

汽轮机内部除湿技术的发展

刘建成¹, 林志鸿¹, 闻雪友¹, 田 广²

(1. 哈尔滨·第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036;

2. 海军驻哈尔滨·第七〇三研究所 军事代表室, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘 要: 由于地热电站及核能发电的迅速发展, 汽轮机低压缸所面临的湿蒸汽问题显得尤为突出, 尤其是末几级动叶片长期受高速水滴的冲击, 造成的水蚀, 甚至断裂将影响汽轮机的安全运行。按照机内除湿位置及除湿方式的不同, 论述了空心导叶抽吸、吹扫及加热除湿法、动叶表面槽道除湿法和加长动静叶间间隙法、隔板装置除湿法等, 概括了近三十年来, 俄、英、德、美、法等国家内部除湿技术研究的进展和应用情况, 以及与其相关的蒸汽湿度测量技术的发展, 探讨了国内机内部除湿的研究状况及发展方向。

关键词: 汽轮机; 湿蒸汽;
内部除湿

中图分类号: TK263. 2
文献标识码: A

1 前言

在汽轮机内过热或饱和蒸汽膨胀做功, 穿过饱和线后, 会有水滴凝结析出使水蒸气湿度增加。若汽轮机内湿度过大而不采取措施, 末几级叶片会发生侵蚀, 工作数年后就会损坏, 甚至断裂; 另外做功蒸汽具有湿度也使机组效率有所下降^[1]。本着机组设计长寿命和高效的原则, 设计者必须慎重考虑湿度问题。解决汽轮机湿度影响的消极方法为表面抗蚀技术, 而积极方法为除湿技术,

其中除湿技术分为外部除湿(汽水分离)技术和内部除湿技术。

内部除湿技术在船用汽轮机上应用更具有切实意义, 它可以代替庞大的外置汽水分离器, 大大缩小所占舱内空间, 减轻机组重量。

2 汽轮机叶栅内液滴的运动

汽轮机内部的湿蒸汽流实际上是一种高速汽液两相流。由蒸汽自发凝结而成的水滴(一次水滴)在与蒸汽流动过程中会不断长大, 部分靠近叶栅表面的具有一定尺寸规模的水滴会在叶栅表面沉积而形成水膜。水膜同时被主流蒸汽推向叶栅尾缘而在尾缘处不断累积, 达到临界点后, 又在叶栅尾缘被高速气流撕裂, 形成

直径通常在几十个微米的大尺度液滴(二次水滴)后重新汇入主蒸汽流中。

蒸汽流中所含的各种尺度的水滴是造成叶片侵蚀、湿汽损失和级效率下降的主要原因。图 1 为叶栅内 S1 流面及 S2 流面内水滴的运动轨迹。研究水滴运动轨迹对确定机内部除湿结构和除湿方法有指导意义^[2~3]。

3 内部除湿技术的研究

20 世纪 50 年代以来, 前苏联、英国、美国、日本、波兰、捷克和德国等发达国家都在积极开展汽轮机水蚀及内部除湿的研究^[4~7]。

汽轮机内应用最早和最广泛的除湿方法是外缘分离法, 它是

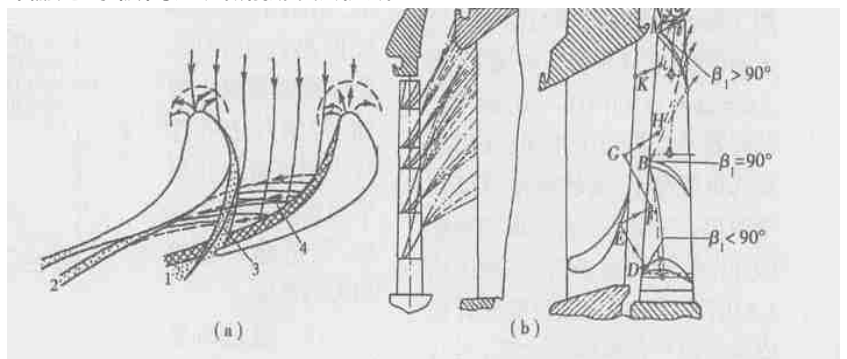


图 1 汽轮机叶栅内水滴的运动轨迹

在外缘开设除湿沟槽, 利用喷嘴叶栅和工作叶栅对工作汽流的扭转和离心效应, 将水滴甩向外缘, 引入沟槽后导入冷凝器中。简单的外缘分离法除湿效率较低。

根据除湿位置不同, 汽轮机内部除湿方法可以分为以下 3 种。

3.1 导叶除湿技术

它是将导叶内制成空腔, 通过腔室借助抽吸、吹扫或加热的方法将附在导叶表面的液膜或尾缘积聚的大液滴去掉, 以增加蒸汽干度。由于吹、吸及加热的方式不同, 空心导叶去湿法又可分为以下几种:

