

超纯水制备中 TOC 含量超标原因分析与控制措施

顾 淼

江苏中电创新环境科技有限公司 江苏 无锡 214111

【摘 要】：精密制造领域中超纯水水质对成品良率有决定性影响，TOC 作为水质管控核心指标，系统运行期间常出现指标超出限定范围的情形，针对 TOC 超标涉及的三类诱因，本文从原水预处理、设备管路改造到全流程标准化管控搭建完整调控体系，涵盖滤料升级、管路材质替换及分段在线监测等优化手段，各项措施落地后原水有机物截留效率提升，管路内源析出量下降，终端产水 TOC 稳定于标准区间，整套方案可压缩水质异常波动频次，为超纯水系统长效稳定运行提供实操支撑。

【关键词】：超纯水；TOC；水质管控；预处理；管路改造

DOI:10.12417/2811-0722.26.08.066

引言

高端精密产业产能持续扩张，超纯水使用规模逐年攀升，愈发严苛的水质标准对 TOC 控制提出更高要求，原水有机负荷波动、设备内源污染及运维管理缺陷均可能造成 TOC 超标，进而制约产线稳定运转，依托制水全流程工序特征，从源头预处理、设备硬件改造到运行管理体系三个维度构建一体化调控方案，同步配套在线监测与标准化运维机制，相关优化路径统筹考量运行成本与水质保障能力的平衡，为同类超纯水系统 TOC 稳定管控提供可操作思路，契合水资源高效利用的产业发展导向。

1 超纯水制备 TOC 管控基础阐述

超纯水广泛用于半导体、显示面板等精密制造工序，多用于产品清洗与试剂稀释，水中总有机碳会直接拉低产品良率，水体有机物易诱发栅氧化层缺陷，光刻高温环境下杂质碳化生成微细颗粒，进而损伤精密光学设备，由此成为水质管控关键指标，行业通用标准下常规生产用水 TOC 限值不超过 $20\text{ }\mu\text{g/L}$ ，高端精密制程用水需控制在 $1\text{ }\mu\text{g/L}$ 以下，常规制水系统依靠多级过滤、反渗透、真空紫外氧化与抛光树脂协同去除有机物，整套工艺对大分子有机物去除效果稳定，却难以有效截留降解尿素、异丙醇这类低分子量电中性有机物^[1]。原水携带污染物、设备管路析出有机杂质及运维疏漏均可能造成 TOC 超标，构建全流程闭环管控体系并精准把控各单元去除效率，正是稳定超纯水水质、保障精密生产持续运行的核心基础。如图 1。

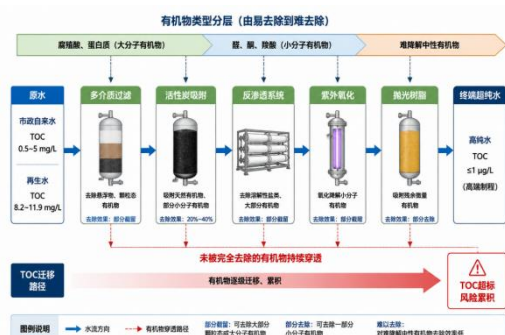


图 1 超纯水制备工艺有机物分层迁移及 TOC 穿透累积路径示意图

2 超纯水制备 TOC 指标偏高诱因梳理

2.1 原水水质自带有机污染物干扰

原水构成超纯水系统有机杂质的初始来源，市政自来水与再生水为两类主流取水水源，水体天然携带各类有机组分，常规自来水 TOC 浓度维持在 0.5 至 5mg/L 区间，其中约七成为腐殖酸、蛋白质等大分子有机物，剩余小分子醛、酮、羧酸类物质难以被前端过滤单元完全截留^[2]。再生水体的有机负荷相对更高，深度处理后 TOC 依旧处于 8.2 至 11.9mg/L 范围，且混杂大量难降解小分子中性有机物，前端多介质过滤仅能去除悬浮态有机颗粒，活性炭单元对亲水型小分子有机物去除效率仅维持在 20% 至 40% ，原水有机负荷一旦出现波动，未被截留的微量有机物便会持续流入后端脱盐与抛光单元，日积月累后直接造成终端出水 TOC 指标的超标。

