

双碳形势下电厂汽轮机运行中的节能技术应用分析

何玉东

(宁夏英力特化工股份有限公司热电分公司 宁夏 石嘴山 753200)

摘要: 汽轮机作为火力发电企业三大主机之一,发挥着能量转换的重要作用,其在系统中运行的可靠与否直接影响着整个机组系统的安全和经济运行。随着国家对“双碳”工作的推行和近年来煤炭价格的不断上涨,导致发电企业经营成本直线上升,甚至出现倒挂现象,为了缓解和降低企业经营成本,首先要进行的就是厂控节能降耗的措施的实施,汽轮机运行节能势在必行。

关键词: 双碳; 汽轮机; 供汽

1 电厂汽轮机节能降耗的意义

2020 年 9 月 22 日,国家主席习近平在第七十五届联合国大会上表示,中国将力争 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和,各企业为了积极响应国家号召采取各类措施降低能耗。加之 2021 年以来的煤价飞涨,极大地增加了火力发电企业的经营成本。而在火力发电热力系统中汽轮机是能量转换的重要设备之一,汽轮机的高效运行对节能降耗起着关键作用。但是各企业机组长周期运行期间,受到电网调峰影响,机组的启停次数增加,而汽轮机每一次的启停机都会造成汽轮机动静不分的摩擦,导致隔板汽封、叶顶汽封、轴端汽封磨损间隙增大、汽轮机动静叶片结垢等,从而会导致汽轮机效率降低。因此,提高汽轮机的工作效率,减少能耗损失,对于发电企业来说至关重要。鉴于此背景下,各发电企业为降低企业经营成本,会对汽轮机进行节能改造,如对汽轮机实施通流改造与增容改造、更换汽轮机汽封形式(刷式汽封、布莱登汽封)、增加汽轮机对外供汽能力等手段增加汽轮机效率,达到节能降耗的目的。

2 电厂汽轮机运行中高能耗产生的原因

2.1 汽轮机高、中缸汽耗大,汽轮机效率下降

随着新能源电力装机容量的快速增长,为了平衡电网负荷,火电机组调启、调停的次数也随之增加,而汽轮机的频繁启停会造成汽轮机轴端汽封以及级间汽封、叶端汽封的摩擦间隙增大,造成级间损失增大,进入汽缸各级之间的蒸汽损失也随之增加,汽轮机高、中、低缸缸效下降,热耗率会高于厂家设计值。

2.2 蒸汽参数低于设计额定值,造成汽轮机功率损失

因市场环境的不变化,各火电企业为了降低度电成本,降低供电煤耗,机组燃烧的煤质偏离设计煤种,导致燃烧调整困难,锅炉受热面金属壁温均出现超温情

况,为了防止金属壁温超温,使得主蒸汽出参数也随之降低。主蒸汽温度的降低使主蒸汽理想焓降低,为了维持当前负荷,会增加进汽量,蒸汽流量增加,汽耗增大,汽轮机效率一定程度地下降,造成功率损失。

2.3 日常运行中的调整和汽轮机启停操作控制不到位造成的损失

汽轮机日常运行中的经济性离不开运行人员的调整,汽轮机运行中加热器端差的控制不当造成给水温度的降低、汽轮机背压的监视调整不到位、机组启动时间的控制和启动过程中加热器的投运介入时间的选择等都会造成机组经济性能降低。

3 节能降耗措施

3.1 综合能源供应,提高机组供汽能力,降低低压缸排汽损失

在国家“双碳”背景下,利用大型火力发电厂的乏汽余热供暖,是解决我国当前低碳清洁供热短缺问题的有效途径。纯凝机组通过供热改造后和降低供电煤耗 40g/kWh 左右,投资较少,投资回收期短,是提高纯凝机组能效和经济性的最佳途径,城市周边和工业园区具备供热条件的亚临界纯凝发电机组应积极调研市场,在满足城市居民供热的前提下,不断拓展工业供汽,减少汽轮机的低压缸排汽损失,达到节能降耗的目的。一是汽轮机低压缸零出力供热改造,低压缸零出力技术在机组运行期间,采用可完全密封的液压蝶阀切除低压缸全部进汽,仅通入少量的冷却蒸汽,用于带走低压缸零出力改造后低压转子运行产生的鼓风热量,从而降低低压转子冷却蒸汽流量,在保证机组安全的情况下提高机组供热能力,降低机组发电负荷、提高机组深度调峰能力。二是采用高背压方式回收机组的乏汽余热,在机组原运行方式和工况不变的情况下,通过高背压改造(图 1),回收汽轮机乏汽余热向城市供热,变废为宝,提高机组的供热能力,降低机组的供热能耗,

