

[节能降耗]

350 MW超临界机组新型涡流汽封的研究与应用

文/李成虎
国能广投柳州发电有限公司

为响应国家政策，解决火电机组漏汽量大、能耗高的问题，实现节煤降耗改造，一种新型的涡流式多级次减压汽封产品问世。介绍了该类型汽封的设计原理，创新优势，实验分析以及其在某火电厂实际应用。从安全性、适用性、经济性多个角度分析，并与传统汽封产品和传统汽轮机检修进行对比。

根据国家统计局数据，截至2022年12月底，我国2022年的发电量累积数值为83 886.3亿kW·h，各类型发电装机容量累计为25.6亿kW·h。我国发电装机容量占比中，火电占比52%（其中燃煤发电机组装机容量已经跌破50%），但是其发电量占比却接近70%，尽管这些年新能源发电包括风电、太阳能发电等发展迅猛，装机容量占比分别达到14%和15%。但是其发电量总占比分别只有8%和3%。由此可见，火电机组在我国的电力生产环节依然扮演着关键角色。

为推动能源行业结构优化升级，进一步提升煤电机组清洁高效灵活性水平，促进电力行业清洁低碳转型，助力全国碳达峰、碳中和目标如期实现，2021年10月，国家发展改革委、国家能源局会同有关方面制定了《全国煤电机组改造升级实施方案》，其中要求，到2025年，全国火电平均供电煤耗降至300 g标准煤/(kW·h)以下。对于供电煤耗在300 g标准煤/(kW·h)以上煤电机组，应加快创造条件实施节能改造。

目前，对于国内大部分服役的火电汽轮机组而言，尤其是300 MW和600 MW级别的汽轮机组，由于受到当时的设计技术理念、设计水平、制造技术和制造工艺的限制，汽轮机整体的效率偏低，机

组的热耗较高，热力性能较差，加之长年累月的运行，整体工况变差。为了响应国家政策，努力实现“双碳”目标，通过先进科学技术对目前的汽轮机组进行节能改造就显得尤为重要。汽封作为保持汽轮机转子和定子间保证动静间隙的部件，是汽轮机整体提升效能的重要环节。本文介绍一种最新形式的汽封，名为涡流式汽封，能有效降低汽轮机组过桥段漏汽率，降低汽轮机能耗，提高汽轮机效率，达到安全稳定高效的密封效果。

新型涡流汽封的设计原理和创新优势

在目前的汽封市场中，主要的汽封产品根据工作原理分为两大类：一类是通过减少动静间隙的流通面积的汽封；另一类是通过改变腔室结构，提高汽流热耗的汽封。本文提出的涡流式汽封，将两者优势结合，以创新的设计和工艺，提高汽封的性能。同时针对两种传统汽封的劣势，予以改进。

1) 针对梳齿汽封适应性、安全性强、密封效果差的特点，涡流式汽封改变了腔室结构，针对腔室面积进行扩容。由图1所示的汽封横截面可知，涡流式汽封的流体接触面积是传统梳齿汽封的3倍，因此给予蒸汽更大的流动阻力，带来更好的汽流扩容耗散。