(1) 通过导叶空腔将水膜抽吸出流动区域。这种方法是空心导叶去湿的最早方法, 先是在美国通用电气公司采用, 而后西德 AEG、法国 Alsthon、捷克 Skoda、英国 GEC-AEI 和日本东芝公司等都相继进行了设计和应用, 图 2 示出了几种典型结构。对于不同的结构参数及运行条件, 例如开槽位置、大小、转速、抽吸压力及流量等, 其去湿效率也是不同的。

在文献 [6~7] 中论述了(汽、液)相密度比、马赫数和雷诺数等对槽道内分离效果的影响参数, 图 3 表示了分离效率与抽气量的关系曲线, 在 4 种转速情况下, 当 $\Delta m = \Delta m / m > 0.6\% \sim 0.8\%$ 时, 分离效率增加趋于平缓; 在同等抽气量情况下, 高转速使分离效率增加。对空心叶片表面抽吸缝的开设位置研究表明: 当级压比 $\epsilon > 0.7 \sim 0.75$ 时, 抽吸缝应开在内弧表面和背弧喉部之前; 当马赫数较大时, 缝隙应布在背弧进口处; 若将缝隙开在出汽边上, 在某些大压比和低马赫数情况下, 其效果优于在叶片表面开设吸湿

缝, 因为它可以有效地抽吸掉积聚在叶栅尾缘的水膜和大水滴。勃良斯克运输机械制造学院 P. M. Блоник 的研究也表明: 内弧表面距出汽边不远处开设缝隙会有较好的效果。

列宁格勒工学院对在导叶进口边缘开设缝隙的试验表明: 当栅前湿度为 3%~9% 时, 除湿系数可达 6%~10%。

在机组实际应用时, 抽吸法也有其缺点。为抽出水膜, 导叶空腔必须与冷凝器连接以构成压差, 此时导叶空腔温度与冷凝器背压所对应的饱和温度相等, 导叶壁面温度降低, 加速了水膜层的凝结; 若将吸湿缝开在出汽边

次大水滴。前苏联的 И. И. Кириллов 用透平动试验台做试验观察发现^[8]: 被加热表面具有了非浸润表面的特性, 使水滴不能在表面稳定驻留而形成二次大水滴。此方法在实际应用中要考虑引进热量的多少, 若不改变空心导叶隔板以外的结构而引进前一级热蒸汽, 可能会由于热量不足, 使水膜不能充分地蒸发(波兰汽轮机制造厂的五万机组末四级中采用这一结构)。若从较高温度处抽汽可以使叶片表面获得足够多的热量使水膜充分蒸发, 但要改变空心导叶隔板以外的结构, 使系统设计趋于复杂。

