

刷式汽封的特点及应用

嵇国军

(江苏协联热电集团有限公司, 江苏 宜兴 214203)

摘 要:介绍了刷式密封的结构特点和应用发展状况,研究了刷式密封的基本结构,分析了刷式密封的数学模型和密封机理,给出了刷式密封自国内外的应用情况,结合江苏协联热电集团有限公司汽机组改造案例,分析了刷式密封设计过程中的参数选择及应注意的问题。最后分析了刷式密封技术的经济效益,总结出刷式密封技术在未来的发展中具有重大的研究价值和工程应用价值。

关键词:节能; 刷式密封; 泄漏; 汽轮机

0 引言

随着我国电力行业的发展,以及国家对节能减排的要求,近 20 多年里,在计算流体动力学的推动下,汽轮机的性能有了较大的提高,但随着汽轮机蒸汽参数的提高,漏气损失成为制约汽轮机组效率提高的最主要因素,因而在机组改造中通过减少漏气损失来提高汽轮机组的效率。

刷式密封是 20 世纪 80 年代发展起来的新式密封技术,起初该项技术主要应用于航空领域,随着刷式汽封在航空发电机上的成功应用,后来被广泛推广到民用行业,但在我国刷式密封的应用还不够广泛,研究还处于初始阶段。与传统的齿齿密封、蜂窝密封相比,刷式密封不仅能适应转子的跳动与膨胀,同时还具有泄漏水平低的特点,由于其在高速旋转机械中表现出的高效密封性能和稳定性能,目前国内外已有多个燃气、蒸汽采用透平刷式密封技术,并取得良好经济效益的案例^[1]。在航空发动机领域,刷式密封的应用已超过 10 年,例如其中的 PW4000 系列发动机,通过 3000 次起停续航周期,刷式密封的径向间隙增量不超过 0.002 in (0.051mm),与传统迷宫密封相比,燃料消耗降低 0.4%。

1 刷式密封的结构、数学模型与密封原理

1.1 刷封的结构

刷式密封是一种柔性接触式密封技术,能够适应转子的瞬间径向变形或偏心运动,同时增加了转子振动阻力,故而有利于改善转子的稳定性,其结构示意图如图 1 所示。

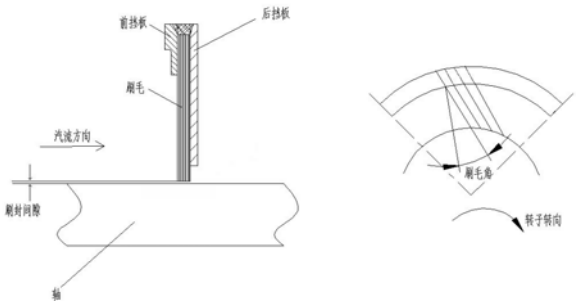


图 1 刷式密封结构

从图 1 可以看出,刷式密封主要由前挡板、后挡板和夹装于两者之间密集排列的刷毛组成,刷毛沿转子旋转方向有一定倾角,以减少刷毛的磨损,使刷毛更容易适应转子热变形、制造误差等问题,并在轴瞬间大幅径向位移后,如喘振、过临界转速等,刷毛可弹回,保持密封间隙不变,当刷毛与轴过盈配合后,不会出现永久性的密封性能损失,上游高压流体经过刷封后,下游为低压,后挡板增强了刷丝束的刚性能力,在设计中如果后挡板设计不当或强度不够极易使刷毛变形,造成密封失效,刷毛自由端与轴表面接触,另一端焊接在圆环上。

1.2 刷封的数学模型与密封原理

目前,应用于刷式密封性能分析的理论模型主要是有效厚度模型^[2-3]。该模型是由 Chupp 在 1996 年对 9 种刷式密封的实验数据进行统计分析处理后得出的一个半经验理论模型,提出有效厚度 B 这个重要参数,该模型解决了刷毛随机分布的定量描述问题,使得从理论上能够进行刷式密封的密封特性分析。

