\circ\text{C})$ 降低并稳定在 $7.53 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ h} \cdot ^\circ\text{C})$, 下降 30%。而光滑管则由 $7.112 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ h} \cdot ^\circ\text{C})$ 下降并稳定在 $3.24 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ h} \cdot ^\circ\text{C})$, 下降 54%。所有其它方面的研究和应用情况也说明横纹管比光滑管不易积垢^{[4][5]}。

大容量的电站凝汽器是采用反冲或胶球清垢的方法,我们认为由于横纹管的沟槽较浅,用该法清洗同样可行。此时将反冲胶球的表面加以改进,将其表面做成毛刺状更能改善清垢效果。

3 结论与建议

(1)大量基础研究和工业应用表明横纹管有着显著的强化传热效果,用于 1500 kW 容量的凝汽式汽轮机组凝汽器在泵功率与光管大致相同情况下其传热系数可较光滑管提高 36% 以上,可节省换热面积 30% 左右;

(2)横纹管比光滑管有更好的抗垢特性;
(3)横纹管强化传热技术可推广应用于火电厂、核电站的凝汽器。新设计的凝汽器可以在与光滑管相同的操作条件下减少传热面积,原有设备的改造可以用横纹管更换光滑管,以同等的面积换取更低的汽轮机背压,增加汽轮机的出力。

参考文献

- 1 贾檀,陆应生,庄礼贤,谭盈科,邓先和.化工学报,1990(5):672
- 2 李向明.螺旋肋形管内传热强化机理、数学模型及最优化方法研究.华南理工大学硕士研究生毕业论文,1981
- 3 王晶.横纹管水平管外冷凝过程的研究及其热力学优化.华南理工大学硕士研究生毕业论文,1989
- 4 Withors J G, et al. New wrinkle in condenser tubing. Power Engineering.
- 5 陆应生,庄礼贤等.高效换热元件横纹管.化工进展,1988,(3):10

新设计 弓形静子可提高高压气机效率

据“ASME Journal of Turbomachinery”1997年4月号报道,多级压气机静子表面静压数据分析揭示,负压面角隅分离使静子部分核心流过早分离,限制了它们的压升能力并产生端壁损失。

使用三维欧拉分析模拟静子流场已导致研制能产生减少负压面角隅内扩压率的径向力,以便延迟角隅分离发作的弓形静子。在一台3级研究压气机内弓形静子概念的试验证实了负压面角隅分离的消除,导致端壁损失减小并增加了静子核心部分的压升能力。这产生了更增强的压升特性并显著改进了压气机整个流量范围内的效率。

已表明,利用三维多级纳维尔-斯托克斯分析可以估算弓形静子与粘性端壁流场强烈的相互作用。这就允许转子匹配静子变化的出口流场,以避免潜在的稳定性极限干扰。弓形静子对一台11级高压压气机的应用已明显改进了效率,并且不会降低稳定性。

(思娟 供稿)

瑞典增压流化床联合循环发电技术的发展现状 = (**The Present Status of Development of Swedish Power Generation Technology Involving the Use of a Pressurized Fluidized Bed Combined Cycle Unit**) [刊, 中] / Li Daji (Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(1). 1- 5

An on the spot survey of Swedish power generation technology involving the use of a pressurized fluidized bed combined cycle unit (PFBC-CC) was made in late April 1996 by a Chinese Delegation of Industrial Science & Technology. As a result, a comprehensive understanding has been gained of the research history and present status of the above-cited technology. This paper gives a brief description of the three types of PFBC plants of Swedish ABB Carbon Co. in respect of its preliminary test, intermediary test, commercial demonstration and application. **Key words** pressurized fluidized bed, combined cycle, Sweden, development

Stirling 发动机燃烧及换热分析 = (**Analysis of a Stirling Engine Combustion and Heat Exchange**) [刊, 中] / Shen Jianping, Jin Donghan, Gu Genxiang (No. 711 Research Institute under the China State Shipbuilding Corp.) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(1). 6- 10

On the basis of a calculation of hydrocarbon fuel combustion chemical equilibrium reaction obtained are the temperature and component ingredients of the combustion products. Following this the combustion gas physical properties were calculated and based on this the convection heat exchange factor, radiation heat exchange factor and rear row heat exchange pipe rib heat transfer of a heat engine outer combustion system heating pipe were also calculated. A contrast computation is conducted of the two combustion conditions, air combustion and liquid oxygen combustion. Also computed are the various factors which have an influence on combustion with an analysis and discussion performed for the calculation results. The valuable conclusions obtained can serve as a guide for the structural design of the heat engine outer combustion system. **Key words** heat engine, heat exchange factor, combustion, chemical equilibrium

给水泵液力调速系统的特性及其非线性改善分析 = (**Analysis of the Characteristics of a Feedwater Pump Hydraulic Speed Governing System and Its Non-linear Improvement**) [刊, 中] / Wang Liwen (China National Civil Aviation Institute), Yan Guojun, Zhu Ruibin, Yang Huipu (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(1). - 11- 14

After an analysis of the regulating characteristics of the fluid coupling feedwater pump speed regulating system this paper gives a brief account of the principle of a variable function generator used for improving the serious nonlinearity of regulating characteristics and also the software and hardware design method. By way of an experimental analysis a scoop pipe-drive method is proposed for the improvement of a high-power variable speed fluid coupling. **Key words** variable speed fluid coupling, feedwater pump, nonlinearity

凝汽式汽轮机乏汽凝汽器强化的研究 = (**A Study of the Exhaust Steam Condenser Heat Transfer Enhancement of a Condensing Steam Turbine**) [刊, 中] / Lu Yingsheng, Zhuang Lixian, Deng Xianbe, Chen Guanghui, Chen Mulin (South China University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(1). - 15- 18

On the basis of an experimental study and analysis on the intensification mechanism of a high-efficiency heat transfer element (transversally corrugated tube) and its heat transfer and fluid mechanics conducted is the industrial application-oriented performance test of a 1500 kW condensing turbine condenser comprising glossy tubes and transversally corrugated tubes. The application prospects of the condensers made of transversally corrugated tubes are also given. **Key words** steam turbine, condenser, transversally corrugated tube, heat transfer intensification

煤粉气流火焰稳定性条件分析 = (**Analysis of Pulverized Coal Current Flow Flame Stability Conditions**) [刊, 中] / Ma Xiaoqian (South China University of Science & Technology), Jin Sijun, Si Xuefeng, Qian Ren-