

化学实验室纯水系统的全流程质量控制研究

吴倪征

中国电子系统工程第二建设有限公司 江苏 无锡 214000

摘要：化学实验室纯水作为基础试剂，其质量直接影响分析结果的准确性与可重现性。纯水系统从原水处理到终端取用的全流程中，存在微生物滋生、总有机碳升高、电阻率下降等多重风险。本文系统解析了纯水系统的工艺流程与水质标准，从制备环节、储存分配环节及维护保养三个维度提出全流程质量控制策略，涵盖预处理单元控制、核心纯化单元优化、循环管路设计、消毒管理及异常处置。研究表明，纯水质量控制不应依赖终端检测，而应建立覆盖设计选型、日常监测、维护保养、验证确认的全流程质量管理体系。

关键词：化学实验室；纯水系统；全流程质量控制

引言：化学分析中，纯水广泛用于试剂配制、空白制备、器皿清洗及仪器进样，其纯度是决定分析结果准确性的基础要素。纯水中的离子、有机物、微粒或微生物可能引起基线漂移、灵敏度下降、假阳性或假阴性等严重问题。然而，许多实验室仅关注制备设备的出水指标，忽视了储存、分配及取用环节的污染风险，导致终端水质劣化。国内外纯水标准（GB/T 6682、ISO 3696、ASTM D1193）对电阻率、总有机碳、微生物等指标有明确规定，但如何系统性保障全流程水质稳定仍是实验室管理的难点。本文从全流程视角出发，系统探讨纯水系统的质量控制策略。

1 化学实验室纯水系统构成与水质标准

1.1 典型纯水系统工艺流程

纯水系统通常由预处理单元、核心纯化单元、后处理单元及储存分配系统四部分组成。预处理单元包括多介质过滤器、活性炭过滤器、软化器及保安过滤器，主要作用是去除原水中的悬浮物、余氯、硬度离子及大颗粒杂质，保护后续核心单元。核心纯化单元是纯水制备的核心，常见技术有反渗透（RO）、电去离子（EDI）及离子交换混床。RO可去除95%~99%的离子和有机物，EDI利用电场连续去除离子，适用于中等水量需求，混床则用于离子交换精处理，出水电阻率可达 $18.2\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ 以上。后处理单元包括紫外杀菌装置和终端过滤器，用于降低微生物负荷和去除残留微粒。储存与分配系统由纯水箱、循环管路及取水点组成，保障纯水在输送过程中的水质稳定。

1.2 纯水水质分级与标准

国内外标准对实验室纯水有明确分级。GB/T 6682-2008将分析实验室用水分为三级：三级水最低要求，电阻率 $\geq 0.2\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ ，用于一般化学分析；二级水电

阻率 $\geq 1.0\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ ，适用于痕量分析；一级水电阻率 $\geq 18.2\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ （ 25°C ），总有机碳 $\leq 0.5\text{mg/L}$ ，微生物 $\leq 1\text{CFU/mL}$ ，适用于高效液相色谱、质谱等精密仪器。ASTM D1193则定义了四种类型，Type I超纯水要求电阻率 $\geq 18.2\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ 、TOC $\leq 50\text{ppb}$ 、微粒 ≤ 1 个/mL。特殊检测对纯水有附加要求：液相色谱用水需低紫外吸收（在 254nm 处吸光度 $\leq 0.001\text{AU}$ ），ICP-MS用水需超低金属离子（如钠 $\leq 0.1\text{ppb}$ ）。各指标之间存在关联，低电阻率通常伴随有机物和微粒超标，需综合控制。

1.3 纯水系统常见质量风险源

纯水系统全流程中主要存在四类质量风险。一是原水水质波动：市政供水因季节、水源变化导致电导率、余氯、微生物含量波动，超出预处理设计能力时影响出水水质。二是系统设计缺陷：管路存在死腔和盲肠段导致水流停滞、微生物滋生；管材选择不当或焊接不光滑造成溶出物污染；循环管路流速不足无法维持湍流状态，促进生物膜形成^[1]。三是运行维护缺失：滤芯、软化树脂、紫外灯、终端过滤器等耗材未按周期更换，导致处理效率下降；系统消毒不彻底或不规范，造成微生物反复污染。四是取用操作不当：取水容器不洁净、取水口接触污染、停滞水未排放即取用，引入外源性污染。这些风险往往相互叠加，需系统性防控。

2 化学实验室纯水系统制备环节的质量控制

2.1 预处理单元控制要点

预处理单元是纯水系统的第一道防线，其运行状态直接影响后续核心单元的处理效率和使用寿命。多介质过滤器用于去除悬浮物和胶体，需根据进出水压差（压差 $\geq 0.05\text{MPa}$ 时反洗）定期反洗，反洗频率一般为每周1~2次，确保滤层清洁。活性炭过滤器主要去除余氯和有

