

硝酸装置四合一机组汽轮机节能改造技术研究与应用

郭东瑞

国能乌海硝铵有限责任公司 内蒙古 乌海 016030

摘要: 四合一机组是硝酸装置生产的核心动力设备,汽轮机是四合一机组的重要组成部分,承担四合一机组的主要动力输出,其运行效率直接影响企业能耗与经济效益。针对当前汽轮机存在的轴封漏汽严重、汽耗偏高、热效率不足、设备老化及调控滞后等问题,本文开展节能改造技术研究与应用。通过优化汽轮机本体、蒸汽系统、驱动方式及控制系统,结合实证分析验证改造效果。结果表明,改造后汽耗率降低9.5%,热效率提升至89.3%,年节约中压蒸汽17712吨,投资回收期2年,兼具多方面效益,为同类机组节能改造提供技术参考。

关键词: 硝酸装置四合一机组;汽轮机;节能改造技术;应用

引言: 硝酸是化工产业核心基石原料,硝酸装置四合一机组作为双加压法生产的核心设备,汽轮机作为四合一机组的动力中枢,其节能水平关乎企业降本减碳与可持续发展。当前,我国硝酸工业面临绿色低碳转型压力,现有机组普遍存在能耗偏高、运行稳定性不足等问题,制约产业高质量发展。基于国家节能政策导向与企业需求,本文聚焦汽轮机节能改造,探索适配技术与方案,助力企业提升能源利用率。

1 硝酸装置四合一机组汽轮机运行现状及节能潜力分析

1.1 硝酸四合一机组及汽轮机结构与工作原理

(1) 硝酸四合一机组整体由汽轮机、氧化氮压缩机、空气压缩机、尾气透平膨胀机及齿轮箱组成,配套润滑、调节等辅助系统,工艺流程为:空气经空压机压缩后与气氨混合,进入氨氧化炉反应生成 NO_x ,经换热冷却后由 NO_x 压缩机加压送入吸收塔,尾气预热后进入尾气透平做功,汽轮机利用反应余热产生的蒸汽做功,补充系统能量亏损。(2) 汽轮机核心由汽缸、转子、导叶持环、轴瓦、调速系统、油系统等构成,型号为NK32/36/32,工作原理是将蒸汽热能转化为机械能,设计工况下输出功率5865kW,额定进汽量25.92吨/小时,蒸汽入口压力约4.0MPa、温度420℃左右,额定转速9200r/min,需稳定控制轴振动、轴位移及转速在8740~9660 r/min合理范围^[1]。(3) 协同运行机制为:汽轮机和尾气透平膨胀机作为原动机,共同驱动空压机和氧化氮压缩机,尾气透平膨胀机回收尾气能量做功,弥补压缩机组能耗,汽轮机补充两者能量差,通过齿轮箱协调转速,保障机组整体稳定运行。

1.2 汽轮机运行现状及存在的问题

(1) 通过现场监测采集数据发现,部分工况下汽轮

机运行参数与设计值偏差较大,轴瓦温度、蒸汽进出口参数波动超出合理范围,影响运行稳定性。(2) 能耗异常主要表现为蒸汽损耗偏高、热效率偏低,机组真空度不足,尾气透平膨胀机回收功率未达预期,增加了汽轮机蒸汽消耗。(3) 排查发现,汽轮机汽封片磨损、高温区域螺栓松弛等设备老化问题突出,部分机组实际工况与设计工况不匹配,导致运行效率下降。(4) 现有运行模式缺乏智能调控,负荷调整不及时,未充分利用EAOC系统等优化手段,难以实现能耗最优控制,制约节能效果发挥。

1.3 节能潜力评估方法与实践

(1) 构建以汽耗率、热效率、蒸汽回收率为核心的评估指标体系,结合机组运行参数,全面衡量节能潜力。(2) 采用理论计算与实证分析结合的方法,通过热力学公式计算理论节能空间,结合现场运行数据验证,确保评估结果准确可靠。(3) 量化分析显示,通过优化运行参数、修复老化部件,可降低汽耗率,提升热效率,年节约中压蒸汽数2万吨左右,节能潜力显著。

1.4 节能改造必要性论证

(1) 能耗数据显示,改造前机组能耗偏高,蒸汽浪费严重,开展节能改造可有效降低运营成本,解决能耗异常问题。(2) 国家节能政策导向推动化工企业降本减碳,企业可持续发展需求也要求提升能源利用率,节能改造符合政策与企业发展方向。(3) 现有成熟改造技术可实现机组适配优化,参考同类项目,改造后投资回收期约1-3年,技术可行且经济效益显著,具备充分改造价值。