流体在刷丝中的流动主要有同向流、射流、漩涡流和横向流四种基本形式, 由于刷封中刷丝间空隙是不均匀的, 不均匀性使得均匀的来流进入刷丝束中就变得不均匀, 并且从紧密的刷丝束区域向疏松的刷丝束区域偏流, 这些偏流在刷丝排之间逐渐形成同向流和射流, 并产生随机的二次流和旋涡流, 当射流遇到前面紧密的刷丝束时, 就会改变运动方向而变成和主流方向垂直的横向流动。正由于刷丝束破坏流动而确保流动的不均匀性, 使流体产生了自密封效应, 横向流动代替向前流动显然是对流体自密封的重要贡献, 能使横流过刷子的总压降增大, 从而减少密封的泄漏, 刷丝在流体流动过程中就像无数多的迷宫密封中的蓖齿, 起到了很好的密封节流作用, 消耗汽流的能量, 产生压降, 从而到达密封的效果。

2 刷式密封的先进性

2.1 刷式密封与迷宫式密封的区别

传统的迷宫密封为一种非接触式密封, 不能杜绝泄漏, 而是用逐级节流的方法来抑制泄漏, 由于受设备轴向长度的限制, 使迷宫密封泄漏量较大, 并且迷宫密封的泄漏流量随着压差的增大而急剧上升, 其密封效率急剧下降, 据相关统计资料显示, 汽轮机间隙每增加 0.0254mm, 平均功率损失约 4~5kW。

刷式密封可以改善转子的稳定性, 使汽轮机或燃气轮机出力提高 0.5%~6% (据改造数量、位置、机型、工况等因素, 存在差异), 刷式密封的出现, 使得过去因安全原因不可以达到的小间隙甚至零间隙成为可能, 这对机组效率的提高是非常显著的, 从某种角度看, 在获得同样效率增量的情况下, 改造汽封比改造叶片更节省成本和时间。

2.2 刷式密封与蜂窝式密封区别

刷式密封与蜂窝密封均来源于飞机发动机, 蜂窝密封是第二代产品, 刷式密封是最新的第三代产品。

刷式密封更先进, 效果更好, 可广泛应用于轴端, 隔板, 叶顶, 油封等部位, 而蜂窝密封受应用范围限制较多。

蜂窝密封从结构上讲还是一种刚性密封, 一旦碰磨, 就不可恢复, 安装时, 间隙控制得再小, 过临界或异常震动等情况下就会将其间隙磨大, 刷式密封是一种柔性密封, 可自适应轴跳动, 不会因过

临界或异常震动等造成间隙永久变大。

2.3 刷式密封与传统密封的区别

蜂窝密封主要靠气流在各蜂窝中形成涡流来进行密封, 试验证明, 要形成涡流, 气流速度及间隙必须满足一定要求, 而实际安装过程中, 间隙过小, 汽轮机冲转机时容易抱轴, 造成震动或开机困难, 间隙过大则密封效果差, 因此通常应用于低压末级叶顶湿蒸汽区;

刷式密封与迷宫密封及蜂窝密封相比, 其密封性能和寿命有了大幅提高, 有效提高了机组的效率; 由于增加了转子的振动阻力, 从而改善了转子的稳定性; 在动静之间瞬间过盈情况下, 通过刷子的柔性退让能保持密封能力不变, 有效增加了机组的可用性和安全性, 可以说, 刷式密封是传统密封最有力的替代品。

图 2 所示的泄漏流量与压比关系曲线, 给出了在模拟航空发动机工作状况下, 刷式密封与迷宫密封的性能对比。其中转子转速为 30000RPM, 直径为 5.1 in(129.54mm), 线速度为避免 303m/s (相当与 3000RPM, 直径 1292mm), 工作温度为 500-600°F (260-316℃)。典型四齿迷宫密封的初始径向间隙为 0.006 in (0.15mm), 作对比的两个刷式密封, 1#刷封与轴的初始过盈量为 0.005 in (0.127mm), 2#刷封的初始过盈量为 0.001 in (0.025mm)。1#和 2#除过盈量不同外, 其余参数相同。

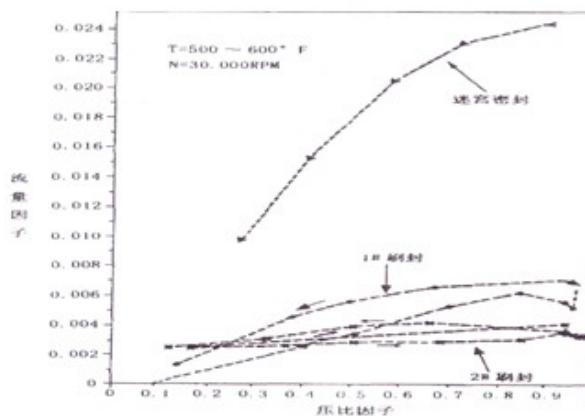


图 2 泄漏流量与压比关系曲线

从图 2 中曲线可看出, 迷宫密封的泄漏量是刷式密封的 4~7 倍, 而且迷宫密封的泄漏流量随压差增大而积聚上升, 而刷式密封的曲线相对平缓, 表明压力对其密封效率影响不大。