机物,余氯去除效果需通过DPD比色法定期验证,出水余氯应低于0.05mg/L,活性炭饱和后需及时更换,通常每年更换1次或根据余氯穿透情况确定。软化器用于降低进水硬度,防止RO膜结垢,出水硬度应控制在 $\leq 1.5\text{mg/L}$ (以 CaCO_3 计),软化器需根据用水量或出水硬度自动/手动再生,再生周期一般为3~7天。保安过滤器作为RO进水的最后屏障,滤芯精度通常为 $5\mu\text{m}$,用于拦截前段脱落的细小颗粒和微生物,当进出水压差 $\geq 0.07\text{MPa}$ 或运行3~6个月时应更换滤芯。各预处理单元应建立运行日志,记录运行参数和维护记录,便于追溯和问题排查。

2.2 核心纯化单元控制

核心纯化单元是决定纯水出水水质的关键环节。反渗透(RO)系统的核心控制指标是脱盐率和产水流量。脱盐率应为97%~99%以上,通过在线电导率监测计算,脱盐率显著下降通常提示膜污染或膜老化。RO产水电导率应低于原水电导率的5%,回收率控制在50%~75%之间。RO膜需定期进行化学清洗,清洗周期一般为3~12个月,可根据产水量下降10%~15%或脱盐率下降5%以上判断。电去离子(EDI)系统适用于产水量中等、水质要求高的场景,进水需满足硬度 $\leq 1.0\text{mg/L}$ 、 $\text{CO}_2 \leq 5\text{mg/L}$ 、 $\text{TOC} \leq 0.5\text{mg/L}$ 的先决条件。EDI运行需控制电压和电流,过高会导致结垢,过低则去除效率不足,产水电阻率应稳定在 $15\sim 18\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ 。离子交换混床用于终端精处理,出水电阻率应 $\geq 18.2\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ 。混床的交换容量随产水量逐渐消耗,需根据出水电阻率下降或产水量累积更换或再生,一般每1~2年更换一次。

2.3 后处理单元控制

后处理单元在纯化单元之后进一步去除残留的微生物、有机物和颗粒物,是保障超纯水水质的关键。紫外杀菌装置采用185nm和254nm双波长紫外灯,185nm波长用于降低总有机碳(TOC),254nm波长用于杀灭微生物。紫外灯强度随使用时间衰减,应定期监测强度或按累计运行时间更换,通常建议运行8000~9000小时(约12~14个月)更换,也可采用时间累计计时器提醒。紫外灯前应监测水流温度,高温时流量需相应调整以确保有效辐照剂量。终端过滤器是纯水取用前的最后一道屏障,常采用 $0.05\mu\text{m}$ 或 $0.22\mu\text{m}$ 孔径的中空纤维滤膜或微滤膜,用于截留微生物和微粒。终端过滤器需定期进行完整性测试(气泡点测试)并记录结果,更换周期一般为3~12个月,实际依据累计产水量和维护记录确定。过滤器前后宜设置取样口,便于定期检测进出水微生物指标验证过滤效果。所有后处理单元的运行状态均应纳入日常巡检记录^[2]。

3 化学实验室纯水系统储存与分配环节的质量控制

3.1 纯水箱设计与运行

纯水箱设计直接影响储存期间水质稳定性。水箱应选用低溶出材料,推荐316L不锈钢(内壁电抛光至 $\text{Ra} \leq 0.4\mu\text{m}$)或专用聚乙烯。水箱需密闭设计,配备 $0.2\mu\text{m}$ 疏水性空气过滤器阻隔微生物,空气过滤器每6~12个月更换。内部应采用锥底或锥顶设计,配置 360° 旋转喷淋球确保内壁全覆盖清洗,焊缝须打磨抛光避免死角。液位控制宜采用非接触式传感器,避免探头污染。水箱底部应设排放阀,具备完全排空能力。运行中应保持纯水动态循环,防止长期静止导致水质劣化,同时保持补水和取水平衡,防止负压或溢流。

3.2 循环管路系统设计

循环管路设计核心是抑制微生物滋生。管路应采用24h连续循环,无法连续时每天至少循环2~4小时。管内流速应 $\geq 1.0\text{m/s}$ 维持湍流状态,减少微生物附着。管材应选用PVDF、PP或钝化316L不锈钢,管路连接采用热融或氩弧焊。管路坡度不小于0.5%,低点设排放口。应避免盲肠段和死腔(长径比 $L/D \geq 3$ 即视为死腔),取水支管长度不超过1.0m,末端设循环阀门保持微循环。管路宜配置在线电阻率和TOC监测探头,建议进行水力学模拟,提前识别低流速区域和死腔段。

3.3 取水点管理

取水操作规范性直接影响终端水质。取水口应选用隔膜阀或微型循环取水阀,齐平安装,避免使用普通球阀(存在积水腔体易滋生微生物)。取水操作应标准化:取水前排放1~3分钟停滞水,长期未使用时延长排放时间;容器使用前用待取水冲洗3次;取水时避免取水口与容器接触;一级超纯水即取即用,三级水可用洁净聚乙烯瓶短期储存(不超过1周)。不同取水口应标注纯水等级避免混用,设置“取水前排放”标识。多用户实验室可实行取水点定期轮换和责任人制度,确保每个取水口均得到定期使用^[3]。

