

三压再热余热锅炉匹配下 M701F4 机组汽轮机变工况通流性能优化

杨大源

大唐惠州热电有限责任公司 广东 惠州 516123

【摘要】：三压再热余热锅炉蒸汽参数随燃气轮机负荷变化产生明显波动，M701F4 机组汽轮机易出现进汽流量分配偏差、级间焓降失衡及通流损失增大等问题。基于高、中、低压缸热力参数及级组运行数据，辨识锅炉蒸汽输出特性同汽轮机通流需求的偏离区间，提出滑压曲线修正、调阀方式优化、再热汽温协调及通流结构校核方法。优化后各缸效率、负荷适应能力及参数稳定性得到改善，汽轮机变工况运行保持在合理通流区间。

【关键词】：三压再热余热锅炉；M701F4 机组；汽轮机；变工况；通流性能

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.060

引言

M701F4 燃气—蒸汽联合循环机组负荷调整频繁，燃气轮机排气能量变化会直接改变三压再热余热锅炉的蒸发量、主蒸汽压力、再热汽温及各压力等级蒸汽比例。汽轮机通流部分按照一定进汽参数和流量分配关系设计，当锅炉侧输出偏离设计区间时，高压缸调节级压比、中压缸再热进汽状态、低压缸容积流量均会发生改变，继而引起级间焓降重新分配、叶栅攻角偏移、排汽损失增加及缸效下降。单纯依靠负荷指令调节难以消除锅炉侧和汽轮机侧的动态偏差，需要从热力参数、调节阀特性、级组通流能力及负荷变化过程入手，建立变工况匹配关系，明确性能劣化位置，再形成参数协调和结构优化方案。

1 三压再热系统变工况匹配特征分析

1.1 余热锅炉分压蒸汽生成规律

三压再热余热锅炉依托燃气轮机排气余热，分别在高压、中压、低压受热面内完成给水加热、蒸发及过热过程。燃气轮机负荷变化会引起排气温度、排气流量及热量分布同步改变，高压系统蒸汽产量受排气高温段影响较大，中压系统受再热需求和蒸发压力共同制约，低压系统则对尾部烟气温度及凝结水流量更为敏感。负荷降低后，高压蒸汽压力下降幅度通常快于流量变化，中低压蒸汽比例可能相对上升，导致三种压力等级蒸汽分配偏离设计状态。受热面传热温差、节点温差、接近点温差及汽包压力共同决定蒸汽生成边界，需结合热端能量梯级利用理念，协调各压力等级蒸发量，避免高品位热能利用不足及尾部排烟损失增加。

1.2 汽轮机各缸进汽参数变化特征

汽轮机高压缸进汽参数主要受主蒸汽压力、温度及调节阀开度控制，变负荷运行时流量变化会改变调节级压比和级组反动度，使叶栅进口攻角偏离设计值。高压缸排汽进入再热系统后，再热汽温、再热压力及压损决定中压缸进汽状态，温度控制滞后容易造成中压级组焓降分配不均^[1]。低压缸进汽由中压

排汽和低压补汽共同构成，负荷下降时容积流量减小，末级叶片可能进入低负荷非设计工况，排汽湿度、鼓风损失及回流损失随之变化。各缸参数并非独立波动，而是通过轴系功率分配、级间压力和排汽背压形成连续传递关系，需要依据高效、低碳运行理念，识别不同负荷区间的参数敏感点。

1.3 锅炉输出汽机需求耦合关系

余热锅炉蒸汽输出能力取决于燃气轮机排气能量及三压受热面的吸热分配，汽轮机通流需求则受负荷指令、阀门开度、级组流通面积和排汽条件共同约束。锅炉侧蒸汽流量增加但汽轮机阀门开度不足时，会形成主汽压力升高和节流损失增大；汽轮机需求增长快于锅炉产汽能力时，则可能出现主汽压力下降、再热汽温波动及缸间功率失衡。高压蒸汽流量变化还会改变再热蒸汽量，进而影响中压缸进汽焓值和低压缸排汽状态，形成多参数联动。耦合匹配应以热量供给、质量流量及压力等级协调为核心，建立燃机排气、锅炉产汽、汽机通流三者动态响应关系，使能量梯级利用、负荷响应速度和通流效率保持一致。

2 汽轮机通流性能偏离问题识别

2.1 高压缸调节级流量受限表现

高压缸调节级受主蒸汽压力下降、阀门节流及喷嘴有效流通面积限制，变负荷过程中容易出现级前压力升高、级后压力响应迟缓及流量增长受阻。调节阀开度增加后，实际进汽量未能同步提升，表明局部压损和流动阻力已超过合理范围。蒸汽进入喷嘴后速度分布不均，叶片进口攻角偏离设计值，级内焓降利用率下降，并造成后续压力级流量分配紊乱。识别时应结合阀位、级前后压差、主汽流量及高压缸效率开展关联诊断，形成数字化通流能力判定依据。