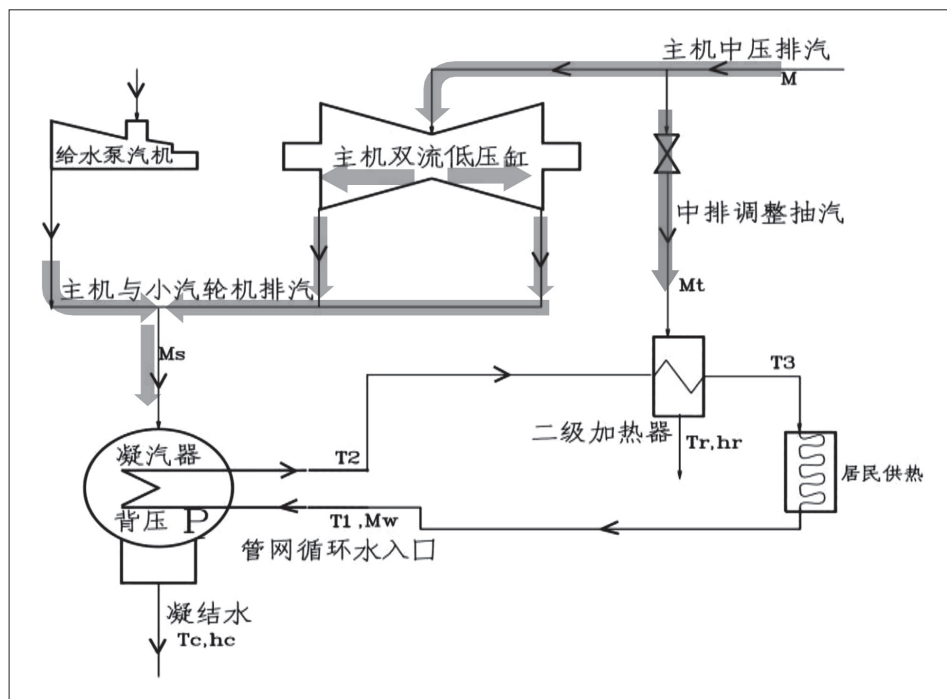


图1 高背压供热改造图

实现了节能减排的目的。

通过提高机组的供热能力，增加汽轮机供热电比，降低发电机组煤耗，达到节能降耗的目的。

3.2 提升锅炉受热面金属材质，提高主再热蒸汽参数至额定

目前火力发电企业锅炉末级过热器、低温再热器主流材质为12Cr1MoVG、SA213-TP347、高温过热器材质为TP347H材质，在机组实际运行中，受煤炭价格上涨影响，各企业为了降低发电成本，锅炉燃烧煤质偏离设计煤种，使得锅炉受热面存在超温现象造成锅炉受热面泄漏或爆管时有发生，为了防止锅炉受热面超温，各企业采取了降低主蒸汽参数的措施，防止和杜绝锅炉金属壁温超温的发生，主蒸汽初参数降低造成汽轮机功率降低，热耗增大。为了提高主蒸汽初参数，提升汽轮机功率，降低汽轮机热耗率，就要从锅炉金属材质上进行考虑，将锅炉高温过热器、末级过热器、低温过热器材质改为SA-213TP347HFG、SA213T91材质以适应当前燃煤煤质，减少超温爆管的发生。从而有效提高主蒸汽温度，提高汽轮机效率，减少热损耗。

除此之外，对电厂要加强电厂运行人员的技能培训，提升人员技术水平，加强日常运行管理，根据煤质的变化及时调整燃烧工况，杜绝因锅炉金属壁温超温造成的主蒸汽温度偏离设计值的现象发生，保证汽轮机运行时的蒸汽参数在设计值以上。