4 维护保养与异常处置

4.1 日常维护标准操作规程

纯水系统的长效稳定运行离不开规范的日常维护。每日巡检内容包括记录RO产水电导率、EDI出水电阻率、产水流量及系统压力,与历史基线对比,及时发现异常趋势。每周维护包括取水口阀体外部清洁、空气过滤器外观检查,以及软化器出水硬度手动检测(自动软化器可关闭)。每月维护更关键:非自动软化器进行再生操作;保安过滤器在压差超标或运行3~6个月更换滤芯;用沾有无菌水的棉签擦拭取水口内表面,进行微生

物涂布检测；检查管路外观有无渗漏或损坏。季度及年度维护需执行深度保养：每季度或半年对RO膜进行化学清洗（产水量下降超10%时提前）；每年更换紫外灯（累计运行 ≥ 8000 小时）；每年更换空气过滤器滤芯；每年对管路系统进行一次全面消毒，并对EDI模块进行评估。所有维护操作需记录在设备运行日志中，形成可追溯的维护档案。

4.2 系统消毒方法与周期

系统消毒是控制微生物污染的核心手段。化学消毒法应用最广，常用消毒剂包括：次氯酸钠（50~100ppm有效氯），接触时间30~60分钟，适用于耐氯材质的管路和不锈钢水箱；过氧乙酸（0.1%~0.2%），消毒效果强、分解产物无害，适用于大多数软管和不锈钢系统，接触时间30分钟后需彻底冲洗；过氧化氢（3%~5%），分解为水和氧气，无残留毒性，适用于敏感系统。热水消毒法适用于耐热管路（如不锈钢），将系统内热水循环加热至80℃以上并维持60分钟，冷却后排空，无需化学冲洗，环保且无残留。臭氧消毒需配备臭氧发生器，循环浓度0.2~0.5mg/L，接触30分钟后通过紫外灯将残留臭氧降解为氧气。消毒周期应根据系统微生物监测结果确定：纯水系统一般每3~6个月消毒一次；若微生物持续超标需缩短至每月一次^[4]。消毒后必须充分冲洗，直至出水电阻率恢复正常水平且无消毒剂残留（如余氯 $< 0.05\text{mg/L}$ ），方可恢复供水。

4.3 常见异常诊断与处置

纯水系统运行中常见异常需快速诊断处置。电阻率下降的原因包括：RO膜脱盐率下降（膜老化或破损，需更换）；混床离子交换树脂失效（需更换或再生）；EDI模块进水条件异常或电流电压不当（调整参数）；系统污染（微生物膜或无机盐结垢，需清洗消毒）；原水水质大幅波动（核查原水）。排查流程应逐段取样分析，定位问题单元。TOC升高的主要原因有：紫外灯强度衰

减或灯管失效（更换紫外灯）；微生物在系统内大量滋生（消毒处理）；活性炭过滤器吸附饱和（更换活性炭）；源水有机物含量升高（增加预处理）。微生物超标是最常见问题，处理方案为系统全面消毒并更换终端过滤器，若反复超标需检查是否存在管路死腔或循环中断，必要时改造管路。产水量下降通常由RO膜堵塞、保安过滤器堵塞或增压泵故障引起，可通过测量各段压力判断堵塞位置，分别采取化学清洗、更换滤芯或维修更换泵体处置。所有故障应记录原因和处理措施，作为后续预防的依据。

结束语

化学实验室纯水系统的全流程质量控制是一项系统性工程。本文从制备、储存分配到维护保养三个维度构建了完整的质量控制体系，强调了预处理、核心纯化、后处理、水箱与管路设计、在线监测、定期消毒及异常处置等各个环节的协同作用。纯水质量控制不能仅依赖终端水质检测，而应建立覆盖设计选型、运行监控、维护保养、验证确认的全流程质量管理闭环。实验室应根据自身检测需求和管理能力，制定符合标准的操作规程并严格执行，定期审计和优化系统性能。全流程质量控制策略的有效实施，将显著提升纯水系统的运行稳定性，为化学分析结果的准确性和可靠性提供坚实保障。

参考文献

- [1]施强. 实验室超纯水系统PVDF管道施工技术[J]. 安装,2023(4):36-38.
- [2]李婉,邱晓航,王秀云,等. 实验室用水规格及电导率仪使用操作规范建议[J]. 大学化学,2026,41(3):77-86.
- [3]朱罗茵,梁毅,叶勋. 从微生物控制角度探讨制药纯化水系统的工艺设计[J]. 中国医药工业杂志,2024,55(10):1336-1342.
- [4]王晓东,李静. 实验室超纯水系统的使用与维护管理[J]. 化学分析计量, 2022, 31(5): 89-92.