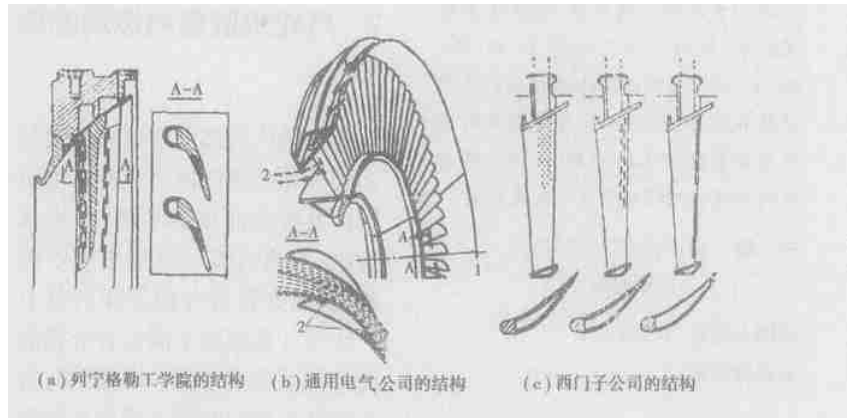


图 2 带有去湿缝的空心导叶结构

上, 结构上要求导叶的出汽边较厚, 会导致能量损失增加, 特别对于叶片较小和重量尺寸要求苛刻的船用汽轮机, 制造起来有相当大的难度。

(2) 通过向导叶空腔内引进热量, 加热壁面, 使外表面水膜层蒸发而使尾缘不能形成二

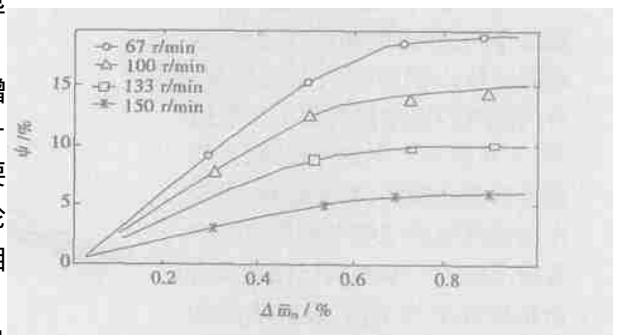


图 3 分离效率随抽气量和转速变化的关系曲线

(3) 在空心导叶尾缘开设吹扫缝, 将较高压蒸汽引进导叶内腔后从尾缘吹扫缝喷出。此方法目的在于击碎从尾缘脱落的大水滴, 使其尺寸减小, 速度加快, 减轻对下一级动叶的冲蚀, 且能均衡导叶附面层的尾迹蒸汽, 防止流场内脱流区扩大, 降低流动损失。从整个系统的能量角度讲, 所用的高压蒸汽只是使工作蒸汽绕过几级进行旁路, 最后能量仍回到主流中去。此种方法同样存在叶片出汽边较厚的结构缺点, 并且吹扫汽量和方向角需合理匹配, 以免影响主汽流。奥地利 Weiz 工厂较早地采用了这种方法^[9]。

(4) 蒸汽吹扫与加热相结合的综合法。通过合理设计吹扫缝结构, 将引入的较高温度和压力的蒸汽喷出, 既可以使主流蒸汽干度增加, 又能防止导叶出汽边处形成大水滴, 并且吹出的热蒸汽会在动叶表面形成蒸汽垫, 保护动叶免受水滴侵蚀, 其示意图见图 4(a)。英国 AEI 公司 500 MW 机组末级静叶采用了这种方法, 俄罗斯萨拉托夫工业大学的学者对此种方法给出了热经济性分析^[10]; 莫斯科动力学院的试验资料表明(见图 4)^[11]: 综合法使得喷嘴叶栅后的水滴尺寸明显减小, 并且弥散度沿叶栅后节距的分布更为均匀。

3.2 动叶除湿技术

理论上讲, 动叶应具有很好的分离效果, 因为高速旋转的叶栅会将附在上面的水份靠离心力作用甩向外缘。但由于汽轮机中蒸汽流的雷诺数较高, 蒸汽从导叶流出后, 较大水滴会偏离主流, 进入动叶时以较大攻角与高速旋转叶栅撞击和反弹, 难以形成较

厚的水膜而导致分离效果较差。试验表明: 光滑的工作叶片表面水膜存在厚度仅为 $7 \sim 12 \mu\text{m}$, 粗糙的工作叶片表面水膜厚度不到 $40 \mu\text{m}$ 。

为提高动叶的水份分离效率, 俄罗斯卡鲁加汽轮机制造厂同莫斯科动力学院共同研制了一种动叶除湿的结构(见图 5)^[12]: 在动叶表面进汽边一侧的背部刻若若干道小槽, 以收集和输送叶片表面的水膜, 减少水滴反弹; 同时在动叶顶部做了带有引射型水份收集装置的特殊屋形围带, 可收集水份并使之通过围带上的小孔排出后抛入设在静子上的排水槽, 从而保证水份收集效率的提高。试验表明: 在 u/c_0 宽广范围内(圆周速度由 130 m/s 变化到 230 m/s), 分离系数没有降低, 并且随着初始湿度的增加以及抽汽量的增加, 分离系数也有增加的趋势。此种型式的分离装置被前苏联应用于 OK-12A 汽轮机第七级上^[13]。

3.3 动、静叶栅间隔板装置除湿技术

此技术是在加长的动、静叶栅轴向间隙中设置隔板分离装置, 利用蒸汽气流按出口角偏转而引起水滴向外缘移动。理论计算表明, 这种除湿方法可以有很高的水份分离系数。英国联合电

