

低能耗反渗透水处理系统运行参数调试与优化

侯海霞¹ 文开阳² 李 敏²

1. 河南缔澄环保科技有限公司 河南 安阳 455000

2. 安阳钢铁建设有限责任公司 河南 安阳 455000

摘 要：当下水处理行业节能降本需求持续提升，传统反渗透系统固定参数运行模式能耗偏高、适配性差的问题逐步凸显。本文围绕低能耗反渗透水处理系统，聚焦日常运行核心参数的调试方法与优化路径，结合现阶段行业智能运维、动态调控的发展趋势，分析压力、回收率、水温、清洗周期等参数对系统能耗与运行稳定性的影响，梳理传统运行模式的短板，提出适配水质波动、负荷变动的参数调试方案，通过精细化参数管控降低无效能耗，保障系统长期稳定、低耗运行，为工业水处理系统节能优化提供实操参考。

关键词：低能耗反渗透；水处理系统；运行参数；调试与优化

引言

反渗透水处理技术是目前工业纯水制备、污水回用、海水淡化的主流技术，应用场景覆盖化工、电子、市政、环保等多个领域。行业低碳发展政策落地后，水处理设备的能耗管控成为企业降本增效的核心环节。多数现场反渗透系统长期沿用固定运行参数，未根据进水水质、环境温度、产水负荷的实时变化调整参数，出现能耗浪费、膜组件损耗加快、产水效率不稳定等问题。当前行业正向智能化、精细化运维转型，依托动态参数调控替代传统固定运行模式，成为低能耗反渗透系统运维的核心方向。本文针对性开展参数调试与优化研究，解决系统低效运行的实际问题。

1 反渗透水处理系统运行现状

目前国内各类在用反渗透水处理系统，大多采用标准化出厂参数运行，运维模式以固定参数常态化运行为主，极少根据现场工况变化做动态调整。多数企业的运维工作仅聚焦设备故障维修、定期换膜、常规冲洗等基础操作，没有建立参数动态调试的运维机制，导致系统节能潜力无法释放。现阶段行业内的反渗透系统能耗问题，普遍集中在无效能耗占比过高，高压泵、增压泵长期恒定功率运行，在进水水质变好、产水需求降低的工况下，设备输出功率超出实际需求，形成持续性能耗浪费^[1]。从实际运行工况来看，进水水温、含盐量、杂质含量会随季节、水源环境、生产负荷产生波动，固定运行参数无法适配工况变化。冬季水温偏低，水体黏度提升，膜渗透效率下降，固定压力运行会直接降低产水量；夏季水温偏高，不加调控的参数会加速膜面污染堆积，增加后期清洗频次，间接提升运维成本。部分系

统为保障产水稳定性，长期设置偏高的运行压力和回收率，短期产水效果稳定，但会持续加剧膜组件负荷，缩短膜使用寿命，增加长期运行能耗和设备更换成本。同时，中小型水处理站点普遍存在运维数据管控粗放的问题，仅记录日产水量、设备启停状态，不会实时监测、统计压力差、膜通量、药耗、能耗等核心参数，无法精准判断参数匹配度。现阶段行业智能化运维普及速度加快，动态参数调控、变频适配、按需运维等技术逐步落地，但多数传统站点仍沿用老旧运维模式，参数调试无标准、优化无依据，系统长期处于高耗、低效、高损耗的运行状态，不符合当下水处理行业节能降耗、精细化运维的发展要求。很多现场运维人员缺少系统参数优化的专业能力，难以结合水质、负荷变化开展针对性调整，进一步制约了反渗透设备效能发挥，也使得节能改造工作落地难度较大，亟需形成一套可落地的运行优化方案来改善现有局面。

2 反渗透系统核心运行参数及影响机制

2.1 运行压力参数影响

运行压力是反渗透系统产水的核心驱动条件，直接决定系统产水能力和能耗水平，也是日常运维中影响能耗最直观的参数。系统运行压力不需要保持固定数值，需要匹配进水水质和产水需求动态调整。进水含盐量偏高时，水体渗透压提升，需要匹配对应压力保障产水效率；进水含盐量偏低时，过高的运行压力不会提升产水量，只会增加高压泵能耗，同时造成膜面压力过载，加速膜结构损耗。现阶段很多设备运行存在压力参数适配失衡的问题，设备出厂预设压力普遍适配常规水质工况，无法适配现场波动工况。日常运行中，系统前后段

压力差可以直接反映膜面污染程度,压力差持续上升,说明膜面杂质堆积增多,系统运行阻力加大,能耗同步提升。未及时调试压力参数,会让系统长期带阻运行,不仅增加电能消耗,还会造成膜组件局部受压不均,出现膜通量衰减加快的情况。合理调控运行压力,精准匹配工况需求,是降低系统无效能耗、延长设备使用寿命的基础手段。

