

制浆造纸厂污水处理过程中电气能耗问题与节能技术综述

韦汉清

中国轻工业南宁设计工程有限公司 广西壮族自治区 南宁 530031

【摘要】：制浆造纸行业属于国内重要的基础原料产业，同时也是高耗能、高耗水等特征显著的行业。其中废水处理环节的能耗占到企业整体耗能的20~30%，所用量几乎均为用电，已成为达成“双碳”目标的主要渠道之一。本文以制浆造纸厂污水处理系统为主要对象展开讨论，通过分析发现，由于存在设备选型冗余、生产运行控制不够精细以及缺少数字化运营管理等主要问题，为此提出了从设备优化、能源回收、数字化与智能化等方面的节能体系，力求整体改造的新思路，对促进制浆造纸行业达到“绿色低碳”具有重要的理论意义及实用性。

【关键词】：制浆造纸；污水处理；电气能耗；节能技术

DOI:10.12417/2705-0998.26.01.074

引言

制浆造纸行业是一个国民经济的基础性产业，需要利用较多的水资源，同时也要排放大量的污水，属于一个大用水行业与高能耗行业。据行业数据显示，每吨纸浆制造将耗费100~200m³的水资源，并排放80~150m³的工业污水。在这一过程中，企业所消耗的能源高达20%，其中所耗电能更是达到80%以上，这些能量消耗用于提升污水的高度、增加空气中的含氧量、处理污泥等地方。但随着相关法规的执行，制浆造纸厂需要按要求COD排放降到50mg/L以内，并且其单位产品消耗的能源要求下降13%。这使得污水处理系统的节能减排问题变成了其绿色转型的重要问题。

1 制浆造纸厂污水处理过程电气能耗现状与特征

1.1 能耗构成与分布规律

制浆造纸厂污水处理过程中，电能消耗随分阶段呈现单一性，源于各工序均存在不同能量消耗现象，在第一级处理阶段，主要能源用于物理分离，故本阶段能耗基本集中在污水提升泵上，其约占比了总第一阶段能耗的85%以上，计算可发现其大都约占总生产线能耗的15%-20%，主要用来克服管线压强、提升到下一阶段提升水位至后续流程，第二级生物处理是最耗能阶段，其约占比总能耗的50%-65%，而该部分又以曝气鼓风机为主导，其约占比59%，其次为混合液回流泵，其约占比22%，这两个设备加起来约占第二级处理用电量的大半；而在深层次处理过程中，则需借助于二次提升泵与加药系统完成，故而该流程用电量较小，也即占总电量的比例较小，其仅占10%-15%左右，而需要特别注意的是膜组件反冲洗泵瞬间最大功率约可达到普通泵组的1.5倍；至于固废处理部分，其对脱水机、污泥运输泵等电能消耗比例基本分别都占据了5%-10%，但是其中脱水机的部分其主要为需要保持高压状态工作，进而每吨污泥处理电能约需要0.8-1.2kwh。

处理规模对能耗强度控制有非常大的影响，而且存在较强的“规模效应”。本文数据表明，处理规模在5万m³/d时，

单位水耗电量约为0.43kW·h/m³；而当处理能力规模扩大时，因装置效率提升，以及能源梯级利用优化，则可节省电量到0.3kW·h/m³以下。例如，15万m³/d规模的制浆造纸废水处理装置，使用集中曝气和变频调速后，吨水电耗较3万m³/d小型厂降低28%。

表1 制浆造纸厂污水处理各单元电气能耗分布对比

处理单元	核心设备	单元能耗占比	典型设备耗电量 (kW·h/d)	吨水电耗贡献值 (kW·h/m ³)
一级处理	污水提升泵	15%-20%	800-1200	0.06-0.08
二级处理	曝气鼓风机	50%-65%	3500-5200	0.22-0.28
	混合液回流泵		1200-1800	0.08-0.10
深度处理	二次提升泵	10%-15%	600-900	0.04-0.06
污泥处理	污泥脱水机	5%-10%	300-600	0.02-0.04