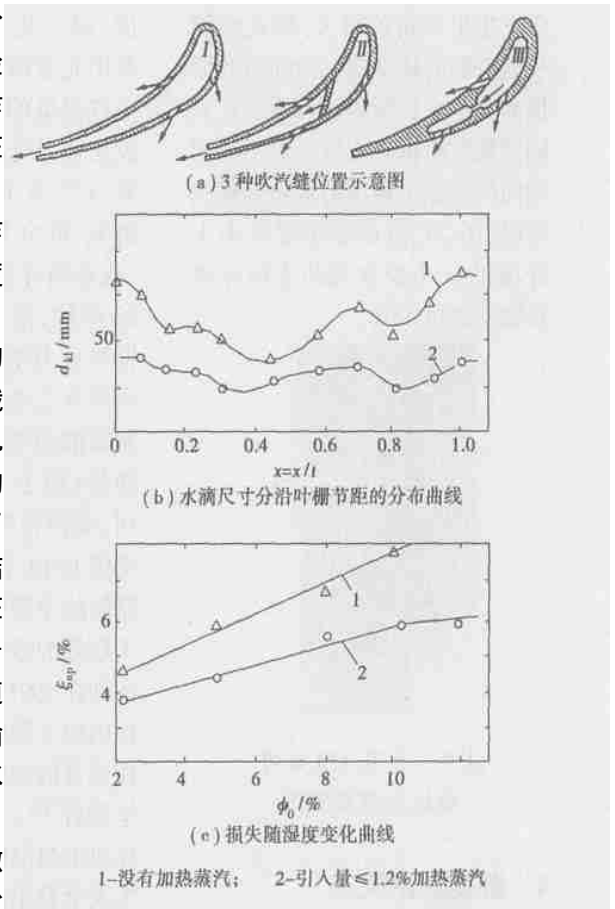


图 4 3点吹汽时栅后水滴直径分布及损失曲线

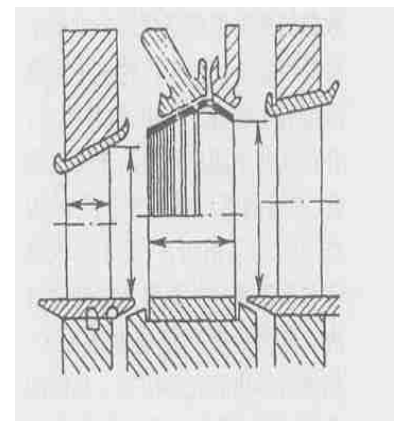


图 5 动叶除湿结构

气工业公司(AEI)在加拿大运行的 22 MW 机组上应用此法, 资料表明^[14]: 这样的隔板分离装置(见图 6)可使蒸汽湿度从 $y = 0.105$ 减少到 $y = 0.025$ 。然而, 在喷嘴后湿蒸汽的实际流动过程

中发生出口角的增大, 因此水滴径向位移的梯度随轴向间隙的增加而减小。莫斯科动力学院在双轴试验汽轮机第三级后对不同的轴向间隙做了详细的水份分离试验(见图 7), 但试验结果并不十分理想: 4 个腔室总的水份分离系数不超过 15%。

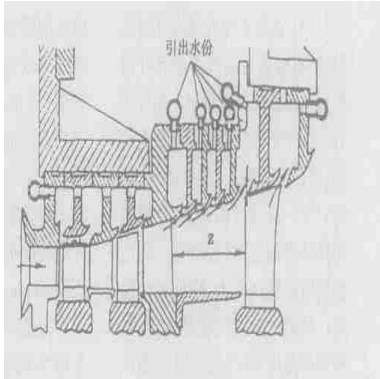


图 6 英国 AEI 公司隔板除湿装置图

4 湿度测试技术

对汽轮机除湿技术的研究, 试验上离不开湿度测量, 其测量数据的准确度将直接影响试验结果的可信度。由于汽轮机中湿蒸汽流的水滴直径很小, 数量很多, 并且这些水滴以很高的速度运动着, 这给测量工作带来很大的困难^[15]。至目前为止, 关于蒸汽湿度和水滴直径的测量还未彻底解决。蒸汽湿度测量的方法很多, 如热力学法和光学法等。早期的蒸汽试验测量中用热力学法较多, 其中 CERL 研制的加热法探针具有一定代表性^[16], 国内西安交通大学李炎锋和徐廷相等也研究了基于新型加热法的热力探针^[17]。热力法的测量精度依赖于对取样过程热量传递及质量测定的精度。

