

汽轮机密封技术的应用和发展

魏琳健, 李春清, 高 雷, 寇 丹

(哈尔滨·第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘 要: 汽轮机的汽封是汽轮机的重要部件, 汽轮机汽封的密封性能将直接影响到汽轮机汽封的蒸汽泄漏量, 进而影响汽轮机的机组热效率。根据各种汽封结构型式的密封机理, 分析和比较了现有各种汽轮机汽封的密封性能, 并展望了汽轮机密封技术的发展前景。特别是最近十几年美国布兰登工程公司研制并在世界范围内得到广泛应用的布兰登式可调汽封, 布兰登式可调汽封能够提高汽轮机机组运行的安全性和可靠性及显著提高汽轮机热效率, 但是在中国应用布兰登式可调汽封时出现了汽封锈蚀和弹簧塑性变形问题。

关 键 词: 汽轮机; 汽封; 应用; 发展

中图分类号: TK26

文献标识码: A

1 引 言

汽轮机的汽封分为轴端汽封, 隔板汽封和叶顶汽封, 分别用来防止汽轮机的轴端, 隔板和动叶顶部蒸汽的泄漏, 其作用分别是防止外界空气进入汽轮机, 与汽轮机内的蒸汽混合, 减小蒸汽泄漏量, 从而减少化学补水量和防止高位能的工作介质向低位能流动。按照密封机理划分, 汽轮机的汽封可分为接触式密封: 碳精环汽封和刷式汽封; 非接触式密封: 拉别令汽封和蜂窝式汽封。另外, 汽轮机汽封还可分为

可调式和不可调式汽封。作为汽轮机的易损件和必备部件, 汽轮机的汽封越来越引起从事汽轮机设计的工程技术人员的关注。因为从汽轮机运行的测试结果可以看出汽轮机的漏汽损失约占内部损失的 $1/3$ 左右。近年随着汽轮机密封技术的不断发展, 汽轮机运行的安全性和机组热效率都得到相应的提高。特别是最近十几年, 从碳精环汽封、拉别令汽封、蜂窝式汽封到刷式汽封, 从传统的不可调式汽封到可调式汽封, 汽轮机密封技术的发展很快, 不断地减小汽轮机的蒸汽泄漏量, 提高汽轮机组的热效率, 减少燃料耗量, 改善电厂的经济性。

2 传统的碳精环汽封和拉别令汽封

碳精环汽封为接触式汽封, 因此机械损失比较大。早期在小型汽轮机上采用的碳精环汽封虽然可用, 但具有局限性, 不适用于高温与高压汽轮机, 而且如果因磨损产生间隙并使间隙有所扩大将导致大量的蒸汽泄漏。它磨损快, 只适用于轴径圆周速度不超过 $35 \sim 40 \text{ m/s}$, 工作温度不超过 300°C 的小型汽轮机。

包括梳齿式汽封和迷宫式汽封在内的传统拉别令汽封以其成

本低、结构简单、安全可靠和易于安装的特点被广泛应用于大、中、小型汽轮机。目前采用的梳齿式汽封和迷宫式汽封的径向间隙一般为 $0.2 \sim 0.6 \text{ mm}$, 当超过 $0.5 \sim 0.6 \text{ mm}$ 时, 就要视运行情况在大修时及时更换汽封。

3 蜂窝式汽封

与传统的梳齿汽封相比, 蜂窝汽封的最大特点是如果与转子发生擦碰, 不会损坏转子和引起转子的过度弯曲, 密封性能仍可保持, 另外可以抑制密封流体的激振, 改善转子的稳定性。国内外有关研究机构已经研究了各种蜂窝芯格尺寸和蜂窝孔深对密封性能的影响。蜂窝汽封的芯格尺寸对泄漏量的影响不呈线性规律, 芯格尺寸为 1.6 mm 的蜂窝汽封的封严特性最好, 其次为小芯格尺寸 (0.8 mm) 的蜂窝汽封, 大芯格尺寸 (3.2 mm) 蜂窝汽封的封严特性最差。而与梳齿汽封相比, 芯格尺寸为 $0.5 \sim 1.6 \text{ mm}$ 蜂窝汽封的泄漏量小于梳齿汽封, 但是更大或更小芯格尺寸的蜂窝汽封的泄漏量大于梳齿汽封。在汽封径向间隙相同的情况下, 当汽封的径向间隙大于 $0.20 \sim 0.40 \text{ mm}$, 蜂窝汽封的封严特性比梳齿

