

热能动力装置节能技术应用与分析

梁泽超

邢台纳科诺尔精扎科技股份有限公司, 河北 邢台 054001

[摘要]热能动力装置属于工业领域主要的能源转换和消耗设备,其节能潜力的挖掘对于达成“双碳”目标有着十分重要的意义。文章根据热力学第一定律和第二定律,对热能动力装置能量损耗的机理及分布情况进行分析,认为锅炉燃烧和传热过程是火用损失的主要来源。在此基础上,将节能技术分为面向过程优化的主动型技术和基于能量梯级利用的被动型回收技术两种,分别对变工况运行调节、过剩空气系数精准控制、尾部烟气余热回收、凝结水闪蒸汽回收、转动机械变频调速和管道保温优化等技术的应用要点和节能效果进行了阐述。

[关键词]热能动力装置;节能技术;火用分析;余热回收;变频调速

DOI: 10.33142/ect.v4i7.20134

中图分类号: TK018

文献标识码: A

Application and Analysis of Energy-saving Technology for Thermal Power Devices

LIANG Zechao

Xingtai Naknor Technology Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 054001, China

Abstract: Thermal power devices are the main energy conversion and consumption equipment in the industrial field, and the exploration of their energy-saving potential is of great significance for achieving the "dual carbon" goal. The article analyzes the mechanism and distribution of energy loss in thermal power devices based on the first and second laws of thermodynamics, and believes that boiler combustion and heat transfer processes are the main sources of fire loss. On this basis, energy-saving technologies are divided into two types: active technologies based on process optimization and passive recovery technologies based on energy cascade utilization. The application points and energy-saving effects of technologies such as variable operating conditions adjustment, precise control of excess air coefficient, tail flue gas waste heat recovery, condensed water flash steam recovery, rotating machinery variable frequency speed regulation, and pipeline insulation optimization are elaborated respectively.

Keywords: thermal power device; energy-saving technology; fire analysis; waste heat recovery; variable frequency speed control

引言

热能动力装置被广泛地应用到电力、化工、冶金等国民经济支柱产业中,它的能源消耗量占工业终端用能的很大一部分。在能源供求紧张、碳排放限制不断增加的情况下,热能动力装置的能源利用率提高成了行业的迫切需要。工程界一直重视热平衡层面的能量“数量”分析,而忽视了能量“品质”贬损的火用损失。火用分析方法依靠热力学第二定律,可以显示出不可逆损失的真实分布情况,给节能技术精准施策赋予理论支撑。近些年来,变频调速、热泵、气凝胶保温等技术日趋完善,节能工作由原来的单个设备改善转向系统级综合改良。

1 热能动力装置能量损耗机理与节能潜力分析

1.1 典型热力循环的不可逆损失分布

热能动力装置能量转换过程中存在着燃烧、传热、流

动等不可逆环节,实际循环效率比理想循环低。火用分析法可以对系统各个部分的能量品质损失进行定量分析。以典型的燃煤火电机组为例,把热力系统分成锅炉、汽轮机、凝汽器和回热系统,建立质量平衡和火用平衡方程,可以求出各个设备的火用损失分布^[1]。经过对 300MW 机组的分析可知,锅炉单元的火用损失占总输入火用的 65%~70%,汽轮机单元占 15%~20%,凝汽器单元占 10%~15%。锅炉中燃料燃烧产生的化学火用损失以及高温烟气和工质之间大温差传热损失,都是系统不可逆性的主要来源。船用柴油机余热回收系统中锅炉火用损失最大,其次为蒸汽轮机和动力涡轮。环境温度升高时,各个部件的火用效率都会降低。上述结论表明,热量损失最大的部位并不一定是火用损失最大的部位,节能改造的优先次序应该按照火用损耗分布来定。

1.2 运行参数偏离设计工况对效率的影响机制

热动力装置实际运行时经常偏离设计工况，负荷、燃料、环境条件的变化都会引起运行参数的偏离，从而影响效率。供热汽轮机变工况热力计算可以建立电出力快速模型，实现0~116MW升负荷、0~82MW降负荷的评价。供热机组受季节影响，春秋季可调容量大，冬季供热负荷高时可调容量小，运行调节策略要具备动态适配能力。锅炉在运行中由于负荷的变化而造成过剩空气系数、排烟温度、飞灰含碳量等参数与设计值不符，从而引起效率的降低。因此建立基于机理模型的运行参数优化方法，进行变工况动态寻优，是提高实际运行能效的一种重要方式。

