

# 汽轮机热耗率影响因素及节能改造技术应用研究

吕志军

国家能源集团宁夏煤业公司煤制油分公司动力厂，宁夏灵武，750411；

**摘要：**本文就汽轮机热耗率展开研究，对影响热耗率的关键因素做了系统的分析。汽轮机通流部分的磨损、结垢情况影响蒸汽做功效率；凝汽器真空度的波动改变排气压力，进而影响循环热效率；给水加热系统的抽汽参数和加热器性能，决定回热循环的完善程度。同时根据工程实践来探讨通流部分优化、凝汽器强化传热改造、泵类设备变频调速等节能技术的运用，用典型案例数据来验证改造成效，给电力行业提高能源利用率、达成节能降耗目的给予理论及实践的参照。

**关键词：**汽轮机；热耗率；影响因素；节能改造技术

**DOI：**10.69979/3060-8767.26.01.017

## 引言

在能源需求不断增加、节能环保要求不断提高的情况下，汽轮机是电力生产等领域的重要设备，汽轮机热耗率影响着能源利用效率和企业经济效益。降低汽轮机热耗率，实现节能运行，成为行业关注的焦点。本文对汽轮机热耗率的影响因素加以探究，剖析各个因素的作用机理，就不同的影响因素展开研究，探寻相应的节能改造技术的运用方法，期望能给汽轮机节能改造的实际操作给予理论支持和操作指引，助力行业绿色可持续发展。

## 1 汽轮机热耗率概述

汽轮机热耗率是评价汽轮机经济性好坏的重要指标，是指汽轮机输出单位功所消耗的热量，单位一般用  $\text{kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h})$  表示。热耗率越低，汽轮机把热能转化为机械能的效率就越高，能源利用就越充分。火力发电系统当中，汽轮机热耗率同电厂煤耗指标密切相关，对于电厂的运营成本以及环保表现有着十分重要的意义。由于能源政策的收紧以及环保意识的提高，准确把握汽轮机热耗率的影响因素，采取有效的节能改造措施，降低热耗率，已经成为电力企业提高核心竞争力的重要途径。

## 2 汽轮机热耗率影响因素分析

### 2.1 汽轮机通流部分状态

汽轮机通流部分是蒸汽能量转换的主要区域，状态的好坏直接关系到热耗率。在长期运行中，蒸汽里的杂质、化学物质等会致使通流部分的动静叶片遭受多种损害。叶片表面结垢以后，本来光滑的蒸汽流动通道变得

粗糙起来，通道面积也缩小了，于是蒸汽在流动时要克服更大的阻力，能量在摩擦、碰撞中大量损耗，热耗率也就提高了。腐蚀、磨损问题同样不容忽视，它们会破坏叶片的原有结构，扰乱蒸汽的正常流场，造成能量损失更加严重。

除此之外，通流部分间隙的变化也会对热耗率产生较大的影响。一旦动叶与静叶之间径向间隙、轴向间隙超出标准范围，蒸汽就会从这些缝隙中泄漏。泄漏的蒸汽不能有效做功，导致真正用来推动汽轮机运转的蒸汽量减少，热耗率升高。

### 2.2 凝汽器真空度

凝汽器真空度是决定汽轮机排气压力高低的关键因素，排气压力的高低直接决定汽轮机理想焓降的大小。两者呈负相关，凝汽器真空度越低，排气压力越高，汽轮机的理想焓降就越小。这就意味着，在发电量相等的情况下，汽轮机所消耗的蒸汽量会更多，热耗率也会大幅度提高。

影响凝汽器真空度的因素很多。凝汽器传热管结垢时，污垢会在管壁上形成隔热层，使传热系数大幅降低，削弱凝汽器的换热效果，使排气不能很好地冷凝成水，最终导致真空度下降。凝汽器水位过高会淹没部分传热管，减小有效换热面积，降低冷凝效率，使真空度降低。另外，真空泵工作效率下降不能及时抽走不凝性气体，或者空气漏入量增加破坏凝汽器真空环境都会造成凝汽器真空度降低，影响汽轮机热效率。

### 2.3 给水加热系统效率

给水加热系统的作用就是用汽轮机的抽汽来加热锅炉给水，提高给水温度，减少锅炉的燃料消耗量，从而降低汽轮机的热耗率。给水加热系统效率主要是由加热器的传热效果、加热器的端差和抽汽管道散热损失决定的。如果加热器传热管结垢、堵塞或者加热器内有空气积聚，会使加热器的传热系数变小、换热效果变差，使给水温度达不到设计值。同时加热器端差增大，即加热器出口给水温度与抽汽饱和温度的差值大于设计值，也会导致给水加热系统效率降低。高压加热器端差每升高 $1^{\circ}\text{C}$ ，汽轮机热耗率就会增加 $0.1\% \sim 0.2\%$ 。另外，抽汽管道的保温层损坏，会造成抽汽在输送过程中散热损失增大，从而降低给水加热系统的效率，使热耗率增大<sup>[1]</sup>。