国外某公司针对汽轮机运行状态有对比实验，也表明刷式密封相对阶梯迷宫密封效率的显著改善。图 3 为刷式密封与典型 4 齿迷宫密封的间隙为 0.02 in (0.5mm)、0.01 in(0.25mm) 、0.007 in(0.178mm)情况下的流量/压比曲线。

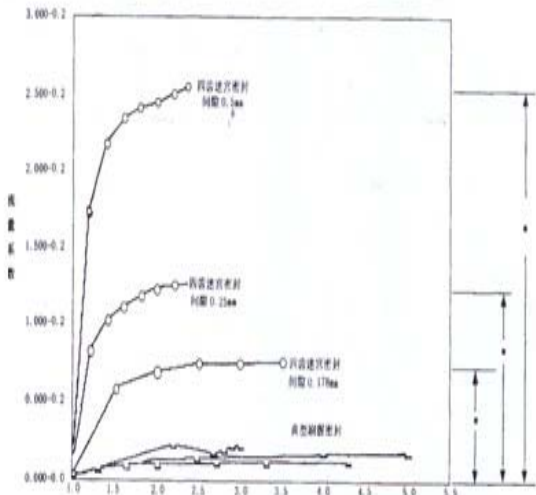


图 3 刷式密封与典型 4 齿迷宫密封的不同间隙情况下的流量/压比曲线

3 刷封技术在江苏协联热电集团有限公司中的应用

刷式密封技术最早应用于军事航空领域，近年来逐渐应用到民用汽轮机上，通用电气分别在 1999 年,2003 年,2004 年在其 400MW、350MW、375MW 汽轮机上安装了刷式密封，检修后使机组效率获得了 3%以上的提高。

在国内，自 90 年代以来，刷式密封技术也慢慢在各大电厂得到应用^[4]。哈尔滨汽轮机厂首先在其生产江西新余电厂和湖南来阳电厂超高压 200MW 的汽轮机中应用了刷式汽封，南京汽轮机有限责任公司也与 GE 公司合作，在其生产的 6000 系列燃气轮机中采用了刷式汽封。

江苏协联热电集团有限公司#3 机组为上海汽轮机厂生产的 CC50-8.83/4.12/1.47 高压双抽汽轮机，由于该汽轮机为 90 年代的产品，1996 年 2 月投产，该机组是协联集团对外供热的主力机，每年实际运行时间都在 8000h 以上，至今运行 17 年多，汽轮机热耗也不断升高，为此，公司于 2012 年 11 月对该机组进行大修，大修前，公司技术人员同江苏透平密封高科技有限公司进行了充分的技术交流

和沟通，对#3 机刷式密封技术改造可行性方案进行了论证，决定在大修中对该机组前后轴封及隔板汽封进行刷封改造，改造方案见表 1。

表 1 改造方案

改造位置	数量（圈）	汽封结构形式	刷丝材质
轴封 前轴封	3	刷式汽封	高温钴基合金
轴封 后轴封	2	刷式汽封	高温钴基合金
隔板汽封 隔板汽封	29	刷式汽封	高温钴基合金
合计	34 圈		

以下对轴封改造技术进行重点说明，图 4 为后轴封圈剖视图，密封形式为高低梳齿密封。从图 4 可以看出，该级密封共有 6 个齿，级间压差约为 0.06MPa，汽封圈共分六个弧段。