2.2 系统回收率参数影响

回收率代表系统产水与进水的比值,参数设置直接关系到水资源利用率和系统运行稳定性,同时间接影响整体能耗。回收率设置过高,进水盐分无法及时随浓水排出,会在膜面形成浓差极化,盐分持续堆积会堵塞膜孔,降低产水效率,需要更高压力维持产水,形成能耗递增的循环。回收率设置过低,大量水资源随浓水排放,水资源利用率不足,单位产水能耗会显著提升。不同水源工况对应的合理回收率区间存在差异,苦咸水、市政自来水、工业中水的适配回收率各不相同,不能统一设置固定数值^[2]。目前多数企业为提升产水总量,盲目调高系统回收率,忽略进水水质的承载能力,导致膜污染速度加快,清洗周期大幅缩短。频繁的清洗会增加药剂消耗、设备启停能耗,还会损伤膜组件性能,造成长期运行成本上升。结合进水水质、水源类型、膜组件配置调试回收率参数,能够平衡水资源利用率与能耗损耗,实现系统高效低耗运行。

2.3 水温与通量参数影响

水温是容易被忽略的关键参数,水温变化会改变水体黏度和分子运动速度,直接影响膜通量和系统整体能耗。水温偏低,水体黏度增大,水分子穿透膜孔的难度提升,同等压力下产水量会下降,运维人员通常会通过加压保障产水,进而增加能耗。水温偏高,水体黏度降低,膜通量会自然提升,但温度过高会加速水中微生物、杂质附着膜面,加快膜污染速率。膜通量参数代表单位膜面积的产水效率,通量设置过高,膜组件长期满负荷运行,抗污染能力下降,杂质更容易附着堆积;通量设置过低,膜组件利用率不足,设备资源浪费,单位产水能耗升高。现阶段精细化运维模式下,行业不再采用固定通量运行模式,而是结合季节水温变化、膜组件使用年限动态调整通量参数。新膜组件适配常规通量区间,老化膜组件需要下调通量,降低运行负荷。通过水温与通量的联动调试,能够规避温度波动带来的能耗损耗,稳定系统运行效率。

3 低能耗反渗透系统参数调试与优化策略

3.1 压力参数动态调试优化

压力参数优化的核心是摒弃传统固定压力运行模式,建立工况联动的动态调试机制,消除高压冗余带来的无效能耗。日常运维中,需要根据进水含盐量、水温、膜组件老化程度三个核心条件,实时微调运行压力,让压力输出始终匹配系统实际运行需求。设备初始投运阶段,膜组件性能完好,可采用基准低压运行模式,避免初始高压运行造成的能耗浪费和膜组件过度受压。针对水质波动场景,进水含盐量升高时,小幅提升运行压力,保障产水通量稳定;进水含盐量降低时,同步下调压力,减少高压泵功率消耗。结合变频控制技术,将高压泵与系统流量、电导率监测设备联动,实现压力自动适配调节,解决传统人工调压滞后、精度不足的问题。生产低负荷时段,产水需求下降,系统自动降低泵体转速和运行压力,避免设备满负荷空转产生的能耗浪费^[3]。同时建立压力差常态化监测机制,每日记录系统进出口压力数值,统计压力差变化幅度。压力差出现持续性小幅上升时,及时小幅下调运行压力,同时开展在线冲洗,提前清除膜面初期堆积杂质,避免压力差持续扩大导致的能耗飙升。区别于传统超标后清洗的被动运维模式,动态压力调试可以持续维持系统低阻力运行状态,减少设备满负荷运行时长。长期运行数据表明,精准的动态压力调控,能够有效降低系统单位产水电耗,同时延缓膜组件老化速度,减少设备运维成本。

3.2 回收率精细化优化调控

回收率优化的核心是摒弃统一固定参数设置,根据水源特性和设备配置做精细化分级调试,兼顾水资源利用率和系统能耗稳定性。不同进水水质的盐分、杂质含量差异较大,适配的回收率区间完全不同,自来水、浅层地下水、工业回用水等不同水源,需要单独设定专属回收率参数,避免参数错配引发的各类运行问题。针对常规市政自来水进水工况,可维持中等回收率区间,保障产水效率与设备稳定性;针对含盐量、硬度偏高的苦咸水或中水回用工况,需适度下调回收率,避免盐分、硬度离子在膜面大量富集,杜绝浓差极化现象。盲目追求高回收率,会让系统长期处于高污染风险状态,膜孔堵塞速度加快,系统运行阻力持续增加,后续需要投入更多能耗维持产水,整体运行性价比大幅降低。现阶段新型运维模式会采用分段式回收率调控方式,根据每日进水水质的实时检测数据,微调系统运行回收率,实现小范围动态适配。同时结合系统运行负荷调整参数,满负荷生产时段可小幅优化回收率,低负荷待机时段适当降低回收率,减少无效水循环。通过精细化回收率