1.2 关键耗能设备与能耗强度

针对制浆造纸污水处理厂来说，主要耗能设备分别为：污水提升泵、曝气鼓风机、污泥脱水机，它们的耗能大小直接影响整套工厂系统的能耗高低。其中，污水提升泵为第一道系统的主要“能耗大户”，它负责提升原水，消耗的电能约为整个过程的85%，受到泵站的扬程和流量影响，它们的电耗受扬程和流量的波动影响较大，由于传统定速泵往往通过闸门来进行流量调节，导致泵站实际有效的功率占比大约只有60%，传统的泵站还有可能造成节流率超过30%。曝气鼓风机是整套工厂系统的最大耗能设备，占据了第二个过程中的59%左右和整个工厂系统中的43%左右的能量消耗，二者的主要耗能均与曝气效果和曝气压力控制精度息息相关。罗茨鼓风机运行噪音较大、反应速度较为缓慢，通常能耗比仅为80%以下，而磁悬浮离心机由于采用了无轴磨损轴承以及变频技术控制，通常可以提供高达85-90%的能耗比，相对于传统设备能量的节约

提升多达 20-30%。污泥脱水机是污水处理的重要设备，其耗电量主要与污泥含水率以及处理量密切相关。对于带式压滤机，每吨含固率大约耗电 1.2~1.5 千瓦时；离心脱水机电耗较高，能耗会随着高转速的增加而增加，离心脱水机电耗每吨污泥在 1.8~2.2 千瓦时左右。而且，不同历史时期的设备差距显著，传统型 Y 系列电机相比 IE3 高效型电机型号要高 15%~20% 的电耗；在未进行变频改装的定转速脱水机上，当负载率较低时，其效率还会再下降 10%~12%。

设备能耗强度还受工艺协同性影响，如曝气鼓风机风压与生物池液位不匹配会导致“过曝气”，使氧利用率从 25%-30% 降至 18%-22%，间接增加能耗 15%；泵类设备扬程选型冗余会导致运行点偏离高效区，造成“大马拉小车”现象。

2 制浆造纸厂污水处理电气能耗核心问题剖析

2.1 设备配置与选型问题

很多制浆造纸厂污水处理系统在其设备选型过程中存在着结构性缺陷，造成了不必要的能源浪费。一般按照“最大负载冗余”的原则，在设计上设置设备，以应对最极端的情况，导致重要设备的选型达 70%~90% 冗余，结果造成了每日常负荷运行情况仍然低于 60%。如某制浆厂的设计曝气量按照 120% 每天浆量来设计，实际上运行只需要 75%~85% 的风，这造成风机长期低效率工作，其能量利用效率较原来下降 15%~20%。另外，设备单一化问题突出，80% 以上中小型纸厂仍采用恒速驱动模式，缺乏变频调速、软启动等动态调节手段，当处理量波动时只能通过阀门节流或挡板调节控制流量，造成管网阻力损失增加，节流能耗占比达 15%-20%。

老旧设备能效水平偏低形成能耗“洼地”。根据行业调研，建厂时间超过 2000 年的造纸企业超过 1/3 的高能耗泵仍然采用淘汰型号的，其效率较 IE3 标准电机低 8%-10%。不合理的设备配置带来的能源浪费的增加，例如在生物池曝气系统中，由于鼓风机压力和供氧量不匹配，实际的氧利用率只有 20%-25%，较理论值低 10-15 个百分点；污水处理时，污泥脱水机与进料泵的流量未同步，时有“过载停机”，或者“空转耗能”的情况。