2 硝酸装置四合一机组汽轮机节能改造技术方案设计

2.1 改造总体目标与原则

(1) 节能改造核心目标:实现汽耗率降低8%-10%,由改造前的25.92吨/小时降至23.58吨/小时;热效率提升

6%-8%，达到89%以上；年节约中压蒸汽1万-2万吨，切实解决能耗偏高问题，提升机组能源利用效率。（2）改造原则：坚守安全性优先原则，改造过程中杜绝影响现有生产系统稳定，确保施工与生产安全；遵循可靠性原则，选用成熟适配技术，保障改造后设备长期稳定运行；坚持经济性原则，控制改造投资，缩短投资回收期；兼顾兼容性原则，确保改造后设备与原有机组、辅助系统无缝衔接，不破坏原有生产流程。（3）改造范围与边界界定：改造范围涵盖汽轮机本体、蒸汽系统、驱动系统及控制系统，具体包括汽轮机叶片、密封件等核心部件更换，蒸汽管道优化，驱动方式调整及控制系统升级；明确改造边界为硝酸装置四合一机组配套汽轮机相关系统，不涉及其他机组及无关辅助设施，避免改造范围过度延伸^[2]。

2.2 核心节能改造技术选型与设计

（1）汽轮机本体优化技术：采用高效扭曲叶片替代原有低效能叶片，优化叶片型线，减少蒸汽流动阻力；升级汽封结构，选用柔性密封件，降低蒸汽泄漏量；对汽轮机汽缸、转子等关键部件进行精密加工修复，提升本体运行效率，适配实际工况需求。（2）蒸汽系统节能改造：新增汽封漏汽回收装置，对汽轮机前后汽封信号管排出的乏汽进行回收利用，重新引入生产系统；优化蒸汽进出口参数，调整蒸汽压力、温度至最优区间，减少蒸汽损耗；改造蒸汽管道保温层，降低管道散热损失，提升蒸汽利用效率。（3）驱动方式优化技术：结合机组实际负荷需求，采用变频调速驱动技术替代传统驱动方式，实现转速精准调控，根据生产负荷变化实时调整输出功率，避免能源浪费。^[3]（4）控制系统升级技术：升级自动化控制系统，引入PLC智能调控系统，实现运行参数实时监测、自动调整；搭建数据采集与分析平台，实时捕捉汽耗率、热效率等关键指标，通过智能算法优化运行模式，实现能耗最优控制。

2.3 改造方案详细设计

（1）设备选型与参数匹配设计：选用与现有机组规格适配的高效叶片、柔性密封件、余热回收装置及PLC控制系统，确保设备参数与汽轮机设计工况、原有辅助系统匹配，叶片材质选用耐高温、抗磨损合金材料，延长设备使用寿命；严格核对设备型号、规格，避免选型偏差。（2）改造施工流程与工艺要求：制定分阶段施工流程，依次为停机拆解、部件更换、管道改造、控制系统安装，明确各工序施工时长与衔接要求；重点把控叶片安装、密封装配、管道焊接等关键工序，要求焊接合格率达到100%，叶片安装间隙误差控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内。

（3）改造过程中的设备利旧与新增方案设计：对原有状态良好的转子、齿轮箱等设备进行检测、维护后继续使用，降低改造投资；新增余热回收装置、PLC控制系统、变频调速设备等核心部件，明确新增设备的安装位置、连接方式，确保与原有设备协同运行^[4]。（4）安全防护与应急方案设计：施工区域设置警示标识，划分安全作业区，落实临时用电、动火作业、高处作业等安全措施；配备充足的消防器材及应急器材，制定人员触电、灼烫、高处坠落、物体打击、设备故障、管道泄漏等突发事件的应急处置流程，明确应急责任分工，确保施工过程安全可控。

2.4 方案可行性验证

（1）技术可行性分析：选用的叶片优化、密封升级、变频调速及智能控制等技术均为化工行业成熟应用技术，已在同类硝酸四合一机组改造中得到验证，设备兼容性强，施工工艺成熟，可适配现有机组规格，不存在技术瓶颈，改造后能够实现参数精准调控。（2）经济可行性分析：改造总投资估算约480万元；结合节能目标测算，年节约中压蒸汽成本约283.4万元，扣除运维费用后，年净收益约245万元，投资回收期约2年，经济效益显著，符合企业降本需求。（3）风险识别与应对措施设计：识别出设备选型偏差、施工工艺不达标、试运行故障等潜在风险；针对选型偏差，建立设备选型双重审核机制，由技术部门与采购部门联合核对；针对施工工艺问题，安排专业技术人员现场指导；针对试运行故障，制定常态化排查方案，及时优化调整，确保改造后机组稳定运行。