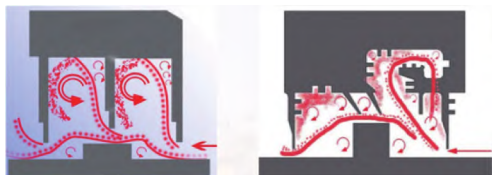


图1 传统梳齿汽封和涡流式汽封腔室对比

2) 涡流式汽封在腔室中设计了多个扰流齿, 用来增加气流阻力, 降低气流流速, 消耗高速气流由于惯性冲入腔体的动能, 让气流在腔体内充分热耗散。

3) 扰流齿会使气流形成涡流, 再利用伯努利效应, 产生压差, 促使涡腔内已经热耗散汽流流出涡流腔体。

4) 设计出汽口, 利用汽流对流抵消效果。由于汽流密度增加温度降低, 再通过出汽口与进汽口高温高压的蒸汽形成 90° 夹角对冲, 进汽的阻力增加。

5) 涡流式汽封的倾斜齿与其角度的设计, 经过流体实验和西北工业大学动力与能源学院的实验数据反复验证, 得到以下结论。

如图2所示, 直齿 $\alpha=0^\circ$ 对应值明显大于篦齿倾斜角度为 $\alpha=30^\circ$ 和 45° 对应的泄漏系数, 这是因为篦齿面的倾斜使得处于扩散状态的射流在撞击到下流的齿面时, 会顺势沿着倾斜齿面流进齿腔, 相较于直齿, 有更多的流体进入齿腔, 齿腔内的旋涡得到充分发展, 涡流强度有所增加、湍流度增大, 与射流区流体相互作用, 使得射流与齿腔中的涡流质量、能量交换增大, 消耗流体动能, 增大了流动阻力; 另外当篦齿倾斜时, 齿腔中流体与壁面的接触面积增大, 因此摩擦消耗的能量更多。说明增大篦齿倾斜角度有利于减小泄漏系数, 提高篦齿封严性能。

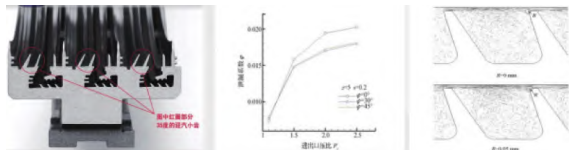


图2 涡流式汽封的倾斜齿设计

本文设计的汽封产品梳齿型汽封作为设计原型。但是其也存在密封效果相对较差的缺点, 大量的科研表明, 改善汽封结构, 增大腔室的面积, 根据热力学效应, 汽体流动的热耗在大腔室的提高, 密封效果也相应提高; 同时, 提高流体腔室表面的

粗糙程度, 通过摩阻效应, 流体的密封效果也会越好。本文设计的汽封就通过增大腔室空间容积形成迷宫式汽封, 增加导流小齿以增加流道表面粗糙度的目的, 提高汽封整体的密封效果。

新型涡流汽封实验对比

1. 汽体矢量模拟图

图3是传统的梳齿型汽封和涡流式汽封汽体通过的矢量图。可以看出, 从进汽端经过腔室后, 汽体形成了3个漩涡体, 在通过光滑壁(转子)时, 通过汽体模拟的颜色可以得知汽体本身的热耗下降并不明显, 说明密封效果不理想。而汽体通过复杂的迷宫腔室后, 整体进出汽的热能已经有明显下降(蓝色变为绿色)。

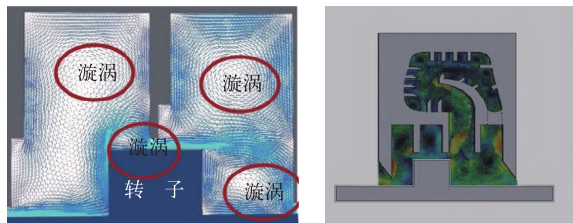


图3 梳齿汽封汽体矢量模拟图和新型涡流汽封汽体矢量模拟图

2. 试验台模拟实验

本次实验对比应用了传统的梳齿型汽封与本文设计的汽封, 通过压力计时法和流量法测试汽封的密封性能。图4和图5分别为梳齿型汽封和导流汽封的CAD截面图。

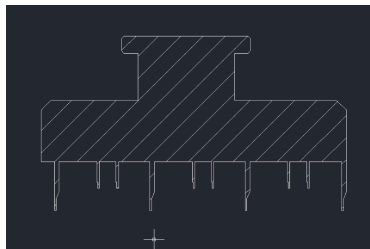


图4 梳齿汽封截面图

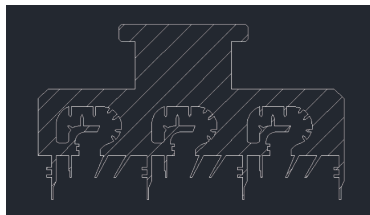


图5 涡流式汽封截面图

本文使用的流量系数定义为

$$\mu = \frac{G}{F \times \sqrt{P_0 \rho_0} \sqrt{(1 - \pi_z^2) / 2}} = \frac{G}{F \times \sqrt{(1 - \pi_z^2) / Z \times \frac{P_0}{\sqrt{RT_0}}}}$$

式中， μ 为流量系数； G 为测量的漏汽量（kg/s）； F 为汽体侧漏面积， m^2 ； Z 为高低齿总数（本次测试取值为10）； P_0 为进气总压，Mpa； P_2 为排气静压，Mpa； T_0 为进气温度，K； R 为汽体常数。