2.2 运行管理与调控短板

制浆造纸厂的污水处理过程管理“靠经验，缺数据”，难以精细化运营。现有系统未搭建充分的能耗管理监控系统，60% 左右的中小型企业仍采用人为数据记录方法，数据采集周期长达 24-48 小时，并且发现突发事件性能源消耗的概率较低，导致其能源过度依赖电力、增加了企业经济负担。个别企业未考虑电能收费的早晚时间段的电价差异性而采取相应的操作措施，如部分用电高峰期的能源用电占比仅为 25.7%，而低谷期用电占比高达 43.7%，但未利用低谷时段调整污泥脱水或膜清洗等连续运行动作的开闭，增加了至少 10—15 个百分点的

能源浪费空间；不同工艺过程能耗相关的操作变量协调未被考虑到，如曝气风量的设置不符合进水负荷溶氧的需要，进入水厂的 COD 含量下降 30% 的情况下仍不改变风机的运转参数，增加了过度曝气能源消耗；混合液回流比率仍以 100% 不变，未随沉淀物的减少降低比例的负荷而导致回流泵的非必要能源消耗负荷高达 18%。

由于运行维护团队节约能源意识不强，现有的运行流程中没有能源消耗评价指标，工作人员的精力更多地放在保证出水质量上，而不是为了节约能源。例如，为了防止出泥膨胀，而过度曝气运行时间超过了理论值，导致实际曝气量过多；对设备进行例行检查和保养力度不够，约有 15% 的提升泵叶轮积垢未及时清理，输水量减少 8-12%，整体运行效率降低至少 15%。

2.3 政策标准与技术适配挑战

环保政策提升及能源消耗监管力度的提升，对污水处理电气系统构成了两方面的压力。新的规定将水处理用电纳入了限制指标里，同时要求一吨产品的用水处理用电不超过 50kW·h，比 2017 修订版更加严格；还提出了一个新要求 COD 排放上限，从 80mg/L 变为 50mg/L，迫使企业增设深度处理单元。

由于中小企业缺乏必要的资金投入，当需要对其生产线升级改造一次提高其生产过程节能效率的时候，通常一次投入资金就大于千万人民币，并且时间花费可能需要 3~5 年的时间。而此时一些小型造纸厂利润率只有 3%~5%，不具承受能力。传统生产方式与新型节能技术匹配度不高所形成的所谓的“改造费用阻碍”。如厌氧处理产生沼气的资源化利用中，若原有的供电线路未进行满足并入电网需要改造的话，则另需增加约 200 万~300 万资金进行电力线路及继电器控制系统的更新，导致 30% 的企业搁置沼气发电项目。

3 制浆造纸厂污水处理电气节能关键技术体系

3.1 设备优化与运行调控技术

对设备层的节能优化主要是在高效率机器替换与操作参数的灵活调整方面，从技术升级上削减耗能源头。如高效电机应用，IE4 超效电机比 IE2 型传统电动机能效可提升 4%~6%，因而该电动机可广泛应用于如污泥脱水机等连续运转设备上，其每台每年可节省电力 5000~8000kWh。又如磁悬浮鼓风机由于独特的无摩擦轴承和 3D 流动叶片的构成结构，较之罗茨风机可节省电量 30%~40%。变频调速技术通过实时匹配工况需求实现无级调速，泵的应用更加合理，避免出现阀门节流损失，可以节省 20%~35% 的电能，并且部分马达还具备再生制动功能，在释放制动力的同时可将剩余动力反馈给电力系统，其回收效率达 95% 以上。

运行调控策略需结合负荷特性与电价机制动态优化，错峰用电通过峰低谷时段对大型耗能的设备进行调配，例如在夜间将污水处理的过程进行安排，由此可减少 58.8% 的费用投入；

设备匹配性优化通过动态调整并联泵组运行台数,如进水量从 800m³/h 降至 500m³/h 时,由 3 台泵并联运行切换为 2 台,提升单泵负荷率,提高运行效率。

表 2 传统与优化设备能耗指标对比

设备类型	传统技术参数	优化技术参数	节电率	投资回收期
曝气风机	罗茨风机,能效 75%-80%	磁悬浮风机,能效 85%-90%	30%-40%	3-5 年
污水提升泵	恒速电机+阀门调节	IE4 电机+变频调速	20%-35%	2-3 年
污泥脱水机	IE2 电机,效率 87%-89%	IE4 电机,效率 91%-93%	4%-6%	4-6 年

