

高纯水制备过程中二级反渗透与抛光混床系统性能评估与改进

于重洋

南乙环境工程技术(上海)有限公司 上海 200240

摘要: 在高纯水制备工艺里, 二级反渗透与抛光混床系统起着关键作用, 其性能直接决定高纯水的质量与制备效率。本文全面评估这两个系统的性能, 深入分析运行数据和实际案例, 发现二级反渗透系统存在膜污染致使脱盐率下降、能耗较高等问题; 抛光混床系统面临树脂使用寿命短、再生效果不稳定等状况。针对这些问题, 提出了优化预处理工艺、选用新型膜组件、改进树脂再生工艺等改进措施。改善后不仅提高了系统整体的脱盐率, 同时改善了产水水质及水量的增加, 降低了系统运维成本。

关键词: 高纯水制备; 二级反渗透; 抛光混床; 性能评估; 改进措施

1 引言

随着电子、制药、半导体等行业的飞速发展, 对高纯水的水质要求日益严苛。高纯水制备过程中, 二级反渗透与抛光混床系统是保证出水水质的关键环节。二级反渗透通过两次反渗过程, 有效去除水中的溶解性盐类、胶体、微生物等杂质; 抛光混床则进一步对反渗透产水进行深度脱盐和纯化, 使水质达到更高标准。然而, 在实际运行中, 这两个系统会面临各种问题, 影响高纯水的制备效率和质量。因此, 对二级反渗透与抛光混床系统进行性能评估与改进具有重要的现实意义^[1]。

2 二级反渗透与抛光混床系统概述

2.1 二级反渗透系统工作原理

二级反渗透系统是在一级反渗透的基础上, 对一级反渗透产水再次进行反渗透处理。其核心部件是反渗透膜, 利用半透膜的原理, 在高于溶液渗透压的作用下, 使水分子通过反渗透膜, 而水中的无机盐、重金属离子、有机物、胶体、细菌、病毒等杂质被截留在膜的另一侧, 从而达到分离、提纯和浓缩的目的。通常, 一级反渗透可去除原水中90% - 95%的盐分, 二级反渗透对剩余盐分的去除率可达95%以上, 进一步降低水中的含盐量, 提高水质, 满足后续高纯水制备工艺的要求。

2.2 抛光混床系统工作原理

抛光混床一般设置于二级反渗透系统之后, 是高纯水制备的精处理设备。它由氢型强酸性阳离子交换树脂和氢氧型强碱性阴离子交换树脂按一定比例均匀混合而成。当水通过抛光混床时, 水中的阳离子与氢型树脂中的 H^+ 进行交换, 阴离子与氢氧型树脂中的 OH^- 进行交换, 交换下来的 H^+ 和 OH^- 结合生成水, 从而实现水中离子的

深度去除, 使水质电阻率可达到 $18M\Omega \cdot cm$ 以上, 满足高纯水的严格要求。

2.3 系统在高纯水制备中的作用及地位

在高纯水制备工艺中, 二级反渗透系统作为主要的脱盐单元, 承担着去除水中大部分盐分和杂质的重任, 为后续的精处理提供水质相对较好的进水。它能有效降低水中的溶解性固体(TDS)、硬度、重金属离子等, 减轻后续抛光混床的处理负荷。而抛光混床系统则是高纯水制备的最后一道关键工序, 对二级反渗透产水进行深度精制, 去除残留的微量离子和有机物, 确保最终出水水质达到高纯水标准。^[2]

3 性能评估

3.1 评估指标设定

(1) 脱盐率: 衡量二级反渗透系统和抛光混床系统去除水中盐分的能力, 是评估系统性能的关键指标。脱盐率 = $(1 - \text{产水含盐量} \div \text{进水含盐量}) \times 100\%$, 脱盐率越高, 表明系统对盐分的去除效果越好。

(2) 产水水质: 包括电阻率、总有机碳(TOC)、颗粒物质含量、细菌内毒素等指标。高纯水的电阻率通常要求达到 $18M\Omega \cdot cm$ 以上, TOC含量越低越好, 颗粒物质和细菌内毒素需控制在极低水平, 以满足不同行业对高纯水水质的严格要求。

(3) 产水量: 指系统单位时间内的产水体积, 反映系统的生产能力。稳定且满足设计要求的产水量对于保证生产连续性至关重要。

(4) 能耗: 主要考量二级反渗透系统中高压泵等设备的耗电量, 以及抛光混床系统再生过程中的能源消耗。能耗过高会增加生产成本, 降低系统的经济性。

3.2 数据收集与分析方法

(1) 数据收集：在二级反渗透与抛光混床系统的进、出水口安装在线监测仪表，实时采集进水和产水的水质参数，如电导率、电阻率、TOC等；利用流量计记录产水量；通过电力监测设备统计系统的能耗数据。同时，定期人工采集水样，送至实验室进行更全面的水质分析，包括颗粒物计数、细菌内毒素检测等，以补充在线监测数据的不足。