汽封好;当汽封的径向间隙小于 0.06 mm 时,梳齿汽封的泄漏量小于蜂窝汽封。蜂窝孔深对密封性能几乎没有影响。采用蜂窝汽封后,汽封间隙可以很小,达到减小漏气量和提高效率的目的,同时由于蜂窝汽封很软,即使与转子发生擦碰,一般不会发热和伤及转子而引发安全问题。目前,国内外许多燃气轮机、压缩机、高压涡轮泵和汽轮机都广泛采用蜂窝汽封。

4 刷式汽封

与拉别令汽封相比,近年出现的刷式汽封可有效地减少蒸汽的泄漏量,可使汽封初始的泄漏量减少 50% 以上。刷式汽封有如下优点:提高机组的热效率,大幅减小汽轮机径向支持轴承间的轴向长度;汽封的轴向长度和重量远小于拉别令汽封,结构紧凑、泄漏量小(少于拉别令汽封泄漏量的 20%)、可靠性高、寿命长、改造变动小和维护费用低。目前刷式汽封单位面积的鬃毛数每平方毫米可以达到 100 根鬃毛,刷式汽封采用钴基或铬基合金的鬃毛丝与经过固体润滑脂处理过的织构碳化铬表面对磨,刷排轴向宽度约为 0.8 mm。刷式汽封壳体可做成尺寸为轴向 4~5 mm 和径向 12 mm。刷式汽封已经成功地应用到最大压力差 0.5 MPa。更高的压力可能导致鬃毛颤振,进而导致磨损和泄漏增加。试验表明一个精心设计的刷式汽封的气体泄漏量不大于传统拉别令汽封泄漏量的 20%。

刷式汽封主要有两种专利密封结构,如图 1 所示,一种将鬃毛组件与侧板焊接在一起(见图

1(a)),另一种将鬃毛包裹在一根金属丝上(见图 1(b)),然后夹固定在前后板之间的一个环形管内。刷式汽封的鬃毛径向向内伸

展,将其末端加工以适合转子表面,为了适应转子的径向运动,鬃毛沿轴旋转方向布置成 45°,当受热时,鬃毛与转子表面轻微接触,其弹性使其追踪转子的径向偏移,在下游侧,后板限制鬃毛因压力导致的挠曲;当冷态时,鬃毛的尖端刚离开转子并且其间隙恰好适合在运行中通过热膨胀和/或压力闭合。转子与后板之间的间隙是确定刷式汽封承压能力的一个关键参数,此间隙需要尽量减小,但又以在任何运行条件下避免接触转子为准。

目前,试验工作和机组的实际运行已经证明刷式汽封的鬃毛是牢固的,组成刷子的钢丝在交变温度下不会脱毛。刷式汽封的使用实践表明:汽封间隙为 0.51 mm~1.27 mm 时能够保证汽轮机的安全运行。刷式汽封最早使用在航空发动机上,现在正在逐步地推广和应用用于汽轮机。此外,刷式汽封具有方向性,采用刷式汽封的汽轮机只能单方向旋转,因此具有正车和倒车功能的汽轮机不宜采用刷式汽封。

