

汽机运行中上下缸温差大的分析及解决

赵振廷

包头东华热电有限公司 内蒙古 包头 014000

摘要：疏水系统是热力发电厂中的一个重要系统，其运行状况的好坏，会直接影响到全厂热力系统运行的经济性与安全性，若电厂接入的疏水系统存在问题，在实际生产中我们较为常见的一种故障就是汽轮机运行中出现上下缸温差大的问题，为此，本文分析了汽机运行中出现上下缸温差大的原因，并结合本人实际工作经验提出了相应的解决策略，以期提高汽机热经济性，更好的保障电厂的正常稳定运行。

关键词：汽机；运行；上下缸；温差大；问题；解决策略

热经济性与技术经济性是当前各发电厂主要系统配置的主要参照指标。对于疏水逐级自流系统的热经济性而言，其属于一种低级系统，改进这种系统的热经济性，可在系统中加疏水泵来实现。但对于不同疏水方式通常只有0.5%~1.5%的热经济性变化范围。在选择系统的疏水方式时，可通过比较技术经济指标来确定。虽然疏水逐级自流方式的实际热经济性并不好，但基于其系统具有简单、可靠、投资小的优点，并且易于维护，因此其应用也越来越广泛。

1 汽轮机上下缸温差大的原因分析

1.1 保温不佳导致汽轮机上下缸温差大的原因分析。

保温层脱落或密封不良，下缸保温层因施工工艺差、固定不牢或长期振动导致与缸体分离，形成空隙，冷空气直接接触缸体表面加速散热。上缸保温层密封失效（如接缝开裂），热量流失更快，加剧上下缸温差。保温结构设计缺陷，下缸需布置抽汽管道和疏水口，导致保温层覆盖不连续，局部散热面积增大。未采用分层保温技术，单一保温材料难以适应汽缸热膨胀收缩，易产生裂缝或空隙。保温材料性能不匹配，选用的保温材料导热系数过高或耐温性不足，无法有效阻隔热量散失。未针对下缸高散热区域（如抽汽管段）采用增强型保温材料，导致局部温差突增。检修维护不及时，运行中未定期检查保温层完整性，脱落部位未能及时修复，冷空气持续侵入，停机后未对保温层空隙进行填充密封，加剧停机阶段的温差积累。

1.2 启动方式异常导致汽轮机上下缸温差大的原因分析。

蒸汽参数不匹配，启动时主蒸汽温度或压力低于汽缸金属温度，导致蒸汽接触缸体后快速凝结，下缸因凝结水积聚而冷却速度加快，形成温差。非全周进汽时间过长，部分进汽模式下（如顺序开启调节阀不当），蒸汽仅作用于上缸区域，下缸受热不均，加剧上下缸散热

差异。暖机不充分，热态启动时未提前抽真空或暖管时间不足，冷蒸汽直接进入汽缸，造成下缸温度骤降。暖机转速选择不合理（如低速阶段真空过高），导致蒸汽凝结量增加，下缸散热加剧。真空控制不当，低转速阶段真空度过高，加速蒸汽凝结并增大下缸冷却强度，同时可能抽吸外部冷空气进入汽缸。疏水操作失误，启动时疏水阀未全开或管道堵塞，凝结水滞留汽缸内，下缸因积水吸热而温降显著。轴封送汽时机错误，未抽真空即提前向轴封送汽，冷蒸汽逆向流入汽缸，直接冷却下缸金属表面。

1.3 停机方法不当导致汽轮机上下缸温差大的原因分析。

停机负荷骤降，减负荷速度过快导致蒸汽流量急剧减少，下缸因散热面积大且保温较弱，温降速率显著高于上缸。轴封蒸汽过早切断，停机时未维持轴封蒸汽供应至缸温稳定，冷空气从轴封处倒灌进入汽缸，直接冷却下缸金属表面。疏水系统操作不当，停机后未及时开启疏水阀或疏水管道堵塞，导致凝结水积聚在下缸，积水吸热加剧下缸温降。疏水系统设计缺陷（如疏水管改接错误），冷汽/水通过疏水管倒流至汽缸内。停机后冷空气倒灌，高真空状态下未及时破坏真空，冷空气通过未严密关闭的阀门或管道间隙进入汽缸，优先冷却下缸。阀门关闭不严导致漏汽，停机后主汽阀、抽汽阀或疏水阀内漏，高/低温蒸汽或冷空气渗入汽缸，破坏温度平衡，停机后保温层维护不足，未及时修复脱落的下缸保温层，冷空气直接接触缸体，加速散热。

1.4 汽轮机正常运行中空气对流对上下缸温差的影响原因。

空气自然对流散热差异，汽轮机运转平台上下空气温度分层明显，平台下部环境温度较低，冷空气通过底部缝隙或未密封区域进入，形成自下而上的自然对流，持续冷却下缸金属表面。运行时下缸布置的抽汽管道、疏水管等金属部件暴露面积大，加速空气对流散