3.3 通过对汽轮机通流部分的改造，提高汽轮机效率

汽轮机通流部分改造是提高机组效率的有效途径，

从单位降耗成本、单位年节煤量成本看，“不改变进汽参数方案”与“小幅提升进汽参数方案”基本相当，对于热耗率明显偏离保证值的问题，亚临界机组可根据汽轮机设计规范和运行规程，通过专家论证、核算高温部件在冷态、温态、热态、极热态变工况的力学状况，确定安全余量。基于高温部件材料的强度，确定高温部件最高变动率以及相应的寿命。针对汽轮机转子等高温部件确定的灵活性极限，确定一次、二次旁路的容量和监控逻辑。

汽轮机通流部分的改造方法主要有：

(1) 高中压采用新型反动式叶片，优化气动性能，并适当调整高中压缸级数；

整高中压缸级数；

(2) 高中压隔板为焊接隔板，应改为装配式隔板，消除焊接变形，减少漏汽损失；

(3) 采用整体铸造式高中压内缸结构；

(4) 优化高中压进汽结构，降低进汽损失；

(5) 小间隙汽封技术应用；

(6) 优化汽轮机抽汽和加热器匹配；

(7) 低压部分用新型反动式叶片。

对通流部分的改造，改造后一般能使得机组在50%THA至额定工况减少热耗15kJ/kWh以上。

表1、表2是对300MW亚临界湿冷机组和600MW亚临界湿冷机组通流部分改造三种不同方案测算。

由上可知，汽轮机通流部分改造能够使亚临界机组供电煤耗降低约15g/kWh，改造后供电煤耗降至311g/kWh左右，达到节能降耗的目的。

某电厂亚临界330MW机组提温提效改造效果，改造后额定供电煤耗达299.72g/kWh，机组性能水平大幅提升，如表3所示。

某电厂亚临界600MW机组提温提效改造效果，改造后供电煤耗达到313.1g/kWh，如表4所示。

3.4 热力系统优化

考虑到原#3高加抽汽过热度较高，约为250℃左右，可以在#1高加后新设置一级外置式蒸汽冷却器（图2），利用此部分过热度进一步加热给水，提高给水温度，达到降低热耗的目的。降煤耗效果约为0.5g/kWh。

3.5 合理管控汽轮机的启动、停止，减少损失

随着新形势下新能源发电装机容量的增大，火电厂

调峰次数也随之增加，机组的启停频次增加，而汽轮机启停过程中也是能耗损失增大。汽轮机启动前要按照规程要求选择合理蒸汽参数，防止因参数选择不当造成汽轮机启动过程中振动增大，延长机组启动时间造成损耗。为避免机组启停期间各类异常情况的发生：一要加强运行人员的技术培训提升运行人员技术

能力；二是重大操作期间专业主管必须现场亲自监督，发现异常及时指导运行人员，避免异常扩大影响汽轮机启动；三是汽轮机启动过程中高中压低压疏水系统关闭时间的确认，在疏水门关闭后要第一时间进行校验，减少因疏水系统阀门不严造成蒸汽的损失；四是正确选择加热器的投运时间，机组冲转后加热器应随机启动，

有利于提升凝结水和给水温度，降低锅炉燃烧损失。

表 1 300MW 亚临界湿冷机组通流改造方案对比

项目	单位	方案 1	方案 2	方案 3
		不改变进汽参数	小幅提高进行参数	大幅提高进行参数
改造前进汽参数	MPa/°C /°C	16.7/538/538		
进汽参数	MPa/°C /°C	16.7/538/538	16.7/542/538	16.7/566/566
改造后供电煤耗	g/kW·h	311.8	311.4	308.1
供电煤耗降低值	g/kW·h	15.4	15.8	19.1
改造设备总投资	万元	4933	5033 ~ 5433	11387 ~ 12387
单位降低成本	万元 / (g/kW·h)	320	319 ~ 344	596 ~ 649

表 2 600MW 亚临界湿冷机组通流部分改造方案对比

项目	单位	方案 1	方案 2	方案 3
		不改变进汽参数	小幅提高进行参数	大幅提高进行参数
改造前进汽参数	MPa/°C /°C	16.7/538/538		
进汽参数	MPa/°C /°C	16.7/538/538	16.7/542/538	16.7/566/566
改造后供电煤耗	g/kW·h	308.9	308.5	305.1
供电煤耗降低值	g/kW·h	10.3	10.7	14.1
改造设备总投资	万元	9400	9700 ~ 10200	19600 ~ 21100
单位降低成本	万元 / (g/kW·h)	913	907 ~ 953	1390 ~ 1495

