

一次再热汽轮机通流部分积盐成因与清洗工艺改进

詹国强

天富能源股份有限公司天河热电分公司 新疆 石河子 832000

【摘要】：一次再热汽轮机作为火电、核电等能源系统的核心设备，其通流部分的清洁度直接影响机组的热效率、运行稳定性及使用寿命。通流部分积盐会导致通流面积减小、气流阻力增加、叶片腐蚀损伤等问题，严重时引发机组非计划停机。本文结合工程实践，深入分析一次再热汽轮机通流部分积盐的主要成因，包括给水水质超标、蒸汽参数波动、机组启停工况不当等；系统梳理现有化学清洗、物理清洗等工艺的应用特点及局限性；在此基础上，从清洗介质优化、工艺参数调控、清洗时机把控等方面提出针对性的改进措施，为提升汽轮机通流部分清洗效果、保障机组安全经济运行提供技术参考。

【关键词】：一次再热汽轮机；通流部分；积盐成因；清洗工艺；改进措施

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.019

1 引言

一次再热技术通过将汽轮机高压缸排出的蒸汽重新加热至高温后送入中低压缸做功，显著提升了机组的热循环效率，已广泛应用于大容量、高参数汽轮机机组中。通流部分作为汽轮机实现能量转换的核心区域，涵盖喷嘴、动叶片、静叶片等关键部件，其内部流道的光滑度和完整性直接决定蒸汽的膨胀做功效率。在长期运行过程中，通流部分易出现积盐现象。积盐物质主要包括钠盐、钾盐、钙盐、镁盐及硅化物等，这些物质附着于流道表面，会破坏流道的气动性能，导致蒸汽流动损失增加，机组热耗率上升；同时，积盐层的不均匀分布会引发叶片振动加剧，增加疲劳损伤风险，且部分腐蚀性盐类会加速叶片金属材料的腐蚀，缩短设备使用寿命。据统计，因通流部分积盐导致的机组热效率下降可达1%~3%，严重时甚至会引发汽轮机卡涩、振动超标等故障，造成巨大的经济损失。目前，行业内已形成多种汽轮机通流部分清洗工艺，但实际应用中仍存在清洗不彻底、对设备损伤较大、清洗后机组稳定运行周期短等问题。因此，深入剖析积盐成因，优化改进清洗工艺，对保障一次再热汽轮机安全、高效、长周期运行具有重要的工程意义。

2 一次再热汽轮机通流部分积盐成因分析

一次再热汽轮机通流部分积盐是一个复杂的物理化学过程，其形成与给水水质、蒸汽流程、机组运行工况等多个因素密切相关。通过对多台不同容量一次再热汽轮机的运行数据、检修记录及积盐样本分析，明确其主要成因如下。

2.1 给水水质超标是积盐的根本源头

汽轮机通流部分的积盐物质主要来源于锅炉给水，若给水处理系统运行不稳定，导致水质指标超标，含盐杂质会随给水进入锅炉，经蒸发浓缩后进入蒸汽系统，最终在通流部分沉积。

首先，给水含盐量超标是核心因素。给水处理过程中，离子交换树脂失效、过滤装置堵塞等问题会导致给水中的 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及 SiO_3^{2-} 等离子含量超过标准限值。

这些离子在锅炉内随蒸汽蒸发被浓缩，当蒸汽中含盐量达到饱和状态时，会以结晶形式析出，随蒸汽进入汽轮机通流部分。其次，给水pH值调控不当会加剧积盐与腐蚀的耦合作用。pH值过低会导致锅炉金属管道腐蚀，产生的腐蚀产物（如 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 等）会混入蒸汽中，与盐类物质结合形成复合积盐层；pH值过高则可能导致给水中的硅化物稳定性下降，形成硅垢沉积。此外，给水中的有机物含量超标也会促进积盐形成，有机物在高温下分解产生的有机酸与金属离子结合，形成难溶性的有机酸盐，附着于通流部件表面。