20 世纪 70 年代以后, 激光技术和电子计算机技术迅速发

展, 国外先后开始利用光学原理测量蒸汽湿度的试验研究工作。光学法主要分为两类: 角散射法和全散射法(或称消光法)。到 80 年代, 前苏联莫斯科动力学院和德国阿亨工业大学研制成的角散射光学探针; 瑞士 BBC 公司、美国西屋公司、

英国 CERL 公司和日本东芝公司研制的全散射光学探针, 都取得了较好的效果, 文献[18]总结了国外在 1991 年前这方面的进展。国内原上海机械学院以王乃宁教授为首的师生们研制了全散射光学探针^[19], 并应用于 200 MW 汽轮机末级湿度试验。最近上海理工大学蔡小舒教授等研制了一种新型集成化探针系统^[20], 应用于捷克 Prunerov 电厂和江苏利港电厂等。

蒸汽湿度测量技术的发展, 有力地促进了汽轮机内部除湿技术的研究。

5 我国除湿技术的研究情况

我国的湿蒸汽研究始于 20 世纪 60 年代, 先后形成几股研究力量。国内高校中西安交通大学以蔡颐年教授为首的师生们在湿蒸汽的自发凝结、成核、液滴对固体壁面的高速撞击和液膜撕裂等机理分析以及空心静叶去湿方法和结构等方面进行较为深入的研究^[21]; 姚福生院士对湿蒸汽的工程应用研究做了很多工作^[22]; 其它大型汽轮机厂如哈汽厂和上汽厂对此也都有研究, 并取得了宝

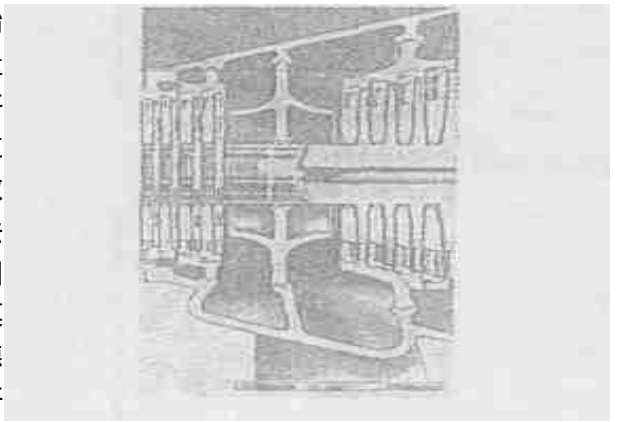


图 7 MЭИ 动、静叶栅间隔板除湿试验装置图

贵的试验数据和设计经验。

由于船用汽轮机对技术可靠性要求较高, 我国目前尚未有成熟的船用汽轮机内部除湿应用技术。哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所所在 20 世纪 70 年代初建立了外缘除湿试验台, 而后又收集整理了大量的除湿文献资料, 并在此基础上进行了管道除湿计算、液滴流动轨迹分析、汽水分离和叶片抗蚀试验等研究工作^[23~24], 取得了一定成果; 同时哈尔滨工程大学等单位一直致力于此项研究。

6 结论

(1) 内部除湿技术经过几十年的发展和研究, 在国外已趋于成熟。很多国家已实际应用于陆用和船用汽轮机上, 而我国研究起步较晚, 且多处于试验阶段, 离实际应用尚有一定距离, 尤其在船用汽轮机上的研究试验做得很少。

(2) 各种在空心导叶上进行的除湿方法研究比较广泛。因其在静止元件上做文章, 实际应用中更易实现, 目前仍是除湿的主导方法。其中加热综合法值得深入研究。

(3) 动、静叶栅间隔板装置除湿以及动叶除湿具有一定的发展前景。

(4) 综合应用各方法研制专门的除湿级是机内除湿的发展方向。

(5) 除湿试验研究中湿度及水滴粒径的测量虽然有很大发展, 但还是没有一种运行可靠、精确度高和成本低的测试设备, 因此测试技术仍是试验研究的难点。

参考文献:

