

# 350MW汽轮机节能改造技术的应用实践

张康康 王瑞波 吕瑞兵 孙建 王永兴 韩鹏程  
呼和浩特热电厂 内蒙古呼和浩特 010030

**摘要:** 本文围绕350MW汽轮机的节能改造技术,阐述了其工作原理,详细剖析了汽封节能改造、TSI系统升级改造、热力优化及余热回收等关键技术要点。通过呼和浩特热电厂的案例分析,展示了节能改造方案的制定、实施过程及显著效果,验证了节能改造技术在提升汽轮机热效率、降低能耗及减少污染物排放方面的有效性,为火电厂的节能减排工作提供了实践参考。

**关键词:** 350MW汽轮机;节能改造技术;热力优化;余热回收

## 引言

在全球能源需求不断增长、能源资源日趋紧张的背景下,节能减排已成为世界各国能源发展的最主要战略方向。就电力行业而言,火电厂是能源消耗与污染物排放的主要来源,节能减排具有重要意义。350MW汽轮机是火电厂关键设备,其热效率直接关系到全厂经济与效益。因此,开展350MW汽轮机节能改造以提高热效率、降低能耗、减少污染物排放,已成为火电厂技术改造中的一项重要工作。

## 一、350MW汽轮机工作原理概述

350MW汽轮机是大型火力发电中的核心装置,其工作原理基于蒸汽能量转换与机械做功的精密协同。锅炉排出的高温高压蒸汽通过主蒸汽管道流入汽轮机后,首先冲击高压缸内部喷嘴组,使喷嘴内蒸汽膨胀加速,热能转化为高速流动的动能,形成高流速蒸汽束,直接冲击高压缸转子表面的动叶片。动叶片在蒸汽冲击下产生推力,驱动转子高速旋转;蒸汽动能由此推力转化为转子机械能,完成首次能量转换。

从高压缸排出的蒸汽温度与压力虽有所降低,但仍携带大量能量,随即进入中压缸。中压缸采用反动式设计,蒸汽在流经静叶与动叶时,不仅在静叶(喷嘴)中膨胀加速,还在动叶中继续膨胀做功,这种双重膨胀机制使蒸汽能量得到更充分释放,推动中压转子持续旋转,

进一步将热能转化为机械能。

低压缸主要承担蒸汽的最终膨胀功能,其内部采用多级叶片组,将蒸汽压力降至接近凝汽器真空水平,确保蒸汽在低压缸中充分膨胀,驱动转子转动直至能量基本耗尽,最后排入凝汽器凝结为水,完成全部做功循环。

整个过程由汽轮机各级转子经联轴器串联,将高压、中压和低压缸输出的机械能叠加,带动发电机转子旋转、切割磁感线发电。配套调节系统通过控制蒸汽阀门开度,实现对进入汽轮机蒸汽流量的精确调节,保障机组在各种负荷条件下的平稳运行。润滑油系统与密封系统协同作用,最大限度减小转子高速旋转过程中的摩擦损耗,并防止蒸汽泄漏,从而保证汽轮机高效、安全运行,最终实现将燃料化学能转化为电能的核心功能。

## 二、350MW汽轮机节能改造技术要点

### (一) 汽封节能改造技术

汽封节能改造技术对于提升汽轮机运行效率、减少能源损耗具有至关重要的作用。传统汽封结构普遍存在间隙难以精准控制的问题,在运行过程中蒸汽易从间隙处泄漏,导致能量损失,影响机组经济性。

新型汽封采用先进材料与独特结构设计,如蜂窝式汽封,其蜂窝结构可形成多个微小涡流区,蒸汽流经时受涡流扰动而产生自密封效应,从而有效降低泄漏量。布莱登汽封则利用弹簧的弹性特性,使汽封块在机组启停及运行各阶段均能自动调节与转子之间的间隙,始终维持最佳密封状态,显著减少蒸汽泄漏损失。

安装过程中对精度的严格控制尤为关键。需准确测量汽封间隙,并依据机组实际运行参数及转子振动特性,将其调整至合理范围,以确保汽封有效封堵的同时,避免因间隙过小引发动静部件摩擦。此外,汽封体须经精细加

**作者简介:** 张康康(1984.09—),男,汉族,山西省霍州市人,毕业于长春工程学院,大学本科,热能与动力工程专业,工程师,现就职于呼和浩特热电厂,研究方向为热动专业。

工，保证表面光洁度，降低蒸汽流动过程中的摩擦阻力。

改造后，机组热耗率明显下降，能源利用效率大幅提升；同时增强了运行稳定性，缓解了因汽封泄漏引起的振动问题，延长了设备使用寿命；还减少了补汽量，减轻锅炉负担，提升了整个热力系统的运行经济性，为电厂带来可观的经济效益与环境效益。