热,而上缸因蒸汽覆盖较完整,散热速率相对较低。保温层破损加剧对流,下缸保温层脱落或与缸体之间形成空隙时,冷空气直接穿透保温层空隙,在金属表面形成强制对流换热,显著降低下缸温度。保温层外护板密封不良(如铝皮开裂、固定螺栓松动),外部冷空气持续侵入保温层内部,形成局部高速气流通道。

通风系统设计缺陷,汽轮机厂房通风设计不合理导致冷空气流集中冲击下缸区域。运行环境温度湿度干扰,高温季节厂房空调冷风直吹汽轮机下部,或冬季环境温度加剧空气冷对流强度,扩大上下缸温差。

2 汽轮机上下缸温差大危害

2.1 汽缸变形与中心偏移。上缸温度高于下缸时,汽缸受热膨胀不均,形成“猫拱背”变形(向上拱起),导致汽缸同心度破坏和内部径向间隙减小。变形会引发隔板、叶轮偏离垂直平面,改变轴向动静间隙,严重时直接引发摩擦。

2.2 动静部件摩擦与损坏。汽缸变形后,下缸底部径向间隙可能完全消失,造成动叶片与静叶、轴封等部件直接摩擦,损坏设备。轴向间隙异常变化会加剧叶轮与隔板间的轴向摩擦风险,威胁转子稳定性。

2.3 振动增大与轴系失稳。汽缸膨胀不均导致轴承座偏移,破坏转子与汽缸的同心度,引发轴振超标甚至振动连锁保护动作跳机。长期振动超标可能加速轴承磨损、基础松动等二次故障。

2.4 转子弯曲与应力损伤。上下缸温差导致转子受热不均,产生径向温差,可能引发转子临时性弯曲,被迫停机。汽缸与转子的热应力叠加,可能诱发金属疲劳裂纹,降低设备寿命。

3 汽轮机上下缸温差大解决措施

3.1 汽轮机组保温措施优化方案。(1)保温材料升级与覆盖优化,采用高隔热性能的可拆卸保温套替代传统保温材料,确保对汽缸、阀门等异形部件实现紧密包裹,减少散热损失并提升热效率。重点加强下缸保温层完整性,采用多层复合结构(如硅酸铝纤维毡+陶瓷纤维毡)增强隔热效果,避免保温层脱落或空隙导致冷空气渗透。(2)密封与防冷风侵入处理,对下缸保温层与缸体结合处使用弹性密封材料(如耐高温硅胶)填充缝隙,阻断冷空气通过管道穿缸部位或螺栓孔侵入。外护板密封加固:修复铝皮开裂部位,紧固螺栓并增加密封条,消除外部冷风直接冲刷保温层的风险。(3)环境隔离与气流控制,挡风板安装:在汽轮机基座下方加装金属挡风板,引导厂房内气流绕行,减少冷空气对下缸的直接对流散热。封闭电缆沟与夹层:对汽轮机周边电缆

沟、管道夹层进行隔热封闭,防止冷空气通过地下通道上涌至缸体区域。(4)运行维护与监测,启动前检查保温层状态,及时修复脱落部位,并通过红外热成像定期监测上下缸表面温度分布,动态调整保温措施。停机时保持轴封供汽,避免冷气倒灌导致缸体骤冷,并通过汽缸加热装置对下缸局部升温以平衡温差。

3.2 汽轮机启停流程优化措施。(1)启动流程优化,蒸汽参数控制,采用滑参数启动方式,控制蒸汽温升率不超过 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$,特殊工况下可适度提升至 $3\sim 4^{\circ}\text{C}/\text{min}$,避免温度突变导致金属部件热应力超标。通过协调锅炉蒸汽参数,确保汽温呈线性变化,减少汽缸与转子的温差。暖机与预热,延长低速暖机时间(如 $500\sim 800\text{rpm}$),采用全周进汽方式均匀加热汽缸,优先通过法兰螺栓加热装置平衡法兰与螺栓温差。冷态启动时采用盘车预热技术,提前向轴封供汽,减少转子与汽缸的初始温差。疏水与真空管理,启动前提前开启所有疏水阀,确保凝结水及时排出,防止积水吸热导致下缸温度下降。维持合理真空度,避免过高真空加速冷空气倒灌,加剧上下缸温差。(2)停机流程优化,负荷与温度调节,负荷控制:停机前均匀降低负荷,速率控制在 $3\sim 5\text{MW}/\text{min}$,避免快速甩负荷导致汽缸骤冷。参数匹配:协调锅炉降压速率与汽轮机金属降温速率,保证主汽温与缸温匹配温差 $\leq 50^{\circ}\text{C}$ 。闷缸与余热利用,停机后立即关闭本体疏水阀,利用残余蒸汽维持缸内温度均匀性,减少冷空气侵入。延迟轴封蒸汽切断时间,维持轴封供汽压力稳定至缸温降至 200°C 以下。盘车与转子保护,转速归零后连续盘车至缸温 $< 150^{\circ}\text{C}$,防止转子因上下缸温差过大发生临时弯曲。辅助投用汽缸加热装置,对下缸局部补热,平衡停机阶段温差。(3)监测与动态调整,温差实时监控,监测上下缸温差、法兰内外壁温差等关键参数,温升率超限时立即暂停升速或降负荷。

