

## 超纯水在稳态强磁场实验装置中的应用

丁少华<sup>1</sup>, 欧阳峥嵘<sup>2</sup>

(1 上海华强环保设备工程有限公司, 上海 201210 2 中国科学院强磁场中心, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 强磁场实验装置是国家发改委批准的国家“十一五”重大科技基础建设项目之一, 是一项国家大科学工程, 具有国际先进水平, 可为众多学科领域的科学研究提供强磁场极端实验环境和实验手段的大型综合科学实验装置。中国科学院强磁场中心将与美国、法国、荷兰、日本并列成为世界五大稳态强磁场科学中心之一。超纯水冷却系统作为强磁场实验室的电源、水冷、低温、控制系统等四大技术装备系统重要组成部分, 主要为 40T(特斯拉)级稳态强磁场实验装置的水冷磁体和 20MW(兆瓦)高功率高稳定度电源提供去离子水冷却系统。此外, 为保证水质(电阻率)稳定性还专门设置了循环提纯系统。

本项目中去离子水冷却系统充分体现了环保和节能的设计思路, 其中包括反渗透系统(RO)浓缩水回收利用、NaOH自动精确投加, 以及无酸碱废液排放的电再生去离子装置(CEDI)等。

**关键词:** 特斯拉; 超纯水; 提纯系统; 材料污染; 清洁施工; 无酸碱废液排放

## Application of Ultra-pure Water in Steady High Magnetic Field Laboratory

DING Shao-hua<sup>1</sup>, OUYANG Zheng-rong<sup>2</sup>(1 Shanghai Huaqiang Environmental Protection Equipment & Engineering Co., Ltd., Shanghai 201210  
2 High Magnetic Field Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Anhui Hefei 230031, China)

**Abstract** High magnetic field laboratory was one of major technical infrastructure projects approved by the National Development and Reform Commission in “Eleventh Five-Year”. It was a Large Scale Scientific Facility with international advanced level and it can serve for many disciplines to provide extreme high magnetic fields environment of scientific research and experiment. High Magnetic Field Laboratory of Chinese Academy of Sciences would be tied into one of the world's top five science centers in steady high magnetic field with United States, France, Netherlands and Japan. Ultra-pure water as water cooling system was the very important part of four technical equipment systems such as Power, CWS, Cryogenics technology and Central control system. It supplied cooled demineralization water to the Water-cooled Magnet and the 20MW high stability power of the 40 Tesla steady high magnetic fields. In addition, it needed to be set up purification system to keep resistive stability in recycle system. Cooled demineralization water system in this project reflected the design idea fully for environmental protection and energy saving including the recycle of RO concentration water, NaOH dosing automatically and accurately, CEDI unit without acid and alkaline waste water, and so on.

**Key words** Tesla ultra-pure water purification system; materials pollution; clean construction; no acid and alkaline waste water be discharged

磁现象是物质的基本现象之一。科学研究早已证实, 当物质处在磁场中, 其内部结构可能发生改变, 强磁场与极低温、超高压一样, 被列为现代科学实验最重要的极端条件之一, 为物理、化学、材料和生物等学科研究提供了新途径, 对于发现和认识新现象、揭示新规律具有重要作用。强磁场下的核磁共振, 又是生命科学、医学、脑科学研究的必要工具。强磁场可分为稳态强磁场和脉冲强磁场两大类, 其对应的发生装置又分为稳态强磁场装置和脉冲强磁场装置。超纯水冷却系统是强磁场实验室的电源、水冷、低温、控制系统等四大技术装备系统重要组成部分。它包括一次冷冻水系统, 二次冷冻水系统, 蓄冷水罐, 去离

子水制备及循环提纯系统, 电力配电和整个中央控制系统等。本文主要讨论在稳态强磁场实验装置中有关超纯水的应用、水系统设计、管道材料腐蚀性和洁净措施、中央控制系统和工程管理。