- [1] BAUMANN K. Some recent developments in large steam turbine practice [J]. **Eng** 1921, **111**: 435—448.
- [2] BAKHTAR F, ERAHIMI M, WEBB R A. An investigation of nucleating flows of steam in a cascade of turbine blade wake traverses [J]. **Journal of Fluids Eng** 1994, **3**: 116—121.
- [3] 蔡颐年. 蒸汽轮机 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [4] KIRILLOV I I, NOSOVITSKII A I, SHPENZER G G, *et al.* Increasing the separation efficiency in the end-stage blade passages of large steam turbines [J]. **Izv VUZ — Energetika**, 1969 (11): 122—126.
- [5] TANUMA T. The removal of water from steam turbine stationary blades by suction slots [J]. **Proc Instn Mech Engrs** 1991 (4): 179—189.
- [6] FILIPPOV G A, ALEKSANDROV A M, POVAROV O A. Moisture flow on the surface of rotor blade turbine [J]. **Isvestiya Academy of Sciences USSR-Energetics and Transport**, 1974 (4): 133—137.
- [7] ДЕЕИЧМ Е, ФИЛИПГОВ Г А, П-ОВ АРОВИДРО А. Исследование внутривихревой сепарации влаги в турбинной ступени [J]. **Теплоэнергетика**, 1969(3): 77—79.
- [8] КИРИМОВ И И ИДР. Исследование плоских решеток сопловых лопаток на важномпаде [J]. **Энергостроение**, 1968(6): 132—135.
- [9] JORICHA H. 凝汽式透平末级叶片的水蚀 [J]. 杨向如, 译. 哈汽厂汽轮机译文集, 1972(1): 12—32.
- [10] ХЛЕБАЛИН Ю М. Тепловая защита проточной части паровой турбины от влажно — порошковой эрозии [J]. **Изв ВУзов Энерг** 1994(7/8): 61—66.
- [11] ДЕЙЧ М Е. Газодинамика решеток турбомашин [M]. Москва: Москва Энергомиздат, 1996.
- [12] ДЕЙЧ М Е, КИРЮХИИ В И, ФИЛИПГОВ Г А. Исследование специальных турбинных ступеней сепараторов [J]. **Теплоэнергетика**, 1974(8): 20—23.
- [13] КИРЮХИ Н В И, ФАЛИПОВ Г А. Опыт эксплуатации турбоустройств питательных насосов АЭС со специальной ступенью-сепаратором влаги [J]. **Теплоэнергетика**, 1998 (4): 57—60.
- [14] SGHWR HARRIS F. Steam turbine for the 100 MW prototype [J]. **Nuclear Eng**, 1976(6): 440—443.
- [15] 蔡颐年, 王乃宁. 湿蒸汽两相流 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1985.
- [16] MOORE M J, SIEVERDING C H. 透平和分离器中的双相流 [M]. 蔡颐年, 姚福生, 译. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [17] 李炎锋, 李俊梅, 贾衡, 等. 新型加热法测量流动湿蒸汽湿度的试验技术 [J]. **热能动力工程**, 2001, **16**(2): 153—156.
- [18] 蔡小舒. 光散射法测粒技术及在湿蒸汽测量中应用的研究 [D]. 上海: 上海机械学院, 1991.
- [19] 王乃宁. 颗粒粒径的光学测量技术及应用 [M]. 北京: 原子能出版社, 2000.
- [20] 蔡小舒, 汪雨莉. 一种新型的测量汽轮机内湿蒸汽两相流的集成化探针系统 [J]. **工程热物理学报**, 2001, **22**(6): 52—57.
- [21] 张乃成, 俞茂铮, 蔡颐年. 汽轮机缝隙抽湿式隔板中的水份运动特性 [J]. **西安交通大学学报**, 1990, **24**(4): 75—80.
- [22] 姚福生. 汽轮机动叶抗水蚀方法的研究 [J]. **东方汽轮机**, 1978 (13): 1—49.
- [23] 孙先亮, 罗春新. 关于在汽轮机通流部分内部的除湿问题 [J]. **热能动力工程**, 1986, **1**(6): 10—19.
- [24] 李学来, 罗春新, 孙先亮. 汽轮机隔板分离器内流场的数值研究 [J]. **热能动力工程**, 1995, **10**(5): 302—305.