2 面向过程优化的主动型节能技术

2.1 变工况运行调节与负荷动态匹配技术

变工况运行调节的核心就是使装置的出力和外界负荷的需求相匹配，避免设备长时间处在低效区。传统的定负荷方式会造成一些负荷的效率大幅度降低，主动型调节就是对设备组合以及负荷进行合理的安排，从而提高效率。综合能源系统中，考虑变工况特性容量和调度双层优化的方法已经被提出，用极致梯度提升算法建立效率修正模型，加入最优负载率跟踪策略，主动调节能量转换设备输出比例，实现柔性供能。仿真结果表明该方法可以提高模型的准确性，也可以提高配置和调度的经济性。工程中要依靠在线监测和快速计算工具，对多机组协同的场景按照各个机组变工况效率的特点来制定负荷分配方案，保证整个系统的综合效率较高。

2.2 过剩空气系数精准控制与燃料分级燃烧技术

过剩空气系数是决定锅炉燃烧效率的主要因素。系数过低造成不完全燃烧损失增多，系数过高会造成排烟热损失增大，存在使热效率最高的最优值。基于机理模型的优化方法综合考虑不完全燃烧热损失和排烟温度的影响，可以得到不同的负荷和煤种下最优的过剩空气系数，克服了传统热效率测试成本高、普适性差的缺点^[2]。燃料分级燃烧技术主燃烧区使用过剩空气系数0.8~0.9，保持还原性气氛抑制氮氧化物的生成，在燃尽区补入平衡风。该种“低氧燃烧、分级送风”的方式既提高了效率又降低了污染物排放。在役锅炉通过降低总过剩空气系数、增加燃尽风份额来达到脱氮和提效的目的。

3 基于能量梯级利用的被动型回收技术

3.1 尾部烟气余热深度回收与热泵耦合利用

锅炉尾部烟气温度一般为150~200℃，直接排放会造成能量的浪费和环境热污染。传统的省煤器、空气预热

器只能使烟温降到85~95℃左右，要达到深度回收的效果必须使用热泵。压缩式热泵可以将低温余热提高到可以利用的温度。北京某锅炉房使用烟气余热深度回收热泵系统，供暖季回收余热89577kWh，季节能效比为4.46，折合节能量为3723kgce，减排CO₂为9282kg，年节约费用为13875元，回收期约为6.5年。火电厂的烟气余热耦合提质利用热泵系统也可以大大提高能效。系统设计要考虑到深度回收工艺（烟温小于60℃）和回收热量品位同用户需求相适应的问题，一般用烟气、水换热器和热泵蒸发器串联的方式进行分级供热。

3.2 凝结水系统闪蒸汽回收与热力除氧优化

高温凝结水含大量显热，饱和压力一般大于低压用汽需求，具有闪蒸回收条件。闪蒸罐减压闪蒸，二次蒸汽可以用于除氧器或者低压热用户，闪蒸后的凝结水加压回注。炼化企业溶脱装置采用带压闪蒸回收凝结水5t/h，年节约蒸汽量为1t，经济效益比300万元高很多。煤化工乙二醇装置中，中压蒸汽冷凝液闪蒸后得到0.2MPa蒸汽，正好满足变换除氧器汽提除氧的要求。热力除氧器是主要的耗能设备，用闪蒸汽代替一部分新鲜蒸汽可以减少高品位蒸汽的消耗。除氧器乏汽回收改造有明显的经济效益，每年可以得到节能收益约1698万元。凝结水回收率提高可以减少锅炉排污，给水温度每升高6℃可节约燃料1%。

3.3 转动机械变频调速与液力耦合传动节能

风机、水泵数量多、耗电大，功耗与转速三次方成正比，调速运行可以降低能耗。液力耦合器调速有滑差损失，变频调速通过改变供电频率来直接调节转速，消除了滑差损失。对1000kW风机的对比结果表明，变频改造可以在1年多的时间内收回额外的投资，效率比液力耦合器高25%~50%。风机、水泵输入能量的15%~20%被电机及设备自身消耗，35%~50%被挡板或者节流阀消耗。变频调速可以消除节流损失，节能效果明显。工程中应先对运行时间长、负荷变化大的辅机进行改造，以缩短回收期。