测试环境介质见表1。

表1 模拟参数	
测试环境介质	
介质	高压空气
压力/Mpa	≤ 0.9
测试温度/ $^{\circ}\text{C}$	室温（22）
模拟汽轮机参数	
转速/（r/min）	3 000
转子直径/mm	$\varnothing 350$
进气口直径/mm	$\varnothing 22$
出气口直径/mm	$\varnothing 102$
压缩空气储量/ m^3	1.2
试验台汽封卡槽	1-6道
驱动电机功率/kW	4.5
压缩空气系统	
压缩空气储量/ m^3	1.2
储存方式	压缩气管（双罐串联）
试验台汽封卡槽	1-6 道
联通管道直径/mm	$\varnothing 22$
阀门形式	可调节球阀
过滤形式	汽水分离器

（1）压力计时法

压力计时法是控制变量法中限制相同压降改变压降时间的测试方法，其参数设置见表2。

参数	数量（单位）
汽封数量	2圈
高齿数量	4条
低齿数量	3对
两圈内径同为内径	$\varnothing 338$
转子间隙/mm	0.5
安装试验台汽封槽位置	第5、6道
动静间隙/mm	0.55
启始压缩空气压力/Mpa	0.7
终结压缩空气压力/Mpa	0.3

从图6中可以看出对比结果，在所有参数相同，应用梳齿汽封的压降时长用了30 s，本文提出的涡流式汽封用时39 s，延长压降9 s，设计效果提高30%。

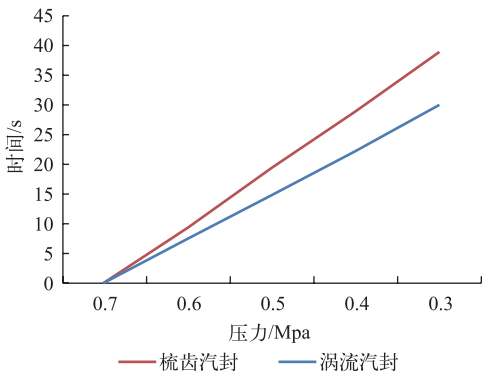


图6 压力计时法实验对比

（2）流量法

流量法是通过限定相同的压力和时长，来测试不同汽封的流量消耗，其参数设置见表3。

参数	数量（单位）
汽封数量	2圈
高齿数量	4条
低齿数量	3对
两圈内径同为内径	$\varnothing 338$
转子间隙/mm	0.5
安装试验台汽封槽位置	第5、6道
风压/kPa	25
时间/min	5

从图7中可以看出对比结果，在设置相同气压和持续时间的情况下，梳齿汽封流量约为36 m^3/h ，而导流汽封约为24 m^3/h ，降低流量12 m^3/h ，相对降低流量30%。

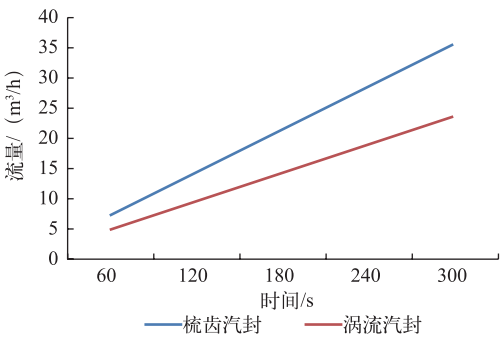


图7 流量法实验对比

新型涡流汽封实际应用

国能广投柳州发电有限公司位于广西壮族自治区柳州市鹿寨县经济开发区规划范围内，一期工程建设2×350 MW超临界湿冷燃煤热电联产机组，两台机组分别于2016年10月27日、12月26日投入商业运行，2017年5月正式对外供热。

