

空气压缩机余热利用探究

彭步灿¹ 杜侃侃¹ 杨波²

1. 中国电建集团山东电力建设有限公司 山东 济南 250014

2. 中国电建集团核电工程有限公司 山东 济南 250102

摘要: 空气压缩机运行过程中产生大量中低温余热, 具有显著的回收利用潜力。本文系统解析了余热产生机理与特性, 探讨了基于热交换理论的关键回收技术, 构建了涵盖工艺用热、热泵增值及动力再生的梯级利用体系。重点研究了系统集成优化与智能控制策略, 并建立了全生命周期经济性分析模型, 为提升空压机能效、实现工业节能降耗提供了系统的技术路径与理论支撑。

关键词: 空气压缩机; 余热利用; 热交换理论; 梯级利用; 系统优化

引言: 在能源日益紧张的当下, 提高能源利用率成为关键。空气压缩机作为工业领域广泛应用的设备, 运行中产生大量余热, 若能有效利用, 可显著降低能源消耗与运行成本。然而, 当前空气压缩机余热利用存在诸多问题, 如回收技术不完善、利用方式单一等。因此, 深入探究空气压缩机余热利用, 挖掘其潜在价值, 对推动工业节能减排、实现可持续发展具有重要意义。

1 空气压缩机余热资源解析

1.1 余热产生机理

空气压缩机运行过程中余热产生源于多重物理过程。压缩阶段气体温度显著升高, 以单级活塞式压缩机为例, 当进气压力0.1兆帕、排气压力升至0.7兆帕时, 理论绝热压缩终温可达400摄氏度以上, 实际工况通常稳定在150至200摄氏度^[1]。此过程伴随熵增现象, 气体分子无序度增加导致不可逆热损失, 压缩比达到5时系统熵增量约为初始状态3倍。机械摩擦损耗方面, 活塞环与气缸壁、轴承滚动物体与滚道间相对运动产生摩擦热, 中小型压缩机机械效率通常在85至90之间, 意味着10至15输入能量转化为热能。电机损耗包含铜损与铁损, 额定工况下电机温升达60至80摄氏度, 对应损耗功率占输入功率5至8单位。多热源耦合机制表现为压缩热、摩擦热与电机热通过导热对流在系统内传递, 其中压缩热占比最高, 达总余热70至75单位。

1.2 余热特性表征

余热温度-流量动态分布呈现显著时空特征。沿压缩腔轴向方向, 进气端至排气端温度梯度可达每米50至80摄氏度, 排气侧温度峰值维持时间与压缩机转速成正比, 当转速提升至每分钟1500转时, 高温区持续时间较每分钟750转工况延长约1.5倍。流量特性方面, 单台20立方米每分钟排量压缩机产生的余热介质流量约为25至30

立方米每小时, 随负载率变化呈现线性响应关系。热能品质分级依据温度区间划分, 100摄氏度以上高温段定义为高品质热能, 具备直接利用价值; 60至100摄氏度中温段需通过热泵提升能级后使用; 60摄氏度以下低温段通常需辅助热源方可实现有效回收。可回收热量计算采用能量平衡法, 以某型螺杆压缩机为例, 输入功率55千瓦机型在连续运行8小时工况下, 理论可回收余热总量达320至360兆焦, 相当于10至12千克标准煤当量。

1.3 余热资源评估

能流密度分析显示, 压缩机表面散热强度与功率等级正相关, 55千瓦机型外壳表面能流密度约为800至1000瓦每平方米, 较15千瓦机型提升2.5至3倍。回收价值量化框架构建基于热力学第一定律, 以产生1吨蒸汽需消耗0.12至0.15吨标准煤为基准, 同等热量余热回收可替代传统燃料消耗, 实现年节约运行成本数万元级规模。典型工况波动规律表现为昼夜温差导致的进气温度变化, 夏季进气温度35摄氏度时余热产量较冬季5摄氏度工况增加15至20单位, 负载率波动对余热稳定性的影响更为显著, 负载率从60提升至100过程中, 余热总量增长曲线斜率达0.8至1.2单位每百分比负载变化。

2 余热回收技术原理

2.1 热交换基础理论

传热过程遵循能量守恒定律, 热流密度与温度梯度呈正相关关系。以平板换热器为例, 当冷热流体温差维持在50至80单位时, 单位面积传热量可达2000至3500瓦每平方米, 具体数值取决于材料导热系数与流体流速。对流换热系数是表征流体与固体表面热交换能力的重要参数, 空气自然对流系数约为5至25瓦每平方米开尔文, 强制对流条件下可提升至50至200单位, 水基流体在湍流状态下的换热系数更可达1000至6000单位。强化传热