3.4 管道保温优化与散热损失控制

热力管道散热损失属于热能输配环节中不能被忽略的能耗部分。传统的离心棉、硅酸铝等保温材料在长时间高温工作后性能急剧下降，必须使用新型保温材料进行更新。气凝胶保温材料由于具有很低的导热系数，所以在工业管道保温方面有明显的优势。以南通DN250蒸汽管道改造为例，原来的保温材料为120毫米的离心棉保温，运行11年以后保温层外表面温度达到40~50℃，热损失超过国标规定值的16W/m²最大允许值。用60毫米气凝胶

毡代替后,保温层厚度减小一半,管道外表面温度保持在 34.5°C 左右,环境温度与之相差不超过 5°C 。管道末端蒸汽温度从改造前的 210°C 提高到 221.3°C ,温降由原来的 15°C 降低到 3.7°C 。改造后每年的节能效益为300万元,投资回收期约为1.1年^[3]。

管道保温优化不能只看保温材料的选择,还要考虑保温结构是否完整。预制架空断桥隔热保温管道等新型结构形式,用减少热桥效应的方法来降低散热损失。对长距离蒸汽管网来说,保温性能提高一方面可以减少沿途热损失,另一方面也可以保证末端用户蒸汽参数,两者都具有一定的作用。

4 节能技术综合应用效果评估方法

4.1 基于热平衡与火用平衡的节能量核算准则

节能量的准确核算是评价节能技术效果的前提。仅仅依靠热平衡分析来估计实际的节能效果是不准确的,因为热量在数量上是守恒的,但是能量品质的变化不能用热平衡分析来反映。

科学的节能量核算应该同时使用热平衡和火用平衡两种方法。热平衡分析是求得系统输入与输出的热量差值,反映能量的量利用情况,火用平衡分析是计算各个环节的火用损失,体现能量质的损耗。二者结合可以评价节能措施所减少的热量损失,也可以评价其对系统可用能的保存作用。对于需要进行余热回收、提高热能品位的节能项目来说,火用平衡分析是必不可少的,因为回收的低温余热虽然热量很大,但是它的火用值却远远小于同量级的高温热能。具体实施时应该根据改造前后工况的不同,分别建立热平衡、火用平衡模型,用同样的基准条件做对比计算。节能量用标准煤当量表示,分为燃料节约量、电力节约量、热力节约量等不同的能源品种。

4.2 节能项目的全生命周期经济性评价模型

节能项目经济性评价不能只看初投资和年运行费用,应该从全生命周期角度来考虑。全生命周期成本模型包含初始投资、运行维护成本、设备残值等各方面,用折现回收期法可以衡量成本收益的动态变化。对热能动力装置节能改造项目来说,全生命周期评价要重视以下几个方面,即设备在使用过程中性能衰减情况,能源价格变化趋势,碳交易价格等政策变量的影响^[4]。以烟气余热回收热泵系统为例,虽然初投资较大,但是全生命周期内持续的节能效益使其有经济性。管道保温改造投资回收期一般较短,

但是要把保温材料全寿命更换成本考虑进去。在全生命周期经济性评价中还要考虑节能措施对设备可用率、检修周期等运行指标的影响,防止出现节能不节钱或者节能降可靠的片面决策。

4.3 节能措施对污染物与碳排放协同减排效应分析

热能动力装置节能措施一般都会产生污染物减排和碳减排的双重效果,协同效应是评价节能技术综合价值的重要方面。燃料消耗减少,二氧化碳排放也随之减少。用气凝胶管道保温改造可以每年节约标准煤1100吨,相应的减少二氧化碳排放量达到2875吨。烟气余热回收热泵系统回收89577千瓦时热量的同时可以减少二氧化碳排放9282千克。燃烧过程的优化措施除了减少燃料消耗以外,还可以通过抑制热力型、燃料型氮氧化物的产生来达到污染物协同减排的目的。节能政策的推行对于二氧化碳和二氧化硫的协同减排效果要好于二氧化碳和氮氧化物的协同减排效果。在评价节能措施的协同减排效果的时候,要分开计算直接减排效益和间接减排效益,再用统一的二氧化碳当量加以汇总。