(2) 数据分析方法：运用统计分析方法，对收集到的数据进行整理和分析。计算各项性能指标的平均值、标准差、最大值和最小值等统计量，以了解数据的集中趋势和离散程度。例如，分析脱盐率与进水水质、运行压力、温度等因素之间的相关性，为优化系统运行提供依据。

3.3 实际运行性能表现及数据分析

(1) 二级反渗透系统：在正常运行条件下，二级反渗透系统的平均脱盐率可达98%以上，但随着运行时间的增加，膜污染逐渐加重，脱盐率呈下降趋势。当运行时间达到6个月时，脱盐率下降至95%左右，产水电导率升高。产水量方面，初期能稳定达到设计值，但膜污染后，产水量也有所降低，约为设计值的85% - 90%。能耗随着运行时间和膜污染程度的增加而上升，高压泵的工作压力逐渐增大，导致耗电量增加。此外，系统对进水水质的变化较为敏感，当进水的SDI（污染指数）超过5时，膜污染速度明显加快，系统性能下降更为显著^[3]。具体运行数据统计如表1。

表1 二级反渗透系统运行数据分析表

运行时间	脱盐率 (%)	产水电导率 (μs/cm)	产水量 (m³/h)	能耗 (KW.h/m³)	进水SDI
1个月	98.5	5.2	25	2.5	3.5
3个月	97.8	6.5	23	2.8	4.0
6个月	95.2	10.3	20	3.5	5.5

以内蒙古鑫晶新材料科技有限公司-纯水系统，其高纯水制备系统中的二级反渗透装置在运行初期，各项指标表现良好，脱盐率稳定在98.5%，产水量维持在每小时25立方米的设计标准。但运行5个月后，由于当地水源水质季节性波动，进水SDI值从4上升到6，膜污染加剧。短短一个月内，脱盐率降至94%，产水量减少至每小时20立方米，高压泵能耗相比初始阶段增加了18%，严重影响了生产进度与产品质量。

(2) 抛光混床系统：新投入使用的抛光混床产水电阻率可稳定达到18MΩ·cm以上，TOC含量小于5ppb，水质优良。然而，随着树脂交换容量的逐渐耗尽，产水水

质逐渐恶化。一般情况下，抛光混床的树脂使用寿命在3 - 6个月左右，之后产水电阻率下降至16MΩ·cm以下，无法满足高纯水的质量要求^[4]。运行数据统计如表2。

表2 抛光混床系统运行数据分析表

运行时间	产水电阻率 (MΩ·cm)	TOC含量 (ppb)	再生次数	再生后达标情况
1个月	18.3	3.2	0	/
3个月	17.5	4.0	1	是
5个月	15.8	6.5	2	否（第二次再生后达标）

以内蒙古鑫晶新材料科技有限公司-纯水系统抛光混床系统为例，初始产水电阻率稳定在18.2MΩ·cm，TOC含量维持在3ppb左右。运行4个月后，产水电阻率降至15.8MΩ·cm。首次再生后，电阻率仅回升至16.5MΩ·cm，未能达到制药工艺要求的18MΩ·cm以上。

3.4 存在问题剖析

(1) 二级反渗透系统：

膜污染问题：原水中的胶体、有机物、微生物等杂质在反渗透膜表面逐渐积累，形成污垢层，导致膜通量下降，脱盐率降低。此外，水中的钙、镁等离子在一定条件下会在膜表面结垢，进一步加剧膜污染。

能耗较高：为了克服反渗透膜的阻力，使水通过膜进行分离，需要高压泵提供较高的压力，这导致系统能耗较大。

对进水水质要求严格：二级反渗透系统对进水的SDI、余氯、浊度等指标要求较高，若进水水质不符合要求，会加速膜污染，缩短膜的使用寿命，影响系统性能的稳定性^[5]。

(2) 抛光混床系统：

树脂使用寿命短：由于高纯水制备过程中对水质要求极高，抛光混床中的树脂交换容量消耗较快，导致树脂使用寿命相对较短，需要频繁更换树脂，增加了运行成本。

再生效果不稳定：树脂再生过程中，酸碱浓度、再生时间、流速等因素控制不当，容易导致再生效果不理想，使再生后的树脂交换容量无法恢复到最佳状态，影响产水水质。

4 改进措施探讨

4.1 优化预处理工艺

(1) 强化过滤技术：在二级反渗透系统前增加多介质过滤器和超滤装置，多介质过滤器采用石英砂、无烟煤等滤料，可有效去除原水中的大颗粒悬浮物、胶体等杂质；超滤装置利用超滤膜的筛分作用，进一步去除水中的微小颗粒、细菌、大分子有机物等，降低进水的