技术路径包含表面扩展与流体扰动两类,采用翅片结构可使换热面积增加3至8倍,螺旋扭曲管设计则能提升流体湍流强度,实测数据显示此类改进可使总传热系数提高40至70单位。多相流换热模型需考虑气液两相分布状态,当蒸汽质量流量达到0.5至1.2千克每秒时,泡状流向弹状流转变会导致换热系数突变,此阶段局部换热强度可提升2至3倍,但伴随压降增加15至25单位。

2.2 回收装置核心设计

油-气-水三介质换热器采用分层流道拓扑结构,压缩空气走壳程,润滑油与冷却水分置两个独立管程,通过导热板实现三介质间接换热。某型20立方米每分钟排量压缩机配套换热器设计显示,油侧流道当量直径控制在8至12毫米,气侧流速维持15至20米每秒,水侧雷诺数需大于10000以确保湍流状态^[2]。微通道换热表面优化通过激光加工技术实现,通道水力直径0.5至1毫米的微结构可使换热系数提升至传统设计的2至3倍,但需控制壁面粗糙度小于0.8微米以避免压降过度增加。防腐蚀设计采用双金属复合层结构,基材选用316L不锈钢,表面喷涂铝镁合金涂层厚度80至120微米,实测在80摄氏度、pH值6至8工况下腐蚀速率低于0.002毫米每年。防结垢策略包含水流速控制与表面改性两方面,将水侧流速维持在1.5至2.5米每秒可抑制碳酸钙结晶,表面接枝聚乙烯吡咯烷酮分子层能使结垢倾向降低60至70单位。

2.3 热能储存与调控

显热储热材料相变温度匹配需兼顾用热需求与材料特性,熔点120至150摄氏度的复合硝酸盐适用于高温工况,比热容达1.8至2.2千焦每千克开尔文的材料可在温差50摄氏度条件下储存热量180至220兆焦每立方米。储热系统充放热速率控制通过流量调节实现,当导热油流速提升至0.8至1.2米每秒时,储热模块充热时间可缩短至40至60分钟,但需确保出口温度波动小于5摄氏度。热损失抑制策略包含多层保温结构与真空隔热技术,采用50毫米厚硅酸铝纤维毡与20毫米气凝胶复合保温层,在200摄氏度工况下表面温升可控制在环境温度加25摄氏度以内,热损失密度低于15瓦每平方米。动态调控系统通过温度传感器网络实时采集8至12个关键点数据,PID控制器响应时间小于3秒,能将储热装置出口温度波动范围控制在设定值正负2摄氏度区间。

3 余热梯级利用体系

3.1 工艺端利用路径

物料预热环节需实现温度场精准匹配,以化工反应釜进料预热为例,当余热介质温度为120至150摄氏度时,可将原料从25摄氏度加热至80至90摄氏度,每吨物

料预热消耗热量180至220兆焦,较传统蒸汽加热节能40至50单位。干燥过程热湿耦合机制表现为热风温度与物料含水率的动态平衡,采用两级干燥系统时,第一级利用100至110摄氏度热风将物料含水率从60降至20,第二级采用60至70摄氏度热风完成终干,此配置可使单位质量干燥能耗降低至传统工艺的0.6至0.7倍。清洗工序热能梯度供给通过多级换热实现,高温段(80至90摄氏度)用于除油清洗,中温段(50至60摄氏度)用于漂洗,低温段(30至40摄氏度)用于终了冲洗,某汽车零部件清洗线实测数据显示,梯级供热可使清洗剂消耗量减少30至35单位,同时缩短工艺周期15至20分钟。

3.2 热泵增值利用

压缩式热泵COP提升依赖压缩机效率与换热器优化,采用双级压缩中间补气技术可使低温工况COP从3.0提升至3.8至4.2,当蒸发温度从5摄氏度降至-10摄氏度时,性能衰减率较单级系统降低40至50单位。吸收式热泵驱动热源匹配需考虑温度对口,以溴化锂-水工质对为例,驱动热源温度需维持在140至180摄氏度区间,当热源温度提升至160摄氏度时,制热系数可达1.6至1.8,较120摄氏度工况提升0.3至0.4单位。多级热泵系统集成通过串联不同温区机组实现能量梯级利用,三级系统可覆盖-20至120摄氏度温域,某化工园区余热回收项目显示,该配置较单级系统年节能量增加2500至3000兆瓦时,相当于减少标准煤消耗800至1000吨。