3 硝酸装置四合一机组汽轮机节能改造技术应用与效果验证

3.1 改造实施过程与控制

（1）施工前期准备：按照改造方案完成汽轮机叶片、密封件、余热回收设备等核心设备采购，优先选用行业成熟适配产品并完成质量验收；对施工及运维人员开展技术培训，重点讲解设备安装规范、安全操作流程及调试要点；完成现场布置，划分施工区域、搭建临时防护设施，清理施工周边管线，避免影响现有生产系统。（2）分阶段施工实施与关键工序控制：包括停机拆解、部件更换、设备安装三个阶段施工，严格把控汽轮机叶片安装、密封件装配、新增设备安装、管道焊接等关键工序，确保汽轮机叶片间隙均匀、密封件接触严密、新增设备规范安装、管道焊接达标；合理规划施工进度，避免交叉作业，保障施工有序推进。（3）施工过程中的质量控制与安全管理：安排专业技术人员，对每

道工序进行质量验收,重点验收设备部件安装精度、管道密封性等;落实安全管理制度,规范临时用电、动火作业、高处作业流程,施工作业人员按要求佩戴劳动防护用品,作业期间安排专人监护,定期开展安全巡查,杜绝安全隐患。(4)改造后的设备调试与试运行:完成设备安装后,先进行单机调试,优化控制系统参数;再进行联动调试,模拟实际工况验证设备协同运行效果;试运行周期为15天,实时监测运行参数,及时调整优化,确保机组达到设计运行标准^[5]。

3.2 运行效果监测与数据采集

(1)监测指标与监测方案设计:选取汽耗率、热效率、轴振动、轴位移等作为核心监测指标,制定常态化监测方案,采用自动化监测仪表实时采集数据,每天整理分析,建立监测台账。(2)改造前后运行参数对比测试:针对改造前后汽轮机的蒸汽入口压力、温度、转速、轴振动、轴位移等关键参数,开展对比测试,重点分析参数稳定性及与设计值的契合度,验证改造效果。

(3)能耗数据、效率数据的实时采集与整理:实时采集蒸汽消耗、电能消耗等能耗数据,以及汽轮机热效率、做功效率等效率数据,定期整理汇总,形成数据对比报表,为效果分析提供支撑。

3.3 节能效果与综合效益分析

(1)节能效果量化分析:改造后汽耗率降至23.46吨/小时,较改造前降低9.5%;热效率提升6.2%,达到89.3%;年节约中压蒸汽17712吨,超额完成节能目标。

(2)经济效益分析:年节约蒸汽成本约283.4万元,改造投资回收期约2年,经济效益显著,有效降低企业运营成本。(3)环境效益分析:按蒸汽耗煤折算,年节约标煤约1860吨,减少CO₂排放约4966吨,助力企业实现降本减碳目标,符合绿色发展要求。(4)运行稳定性与可靠性提升效果分析:改造后汽轮机轴振动、轴位移等参数波动控制在允许范围,非计划停机次数较改造前减少80%,设备运行稳定性和可靠性大幅提升。

3.4 改造过程中的问题与解决措施

(1)实施过程中出现的技术难题与应对方案:在更换叶片过程中,低压导叶持环锈蚀卡涩无法拆出,通过制作、使用专用工装,低压导叶持环顺利拆出,确保更换叶片工作有序推进;管道焊接后焊缝出现轻微泄漏,打磨焊缝并重新焊接,经检测达标。(2)试运行阶段的故障排查与优化调整:试运行期间出现转速波动,排查发现是控制系统参数不合理,优化PID调节参数,实现转速稳定控制;热效率未达预期,通过清洗换热器列管、提高蒸汽品质等措施,热效率得到显著提升。(3)问题解决后的效果验证:针对解决的问题开展专项验证,叶片安装、管道密封性均符合要求,转速波动控制在 $\pm 5r/min$ 内,热效率稳定在89%以上,问题解决效果良好,确保机组稳定高效运行。

结束语

本文完成硝酸装置四合一机组汽轮机节能改造技术的研究、方案设计与实践应用,有效解决了机组原有能耗异常、运行不稳定等问题,圆满达成预期节能目标,验证了改造技术的可行性与实用性。改造不仅降低企业运营成本、减少碳排放,还提升了设备运行可靠性。未来可结合智能化、大型化发展趋势,优化改造技术细节,拓展技术应用场景,为硝酸工业节能降碳、自主化升级提供更有力的技术支撑与实践借鉴。

参考文献

- [1]郑鹏图.双加压法稀硝酸生产装置运行情况[J].化工设计通讯,2021,47(04):132-135.
- [2]张国兴.浅谈硝酸放空尾气余热回收利用[J].氮肥技术,2023,40(05):36-38.
- [3]刘得志,周胡平,宋赞.蒸汽动力空压机代替电驱动空压机的可行性分析[J].冶金动力,2024,13(03):31-34.
- [4]王鹏,魏培珍.汽轮机驱动压缩机组的节能改造应用[J].建筑技术科学,2024,21(04):179-182.
- [5]岳阳.双加压法硝酸生产余热回收工艺的创新与实践:以汽轮机改电机驱动为例[J].建筑理论,2025,33(05):215-218.