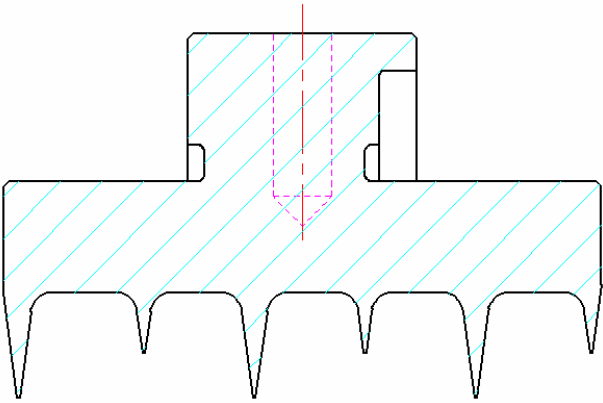


图 4 后轴封剖视图

在改造过程中，将第二个高齿改造成刷封结构，根据汽封环内径和轴径设计刷封间隙和刷封高度，为获得良好的密封效果，在刷丝直径、刷丝高度、自由段高度以及倾角选择、刷毛初始干涉量、前挡板及后挡板保护高度等方面重点设计。

刷毛高度的选择:根据高齿内径和汽封环内径，初步确定刷封高度。 $H=(\text{汽封环内径}-\text{长齿内径})/2=(346-331.8)/2=7.1$ ，为保证安装间隙，以高齿为基准，如高齿的密封间隙为 3mm，刷封的密封间隙为间隙设计，取初始间隙 δ 在 0.15~0.2mm，则刷封间隙以长齿为基准后取高度 $h=(3-0.15\sim0.2)$ 。试验表明刷毛高度过高时，对密封性能不利，设计刷丝高度 $h=10\text{mm}$ ，刷毛倾角 β 一般取 $30^\circ\sim 60^\circ$ ，这里取倾角为 45° ，图 5 为改造后的刷封。

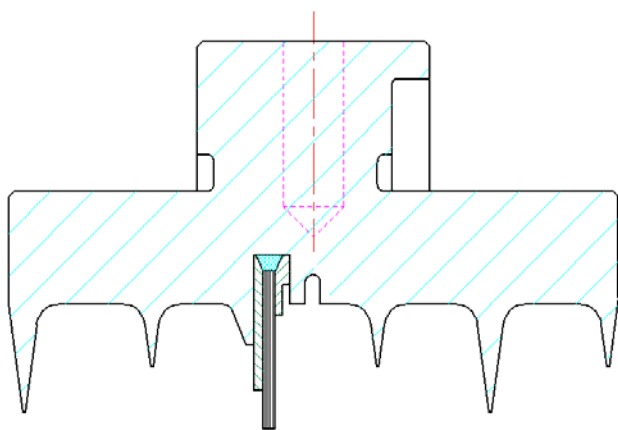


图 5 改造后的刷封

改造后发现：相对改造前各级压比升高而温度降低，汽轮机在接带正常供热流量额定负荷下的热耗由改造前的 9094kJ/kWh 下降到改造后的 8534kJ/kWh，热耗下降了 560kJ/kWh，相当于发电标煤耗下降了 22g/kWh，按照全年发电量 3 亿 kWh 计算，全年可以节约标煤 6600t。

4 结束语

刷式密封自 20 世纪 50 年代产生以后，随着工程应用和航空军事领域的发展，通过人们不断的改造，结构也发生了一系列的演变，目前主要有标准型、改进型、大前挡板和非焊接型等 4 种型式。根据目前的研究表明，刷式密封的泄漏量是梳齿密封的 1/5-1/10，在轴的热膨胀及径向串动下，密封效

果几乎不受影响，提高了效率并改善了稳定性，刷封技术是高性能透平密封发展的主要方向。

刷封技术凭借其高效的密封能力，在节能减排中发挥重要的作用，刷式密封技术具有低泄漏，高效密封，但由于刷式汽封的间隙小，而且长期在高温蒸汽流的冲刷下，磨损及冲刷变形还有待于进一步观察，在现代设备越来越大型化、转轴高速化、低排放、高效节能的趋势下，刷式密封技术的发展前景值得期待。

参考文献：

- [1] 茅声凯,商中福,尹莲华,等.改善汽轮机通流部分性能的现代技术[J].汽轮机技术,1999,41(3):129-135.
- [2] 何立东,袁新,尹新.刷式密封研究的进展[J].中国电机工程学报,2001,21(12):28-32.
- [3] 朱宗举.刷式汽封的设计与应用[J].燃气机技术,2005,18(3):68-72.
- [4] 曹广州.刷式封严结构的泄漏特性研究[D].南京:南京航空航天大学,2006.

作者简介：

嵇国军（1966-），男，江苏宜兴人，高级工程师，长期从事于电厂生产技术及管理工作。