使用红外热成像技术定期扫描缸体表面,识别保温层缺陷并及时修复。智能化控制系统,集成在线应力计算模型,根据转子寿命损耗率动态调整启停参数,实现温差与胀差协同控制。设置温差超标自动报警(如上下缸温差 $> 50^{\circ}\text{C}$ 触发停机保护)。(4)设备改进与维护,保温层升级,采用多层复合保温结构(硅酸铝纤维+纳米气凝胶),重点加强下缸保温层密封性,减少散热损失。对穿缸管道、阀门等部位加装可拆卸保温套,避免局部裸露导致温差扩大。疏水系统改造,优化疏水管道布局,避免冷凝结水积聚在下缸区域,疏扩容器连接管径需满足最大疏水量需求。

3.3 汽轮机疏水系统检查与改进方案。(1)疏水系

统检查要点,管道布局与完整性检查,核查所有可能积水部位(如主汽阀后、抽汽管道弯头)是否设置疏水管阀,确保管道直径满足最大疏水流量需求,避免因管径不足导致积水滞留。检查疏水管是否存在压力倒挂或错误改接问题,防止冷凝水通过管道返流至汽缸内部。疏水阀状态与动作测试,手动测试各疏水阀(包括电动阀、气动阀)的开关灵活性和密封性,重点关注停机状态下阀门严密性,防止冷汽渗入。验证疏水连锁逻辑是否符合工况需求,例如低负荷时自动开启疏水阀、真空异常时闭锁关闭等。积水与温度监测,使用红外测温仪或热成像仪检测疏水管道及下缸区域的温度分布,识别因疏水不畅导致的温差异常点。检查疏水扩容器液位和温度传感器数据,确认系统是否有效排出积水并避免冷蒸汽回流。(2)疏水系统改进措施,管道改造与优化,优先将高压缸本体疏水管直连至疏扩容器,减少中间弯头以降低流动阻力,必要时采用大坡度设计加速凝结水排出。对抽汽管道等易积水部位增设低位疏水罐,通过双疏水阀分级排放,避免单个阀门故障引发汽缸进水风险。

疏水阀升级与密封强化,更换易卡涩的老式疏水阀为耐高温型气动调节阀,提升动作可靠性,并通过定期注入石墨润滑剂减少阀门卡涩概率。对阀门法兰接口处使用金属缠绕垫片或石墨复合垫片加强密封,防止停机期间冷空气通过阀门缝隙倒灌。智能化监控与联锁保护,加装在线液位开关和温差传感器,当检测到疏水管温度低于设定值或液位异常时,自动触发报警并联动开启备用疏水阀。设置停机后疏水阀延迟关闭程序(如延迟30分钟),确保残余蒸汽充分排出后再切断疏水路径。

3.4 汽轮机设备状态定期检查方案。保温层完整性检查,每日目视检查汽缸、主汽阀等关键部位保温层,确认无开裂、脱落或受潮现象,特别关注下缸保温层密

封性,发现缝隙立即用耐高温密封膏修补。每周使用红外热成像仪扫描缸体表面,识别温度异常区域(温差 $>15^{\circ}\text{C}$ 需重点排查),定位保温失效点。疏水系统基础工况验证,每班次手动测试关键疏水阀(如主汽阀后、抽汽管道低位点)的开关灵活性,确认阀门动作无卡涩且关闭严密。检查疏水管道接口法兰是否存在渗漏,通过触感或测温仪检测管道温度梯度,异常低温段可能提示冷凝水滞留。

综上所述,疏水系统在热力发电中扮演着非常重要的角色。虽然汽机在实际的运行中还会存在上下缸温差过大等问题,但是笔者相信,通过上述的一些策略,能使汽机运行中上下缸温差控制在合理的范围之内,使其能满足人们对电力的需求,不断地促进企业和城市经济的发展。

参考文献

- [1]张全.汽机运行中上下缸温差大的问题及应对策略[J].河南科技,2023(12):109.
- [2]常延鹏.汽机启动过程中上下缸温差大的问题及应对策略[J].黑龙江科技信息,2023(32):6.
- [3]胡胜洪.发电机组启动过程中高压缸上下缸温差大的原因分析与措施[J].中小企业管理与科技(下旬刊),2021(09):324-325.
- [4]王国.汽轮发电机高压缸温差探析[J].广东科技,2021(24):106-108.
- [5]蒲敏.汽机运行中上下缸温差大的问题及应对策略[J].科技风,2022(09):180.
- [6]王飞.汽机运行中上下缸温差大的分析及解决[J].山东工业技术,2022(09):57.
- [7]王腾.汽机运行中上下缸温差大的问题和应对策略解析[J].山东工业技术,2022(08):235.