1#机组于2024年上半年完成了B级检修工作，并于2023年11月完成检修后性能试验工作。

1. 机组情况

该电厂1#机组概况主要性能规范见表4。

表4 某电厂1#汽轮机设备技术规范

技术参数	数据
型号	C350/250-24.2/1.6/566/566
型式	超临界、单轴、双排双排汽、一次中间再热、一次中间再热、湿冷、抽汽凝汽式汽轮机。
铭牌功率/MW	350
额定主蒸汽压力/MPa	24.2
额定主蒸汽温度/℃	566
额定再热蒸汽温度/℃	566
额定背压/kPa	6.8
THA工况最终给水温度/℃	281.2
THA工况主蒸汽流量/(t/h)	1024.36
TMCR工况主蒸汽流量/(t/h)	1095.00
TMCR工况机组出力/MW	368.529
最大主蒸汽流量/(t/h)	1150.00
额定转速/(r/min)	3000
汽轮机热耗率（THA）/[kJ/(kW·h)]	7759.9

汽轮机为C350/250-24.2/1.6/566/566型超临界、两缸两排汽、一次中间再热、单轴、湿冷、抽汽凝汽式汽轮机。高压缸共有1个冲动式调节级和7个反动式压力级，中压缸共有7级反动式压力级，低压缸为双分流结构，共有2×2×6个反动式级。机组采用复合变压运行方式，高压部分共有四个调节阀。汽轮机设计有两级工业抽汽，一级工业抽汽从高压缸排汽管道抽出，二级工业抽汽从汽轮机三抽管道抽出，根据工业抽汽参数的要求，可调整回转隔板的开度来调整工业抽汽压力。

由表4可见，其设计汽轮机热耗率（THA）为7759.9 kJ/（kW·h），折合标准煤（29.27kJ/g）煤耗为：265.11g/（kW·h）。其设计煤耗低于全国火电平均供电煤耗302.5 g标准煤/（kW·h）的要求。

该机组在整体机组应用了本文提出的涡流式汽封，其具体的改造方案见表5。

表5 某电厂1#汽轮机涡流式汽封改造方案

汽封位置	数量	改造形式	汽封间隙要求
高压缸前轴封（外侧）	4	斜侧齿汽封	中下限
高压前轴封（内侧）	1	涡流式汽封	中下限
高压隔板汽封	7	涡流式汽封	中下限
高压平衡活塞汽封	7	涡流式汽封	中下限
中进汽平衡活塞汽封	2	涡流式汽封	中下限
中压隔板汽封1~6级	6	涡流式汽封	中下限
中压隔板汽封7~9级	3	斜侧齿汽封	中下限
中压后轴封（外侧）	4	斜侧齿汽封	中下限
中压后轴封（内侧）	2	涡流式汽封	中下限
低压前轴封（外侧）	3	斜侧齿汽封	中下限
低压前轴封（内侧）	1	涡流式汽封	中下限
低压叶顶汽封	10	斜侧齿汽封	中下限
低压隔板汽封	10	斜侧齿汽封	中下限
低压后轴封（外侧）	3	斜侧齿汽封	中下限
低压后轴封（内侧）	1	涡流式汽封	中下限

根据表5可知，部分关键部位，如高压前轴封（内侧）、高压缸整体（包含隔板以及平衡活塞端）、中压前轴封（内侧）等，均进行了涡流式汽封的更换，将这部分位置的普通汽封换成涡流式汽封，并通过换/大修前后的分别进行的性能试验来对比，其实验数据可以检验出更换前后汽轮机整体参数和性能的变化。

通过不同工况下检修前与检修后的性能试验进行对比，能真实反映机组在实际情况中不同程度负载下的运行状况。其性能试验的主要内容见表6。

表6 某电厂1#汽轮机检修前后性能试验内容

序号	内容
1	测定汽轮机在3VWO工况下的热耗率以及高、中压缸效率
2	测试汽轮机在3VWO工况下高、中压缸之间的过桥汽封漏汽率
3	测定汽轮机在100%额定负荷工况下的热耗率
4	测定汽轮机在75%额定负荷工况下的热耗率
5	测定汽轮机在50%额定负荷工况下的热耗率
6	测定汽轮机在40%额定负荷工况下的热耗率

汽轮机运行参数应尽可能按照设计热平衡图提供的参数保持稳定，以减少对试验结果的修正，其

波动值不应超过表7规定的范围。

由表8可知，在运用了本文提出的涡流式汽封后，该机组的热耗值下降明显，从大修前的7 975.38 kJ/（kW·h）降至大修后的7 858.7 kJ/ kW，热耗减少116.68 kJ/（kW·h），折合标准煤约4.5g/（kW·h）。该机组大修后热效率距离汽轮机整体热耗设计值7 759.9 kJ/（kW·h）仅高98.8 kJ/（kW·h），考虑到机组运行本身的老化，想要完全达到新机组的设计热耗值会有一定困难。然而本次应用仍有部分关键部位的汽封未进行更换，因此对于继续降低热耗的空间，还是有待开发的。