表 3 某电厂亚临界 330MW 机组提温提效改造效果

序号	条目名称	对应描述
1	改造前主参数	330MW, 16.67MPa/538°C /538°C
	改造后主参数	330MW, 17.0MPa/543°C /565°C
	改造后额定背压	4.9kPa(a)
2	汽轮机改造范围	保留高压外缸，中、低压缸整体改造
	汽轮机改造后指标	热耗不高于 7743.1kJ/kW·h，高中低压缸缸效分别不低于 91.1%、94.0%、89.2%
3	发电机改造范围	未增容，不做改造
4	锅炉改造范围	主要高温受热面，高温段集箱和管道等

表 4 某电厂亚临界 600MW 机组提温提效改造效果

序号	条目名称	对应描述
1	改造前主参数	600MW, 16.67MPa/538°C /538°C
	改造后主参数	660MW, 16.97MPa/566°C /566°C
	改造后额定背压	11kPa(a)
2	汽轮机改造范围	除低压缸外缸保留外，其他全部改造
	汽轮机改造后指标	热耗不高于 7954.5kJ/kW·h
3	发电机改造范围	线棒、连接线、氢冷器、水冷器、励磁系统等
4	锅炉改造范围	主要高温受热面、管道集箱、阀门等
5	辅机及旁路改造	高加、蒸冷器、旁路系统、阀门等

3.6 加强电厂工作人员的专业培训

在汽轮机发电的过程中，每一个细小的环节都会使汽轮机产生能量的损耗，因此，汽轮机的操作人员必须具备较高的专业技能和丰富的操作经验，才能稳妥地驾驭汽轮机的操作流程。所以，电厂管理人员要加强对汽轮机操作人员的实战培训，使操作人员在实训过程当中积累大量工作经验，避免在实际过操作过程当中因为经验不足而产生的失误。除此之外，工作人员还要严格把控因为外界因素对汽轮机产生的影响，从各方面来保障汽轮机的工作效益。

4 结语

在“双碳”目标和构建以新能源为主题的新型电力系统形势下，火电企业迫在眉睫的是积极响应政策，小到从日常工作中的点滴节能，大到机组的节能改造以及新政策影响下的供热改造，提高机组性能，达到节能降耗的目的。电力资源作为生产资源的重要组成部分之

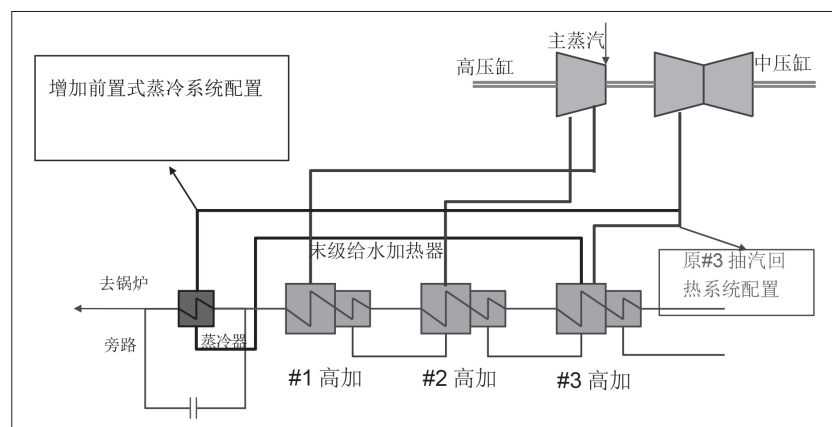


图2 增加蒸冷器示意图

一，能够为可持续发展战略的持续推进，以及绿色环保战略的实施增添卓越力量。汽轮机作为电厂当中的重要组成

装置，从根本上决定着电厂的生产效益，本文针对汽轮机在运行过程中所涉及的节能技术进行论述，提出一些观点，希望对电厂汽轮机的后续发展增添微薄之力。

参考文献：

- [1] 陈志军. 某电厂汽轮机中压转子动叶片开裂的原因[J]. 理化检验-物理分册, 2021, 57(11): 33-36.
- [2] 张永峰. 电厂汽轮机运行中的常见故障及应对策略探讨[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(30): 111-114.
- [3] 胡永颖. 电厂汽轮机节能降耗的主要措施探讨[J]. 皮革制作与环保科技, 2021, 2(19): 135-136.