2.2 蒸汽参数波动加剧积盐沉积

一次再热汽轮机的蒸汽参数（温度、压力）随机组负荷变化而波动，这种波动会破坏蒸汽中盐类物质的溶解平衡，促进积盐沉积。当机组负荷升高时，主蒸汽及再热蒸汽的温度、压力同步上升，蒸汽的溶解能力增强，原本沉积在通流部分的盐类物质会部分溶解；而当机组负荷降低时，蒸汽温度、压力下降，溶解能力减弱，溶解在蒸汽中的盐类物质会重新析出并沉积在流道表面。长期的参数波动会导致盐类物质在通流部分反复溶解与沉积，使积盐层不断增厚。此外，再热蒸汽系统的参数稳定性对积盐影响更为显著，若再热器换热效果不佳，会导致再热蒸汽温度偏低，蒸汽中盐类物质的饱和度升高，加速在中低压缸通流部分的沉积。

2.3 机组启停及变工况运行不当

机组启停过程中，通流部分的温度、压力变化剧烈，且蒸汽品质易出现波动，为积盐形成创造了条件。冷态启动时，锅炉给水温度较低，水质稳定性差，且锅炉内汽水分离装置尚未达到最佳工作状态，蒸汽带水量增加，导致大量含盐杂质进入通流部分；热态启动时，通流部分金属表面存在残留的水分，若启动前未彻底干燥，水分蒸发时会将盐类物质浓缩沉积。此外，机组频繁变工况运行会导致通流部分的气流速度、温度梯度发生剧烈变化，一方面会加剧蒸汽中盐类物质的离心分离与沉积，另一方面会导致积盐层出现剥落与二次沉积，形成不均匀的积盐层，进一步破坏通流部件的气动性能。

2.4 蒸汽系统结构及设备缺陷

一次再热汽轮机的蒸汽系统结构设计不合理或设备存在缺陷,会导致蒸汽流动过程中出现涡流、滞留区,促进盐类物质沉积。例如,主蒸汽管道、再热蒸汽管道的弯头、阀门等部位易形成局部涡流,蒸汽中的盐类颗粒在离心力作用下沉积在这些区域,进而随蒸汽进入通流部分;汽水分离装置、蒸汽过滤器等设备失效,无法有效去除蒸汽中的含盐杂质,会导致大量杂质直接进入通流部分。同时,通流部分的叶片、喷嘴等部

件若存在制造误差或磨损,会导致流道表面粗糙度增加,盐类物质更易附着沉积,形成积盐层。

3 一次再热汽轮机通流部分现有清洗工艺分析

针对汽轮机通流部分积盐问题,行业内已形成多种清洗工艺,根据清洗原理可分为化学清洗和物理清洗两大类,不同工艺的适用场景、清洗效果及局限性存在显著差异,具体对比分析如下表所示。

表1 具体对比分析

清洗类型	典型工艺	适用场景	清洗效果	局限性
化学清洗	盐酸基清洗	积盐以碳酸盐、氧化铁为主的通流部分	对碳酸盐、金属氧化物溶解能力强,清洗速度快	腐蚀性强,易导致叶片金属基体损伤;对硅化物积盐清洗效果差
	柠檬酸基清洗	积盐成分复杂,对设备腐蚀要求高的机组	腐蚀性弱,对多种盐类均有一定溶解效果	清洗温度要求高(80~90℃),清洗时间长;成本较高
物理清洗	高压水射流清洗	积盐层较厚、硬度较高的通流部件表面	清洗效率高,对顽固积盐去除效果好	对叶片表面造成冲击损伤;难以清洗流道内部狭窄区域
	干冰清洗	对清洗后干燥度要求高,怕水的通流部件	无二次污染,对金属基体无损伤	成本高,对薄积盐层清洗效率低;需要专业设备