3.2 能源回收与综合利用技术

采用能源回收技术可以利用系统产生的废能并构建“污水处理-能源生产”的闭环模式,主要实现过程能量多级利用,如利用热泵技术将纸机过程排出的湿气与热量收集并用于提升废水处理厂的温度至 35~40℃,以使得微生物处于最适宜的温度条件下,可节省 15%~20%的热耗,在一例年产量达十万吨的纸厂的实施下使蒸汽消耗量每年降低 1.2 万吨。

联合处理技术可以通过一起实现废弃物减少并转化能量的功能,处理后的污水处理厂产生的污泥经干化处理之后流入发电厂并且参与焚烧。所产生的热量约为 12~18MJ/kg,相当于 20%~30%的燃煤量。为提高能源回收体系的作用,可以通过联合应用不同的技术,如余热锅炉与吸收式热泵联用,可将余热利用效率从单纯回收的 60%提升至 85%以上,进一步降低化石能源依赖。

3.3 数字化与智能化能效管理技术

能源效益数字化管理方法以大数据驱动的精确定制来实

现节能目的,并构成“监测-分析-优化”的闭环管理体系。智慧水务能效管理平台整合配电系统、工艺设备与环境参数数据,实现源网荷储一体化监控,平台可实时显示主要用能设备的能效曲线,异常波动时自动触发报警。

基于物联网的数据采集平台,通过 LoRaWAN 无线通讯技术部署智能电表、振动传感器、能效监测终端实现对水泵、风机等关键设备的电流、功率与温度等信息的实时监测和记录,主要由能源流向示意图、数据整合记录、设备维保档案构成,在节能改造工作中起到辅助作用。

4 未来发展趋势与政策建议

智能化主要是 3 方面,利用人工智能、机器学习;运用数字孪生、虚拟现实等新技术,实现增效减支;结合太阳能发电和储能装置的应用,以降低能耗,提升绿色环保。新的制度框架也在形成,如排放限值与污染许可证结合的方案,将有利于促进企业创新发展和转型。

政策上加大力度和扶持力度,建议建立专项资金支持小企业节能技改,对小企业的节能减排改造给予不超过 50%的补助,降低原始投资成本;制定并出台相关政策,将磁悬浮鼓风机、生物质能等成熟技术纳入绿色信贷支持范围;完善绿色电价政策,扩大峰谷价差,对余热回收、新能源自用比例超 30%的企业给予 0.05-0.1 元/kW·h 的电价优惠,激发企业节能动力。

5 结语

制浆造纸厂污水处理过程的电气能耗管控需直面设备配置冗余、运行调控粗放与政策标准适配不足的核心挑战,通过设备优化、能源回收与智能管理三级技术体系协同发力,可实现综合节能率 10%-25%。多技术融合与数字化转型是破解能耗瓶颈的关键路径,需推动高效设备与智能算法深度耦合,构建“感知-决策-执行”的闭环调控机制。

参考文献:

- [1] 张汉青.造纸污水处理厂引入光伏发电系统的技术可行性分析[J].中华纸业,2025,46(06):112-115.
- [2] 陆造好.基于强化学习的造纸污水处理过程多目标优化研究[D].华南理工大学,2024.
- [3] 李世忠.造纸污水处理过程温室气体排放模型及多目标优化控制研究[D].华南理工大学,2024.
- [4] 康志辉.造纸厂污水处理全流程节能策略[J].工业水处理,2022,42(10):182-186.
- [5] 柏静.造纸污水处理厌氧系统沼气综合利用[J].环境与发展,2020,32(04):120-121.
- [6] 李凯,赵晗,李建军,等.造纸废水的生物处理技术进展[J].检验检疫学刊,2015,25(06):69-71.