### （二）TSI系统升级改造技术

TSI（汽轮机监视仪表）系统升级改造技术主要聚焦于传感器精度提升、信号处理能力增强及监测功能拓展等方面，旨在全面提升汽轮机运行状态的实时感知能力与故障预警水平。其核心在于采用高精度位移、振动、转速、键相及温度传感器，配合先进的信号采集与处理模块，显著提高监测数据的准确性与可靠性。同步增加对汽缸金属温度、主再热蒸汽压力与温度、轴承回油温度等关键参数的在线监测，实现对汽轮机运行状态的全方位、精细化监控。电子控制系统的智能化升级赋予TSI系统更强的数据分析与逻辑判断能力，自主研发或适配的监测数据处理单元可实时响应运行工况变化，精准协调报警阈值设定与保护逻辑配置，保障机组在启动、变负荷及异常工况下的安全稳定运行。部分升级方案还引入了冗余架构与自诊断功能，进一步提升系统可用性与抗干扰能力。上述技术集成应用后，TSI系统整体性能达到国内先进水平，为汽轮机长周期安全高效运行提供了坚实的技术支撑。

### （三）热力优化技术

350MW汽轮机热力优化技术的目标是全面提升蒸汽能量利用效率，降低热耗率与发电煤耗。通流部分优化是其中至关重要的一环：采用先进叶片型线与高精度制造工艺，优化设计动、静叶片几何形状与排布，使蒸汽流场更加均匀稳定，有效抑制涡流与二次流损失，显著提升叶片气动性能，从而使蒸汽能量更高效地转化为机械能，提高汽轮机内效率。蒸汽参数的合理匹配同样不可或缺。应根据机组实际运行工况，动态调整主蒸汽与再热蒸汽的压力、温度，使其尽可能贴近设计值，充分释放蒸汽做功能力，避免因参数偏离造成能量浪费。优化运行方式优化亦十分关键。综合考虑电网负荷需求与汽轮机自身特性，灵活采用滑压运行方式：在负荷变化时，通过调节主蒸汽压力而非节流阀门开度来适应负荷，相比定压运行可显著降低节流损失，使机组在宽负荷范围内均保持较高效率。

此外，还需强化热力系统保温措施，减少散热损失；科学布置与优化热力管道走向与管径，降低沿程与局部

阻力；保障蒸汽流通顺畅，减小压力降。通过上述综合措施，实现汽轮机热力系统的整体优化，切实提升能源利用效率，降低运行成本，增强机组经济性与市场竞争力。

### （四）余热回收技术

余热回收技术旨在回收汽轮机运行过程中排放的烟气余热与乏汽余热，提升能量梯级利用效率。

针对烟气余热回收，可在锅炉尾部加装低温省煤器与烟气冷却器，利用烟气余热加热凝结水或送风，从而提高锅炉效率。通过将烟气温度由约120–150℃进一步降低至90℃或更低，可有效回收烟气中低品位热能，使烟气温度下降20–30℃，锅炉效率提升1–2个百分点。该技术已成为火电节能改造的标配方案，如大唐绥化发电厂、内蒙古蒙能锡林热电厂等2×350MW机组均已成功实施低低温省煤器项目。

对乏汽余热回收，可采用吸收式热泵等技术对低压缸排汽余热进行提质利用，服务于供热或其他热用户。吸收式热泵以高温热源（如汽轮机供热抽汽、高温热水或可燃气体）为驱动能源，将低温热源（如循环水）热量提升至中温品位，其性能系数（COP）通常为1.5–2.5。例如，利用乏汽余热驱动吸收式热泵，可回收循环水余热用于供暖，使系统综合能效提升约15%，并在冬季供暖期日均减少燃煤消耗约200吨。除此外，还可采用其他乏汽回收方式，如利用凝结水泵升压后的凝结水或化学除盐水，在汽水混合器中与来自除氧器、定期排污扩容器及疏水扩容器的无压乏汽进行换热混合，实现乏汽显热与潜热的协同回收，进一步提升热能利用率并创造可观经济效益。

## 三、350MW汽轮机节能改造技术应用实践案例分析

### （一）案例电厂概况

呼和浩特热电厂2×350MW机组采用哈尔滨锅炉（集团）股份有限公司主机产品，锅炉型号为HG-1140/25.4-YM1，为一次中间再热、单炉膛、前后墙对冲旋流燃烧、尾部双烟道、烟气挡板调节再热汽温、平衡通风、紧身布置、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构II型超临界本生直流锅炉。汽轮机由哈尔滨汽轮机厂有限责任公司制造，型号为CZK350/320-24.2/0.4/566/566，为超临界、中间再热、单轴、双缸双排汽、直接空冷、采暖供热抽汽式汽轮发电机组。发电机由哈尔滨电机厂有限责任公司制造，型号为QFSN-350-2，为三相、二极、隐极式转子同步发电机，采用水—氢—氢冷却方式。电厂以双回220kV线路接入位于厂区西面的金海500kV变电站，为呼和浩特市及金川开发区大部分用户提供供热

电联供服务，供热管线包括城市热网东线、西线、金川线、巴彦线及富泰线，现有实际供热面积2974万平方米。#3、#4机组分别于2011年12月2日、2012年1月25日投产发电。