5 可调式汽封

可调式汽封的优良特性在于:随着汽轮机的起动和运行状

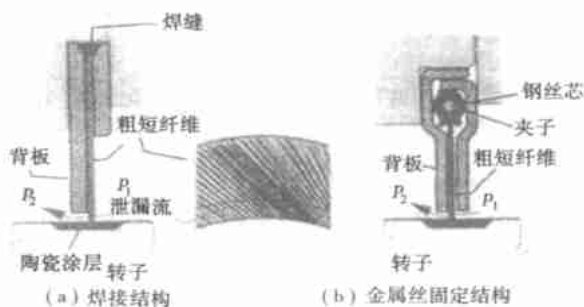


图 1 刷式汽封的结构

态的变化,可调式汽封将按照预先设定值来调整汽封和转子之间的径向间隙。采用可调式汽封可避免径向汽封与汽轮机转子之间的擦碰,提高汽轮机组运行的安全性和可靠性,以及机组的热效率。对于不可调汽封,在正常安装后,如果汽封与转子间的径向间隙过大,就会引起蒸汽的泄漏增加,导致汽轮机组热效率的降低,甚至引起整个汽封系统的失调,导致停机。如果汽封与转子之间的径向间隙设置得太小,在通过临界转速时,转子可能发生较大的振动,或者汽轮机起动过快,汽缸、隔板和隔板套经受较大的温差,从转子轴向的横断面上看,汽缸内壁和外壁的温差导致整个汽缸呈鸭蛋形,汽缸的中分面处张开 V 形口,在水平方向上,汽封齿与转子间的径向间隙达到最大,而在竖直方向上的汽封齿与转子间的间隙达到最小,此时转子的振动就会导致汽封齿与转子发生擦碰,增大汽封齿与转子之间的间隙。当擦碰严重时,会使汽封齿变形、变脆甚至破裂,同时隔板的径向轴封与转子所产生的擦碰会使转子局部受热,产生热变形导致转子弯曲,导致汽封齿的进一步磨损,加大径向汽封与转子之间的间隙。采用

可调式汽封后, 在汽轮机启动时, 较大的汽封间隙有利于汽轮机动静部件的预热, 可缩短启动过程; 还可以在汽轮机转子通过临界转速时, 防止动静部件的擦碰。在汽轮机正常运行时, 减小并保持合适的汽封间隙, 可减少汽轮机的蒸汽泄漏量, 提高机组的热效率。

可调式汽封的研究始于 20 世纪 80 年代, 出现了各种形式的可调式汽封, 但是美国 Brandon 工程公司研制和开发的可调式汽封最为成功, 并得到了广泛的应用。

在 1989 ~ 1990 年间, GE 公司开发和研制了正压汽封。GE 公司的正压汽封系统非常复杂, 采用从外部引入高压蒸汽的方法手动控制汽封块的闭合和开启, 在汽封体上钻出多个小孔以形成高压蒸汽的通路, 这样, 结构复杂, 零件太多, 导致改造费用非常高。改造后运行的效果也不甚理想。随后, GE 公司又推出改进式正压汽封。

日本横滨东芝公司也在为实现汽封的可调而努力, 他们开发并研制了采用压力波纹管控制的可调式汽封, 这种汽封需要从外部引入高压蒸汽来操纵波纹管的涨缩, 从而实现汽封的可调。这种汽封系统结构复杂, 在汽缸和隔板体上需要有高压蒸汽通路, 波纹管还要占据一定的空间, 导致其应用受到限制。

而布兰登式可调式汽封则不同, 它是利用汽封前后的压差来实现汽封的可调。在汽轮机启动过程中, 随着汽轮机负荷的增加, 汽轮机的进汽量也随之增加, 汽轮机各压力级的前后压差也会逐渐增加。布兰登式可调汽

封正是根据这种汽轮机的各级压差随负荷的变化, 将汽轮机各级的隔板径向汽封和叶顶汽封设计成随汽封前后压差而变化, 使汽封与转动部件间的间隙随负荷而变化。当汽轮机达到一定负荷时, 汽封间隙达到最小, 以后再增加负荷汽封间隙将保持不变。布兰登式可调汽封具有结构简单, 改造费用低和适于老机组改造的特点。

布兰登式可调汽封现有两种结构: 6 块弧段和 4 块弧段型式, 如图 2 和图 3 所示, 分别应用于高压和低压汽轮机。

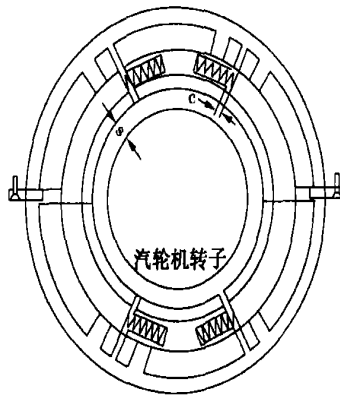


图 2 6 块弧段汽封环结构

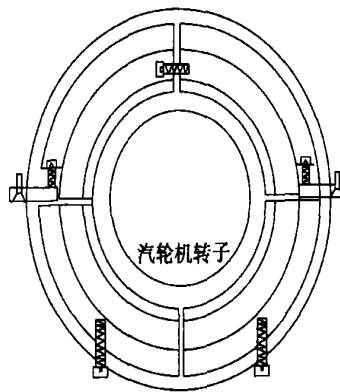


图 3 4 块弧段汽封环结构

可调汽封的闭合压差主要靠改变弹簧预紧力、刚度和零件材料间的摩擦系数来调整, 可调汽

封的结构尺寸也有影响, 但是这种影响有限。

可调汽封的设计应尽量减少汽封环体高度, 加大汽封的宽度, 这样会减小可调汽封的闭合压差。

汽轮机轴端汽封最外面的 3 段汽封环不宜采用布兰登式可调汽封。因为这 3 段汽封环若改成可调式汽封, 特别是最外端的汽封环, 那么, 污物和油将被吸入密封系统。如果轴端第二段汽封环改成可调汽封, 将允许密封蒸汽被吸入汽封抽汽系统。如果轴端第三段汽封采用可调式汽封, 则很难保证蒸汽密封联轴(均压箱)的压力。然而, 更主要的原因是这些汽封环靠近径向支持轴承, 不易发生擦碰。