4.4 多技术耦合应用的综合能效提升潜力评估

单项节能率一般不大,多个技术耦合可以产生“ $1+1>2$ ”的效果。系统集成依靠合理的设备耦合和流程设计来达到能量梯级利用的目的。以热电联产为例,把变工况优化、过剩空气精确控制、烟气余热回收、闪蒸汽回收、变频调速和保温优化集成起来,各个技术的效果互相加在一起而不是互相抵消。过剩空气优化可以减小排烟热损失,给下游余热回收创造更好的条件;闪蒸汽回收可以减少除氧器蒸汽消耗,间接降低锅炉燃料消耗。综合潜力评估应该使用系统级热力计算模型,不能简单地相加各单项节能率,要考虑技术间的交互影响,不能重复计算,还要做敏感性分析找出关键环节和参数,为持续改进指明方向。典型技术的节能效果数据在前面各个章节中已经分别给出,供电煤耗降低 $6\sim 15\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,年节约标煤千吨级不等,具体数值与机组容量、改造深度、运行工况有关。

图1为火用损分布,火用损分布可以反映节能改造的优先方向。锅炉单元的燃烧、传热过程是火用损失较大的地方,其次是汽轮机的膨胀做功和凝汽器排热。由此可知节能技术应该首先集中于锅炉侧的燃烧优化和传热强化,而不是只对热损失量大的地方进行改进。

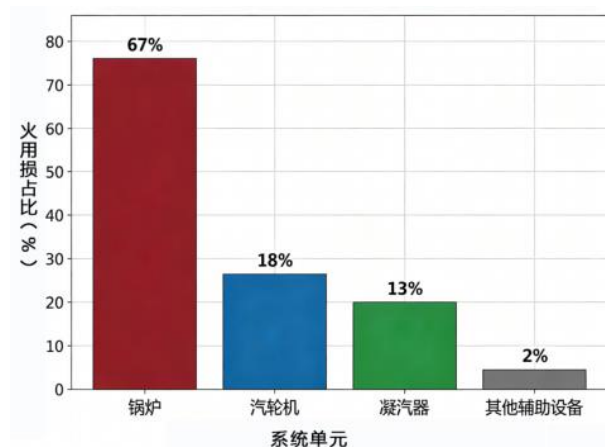


图1 典型火电机组火用损分布示意

5 结束语

热能动力装置节能属于一项包含诸多环节、多种技术的系统工程。本文根据火用分析来揭示能量损耗的机理和分布特点,认为锅炉燃烧、传热过程是节能潜力的主要富集区。在此认识的基础上,把节能技术分为主动型过程优化技术和被动型余热回收技术两种,分别论述了各自的应用要点和工程效果。节能技术选择和部署要遵照“先诊断,后治理,再评价”的科学程序。火用平衡分析给精准找到节能方向提供依据,热平衡和火用平衡结合起来的核算准则保证节能评价的客观性。全生命周期经济性评价以及协同减排效应分析,给技术方案的选择提供全方位的决策支撑。随着能源价格波动、碳交易机制完善、新型保温材料、高效热泵等技术的不断发展,热能动力装置节能的经济性、可行性会越来越高。多技术耦合应用系统级优化,

可以在现有的基础上发现更多的节能潜能,对工业领域的碳达峰、碳中和目标起到重要的促进作用。

[参考文献]

- [1]李聚涛,徐锦祥.火电厂烟气余热耦合提质利用热泵系统的设计与实现[J].大众科技,2025,27(2):29-31.
 - [2]余秀月,陈灵,范润生,等.600MW 供热汽轮机热力计算优化与灵活出力挖掘分析[J].汽轮机技术,2025,67(1):13-16.
 - [3]杨欢红,赵峰,黄文焘,等.考虑设备变工况特性的园区综合能源系统双层优化[J].电力系统保护与控制,2024,52(17):115-127.
 - [4]赵露露,庞秋婷,梁思泰.农业机械与渔船动力装置节能减排技术应用对比分析[J].农机科技推广,2025(12):48-50.
- 作者简介:梁泽超(1989—),男,汉族,河北邢台市襄都区人。