调控,能够有效降低膜污染速率,延长系统化学清洗周期,减少药剂消耗和设备启停能耗。该优化方式无需改造硬件设备,仅通过参数调试即可实现节能效果,适配各类中小型反渗透水处理系统,落地性极强,符合当下低成本节能运维的行业发展趋势。

3.3 水温与通量联动优化

水温属于不可控自然工况参数,优化思路以主动适配调控为主,通过联动膜通量参数调整,抵消水温波动带来的能耗和效率波动,实现系统全年稳定低耗运行。冬季环境温度偏低,进水水温持续下降,水体黏度提升,同等压力和通量条件下,设备产水效率下降,能耗相对升高。此时不建议通过加压提升产水,而是小幅下调膜通量,降低膜组件运行负荷,避免高压低效运行的能耗浪费,同时保障膜组件运行稳定性^[4]。夏季进水水温偏高,水体流动性提升,膜通量自然上升,可适度上调运行通量,提升设备产水效率,充分利用温度优势降低单位产水能耗。但需严格控制通量上限,避免高温高负荷运行加速微生物和胶体杂质附着,防止膜污染突发加剧。换季阶段水温波动幅度大,需要缩短参数监测周期,根据水温变化及时微调通量参数,避免参数滞后适配导致的运行异常。同时结合膜组件使用年限优化通量参数,新膜组件透水性能优异,可适配标准通量区间,保障运行效率;使用年限超过一年的老化膜,透水性能和抗污染性能下降,需要持续小幅下调运行通量,降低膜面负荷,延缓性能衰减。通过水温与通量的联动调控,能够解决季节工况波动带来的能耗失衡问题,让系统在不同环境、不同设备状态下,始终维持最优运行状态,无需硬件改造即可实现持续性节能降耗,适配当下水处理行业精细化、低成本运维的发展需求。

3.4 全周期参数协同优化运维

单一参数调试的节能效果存在局限性,现阶段低能耗反渗透系统优化,重点转向多参数协同调控和全周期运维优化,通过压力、回收率、水温、通量、清洗周期等参数的联动匹配,最大化挖掘系统节能潜力。传统运维模式下各参数独立调控,容易出现参数相互冲突的问题,比如高回收率搭配低压运行,会导致产水不足;高通量搭配低温运行,会加剧膜负荷,造成能耗不降反升。全周期协同优化需要建立参数联动逻辑,以进 waters

质和工况负荷为核心基准,同步调整各项运行参数。水质优良、水温适宜、满负荷生产时,匹配合理的回收率和通量,适度优化运行压力,实现高效低耗产水;水质偏差、水温异常、低负荷生产时,同步下调回收率和通量,微调运行压力,降低设备无效损耗,规避膜污染风险。同时结合智能监测设备,实时采集各项运行数据,建立参数匹配数据库,形成适配现场工况的专属参数标准。除此之外,将参数优化与设备清洗运维结合,摒弃固定周期清洗模式,以压力差、通量衰减、能耗变化为依据,按需开展在线清洗和离线化学清洗。参数异常初期及时干预,避免小问题累积成设备高耗、故障停机等问题^[5]。通过全周期、多维度的参数协同优化,彻底改变传统粗放的运维模式,实现系统从“固定运行”向“智能适配运行”转型,持续降低系统综合能耗和运维成本,完全适配当前水处理行业低碳化、智能化的整体发展趋势。

结语

反渗透水处理系统实现低能耗运行,关键在于摒弃传统固定参数的粗放运维方式,采用精细化、动态化、协同化的参数调控模式适配复杂多变的现场工况。通过优化运行压力、回收率、水温和通量等核心参数,落实多参数联动、全周期适配的运维方式,可有效减少系统无效能耗,减缓膜组件老化速度,降低运维成本并提升水资源利用率。依托智能监测与自动调控技术完善自适应优化体系,是水处理设备节能降耗、行业实现低碳高质量发展核心方向。

参考文献

- [1] 戴小冬. 工业废水处理中反渗透膜技术的工艺参数优化[J]. 资源节约与环保,2025,(11):69-72+87.
- [2] 陈之东. 反渗透浓水回收系统能耗分析与节能降耗措施[J/OL]. 中国科技期刊数据库工业 C,2026,(1):196-199.
- [3] 任梦翔, 张开, 王有斌, 等. 气化渣水处理系统优化方案研究[J]. 广州化工,2026,54(7):126-128.
- [4] 鲍立群. 反渗透在工业污水深度处理中的应用[J]. 区域治理,2026,(9):0118-0120.
- [5] 宋尧. 反渗透技术在工业废水处理中的应用研究[J]. 皮革制作与环保科技,2026,7(5):7-9.