## 2.4 汽轮机运行参数

汽轮机运行参数如果偏离设计值，对热耗率的影响就很大。主蒸汽压力低于标准，蒸汽所含焓值减少，汽轮机通流部分的做功能力下降。为了保持规定的发电量，机组不得不消耗更多的蒸汽，这必然会带来热耗率的上升。主蒸汽温度和再热蒸汽温度降低会加大蒸汽在做功过程中熵增的程度，造成能量损失越来越大，进而使热耗率上升。除运行参数外，负荷率对汽轮机也起着很重要的作用。当汽轮机长时间处于低负荷运转状态时，其内部的气流组织和热力循环效率都难以达到设计的理想状况，设备整体的效率也远远低于额定值，最终造成热耗率居高不下<sup>[2]</sup>。

## 3 汽轮机节能改造技术应用

### 3.1 通流部分优化改造

对于因汽轮机通流部分状态不好而造成热耗率增高的问题，可以采用通流部分优化改造技术。该技术包含动静叶片更换，叶片型线改善，通流间隙调节等系统性手段。

动静叶片更换时，传统叶片经由长时间高温高压蒸汽冲刷，表面易产生磨损、腐蚀，造成气动性能变差。通过更换新材料、精密加工工艺制成的高效动静叶片，可以大幅提高叶片抗冲蚀性能和气动效率。同时根据先进的空气动力学原理对叶片型线进行优化设计，优化叶片表面蒸汽流道，使蒸汽在通流部分的流动更接近理想状态，大幅度减少涡流、湍流等造成的能量损失，最大限度地释放出蒸汽所具有的能量，提高蒸汽的做功效率。

通流间隙的调整同样不能忽视，在运行期间由于机组启停、负荷变化等原因，通流间隙会发生改变，如果间隙过大，蒸汽泄漏量就会增多，蒸汽对叶片的驱动力会减小。技术人员对通流间隙进行准确的测量并加以调整，从而让通流间隙处于最佳状态，减少蒸汽泄漏，保证蒸汽能充分推动叶片旋转做功。

某电厂对一台300MW汽轮机进行通流部分优化改造，全部更换高压缸、中压缸的动静叶片，用精密仪器对通流间隙进行微调。改造之后，汽轮机运行时能量损耗明显减少，蒸汽做功效率提高，热耗率下降，年节约标准煤量可观，显示了该技术在汽轮机节能降耗领域有着巨大的应用价值<sup>[3]</sup>。

### 3.2 凝汽器节能改造

为了提高凝汽器真密度，降低热耗率，可以进行凝汽器节能改造。常用的改造方法有更换凝汽器传热管、对凝汽器钛管进行镀膜处理以及优化凝汽器系统。

将凝汽器的普通碳钢传热管更换成钛管或者不锈钢管，这是改进换热效率的重要手段。碳钢材质容易受到循环水的腐蚀而产生铁锈等污垢，严重影响传热效果；而钛管和不锈钢管由于具有很好的耐腐蚀性以及较高的传热系数，使得热量传递更加高效，大幅减少了结垢的发生。对凝汽器钛管进行镀膜处理，在管壁表面形成纳米级的保护膜，提高传热管表面光洁度，减小污垢热阻。实验结果表明，镀膜后钛管的污垢热阻降低 $30\% \sim 40\%$ ，从而提高换热效果。

另外改善凝汽器的冷却水系统也是提高真密度的有效方法。采用高效的冷却塔可以提高冷却水的冷却效果，智能控制系统的动态调节冷却水的流量、温度，保证凝汽器始终处于最佳的工作状态。某电厂对凝汽器进行改造，把碳钢传热管换成钛管，对冷却水系统进行优化，加装变频水泵和智能温控装置。改造后凝汽器真密度提高 $2\text{kPa} - 3\text{kPa}$ ，汽轮机热耗率降低 $40\text{kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h}) - 60\text{kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，年节约标煤约1200吨，节能效果好，经济效益高<sup>[4]</sup>。

### 3.3 给水加热系统改造

提高给水加热系统效率的改造技术主要有加热器更换检修、抽汽管道保温改善等。加热器在工业运行中会由于长期工作而出现老化现象，造成传热效率明显降低。此时及时更换成高效型号的加热器，可以从设备本

质上提高换热效果。同时建立定期检修制度也十分重要，清除传热管内顽固的结垢、疏通堵塞物、排出加热器内残留的空气，可以有效地减小加热器端差，保证加热器一直保持在高效运行状态。