2.2 中压缸焓降分配失衡特征

中压缸焓降分配受再热蒸汽压力、温度、流量及级间压比共同影响，参数偏离时容易出现前部级焓降集中、后部级做功

能力不足的现象。再热汽温波动会改变蒸汽比容和膨胀特性,部分级组反动度发生偏移,导致静叶出口速度方向和动叶进口条件不匹配^[2]。级间压力测点可呈现非线性变化,中压缸效率下降幅度高于负荷下降幅度,并伴随排汽焓值升高。应依托热力参数在线重构技术,校核各级压力比、温降及功率贡献,准确锁定焓降转移位置。

2.3 低压缸容积流量偏移问题

低压缸容积流量由中压排汽量、低压补汽量、排汽压力及蒸汽湿度共同决定,低负荷状态下容易偏离末级叶片设计流量区间。流量不足时,叶片通道内轴向速度下降,蒸汽流向发生偏转,末级可能产生回流、鼓风及局部涡流;流量偏大时,排汽通道速度升高,排汽损失和湿汽冲蚀程度加重。容积流量偏移还会改变末级压力分布及轴向推力,使低压缸运行稳定性下降。诊断需综合低压缸进汽量、排汽真空、末级压差及湿度数据,建立多负荷区间动态边界。

3 通流性能劣化机理诊断

3.1 进汽参数偏差引发叶栅损失

主蒸汽压力、温度及流量偏离设计值后,蒸汽比容、声速及膨胀能力同步改变,导致喷嘴出口速度三角形发生偏移。静叶出口角度同动叶进口角度失配时,叶片前缘冲角增大,边界层分离和尾迹混合损失随之上升。压力偏低会削弱级内有效焓降,压力偏高则可能使局部马赫数升高,诱发激波损失及附加泄漏。温度波动还会改变蒸汽黏度和湿度发展路径,使后续级组流动状态连续偏离。诊断过程中需利用主汽参数、级前后压力、级组温降及效率数据建立关联模型,辨识叶栅损失对负荷、阀位及锅炉产汽变化的敏感程度,为精细化参数校正提供依据。

3.2 调节阀节流造成压损增大

调节阀承担汽轮机进汽量调节任务,阀门处于非全开状态时,蒸汽经狭窄流道产生高速膨胀、涡流分离及局部冲击,部分可用能转化为不可逆损失。阀前后压差扩大后,调节级实际进汽压力低于主蒸汽管道压力,级组有效焓降被压缩,单位蒸汽做功能力下降^[3]。多阀顺序开启不合理还会造成周向进汽不均,使调节级叶片承受交变气动力,并将流场畸变传递至后续压力级。压损诊断应同步分析阀门开度、阀前后压力、主汽流量及调节级压力变化,结合数字化阀门特性曲线识别高损耗开度区间,避免仅凭开度指令判断实际通流状态。

3.3 再热参数波动改变级组效率

再热蒸汽温度、压力及流量的波动会直接改变中压缸入口焓值和蒸汽比容,使中压级组膨胀线偏离设计轨迹。再热汽温偏低时,可利用焓降减少,后部级湿度提前增加,叶片表面水膜和湿汽损失加重;再热汽温偏高则会改变级间温度分布,并增加受热部件热应力。再热压力不稳会使各级压力比重重新

配,部分级组出现焓降集中,后续级做功能力减弱。锅炉侧再热器吸热变化、旁路调节及负荷响应滞后均会放大参数波动。诊断需建立再热参数动态偏差、级间压力、缸效及排汽焓值之间的映射关系,识别热力响应滞后和效率下降的关键区段。

4 锅炉汽机动态匹配优化方法

4.1 修正滑压运行参数控制曲线

滑压运行参数控制曲线应依据 M701F4 机组燃气轮机排气特性、三压再热余热锅炉产汽能力及汽轮机各缸通流需求重新标定,不宜沿用单一负荷对应单一主汽压力的固定关系。曲线修正需选取主蒸汽压力、再热蒸汽压力、高中低压蒸汽流量、调节级后压力及排汽真空等参数,划分低负荷、中间负荷和高负荷运行区间,识别主汽压力下降过快、再热汽温滞后及低压补汽比例失衡的临界点。低负荷区应适度降低主汽压力,减小调节阀节流压差,同时设置最低压力约束,防止高压缸末级容积流量过小;中间负荷区应保持压力增长速率同锅炉蒸发量增长速率协调,避免级间焓降突变;高负荷区需限制压力抬升幅度,保证再热系统吸热能力和高压缸通流裕度。控制逻辑可引入负荷变化率修正量和参数偏差反馈量,使滑压指令根据排气能量、汽包压力及缸效变化动态校正,提高锅炉产汽同汽轮机进汽需求的匹配精度。

4.2 优化调节阀组配汽运行方式

调节阀组配汽方式优化应从阀门开启顺序、开度组合、阀间负荷分配及切换区间入手,降低部分进汽造成的周向流场畸变和高压节流损失。原有顺序阀控制容易在阀门切换阶段形成较大压差,使调节级局部喷嘴组负荷集中,并引发级后压力波动。优化过程中需依据各阀流量特性试验结果,修正阀位指令同实际蒸汽流量之间的非线性关系,剔除迟滞、空行程及高损耗开度区间。低负荷阶段可采用适度均衡开启方式,扩大有效进汽面积,降低单阀高速射流影响;负荷提升阶段应按照阀前后压差和调节级压力变化平滑切换,避开关阀瞬间流量突增;接近额定负荷时应提高阀门全开比例,充分利用主蒸汽压力^[4]。配汽控制还需同滑压曲线、锅炉产汽速率及再热汽温调节联动,通过阀位偏差、流量偏差和级后压力偏差构成闭环校正,保持调节级周向受力均衡及后续级组流场稳定。