从实际应用情况来看,单一清洗工艺难以满足不同积盐类型、不同积盐程度的清洗需求。例如,对于以硅化物为主的积盐层,传统化学清洗工艺溶解能力不足,清洗后仍有大量残留;高压水射流清洗虽能去除厚积盐层,但会导致叶片表面粗糙度增加,反而加速后续积盐沉积。此外,现有清洗工艺普遍存在清洗时机把控不当的问题,多数机组仅在积盐导致故障或停机检修时才进行清洗,未能实现预防性清洗,导致积盐对机组性能的影响持续存在。

4 一次再热汽轮机通流部分清洗工艺改进措施

结合现有清洗工艺的局限性及积盐成因分析,从清洗介质优化、工艺参数调控、清洗时机把控及辅助技术融合等方面,提出以下改进措施,以提升清洗效果,降低对设备的损伤,延长机组稳定运行周期。

4.1 优化清洗介质配方,提升针对性清洗能力

针对不同积盐成分,研发专用复合清洗介质,提升清洗的针对性和有效性。对于硅化物含量较高的积盐层,在柠檬酸基清洗介质中添加氟化物类助溶剂,利用氟离子与硅离子形成稳定的氟硅络合物,提高硅化物的溶解能力;同时添加缓蚀剂(如乌洛托品、苯并三氮唑),降低氟化物对金属基体的腐蚀作用,经试验验证,优化后的复合介质对硅化物积盐的去除率可达95%以上,且金属腐蚀速率控制在0.05mm/h以下。对于复合盐类积盐层,采用“分步清洗”介质体系:第一步采用碱性清洗介质(如氢氧化钠-碳酸钠混合液),去除积盐中的有机酸盐

和部分碳酸盐;第二步采用酸性清洗介质(如稀盐酸-柠檬酸混合液),溶解金属氧化物和残留的无机酸盐;第三步采用中性漂洗介质,去除残留的酸碱物质和溶解的盐类,避免二次沉积。分步清洗介质体系可根据积盐成分比例调整各步介质浓度和清洗时间,显著提升复杂积盐层的清洗效果。

4.2 调控清洗工艺参数,降低设备损伤

针对物理清洗和化学清洗的关键工艺参数进行优化,在保证清洗效果的同时,最大限度降低对通流部件的损伤。对于高压水射流清洗,优化射流压力、喷嘴角度及清洗距离:根据积盐层厚度调整射流压力,厚积盐层采用20~30MPa压力,薄积盐层采用10~15MPa压力;将喷嘴角度控制在30°~45°,避免垂直射流对叶片表面造成冲击损伤;清洗距离保持在200~300mm,确保射流覆盖均匀且冲击力适中。经优化后,高压水射流清洗对叶片表面的损伤深度可控制在0.01mm以下,满足设备检修标准。对于化学清洗,严格控制清洗温度、pH值及清洗时间:将柠檬酸基清洗介质的温度优化至70~75℃,在保证溶解效率的同时,降低高温对金属材料的氧化损伤;清洗过程中实时监测介质pH值,保持在2.5~3.5范围内,避免pH值过低加剧腐蚀;根据积盐厚度确定清洗时间,一般控制在4~6h,避免过度清洗导致金属基体暴露受损。

4.3 科学把控清洗时机,实现预防性清洗

改变传统“故障后清洗”的模式,建立基于机组运行参数的预防性清洗机制,根据积盐趋势及时开展清洗。通过在线监

测系统实时采集汽轮机热耗率、排气温度、振动幅度等参数，结合历史运行数据建立积盐评估模型，当监测参数超出预警阈值（如热耗率上升1.5%、振动幅度增加0.05mm）时，及时启动清洗程序，避免积盐层持续增厚。同时，结合机组启停周期制定定期清洗计划：对于频繁启停的机组，每半年开展一次局部清洗（重点清洗高压缸通流部分）；对于长期稳定运行的机组，每年开展一次全面清洗。预防性清洗可有效降低积盐对机组性能的影响，延长机组无故障运行时间。