## 1 设计条件

## 1.1 原水资料

自备水厂出厂水, 由国家城市供水水质监测网合肥监测站检测。

表 1 主要指标如下

水样 编号	浊度 NTU	pH	溶解性 总固体 /(mg/L)	总硬度 (CaCO <sub>3</sub> ) /(mg/L)	铁 /(mg/L)	铝 /(mg/L)	余氯 /(mg/L)
1	< 0.8	7.84	148	104	< 0.04	< 0.05	1
2	0.22	7.80	90	60	< 0.02	0.012	0.3
3	0.54	7.81	97	92	< 0.04	0.024	0.1

## 1.2 稳态强磁场装置对超纯水水质、产水量、水温 and 供水压力的要求

### 1.2.1 超纯水制备系统

产水量 10m<sup>3</sup>/h, 水压 5bar, 电阻率 ≥ 18MΩ·cm (25℃), 溶解氧 ≤ 0.01mg/L, TOC ≤ 0.025mg/L, 颗粒物 ≤ 0.5μm.

### 1.2.2 磁体冷却循环提纯系统

循环水量 34.5m<sup>3</sup>/h (按循环总水量的 4% 设计), 即时温度下电阻率 ≥ 14MΩ·cm, 磁体冷却水进口水温 10℃, 磁体冷却水出口水温 30℃.

### 1.2.3 电源冷却循环提纯系统

循环水量 17.2m<sup>3</sup>/h (按循环总水量的 20% 设计), 即时温度下电阻率 ≥ 5MΩ·cm, 电源冷却水入口水温 15℃, 电源冷却水出口水温 35℃.

## 2 超纯水制备及循环提纯系统设计

超纯水制备装置是为磁体水冷系统、电源水冷系统分别提供不同要求的补充水。此外, 磁体水冷系统和电源水冷系统内部还另设循环水提纯装置, 目的是为了内部循环水质满足系统要求。

(1) 预处理设备主要由原水箱、原水泵、反洗泵、PAC加药装置、砂过滤器、活性炭过滤器、阻垢剂加药装置、热交换器、保安过滤器组成。

(2) 除盐单元主要采用二级反渗透 (RO) 和连续电去离子装置 (CEDI)。反渗透膜是依靠压力驱动, 借助于半透膜的选择截留作用将溶液中的溶质 (水中的离子成份) 与溶剂 (水) 分离, 从而达到脱盐去离子目的。

本工艺先通过 1st RO, 去除水中 97% ~ 98% 的盐份 (即水中的阴、阳离子), 再由 2nd RO 将 1st RO 未能彻底脱除的离子有效去除。由于溶解于水中 CO<sub>2</sub> 气体能透过反渗透膜, 会影响反渗透出水的电导率及 pH 值, 因此必须在 2nd RO 前投加 NaOH, 调整 pH 值, 将 1st RO 出水中的 CO<sub>2</sub> 气体转换成能被 2nd RO 去除的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 从而控制 2nd RO 出水电导率及 pH 能满足用户要求。2nd RO 的浓水回流, 作为 2nd RO 进水来使用, 以节省水资源。NaOH 计量泵则根据在线 pH 反馈信号, 自动加药, 以出水 pH 值及电导率值最佳为控制目标。

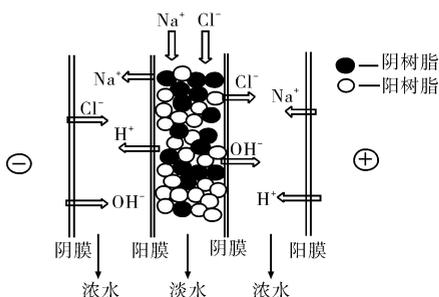


图 1 CEDI 工作原理

连续电去离子法 (Continuous Electro-Deionization), 简称 CEDI 是一种将电渗析与离子交换有机地结合在一起的膜分离脱盐工艺, 是当今最先进的高科技绿色环保技术。它利用电渗析过程中的极化现象对离子交换填充床进行电化学再生, 集中了电渗析和离子交换法的优点, 克服了两者的弊端。