SDI值,减轻反渗透膜的污染负荷。例如,采用精度为 $0.01\mu\text{m}$ 的超滤膜,可将进水的SDI值稳定控制在3以下,有效保护反渗透膜。

(2) 软化处理:对于硬度较高的原水,采用离子交换软化器或反渗透软化工艺,去除水中的钙、镁离子,降低水的硬度,防止在反渗透膜表面结垢。离子交换软化器可将水中的钙、镁离子交换为钠离子,使水的硬度降低至 50mg/L 以下,有效避免反渗透膜结垢现象的发生。

4.2 选用新型反渗透膜组件

(1) 低能耗膜:采用新型的低能耗反渗透膜,如陶氏公司研发的FilmTec™ SW30XLE-400i 海水淡化反渗透膜,该膜具有更低的操作压力和更高的水通量。在相同的产水量和脱盐率要求下,使用低能耗膜可使高压泵的工作压力降低20% - 30%,从而显著降低系统的能耗。

(2) 抗污染膜:选择具有抗污染性能的反渗透膜,如表面经过特殊改性处理的膜材料,可增加膜表面的亲水性,减少污染物在膜表面的吸附和沉积。

(3) 高脱盐率膜:对于对水质要求极高的应用场景,选用高脱盐率的反渗透膜,如海德能公司的ESPA系列反渗透膜,其对盐分的去除率可达99.7%以上,能够进一步提高二级反渗透系统的脱盐效果,为后续抛光混床系统提供更低含盐量的进水,减轻抛光混床的处理负担,提高高纯水的质量。

4.3 改进树脂再生工艺

(1) 优化再生参数:通过实验研究和数据分析,确定抛光混床树脂再生的最佳酸碱浓度、再生时间和流速等参数。例如,对于强酸性阳离子交换树脂,采用4% - 6%的盐酸溶液作为再生剂,再生时间控制在30 - 60分钟,流速为3 - 5BV/h(床体积/小时);对于强碱性阴离子交换树脂,采用4% - 8%的氢氧化钠溶液作为再生剂,再生时间为45 - 90分钟,流速为2 - 4BV/h。通过优化再生参数,可提高树脂的再生效果,使再生后的树脂交换容量恢复率达到90%以上。

(2) 采用分步再生法:将传统的一次再生过程改为分步再生,先使用低浓度的酸碱溶液进行初步再生,去除树脂表面的大部分污染物和离子,然后再用高浓度的酸碱溶液进行深度再生,恢复树脂的交换容量。

5 改进效果预测

5.1 性能提升预期

(1) 脱盐率提高:通过优化预处理工艺、选用新型反渗透膜组件和改进抛光混床树脂再生工艺,二级反渗透系统的脱盐率有望稳定保持在99%以上,抛光混床系统的产水电阻率可长期维持在 $18.2\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ 以上,有效提高高纯水的纯度,满足高端电子、制药等行业对水质的严格要求。

(2) 产水水质改善:在降低盐分含量的同时,预处理工艺的强化和智能监控系统的应用,可使高纯水的TOC含量降低至3ppb以下,颗粒物质和细菌内毒素含量也将得到更严格的控制,进一步提升高纯水的质量,为产品的高质量生产提供可靠保障。

(3) 产水量稳定:减少膜污染和设备故障对系统运行的影响,二级反渗透系统的产水量可稳定保持在设计值的95%以上,保证生产的连续性和稳定性,提高生产效率。

(4) 能耗降低:低能耗反渗透膜的使用和系统运行的优化,可使二级反渗透系统的能耗降低20% - 30%,有效降低生产成本,提高企业的经济效益和市场竞争力。

结论

二级反渗透与抛光混床系统在高纯水制备过程中起着举足轻重的作用,其性能直接关乎高纯水的质量和生产效率。通过对这两个系统全面的性能评估,明确了当前存在的膜污染、能耗高、树脂使用寿命短、再生效果不稳定,使产水水质难以维持达标。

参考文献

- [1] 仲惟雷,赵芳,康燕等.反渗透技术在大型电子超纯水项目中的应用[J].工业水处理,2015,35(05):106-108.
- [2] 吕松,邹锦元,关天丽.一级反渗透+二级EDI超纯水系统在广州市药品检验所的应用研究[J].生命科学仪器,2008(08):53-57.
- [3] 张海松.二级反渗透法制备纯化水工艺说明[J].现代工业经济和信息化,2015:54-55.
- [4] 李刚.基于抛光废料制备抛光砖的工艺研究[J].城镇建设,2021:1(253).
- [5] 张四海,彭贤东.二级反渗透设备制备纯化水的生产工艺与水质控制[J].医疗装备,2017.7: 60-61.