(上接第94页)

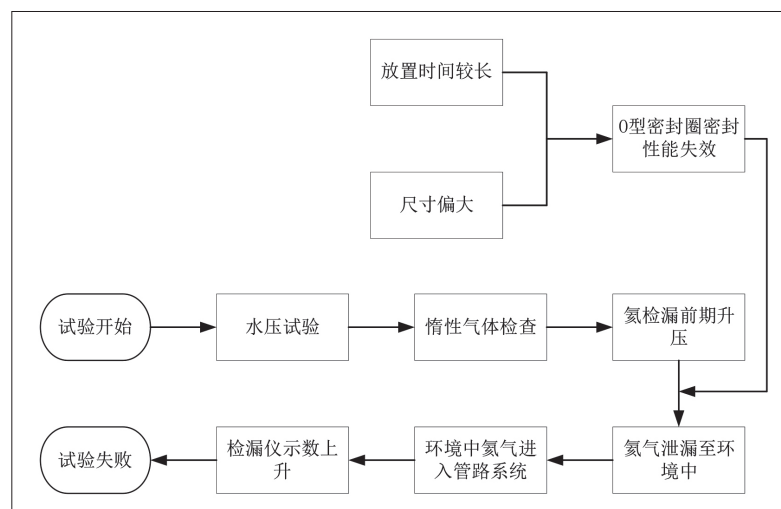


图7 案例试验失败发生机理流程图

3 结语

氦检漏是一种精度较高的密封性检验方式，环境中氦气浓度异常升高可能会影响试验结果甚至造成失败。因此，在氦检漏试验前要注意检查部件、工具、管路系统等各处密封性效果；若发生试验失败，应将氦气泄漏至环境中作为重要因素进行排查分析。为防止如案例试验中因环境氦气浓度异常升高导致定子氦检漏试验失败情形，可采取下列措施：

(1) 氦检漏试验前，不仅要检查外接检漏管路系统密封性，还要对定子部件密封工具、垫片、O型密封圈等进行检查，如有性能下降、尺寸偏差、杂质、凹坑、破损等情况，应在试验前更换，确保密封效果。

(2) 工具密封面处需选用硬度、抗拉强度、定伸强度良好的O型密封圈，O型密封圈与密封槽匹配尺寸保

证适宜，工具装配过程注意不要损坏O型密封圈。

(3) 增加氦吸枪法验证^[6]，若产品氦检漏试验失败，可通过氦吸枪方法检测工具密封处是否有氦气泄漏，如因较大氦气泄漏影响试验，则需调整密封工具，重新进行试验。

(4) 氦检漏时，可同时准备两台检漏仪，一台用于正常试验，另一台用于检测环境中氦气浓度，若出现氦检漏失败的情况，可直接通过观察另一台检漏仪示值的变化判断是否存有氦气泄漏至环境中，便于后续原因分析、问题处理。

参考文献：

- [1] 李梦启. AP1000 三代核电反应堆冷却剂泵屏蔽电机的技术特点[C]// 中国电工技术学会大电机专业委员会 2009 年学术交流会论文集. 贵阳, 2009: 1-4.
- [2] 黄成铭. AP1000 反应堆冷却剂泵[J]. 国外核动力, 2007, 028(6): 20-28.
- [3] 王超, 李藏雪, 张进宝, 等. 屏蔽主泵电机定子绕组腔密封设计[J]. 防爆电机, 2015, 50(5): 11-13.
- [4] 吴健如, 段贻杰. 故障树法在压水堆一回路功率波动原因分析中的应用[J]. 科技风, 2020(21): 79.
- [5] 丁栋, 成永军, 陈联, 等. 橡胶密封对氦质谱真空压力法检漏的影响分析及试验验证[J]. 真空与低温, 2020, 26(2): 114-119.
- [6] 谢永春, 张宏彬, 黄德家, 等. 氦氮泄漏检测技术原理及应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(9): 34-35+38.