2.2 制水设备管路部件有机杂质析出

整套制水系统内各类接触水体的构件会持续析出有机物，构成持续性内源污染来源，不同管材有机溶出量差异明显，普通 PVC 管路有机物析出量远高于 PVDF 与特种不锈钢管材，长期通水过程中管壁不断向水体释放微量有机组分，离子交换树脂运行时间延长后表面吸附的有机物逐步脱落，直接抬升水体 TOC 数值，反渗透及超滤膜元件长期使用会附着有机污染物，剥落后即形成稳定有机污染源，抛光树脂吸附容量存在上限，低浓度有机环境下易发生竞争吸附，难以稳定捕获微量有机物，各类设备构件持续释放的有机杂质相互叠加后大幅增加了终端 TOC 超标的发生概率。

2.3 制水运行流程操作管控存在疏漏

全流程运维管理漏洞会加剧有机污染物累积，进而引发 TOC 指标失控，预处理单元滤料及活性炭长期不更换或再生，吸附位点饱和后丧失有机物截留能力，大量有机杂质直接穿透进入后端工序，真空紫外装置未按周期检修，灯管衰减后氧化降解小分子有机物效率大幅下降，难以将中性有机物转化为易吸附的有机酸，现场缺少全覆盖在线 TOC 监测点位，无法实时捕捉各工段水质波动，单纯依赖末端检测难以提前预判污染

风险, 岗位运维缺少标准化操作规范, 管路定期冲洗与原位消毒执行不到位, 管壁及水箱内部滋生微生物并代谢生成有机质, 多重管理缺陷叠加后最终造成超纯水 TOC 持续偏高。

3 超纯水制备 TOC 超标对应调控手段

3.1 原水预处理阶段有机杂质去除优化

3.1.1 前端滤料选型升级

前端过滤单元作为阻隔大分子有机污染物的首道屏障, 滤料层级与材质直接关系到有机杂质的截留效果, 原有单层滤料结构仅能拦截大颗粒悬浮物, 对胶体类有机物质拦截不足, 极易造成有机物持续穿透进而加重后端处理负荷, 优化中采用分层梯度滤料组合, 底层铺设粒径 2 至 4 毫米石英砂, 中层搭配 1 至 2 毫米石英砂, 上层填充 0.8 至 1.2 毫米无烟煤, 依靠多层深层过滤缩小水体过流孔隙, 稳定降低进水浊度与颗粒态有机碳, 同步配套超滤装置协同运行, 选用截留区间 1 至 300ku 的膜元件, 在 0.1 至 0.5MPa 常规压力下筛分去除胶体、微生物及大分子有机质, 整套滤料改造后可大幅削减进入活性炭单元的有机总量, 缓解活性炭吸附饱和速度并减少小分子有机物持续穿透风险, 从源头降低后端各工段 TOC 处理压力, 稳定控制预处理出水的总有机碳数值。

3.1.2 活性炭吸附单元运维调整

活性炭单元承担原水中天然有机物的核心去除任务, 常规工况下整体去除率维持在 30%至 70%区间, 但对亲水型小分子有机物去除效率仅为 20%至 40%, 长期运维失当会直接削弱吸附性能, 优化中首先固定活性炭更换周期, 避免微孔结构被杂质完全堵塞后丧失吸附位点, 定期采用低流速清水反向冲洗滤层, 冲脱表层截留的悬浮有机污染物以恢复孔隙吸附空间, 同步建立进水水质动态匹配机制, 原水有机负荷偏高时缩短反洗频次以减少小分子有机物累积穿透, 运行中持续监测活性炭出水 TOC 变化, 数值明显上浮时及时开展再生或更换操作, 防止饱和活性炭反向释放已吸附有机物, 通过标准化运维管控稳定吸附效率, 减少未被截留的微量有机物流入反渗透系统, 减轻后续抛光工段降解压力, 持续保障前端有机污染物去除效果的稳定发挥。