表7 某电厂1#汽轮机性能试验各主要运行参数值的最大允许偏差

参数	数据
主蒸汽压力（%）	±5
主蒸汽温度/℃	±15
再热蒸汽温度/℃	±15
排汽压力（%）	±25
抽汽压力（%）	±5
抽汽流量（%）	±10
最终给水温度/℃	±10
电功率或主蒸汽流量（%）	±5%（按规定条件修正后）
转速（%）	±2

表8 某电厂1#机组汽封改造前后性能对比

项目	设计值	修前值	修后值
试验热耗率/[kJ/（kW·h）]	7 759.9	8 131.59	8 018.3
修正后热耗率/[kJ/（kW·h）]	7 759.9	7 975.38	7 858.7
高压缸内效率（%）	83.37	78.81	79.49
中压缸内效率（%）	90.47	91.21	89.12

另一方面，本次汽封改造对整体缸效提升明显。高压缸缸效从大修前的78.81%，提高至大修后的79.49%，提升0.68%，相比于设计值额83.37%，略低3.88%。中压缸缸效从修前的91.21%，高于设计值的91.21%，下降至修后的89.12%，下降了2.09%。中压缸的缸效从修前的高于设计值，到修后的低于设计值，是由于高中压过桥漏汽率降低。因为相对较高的修前高中压过桥漏汽率会导致部分高温高压蒸汽在未完全做功的情况下由高压缸漏入中压缸，造成中压缸缸效虚高，缸效甚至高于设计值的假象。在高中压过桥段进行导流汽封更换后，通过试验数据可知，中压缸缸效下降至理论设计值以下，才能更真实地反映出中压

缸的实际情况。

表9显示了本次汽封改造后带来的潜在经济效益，该电厂的年发电小时数目前在4 000 h，当地煤价为1 000元/t，降低煤耗按4.5 g/（kW·h）计算，仅第一年即可为电厂节约用煤成本约630万元。把下一个大修周期以6年计算，再考虑到涡流式汽封9%的低年递损率，本次汽封改造在一个6年的大修周期所带来的经济效益可以达到3 024.9万元。

表9 某电厂1#机组汽封改造后经济效益

机组容量/ MW	年发电小 时数/h	煤价/ （元/t）	修后降 低煤耗g/ （kW·h）	一个大修周期 （6年）的经济 效益/万元
350	4 000	1 000	4.5	3 024.9

该电厂1#机组经过本次方案进行改造后，有效降低了汽轮机组的热耗值，解决了修前高中压过桥段漏汽率大的问题，提高了高压缸缸效并修正了中压缸缸效虚高于设计值的问题，整个检修过程一次性启机成功。在启机过程中，由于涡流式汽封间隙量的设计的合理性和间隙调整的精准性，转子未出现碰摩情况，因而转子振动小，轴瓦温度表现符合正常参数范围，从而整体上提高了机组启机的成功率，保证了机组的安全运行。

从经济角度出发，降低汽轮机热耗意味着支出更少的煤产出等量的电，涡流式汽封改造能在下一个6年大修周期预计节省用煤支出3 024.9万元，为电厂带来巨大的经济效益。

结束语

本文提出的最新型涡流式汽封，通过结合传统梳齿汽封和迷宫式汽封的优点，在此基础上，颠覆了汽封体的腔体结构，设计出多级次减压腔室，在流体模拟实验中获得优异表现，密封效果提高30%，相比当前市场上的汽封产品，性能优势明显。

在实际应用案例中，在不改变安装方式的情况下，降低机组热耗4.5 g/（kW·h），根据该厂情况，预计在一个大修周期内能带来经济效益3 024.9万元。

从实验和实际案例可证明，涡流式汽封的设计初衷响应国家节能降耗的政策，其性能在汽封市场中遥遥领先，具有十分美好的市场前景，为广大发电用户带来巨大的经济效益。

（收稿日期：2024-10-30）