3.3 动力再生方案

有机朗肯循环工质选型需兼顾环保性与热力学性能,R245fa与R1233zd(E)等低GWP值工质在100至150摄氏度温区表现优异,某型100千瓦余热发电装置采用R245fa时,系统热效率可达12至15,较蒸汽轮机方案提升3至4倍。双工质循环效率优化通过工质对匹配实现,非共沸混合工质(如R600a/R245fa)在蒸发过程存在温度滑移,可使换热过程平均温差缩小5至8摄氏度,实测数据显示此类配置可使循环效率提升至18至20单位^[3]。余热-光伏联合发电架构采用热电联产模式,白天光伏组件背板温度可达60至70摄氏度,通过热电模块可回收电能30至50瓦每平方米,夜间利用余热锅炉驱动有机朗肯循环,某示范项目年综合发电量达80至90万千瓦时,较单一能源系统提升40至45单位。

4 系统集成与优化

4.1 能量流网络构建

质量-能量协同调控模型通过物质流与能量流的动态耦合实现系统优化,以某化工园区余热网络为例,当蒸汽管网压力波动范围控制在0.2至0.5兆帕时,通过调节各

用热单元流量分配,可使整体热能利用率提升至82至85单位,较传统固定分配模式提高12至15单位。多源热能分配算法采用分层优化策略,优先满足高温用热需求后逐级向下分配,当存在120摄氏度、90摄氏度、60摄氏度三级热源时,算法可在0.5秒内完成最优分配方案计算,确保各级热能供需偏差小于2摄氏度。焓损失最小化路径通过热力学第二定律分析确定,针对压缩空气系统余热回收,优化换热器布置使焓损失从28降至18至20兆焦每吨产品,关键措施包括减少传热温差至8至10摄氏度、缩短高温介质停留时间至30至40秒。

4.2 智能控制策略

基于负荷预测的动态调节系统采用神经网络算法,通过采集历史运行数据训练模型,当输入未来24小时气温、生产计划等参数时,预测误差可控制在正负1.5单位以内,据此提前调整余热回收装置运行参数,使系统响应时间从手动调节的15分钟缩短至30至40秒。多变量解耦控制架构针对温度、流量、压力等多参数耦合问题,采用前馈-反馈复合控制策略,在某钢铁企业余热锅炉控制项目中,该架构使蒸汽温度波动范围从正负8摄氏度降至正负2摄氏度,同时将燃料消耗量减少8至10单位每吨蒸汽。故障自诊断与容错机制通过传感器冗余设计与逻辑判断算法实现,当某关键温度传感器故障时,系统可在2至3秒内切换至备用传感器数据,并依据相邻测点数据推算真实值,某电厂实测数据显示该机制使非计划停机次数从每年12次降至3至4次。

4.3 经济性分析模型

全生命周期成本包含初始投资、运行维护与设备更换三大板块。以1兆瓦余热发电项目为例,初始投资约

450至500万元,其中换热器占比35至40,涡轮机占比25至30;年运行维护费用约25至30万元,主要包括清洗、检修及人工成本;设备寿命周期按15年计,第8年需涡轮机大修,费用约80至100万元。节能收益量化基于能量价值核算,余热用于发电时,按当地工业电价0.6至0.8元每千瓦时折算,某造纸企业年回收余热36000兆焦,可发电100至120万千瓦时,年收益60至90万元;若用于供热,每吉焦热量按40至50元计价,同等余热量可创造收益140至180万元。敏感性分析表明,燃料价格波动影响最大,天然气价格从3.5升至4.5元每立方米时,项目内部收益率从18降至12至14单位,其次为设备效率衰减,涡轮机效率年降0.5单位将导致收益减少5至7单位。

结束语

空气压缩机余热利用潜力巨大,通过对余热资源、回收技术、梯级利用体系及系统集成优化的研究,可实现余热高效回收与利用。这不仅有助于企业降低能源消耗、减少运行成本,还能为节能减排目标实现提供有力支撑。未来,应持续创新技术,完善利用方案,推动空气压缩机余热利用向更高效、更环保方向发展,助力工业领域绿色转型。

参考文献

- [1]王鹏.空气压缩机余热回收再利用的分析与实践[J].中国水泥,2024(2):89-91.
- [2]宋涛涛,槐鲜妮,程思勇,等.压缩空气余热利用及减排效果研究[J].油气田地面工程,2023,42(6):79-83.
- [3]李伟.矿用空气压缩机余热系统应用分析[J].机械管理开发,2023,38(10):172-173,176.