(3) 终端部分为氮封纯水箱, UPW 水泵, 185nmTOC UV、脱气膜装置、抛光混床 (Polish)、终端过滤器等组成。

(4) 终端出水经 UPW 水泵增压后, 送至磁体水冷系统, 并与氮封纯水箱保持 30% 回流量, 进行 24h 不间断运行。

(5) 为了保证进入磁体水冷循环系统的超纯水水温 (10℃) 和供水压力 (30bar), 还需进行冷却和加压。

(6) ED 出水即可作为电源水冷系统的补充水, 输送泵一用一备, 作变频控制。当水冷循环水水质变差或最大热负荷停运时, 需排放不合格水、补充新鲜水。

(7) 为了保证磁体水冷系统内的超纯水品质能持续稳定, 在超纯水循环中持续分流部分纯水通过提纯系统提纯后再进入循环。

## 3 中央控制系统

根据本工程的工艺流程, 充分考虑控制系统的安全性、稳定性, 采用的自动控制结构为 PLC 与高性能上位机监控系统相结合的形式, 另外还配备一系列在线测量仪表以及分析仪表等。上位机作为操作监控站和工程师监控站, 通过连接 PLC 组成多个分控站, 可以实现分级分布端, 而上位机则成为服务器, 通过客户端对服务器的访问, 完成一系列数据传输。

超纯水系统中选用德国 Siemens 公司 S7-300 系列 PLC, 上位机监控系统中配置了 21 寸液晶显示屏以及 Siemens 公司的 W NCC 工业组态软件。将系统中各水泵和变频器的相关信号输入 PLC, 并根据程序进行自动连锁控制。工艺运行参数及分析参数, 通过各在线仪表发出的 4~20mA 的过程信号通过屏蔽电缆传输到 PLC 中, 增强抗干扰能力, PLC 的 A/D 转换功能, 把现场模拟量信号, 如温度传感器、流量传感器、压力传感器、电导率仪、电阻率仪等, 转换成数字量信号, 通过以太网与上位机的网络连接, 传送至其数据库中。通过组态软件可以显示总平面图、工艺流程图、设备布置图等, 也可以显示每一设备的工况和每一节点的参数, 实现系统的监视及现场实时参数的即时显示及历史趋势; 同时具有数据查询、状态查询、数据存储、控制管理故障显示、画面及报表打印等功能。

超纯水冷却系统上位机系统配置两台工作站, 四个 21 寸液晶显示屏, 一台打印机, 经交换机和 PLC 的 CPU 通过以太网通讯; PLC 选择 Siemens 公司 S7-300 系列, 采用两套 CPU 做冗余系统, 另配以太网模块与上位机通讯; PLC 的 CPU 和六个工作区的现场 ET200M 子站通过 Profibus-DP 协议通讯; 现场仪表及设备通过屏蔽或非屏蔽双绞线同 ET200M I/O 模块连接; 工作站配置一套 SIEMENS 公司的 W NCC 工业组态软件, 通过 Profibus 协议和 PLC 进行通信, W NCC 监视控制软件采用模块化设计, 包括系统配置组态、实时采样及控制点组态、控制过程组态、流程显示及操作画面组态, 以及进行历史数据记录及统计报表组态。实现对本系统的各参数的实时监控、运行状态显示、报警、自动保护、运行控制。

通过 Profibus-DP 协议将超纯水系统与超纯水冷却系统进行连接, 更方便地监控全套系统的运行情况。同时, 在控制室内设置一套能维持 30 分钟的 UPS 为控制室计算机和 PLC 柜在紧急情况下供电, 进一步保证设备的正常运行。