从布兰登式可调汽封运行的经验来看, 目前布兰登式可调汽封确实可以不同程度地提高机组的热效率, 最高可达 1% ~ 2%, 但是同时也存在两个方面的问题: 一是布兰登式可调汽封经过长时间的运行后, 常常发生锈死, 导致汽封不可调; 二是布兰登式可调汽封经过长时间的运行后其弹簧常常在蒸汽高温的作用下发生塑性变形, 导致在汽轮机负荷减小后布兰登式可调汽封不能够自动进入完全开启状态。

6 汽轮机密封技术的应用和发展前景

综上所述, 各种汽轮机密封技术都在不断发展, 出现了用于工作环境更为严酷的耐高温、高压的汽封; 可抑制气流激振的蜂窝式汽封; 允许汽轮机动静部分相接触的刷式汽封; 智能型的可调式汽封等。各类汽轮机密封技术的应用, 不断提高汽轮机运行

的安全性和可靠性,提高汽轮机的热效率。同时汽轮机的汽封实现可调后,避免了汽轮机转子与梳齿汽封之间的擦碰,使得汽轮机的汽封与汽轮机转子之间的径向间隙可以达到更小,但是梳齿式汽封从其密封性能来看毕竟不如刷式和蜂窝汽封,因此还有待研究其它各种型式汽封的可调性和密封性能,研究和开发新型可调汽封。同时,也应看到所有上述汽封型式都为接触式和非接触式不完全密封,既都要有少量的蒸汽泄漏,需配备有复杂的密封系统,包括汽封冷却器、抽气器、平衡箱和调压阀等等,来回收泄漏的部分蒸汽,减少化学补水量。开发和研究非接触式的完全密封

技术,如磁流体密封等,才是从事汽轮机密封技术研究者的努力方向。

参考文献:

[1] 米勒海因茨 K, 纳乌伯纳德 S. 流体密封技术—原理与应用[M]. 程传庆, 译. 北京: 机械工业出版社, 2002

[2] 休戈布赫特 H. 工业密封技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1988

[3] 王 旭, 张文平, 马胜远, 等. 转子蜂窝密封封严特性的试验研究[J]. 热能动力工程, 2004, 19(5): 521-525.

[4] 布兰登工程公司. 关于汽轮机汽封及其间隙的有关问题和最近发展的介绍[M]. 美国加利福尼亚州: Brandon Engineering Inc, 1998.

[5] MACGREGOR J P. Improved turbine heat rate with retractable packing rings [A].

International Turbomachinery Congress [C]. London England: International Turbomachinery Congress, 1989. 1— 22.

[6] WESCOTT J, BRANDON R E, Sustained turbine efficiency using variable clearance packing[A]. EPRI Heat Rate Improvement Conference[C]. Richmond Virginia; EPRI Heat Rate Improvement Conference, 1988. 1— 10.

[7] MILTON J, SNOWDON T. The application of a high accuracy data collection system [A]. EPRI Heat Rate Improvement Conference [C]. Richmond Virginia; EPRI Heat Rate Improvement Conference, 1988. 1— 6.

[8] MEYER C, LOWRIE J. The leakage through straight and skirt labyrinth and honeycomb seals[A]. ASME Winter Meeting[C]. New York: ASME Winter Meeting, 1974. 23— 30.

新 设计

燃气轮机燃烧室的混合扩压器

《ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power》2004 年 10 月号报导燃气轮机燃烧室混合扩压器所进行的理论和试验研究情况。

增加现代燃烧室的径向深度对预扩压器有一定的难度,传统的扩压系统对给定长度内的扩压有一定的限制,所以设计者需要考虑更多径向和非传统的扩压器结构。

本文报导的是非传统扩压器—混合扩压器,在放气作用下它能在很短的长度内达到高的扩压率。但是,以前的研究是在特定的条件下进行,并且不能对有关的流动机理提供完整的描述,因而很难对这种扩压器的结构进行优化。