4.4 融合辅助技术，提升清洗质量与效率

将超声波技术、脉冲冲洗技术与传统清洗工艺融合，提升清洗质量和效率。在化学清洗过程中引入超声波技术，利用超声波的空化效应破坏积盐层与金属表面的结合力，加速盐类物质的溶解，可使清洗时间缩短30%以上；在物理清洗后采用脉冲冲洗技术，通过周期性的压力脉冲将流道狭窄区域的残留积盐冲刷干净，提升清洗的全面性。此外，清洗后引入表面钝化处理技术，在通流部件表面形成一层致密的钝化膜，降低金属表面粗糙度，减少后续盐类物质的附着，延长积盐周期。钝化处理采用磷酸盐钝化液，处理温度控制在60~70℃，处理时间为2~3h，经钝化处理后，叶片表面的耐腐蚀性可提升40%以上。

5 实例验证

某电厂300MW一次再热汽轮机机组，运行5年后出现热耗率上升2.8%、高压缸振动幅度超标等问题，经检修发现通流部分存在严重积盐，积盐层厚度达0.3~0.5mm，积盐成分主要为钠盐、硅化物及氧化铁。采用本文提出的改进清洗工艺进行

处理，具体步骤如下：第一步采用碱性清洗介质（氢氧化钠-碳酸钠混合液）清洗2h，去除有机酸盐和部分碳酸盐；第二步采用优化后的复合酸性清洗介质（柠檬酸+氟化物+缓蚀剂），在72℃、pH值3.0的条件下清洗5h，溶解硅化物和金属氧化物；第三步采用中性漂洗介质漂洗3h，去除残留杂质；最后采用磷酸盐钝化液进行钝化处理。清洗完成后，机组通流部分积盐去除率达96.5%，叶片表面光滑无损伤。机组重启后运行数据显示，热耗率下降2.6%，高压缸振动幅度恢复至正常范围（0.08~0.12mm），后续稳定运行1年，未出现明显积盐迹象，验证了改进清洗工艺的有效性和可靠性。

6 结论

一次再热汽轮机通流部分积盐的形成是给水水质超标、蒸汽参数波动、机组运行工况不当及设备结构缺陷等多因素共同作用的结果。现有单一清洗工艺存在清洗针对性不足、对设备损伤较大等问题，难以满足机组安全经济运行的需求。

本文提出的改进清洗工艺，通过优化复合清洗介质配方、调控关键工艺参数、建立预防性清洗机制及融合辅助技术，显著提升了清洗效果，降低了设备损伤。实例验证表明，改进工艺可实现积盐去除率达95%以上，有效恢复机组热效率，延长稳定运行周期。随着汽轮机机组向高参数、大容量方向发展，通流部分积盐问题将更加突出。后续可进一步开展智能化清洗技术研究，结合大数据、人工智能等技术实现积盐状态的精准预判和清洗过程的自动化控制；同时研发环境友好型清洗介质，降低清洗过程的环境污染，为汽轮机机组的高效、绿色运行提供更有力的技术支撑。

参考文献：

- [1] 张德利.汽轮机通流部分积盐诊断方法研究[J].汽轮机技术,2022,64(03):209-212+216.
- [2] 尹依军,李和平,姚旭.饱和蒸汽汽轮机通流部位积盐诊断和处理[J].冶金动力,2022,(03):106-109.
- [3] 李后森,王金宝.浅谈超超临界汽轮机通流部分结垢防腐与防治对策[J].电力设备管理,2018,(07):70-74.
- [4] 李波.CC12-50/12/17型汽轮机通流部分积盐原因分析及改进措施[J].区域供热,2015,(04):132-134.
- [5] 童龙胜,万长胜.汽轮机高压缸通流部分积盐现象分析及处理[J].江西电力职业技术学院学报,2013,26(01):26-28.