抽汽管道的保温层在使用一段时间之后容易出现破损、老化的情况，造成抽汽输送过程中散热损失增大。对保温层进行全面检查，及时修复破损处，用高性能保温材料重新包裹，可大幅降低热量损耗。某电厂对给水加热系统中的高压加热器进行上述改造后，设备运行状况明显改善，加热器端差明显减小，给水温度有效提高，从而降低汽轮机热耗率，提高能源利用效率，为企业节能增效提供有力支持<sup>[5]</sup>。

### 3.4 变频调速技术应用

在汽轮机的运行体系当中，辅助设备诸如给水泵、循环水泵、凝结水泵等的能耗控制，对于整个热耗率来说有着不能被忽视的影响。传统的运行方式下，辅助设备大多采用定速运行的方式，采用节流调节的方法来调节流量和压力。这种做法虽然可以满足基本的运行要求，但是存在很大的缺陷，即巨大的节流损失造成大量的电能被白白浪费，设备的运行效率始终无法突破瓶颈。

而变频调速技术的使用，给汽轮机辅助设备节能改造开拓出新的道路。可以准确获取汽轮机实时负荷情况，根据实际需要调节辅助设备的转速。当汽轮机处于低负荷运转的时候，变频调速系统会自动降低辅助设备的转速来减少输出流量和压力，从而达到节约能源的目的；在高负荷的情况下，变频调速系统则会快速提高转速，保证供能的稳定。这样按需供能的运行方式，完全避免了传统节流调节所造成的能力损失，从根本上提高了设备的运行效率和能源利用率。

以给水泵为例，采用变频调速技术之后，系统根据锅炉给水需求量来智能调节给水泵的转速。自适应调节方式不但可以使得设备运行更加平稳，而且可以大大减小机械磨损，从而延长设备的使用寿命。更重要的是，由于减少了很多不必要的能源消耗，间接降低了汽轮机热耗率，使整个发电系统更高效、经济<sup>[6]</sup>。

## 4 节能改造效果验证与分析

为了检验节能改造技术的效果，以某电厂 300MW 汽轮机为例，对它进行了通流部分优化改造、凝汽器改

造、给水加热系统改造和变频调速技术应用等综合节能改造措施。在改造之前，该机组的热耗率是  $8200\text{kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，经过改造之后，对机组运行参数进行监测和分析，热耗率降低到  $7950\text{kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，热耗率降低了  $250\text{kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。按照机组年发电量  $1.5\times10^9\text{kW}\cdot\text{h}$  计算，年节约标准煤约 12500t，减少二氧化碳排放量约 32500t，具有较好的经济效益和环境效益。

从改造效果上看，通流部分优化改造对热耗率的降低贡献最大，其次是凝汽器改造、给水加热系统改造，变频调速技术应用也起到一定的辅助节能作用。这说明，对汽轮机热耗率的主要影响因素采取相应的节能改造技术，可以有效地降低热耗率，提高机组的经济性、环保性。节能改造时要注意各个改造措施之间的相互配合，使改造效果最好。

## 5 结论

本文研究表明汽轮机热耗率受通流部分状态、凝汽器真空度、给水加热系统效率和运行参数等因素影响，当出现异常的时候，热耗率会增大。为此可以采用通流优化、凝汽器改造、给水系统升级和变频调速等节能技术，实践证明能够有效降低能耗、提高效率。未来汽轮机节能改造技术发展空间广阔，应该重点发展高效通流设计技术、新型凝汽器材料与结构，探索智能控制技术的应用，加强余热回收利用的研究，持续创新完善技术体系，助力电力和能源行业绿色可持续发展。

## 参考文献

- [1] 常恕安, 李永良. 汽轮机节能降耗技术研究与改进措施[J]. 农机使用与维修, 2024, (12): 104-106.
- [2] 屈小珂. 60 万 kW 级燃煤机组汽轮机热耗及耗分析试验研究[J]. 电力设备管理, 2024, (21): 261-263.
- [3] 赵雁斌, 卢杰光, 杨栓红. 汽轮机高效节能技术的研究与应用[J]. 机械管理开发, 2024, 39(07): 312-314.
- [4] 曹艳, 李励. 高加危疏阀泄漏对汽轮机性能试验热耗率的影响[J]. 河北电力技术, 2024, 43(01): 91-94.
- [5] 朱伟峰. 浅谈汽轮机高效运行节能优化技术研究[J]. 中国设备工程, 2023, (10): 230-232.
- [6] 苗志强, 李东海, 马竹. 影响汽轮机热耗的因素及改善措施[J]. 电站系统工程, 2023, 39(01): 57-58.