3.2 制水设备管路系统清洁改造举措

3.2.1 管路材质更换优化

水体输送管路构成系统内源有机污染的主要来源, 不同材质管材长期通水后有机物质析出量差异显著, 普通塑料管材会持续向水中释放微量有机质, 由此抬高全流程 TOC 基础数值, 改造阶段逐步淘汰溶出风险较高的管材, 替换为低析出特性的管道材料以降低管壁有机溶出总量, 各类管材内部光滑度同步影响微生物附着概率, 光滑内壁能够减少有机质附着堆积, 从根源上削减微生物代谢生成的次生有机物^[3]。管路改造中配套管件、阀门及接头统一更换为同规格低析出材质, 规避不同材

质衔接位置形成死角滞留水体, 完成材质升级后管路持续释放的有机杂质得到有效抑制, 后端抛光单元有机处理负荷随之减轻, 避免管路长期析出的微量有机物不断累积, 保障终端产水 TOC 长期稳定于合理区间, 减少内源污染所引发的水质波动。

3.2.2 定期原位消毒冲洗流程完善

管路、水箱与膜组件长期静置运行会形成水体滞留死角, 死角内微生物持续繁殖代谢后生成有机产物, 不断推高水体 TOC 水平, 建立标准化冲洗消毒流程能够有效清除死角积累的有机质, 具体操作中设置分等级冲洗周期, 日常执行低流速循环冲洗以清除管壁附着的松散有机沉积物, 定期开展完整原位消毒作业抑制管壁及水箱内壁的微生物增殖, 冲洗作业覆盖整套纯水输送回路, 包含超纯水箱、抛光单元后端输送管线及终端取水支管, 避免局部管路长期不流通形成死水, 消毒完成后以大流量置换管路内部残留水体, 彻底带走消毒过程剥离的有机杂质以防止其再次混入产水, 标准化冲洗消毒能够持续控制内源有机污染, 减少微生物衍生物有机质的持续释放, 稳定各工段出水 TOC 指标并降低末端超标概率。

3.3 制水全流程标准化运行管控方案

3.3.1 在线 TOC 监测点位布设

全流程分段布设在线 TOC 监测设备能够实时捕捉各工段有机污染物波动, 由此改变仅依靠终端取水检测的滞后管控模式, 监测点位覆盖预处理出水、反渗透产水、真空紫外装置后端、抛光树脂出水及终端用水点五大关键节点, 每个点位独立配置检测设备并同步接入中控系统实现数据实时传输, 预处理点位用于把控原水有机负荷波动, 提前调整滤料反洗与活性炭运维节奏, 反渗透与真空紫外后端点位可及时识别膜元件渗漏及灯管效能衰减等问题, 抛光后与终端点位则把控最终产水品质, 监测数据设置分级预警阈值后数值接近管控上限时自动推送提醒, 工作人员得以第一时间排查上游工序隐患, 避免微量有机物持续累积直至终端 TOC 超标, 实现有机污染前置管控并大幅缩短水质异常持续时间。

3.3.2 岗位操作规范细化落地

细化全工段标准化操作需明确各岗位日常巡检、设备维护及水质调控的完整执行标准, 以消除人为操作疏漏引发的 TOC 超标隐患, 针对预处理岗位划定滤料反洗与活性炭检查的固定时间节点, 同步记录每次处理后的出水 TOC 变化, 真空紫外运维岗位明确灯管性能定期核查要求并及时更换光效衰减部件, 保证小分子有机物氧化效率, 管路运维岗位严格落实冲洗消毒的操作步骤、持续时长与水流参数, 杜绝简化流程导致的有机质残留^[4]。配套建立操作记录台账后每项设备维护及水质调节操作均留存完整记录, 管理人员定期核查台账执行情况并对未按规范落实的操作及时整改, 标准化操作能够约束全流程人为变量, 稳定各单元有机物去除能力并持续维持产水 TOC