新结构

燃气轮机叶片的蜂窝状密封

《Знергетика》2003年5~6月号报导, 在当代燃气轮机制造业发展中, 提高燃气轮机经济性和工作可靠性与减少工质通过装置旋转和静止零件之间间隙的漏泄有关。在运行过程中, 由于力对静子和转子的作用以及在过渡工况中它们部件的热膨胀, 通流部分内的间隙可能大大改变。

在所有研究的径向间隙条件下, 阶状蜂窝状密封优于直流式蜂窝状密封。在运行过程中的径向间隙增加条件下, 与其它密封结构比较, 阶状蜂窝状密封结构最有效。

试验证实, 对于具有梳齿的密封结构, 蜂窝室直径与深度的最佳比处在 $h_n/d_n=1.0\sim 1.2$ 的变化范围内, 但是, 应该针对具体的结构作出有关蜂窝室最佳尺寸选择的决定, 同时要考虑蜂窝结构制造的工艺特点及其强度性能。

GE 公司 Frame 7FA 燃气轮机压气机出口端就采用了蜂窝状密封。

(吉桂明 供稿)

汽轮机内部除湿技术的发展 = **Recent Advances in the Technology of Moisture Removal in Steam Turbines** [刊, 汉] / LIU Jian-cheng, LIN Zhi-hong, WEN Xue-you, et al (Harbin No.703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(1). — 1 ~ 5

Owing to the rapid development of geothermal and nuclear power generation in recent years the wet steam problem faced by a steam turbine low-pressure cylinder has become ever more conspicuous. This is especially so for the final stages of rotating blades being long exposed to the impingement of high-speed water droplets, leading to their erosion and even rupture, and thus affecting the safe operation of a steam turbine. In connection with the different methods and locations of in-turbine moisture removal the authors have described the various approaches now available for solving the wet steam problem. They include: moisture removal by the action of suction, purging and heating in hollow guide vanes, wetness removal in rotating-blade surface grooves and by increasing the clearance between moving and stationary blades, and in-diaphragm moisture removal, etc. From a capitulation of the above one can get a glimpse of the recent advances in and the use of in-turbine moisture removal methods (including the relevant measuring techniques) in such a variety of countries as Russia, Great Britain, Germany, the United States and France in the last 30 years. In addition, the present status of research and potential direction of development of in-turbine moisture removal in China is also briefly discussed.

Key words: steam turbine, wet steam, internal moisture removal

带扰流片的矩形直通道内的流动与换热 = **The Flow and Heat Exchange Process in a Rectangular Straight Channel with Spoilers** [刊, 汉] / DU Ping, SHEN Shen-qiang, ZHANG Bo (Department of Power Engineering, Dalian University of Science & Technology, Dalian, China, Post Code: 116024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(1). — 6 ~ 9

A model of three-dimensional compressible flows and heat exchange in a rectangular straight channel was set up. Simulation computations were performed of the internal convection heat exchange process in the channel with in-line and staggered spoilers for Reynolds number of incoming flows in the range of $1 \times 10^5 - 3 \times 10^5$. The calculation results indicate that the rectangular spoilers can bring about a significant intensification of cooling effectiveness with the convection heat exchange factor assessed on the spoiler surface being markedly higher than that on a smooth surface. Moreover, the wall surface temperature in the spoiler-equipped zone has been conspicuously reduced. As compared with in-line spoilers, the staggered ones enjoy an increase in convection heat exchange factor of about 4%. From the results of calculation also obtained was the relationship between heat transfer and flow pressure drops. **Key words:** spoiler, cooling, blade, gas turbine

蒸汽轮机抽汽口流场的数值模拟 = **Numerical Simulation of the Flow Field at the Steam Extraction Opening of a Steam Turbine** [刊, 汉] / CHEN Dang-hui, XU Hong, YANG Kun (Department of Power Engineering, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(1). — 10 ~ 13

By using a numerical simulation method an investigation was conducted regarding the flow field of the steam extraction opening (from a flow passage to a steam extraction pipe) of a large-sized steam turbine, leading to the setting-up of a mathematical model for flow field simulation. A method for solving the model is also provided. Furthermore, a detailed account is given of the flow field structure in various sections from the flow passage to the steam extraction pipe. It is noted that due to the influence of steam extraction an inertial vortex zone has emerged near the front wall of the steam extraction slot inlet at the flow path outside diameter location. Relative to the other portions of the steam extraction tract the flow loss caused by the vortex zone happens to be the highest. At the flow path there appears both a radial and peripheral