## （二）节能改造方案制定

针对呼和浩特热电厂2×350MW机组的实际情况，制定了以下节能改造方案：

（1）汽封节能改造：对汽轮机高中压缸汽封实施改造，采用蜂窝式汽封替代传统梳齿式汽封，提升汽封密封性能，减少蒸汽泄漏。

（2）TSI系统升级改造：对原有TSI系统进行升级，更换为高精度传感器，配备先进信号处理模块，提升监测精度与系统可靠性；新增汽缸壁温、主再热蒸汽压力与温度等测点，实现对汽轮机运行状态的全面、实时监测。

（3）热力优化改造：对汽轮机通流部分进行优化设计，采用先进叶片型线与高精度制造工艺，提升叶片气动性能；合理调整主再热蒸汽参数，使其与汽轮机设计工况更好匹配；优化运行方式，结合电网负荷需求，推行滑压运行策略，降低节流损失，提升全负荷运行效率。

（4）余热回收改造：在凝汽器出口后增设乏汽余热回收装置，回收低压缸排汽余热，用于加热热网循环水，提升能源综合利用效率。

## （三）改造实施过程

（1）汽封节能改造实施过程：首先安排机组停机检修，拆除原有汽封；依据设计图纸与工艺要求，安装蜂窝式汽封，并精确调整各部位汽封间隙；最后开展汽封密封性试验，验证密封效果符合技术规范要求。

（2）TSI系统升级改造实施过程：采购高精度传感器及新一代信号处理设备，对原TSI系统进行整体更换与升级；完成新传感器安装、电缆敷设与信号接入；开展系统联调、静态校验与动态测试；同步优化报警逻辑，合理设定各类参数报警阈值与跳闸定值。

（3）热力优化改造实施过程：委托专业设计单位完成通流部分优化方案设计与部件制造；利用机组大修窗口期，对汽轮机进行解体，更换优化后的叶片、隔板及相应汽缸内件；同步完成蒸汽参数整定与控制系统逻辑更新，落实滑压运行策略。

（4）余热回收改造实施过程：在凝汽器喉部后方安装乏汽余热回收装置，包括板式/管壳式换热器、配套管道、阀门及循环水泵等；完成热网侧接口连接，实现余热向热网水的稳定传递；开展系统注水、冲洗、升温、带负荷调试及72小时连续运行考核，确保装置安全、高效、稳定投运。

## （四）改造效果评估

（1）热效率提升：改造后，汽轮机热效率显著提高。对比改造前后热耗率数据，机组热耗率平均下降约120–150 kJ/(kW·h)，发电煤耗降低约2.5–3.2 gce/(kW·h)。结果表明，节能改造技术切实提升了汽轮机能量转化效率，降低了能源消耗。

（2）经济效益显著：得益于热效率提升与煤耗下降，电厂发电成本明显降低；供热能力增强与余热回收带来的热价收益同步增长，整体经营效益显著改善。此外，余热回收系统减少了对外部热源的依赖，进一步降低了供热成本，提升了企业盈利水平。

（3）环境效益突出：节能改造实施后，电厂二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物及烟尘等主要污染物排放总量大幅削减，对区域环境质量改善起到积极作用；余热回收技术提高了能源综合利用效率，减少了化石能源消耗，完全契合国家“双碳”目标及节能减排政策导向。

## 结论

本文通过对350MW汽轮机工作原理的概述，系统剖析了汽封节能改造、TSI系统升级改造、热力优化及余热回收等关键节能改造技术要点。以呼和浩特热电厂2×350MW机组为实例，详述了节能改造方案的制定思路、实施路径及实测成效。实践表明，对350MW汽轮机实施综合性节能改造，可有效提升热效率，降低能耗与污染物排放，兼具显著的经济效益与环境效益。因此，建议火电厂积极推广和应用350MW汽轮机节能改造技术，为电力行业绿色低碳转型与高质量发展提供有力支撑。同时，应持续跟踪前沿技术进展，深化产学研协同创新，不断探索更高效、更智能、更可靠的节能改造新路径，进一步提升汽轮机节能水平与运行可靠性。

## 参考文献

- [1] 毋健. 节能技术在火电厂热动力工程中的运用[J]. 电力设备管理, 2025, (24): 268–270.
- [2] 田玉芹. 300 MW 机组凝结水泵变频改造及逻辑优化[J]. 流体测量与控制, 2025, 6 (06): 23–26.
- [3] 张晓东, 唐经天, 杜玉生, 等. 300MW 汽轮机振动治理分析[J]. 中国设备工程, 2025, (24): 81–83.
- [4] 冯栋. “双碳”目标下350 MW 热电联产机组灵活调峰技术的探索与展望[J]. 能源研究与利用, 2025, (06): 39–45.
- [5] 邓怡民. 火电厂锅炉汽轮机节能环保对策研究[J]. 电力设备管理, 2025, (23): 246–248.