处于稳定达标状态。

4 TOC 调控手段落地实施实际作用呈现

4.1 原水预处理优化后有机物质去除效果

完成前端梯度滤料更换与活性炭标准化运维调整后,整套预处理体系对水体有机杂质的拦截能力获得整体性提升,分层滤料搭配超滤装置可稳定截留水体中绝大多数颗粒态有机碳,从而降低进入活性炭单元的有机负荷并减少滤层堵塞与有机物穿透现象,活性炭借助定期反洗与定时更换管控使整体有机物去除效率稳定维持在合理区间,亲水类小分子有机物穿透量得到明显控制,优化前预处理出水 TOC 波动幅度较大且遇到原水水质变化时极易出现数值突增,优化后出水 TOC 长期保持平稳区间,过量有机质流入反渗透工段的情况大幅减少,后端脱盐与抛光单元的处理负荷同步降低,真空紫外氧化及抛光树脂的工作损耗随之缓解,系统整体去除有机污染物的容错空间显著扩大,从源头上削减了 TOC 超标的触发条件。

4.2 设备管路改造后 TOC 析出量下降表现

管路材质更换与常态化原位冲洗消毒流程落地后,系统内源有机污染问题得到根本性缓解,低析出管道材料替换完成后管壁持续向水体释放的有机组分大幅减少,管路接头及阀门等易析出部件同步更换后消除了不同材质衔接位置持续释放微量有机质的隐患,固定周期冲洗与消毒作业能够持续清理管壁附着的有机质,抑制管路死角内部微生物繁殖并切断微生物代谢生成次生有机物的路径,改造前管路持续析出的有机质会不断叠加至各工段水体,长期运行后终端 TOC 基础值持续走高,改造完成后系统内源有机增量显著降低,即便长时间连续运行

水体基础有机含量也不会出现明显上浮,后端抛光单元无需持续应对管路带来的额外有机负荷,水质基础稳定性因此得到大幅提升。

4.3 标准化管控推行后超纯水 TOC 稳定状态

全流程在线监测点位布设与岗位操作规范落地后,超纯水系统形成完整的闭环管控模式,TOC 指标波动幅度随之持续收窄,分段在线监测能够实时捕捉各工段水质异常,预警机制提前暴露滤料饱和、紫外灯管衰减及管路死水堆积等潜在问题,避免有机污染物持续累积^[5]。标准化操作细则约束全部运行为,减少人为简化维护流程、延迟设备检修等疏漏,各处理单元有机物去除效能长期维持在设计标准范围内,管控体系落地前终端产水 TOC 频繁出现阶段性超标且异常发现滞后、整改周期较长,标准化管控实施后各类有机污染隐患得以提前处置,终端产水 TOC 长期稳定在管控限值以内,大幅降低水质异常带来的生产影响,最终实现超纯水 TOC 的长期平稳可控。

5 结语

超纯水系统 TOC 超标可追溯至原水有机输入、管路内源析出及运维管控缺失三类核心因素,前端滤料与活性炭单元改造能够削减原水有机负荷,低析出管材更换与常态化冲洗消毒则抑制设备持续释出有机物,分段在线监测辅以标准化操作规范可提前规避水质波动,多重优化手段协同实施后各工段有机物去除能力得到稳定保障,终端产水 TOC 指标持续维持在合格区间内,全流程一体化管控模式能够降低水质异常概率,助力超纯水系统长效稳定运行并契合水资源精细化管控的发展需求。

参考文献:

- [1] 刘澈,徐冉龙,薛雅内,等.电子级超纯水中 TOC 处理技术及原理[J].工业水处理,2026,46(2):11-18.
- [2] 田宇鸣,熊江磊,潘婷,等.超纯水系统国产除硼树脂的筛选及应用研究[J].工业水处理,2024,44(11):155-160.
- [3] 田宇鸣,熊江磊,章洪斌,等.电子超纯水制备过程典型痕量有机污染物去除机理[J].工业水处理,2024,44(9):176-180.
- [4] Hupach S.安全的超纯水 TOC 分析[J].流程工业,2022,(5):46-47.
- [5] 王思华.基于紫外氧化法的超纯水 TOC 含量检测仪的研究及应用[D].青岛科技大学,2022.