采用现代燃气轮机燃烧室的等温表示法进行了试验研究,对混合扩压器的性能与传统的单通路扩压系统的性能比较,在相同的轴向长度内,混合扩压器的面积比增加 53%,预扩压器静压恢复系数增加 13%,燃烧室供气环总压损失系数减少 25%。

计算研究还表明,研究支配流动的机理,对流场的详细分析,包括依据动量方程的分析证明控制流动的机理下仅仅是附面层放气,而且还包括加速的放气流和扩压主流之间更复杂的相互作用。

了解这些机理有助于设计出更实用的混合扩压器,可简化扩压器的几何,还可改进放气的质量,能更有效地用于部件的冷却。

(吉桂明 供稿)

换热技术从大型化向微小化的发展 = **Development of Heat Exchange Technology from Macro-sized Heat Exchange Units to Miniaturized Ones** [刊, 汉] / ZHOU Guo-yan, TU Shan-dong (Mechanical & Power Engineering Institute under the East China University of Science & Technology, Shanghai, China, Post Code: 200237) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(5). — 447 ~ 454

On the basis of analyzing the construction features of traditional heat exchangers a specific analysis was conducted of the construction, performance and applications of now commonly used compact heat exchangers along with an exposition of their development and potential use in micro-sized chemico-mechanical systems. With an ammonia cooler serving as an example the design of a plate-fin heat exchanger and another kind of high-efficiency miniaturized heat exchange unit, the so-called heat-pipe heat exchanger, was respectively carried out. It can be shown that the plate-fin heat exchanger features higher heat-exchange efficiency and a compact structure. This also in a comprehensive way indicates the inevitable development trend of heat exchange technology from macro-sized units to compact and miniaturized ones. The wide prospects of the application of miniaturized heat exchange devices are specifically analyzed by citing as examples such typical miniaturized heat exchange units as micro-channel heat exchangers, micro-channel evaporators and micro-channel heaters. **Key words:** heat exchange technology, miniaturization, micro-channel, micro heat transfer, miniaturized chemico-mechanical system, plate-fin type, heat-pipe type

汽轮机密封技术的应用和发展 = **Application and Development of Steam Turbine Sealing Technologies** [刊, 汉] / WEI Lin-jian, LI Chun-qing, GAO Lei, et al (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(5). — 455 ~ 458

Steam turbine gland seal is a major constituent element of a turbine, which has a direct bearing on the steam leakage of a turbine seal, and thus affects the thermal efficiency of a steam turbine unit. In the light of the sealing mechanism of various kinds of gland seal construction the sealing performance of various turbine gland seals currently in use is analyzed and compared along with a forecast of the development prospects of turbine sealing technology. Described in especial detail is the adjustable gland seal of Brandon type developed by U.S. Brandon Engineering Co. in the recent decade or so and now extensively used worldwide. By using this type of gland seals it is possible to enhance the turbine operational safety and reliability as well as significantly improve its thermal efficiency. However, its use in China has given rise to gland seal rust corrosion and spring plastic deformation. **Key words:** steam turbine, steam gland, application, development

船用燃气轮机变几何动力涡轮大攻角流动特性的三维数值模拟 = **Three-dimensional Numerical Simulation of the Flow Characteristics at a Large Incidence of the Variable-geometry Power Turbine of a Marine Gas Turbine** [刊, 汉] / FENG Yong-ming, LIU Shun-long (Power & Nuclear Energy Engineering Institute under the Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), LIU Min, WANG Lin (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(5). — 459 ~ 463

By employing three-dimensional numerical simulation techniques a study was conducted of the flow field mechanism of the aerodynamic performance variation of a variable-geometry power turbine caused by the rotation of adjustable guide vanes. The results of the study indicate that within a range of relatively small turning angles the adjustable guide vanes designed by using a large turning angle will enable the turbine to operate at a large incidence. The three-dimensional separation flow field structure and its generation mechanism in the rotating cascade flow channel of an adjustable guide vane stage at a large positive incidence are very different from those of the same vane stage at a large negative incidence. Moreover, the suction-surface separation flow caused by a large positive incidence will significantly reduce the efficiency of the turbine as a whole. Through a systematic mechanistic analysis the authors have proposed the use of a rear loaded blade profile for the adjustable guide vanes using a relatively small turning angle and the adoption of an aerodynamic design principle under which a relatively large negative incidence is employed for the rotating cascade of the adjustable guide vane stage of the variable-geometry power turbine. **Key words:** marine gas turbine, variable-geometry power turbine, flow characteristics at a large incidence, numerical simulation