4.3 校核各级通流能力分配边界

各级通流能力分配边界校核应覆盖高压调节级、高压压力级、中压前后级组及低压末级通道,依据不同负荷下蒸汽流量、比容、压力比和湿度变化确定允许运行范围。高压缸重点校核喷嘴组有效面积、调节级临界流量及末级排汽容积流量,防止前部级流量受限或后部级膨胀不足;中压缸需分析再热蒸汽入口状态对级间压比和焓降分布的影响,控制局部级组超负荷及后部级做功能力衰减;低压缸应结合中压排汽、低压补汽和凝汽器背压,校核末级轴向速度、湿度及排汽损失边界。校核方

法可采用设计工况热平衡、实测参数修正和变工况计算相结合的方式,建立各级流量系数、压比和效率的动态关系。对于边界裕度不足的级组,应优先调整蒸汽分配、补汽比例和运行压力,必要时校正喷嘴面积及密封间隙,使各缸通流能力按照热量品位和做功需求合理衔接。

5 优化实施成效检验及稳定管控

5.1 各缸通流效率改善程度检验

各缸通流效率检验需以优化前后热力参数对比为基础,统一修正负荷、环境温度、凝汽器背压及蒸汽初参数差异,避免外部条件干扰评价结果。高压缸重点分析调节级后压力、缸效率、排汽温度及主汽流量变化,判断节流损失和级间流量偏差是否得到削弱;中压缸应结合再热汽温、再热压力、排汽焓值及级间压比分布,识别焓降重新分配后的做功能力变化;低压缸需核查进汽容积流量、排汽真空、末级湿度及排汽损失。检验过程可建立分负荷效率基准曲线,并利用修正后热耗、缸内效率偏差和单位流量功率贡献形成综合判据,使改善幅度具有可比性和连续性。

5.2 变负荷参数协调效果评价

变负荷参数协调效果应从响应速度、波动幅度和稳定恢复时间三个层面进行评价。负荷升降过程中,主蒸汽压力、再热汽温、高中低压蒸汽流量、调节阀开度及各缸级后压力应保持匹配变化,避免锅炉产汽滞后造成汽压下跌,或阀门响应过快

引起节流压差增大^[5]。评价时需提取负荷指令变化率、参数最大偏差、超调量及稳态恢复时间,分析滑压曲线、阀组配汽和再热控制之间的协同程度。对频繁调峰区间还应核查轴向推力、排汽真空及低压缸容积流量变化,判断通流系统是否存在二次波动。通过构建多参数时序关联模型,可准确识别协调薄弱环节,为控制逻辑持续修正提供依据。

5.3 运行数据闭环校正机制构建

运行数据闭环校正机制应覆盖采集、清洗、诊断、修正及验证全过程,形成面向 M701F4 机组变工况通流性能的动态管理链条。数据采集层需统一燃气轮机排气参数、余热锅炉三压蒸汽参数、汽轮机阀位、级间压力、缸效及凝汽器真空的时间基准,剔除测点漂移、异常跳变和工况切换干扰。诊断层依据分负荷基准模型识别压力比、流量系数和效率偏差,并将异常区间映射至滑压指令、阀门组合及补汽比例。校正结果经新工况数据验证后再写入控制参数库,同时设置偏差阈值和版本留痕,保证每次调整具备可追溯性,实现运行策略由固定设定向数据驱动的自适应优化转变。

6 结语

三压再热余热锅炉同 M701F4 机组汽轮机的动态匹配,决定了变工况下蒸汽能量分配及通流效率。合理修正滑压曲线、优化阀组配汽、校核级组边界,可降低节流和叶栅损失,改善各缸焓降分配。依托多参数评价及数据闭环校正,可保持机组调峰过程稳定高效运行。

参考文献:

- [1] 肖晨宇,邱爽,梁鹰,等.联合循环机组分轴轴向排汽汽轮机冷态启动振动优化[J].企业管理,2023,(S2):104-105.
- [2] 严梦月,康英伟.BHDB-M701F4-Q1 余热锅炉动态建模与仿真[J].现代制造技术与装备,2024,60(3):38-43.
- [3] 王一丰,翟春华,黄庆,等.大功率燃气轮机联合循环机组三压再热余热锅炉建模及变负荷运行规律研究[J].热力发电,2023,52(12):79-89.
- [4] 金伟伟,潘春风,魏海君,等.汽包内置双室平衡容器在 F 级三压再热余热锅炉上的改造[J/OL].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023,(10):67-71[2026-07-21].
- [5] 程朝辉,李压伟,刘洋.国内首台 M701F4 燃气蒸汽联合循环汽轮机供热改造方案浅析[J].东方汽轮机,2025,(1):21-25.