## 4 超纯水冷却系统的水质保证措施

### 4.1 注重设计和施工

超纯水在冷却水系统中的节能措施和工况, 以及确保强磁场实验室磁体和电源散热冷却方面十分重要。通过与设计、建设、使用等各方的沟通和技术交流, 充分了解了依据强磁场实验室规划实验安排, 以及水冷磁体和电源系统设计要求所提出的各项技术要求。我们借鉴十多年长期从事 ASTM 电子级超纯水和医药行业符合 GMP(或 FDA)标准的纯化水经验和业绩, 对于整个工程的纯化度和洁净度提出了严格的控制要求, 设备自出厂清洗完成后, 到运输、搬入及管道施工前, 各外露接口均采用密封加盖措施, 保持清洁状态, 防止杂物灰尘进入。

### 4.2 水冷系统管路材料的选择

目前超纯水制备中的管道、水箱、泵、阀等主要部件一般由金属和塑料等制成。聚氯乙烯、聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯等常

用的高分子材料和橡胶制品, 在合成时均会加入一些助剂, 从而引入一些离子和盐类, 在与超纯水接触时(尤其是静态接触), 会产生不同程度的污染。因此, 本项目在管路选材方面特别重视<sup>[1]</sup>。

(1)在一般超纯水系统中, 采用动态循环的供水方式, Cl-UPVC材质流经 50m 及 100m 管道时, 电阻率只相应下降了  $0.3M\Omega \cdot cm$  和  $0.5M\Omega \cdot cm$ <sup>[2]</sup>。因此, 在超纯水制备终端及循环提纯系统中采用新型的 Cl-UPVC 管道系统, 对与超纯水接触的部分如垫片和粘接剂等, 均采用无毒、耐腐蚀和溶出污染少的材料。

(2)本项目中水冷循环管路中长度为 180 多米, 管径为 DN50Q 压力等级为 4.0MPa 考虑到项目投资的经济性, 选用耐腐蚀性强、污染系数较低的 SUS304 不锈钢材料<sup>[3][4]</sup>, 在管路安装完成后进行清洗预膜, 并用超纯水冲洗至电阻率合格为止。同时, 水冷循环系统设置了超纯水提纯装置等措施, 从而保证了水循环系统的高纯水电阻率符合要求。

表 2 不锈钢在不同时间内 Na、Fe、Ca 的溶出量 (ng/cm<sup>2</sup>)

项目	1h			24h			48h			72h		
	Na	Fe	Ca	Na	Fe	Ca	Na	Fe	Ca	Na	Fe	Ca
不锈钢	0		0	0.2		0	0.35		0.17	0.35		0.17

### 4.3 工程管理

(1)通过以上从系统设计角度, 对水处理工艺、设备、管路、电气、自动化控制和报警功能等方面作了充分的考虑外, 现场施工管理也是十分重要的环节。

(2)该项目指派具有十多年纯水、超纯水系统施工技术和管理经验的国家注册二级建造师任项目经理, 并精选相关工程技术人员和专业技术人员组成项目团队, 为项目的施工质量提供了人力资源保障。

(3)对本项目编制针对性的实施性施工组织设计和专项施工方案, 指导现场施工全过程、各阶段、各节点的施工。

(4)通过预先确定的一系列检查和记录, 提供文件证明设备的安装符合设计要求和生产商的建议, 设备的安装质量满足设备正常运行的条件和清洁度要求<sup>[5]</sup>。

## 5 结 语

本项目超纯水冷却系统从水处理设备性能、清洁度保证、电

导率稳定、中央控制系统以及管道选材等角度, 充分利用中科院的“国家队”优势和专业水处理公司的技术力量和经验, 在水化学和水处理工艺、材料腐蚀及电化学、节能、自动控制、洁净施工等技术领域, 进行了必要的研发和整合, 为满足 40T 稳态强磁场装置水冷磁体和 20MW 高功率高稳定度电源的技术装备系统提供了有力的技术支撑和保障。

### 参考文献

- [1] 刘玉玲, 李薇薇, 周建传. 微电子化学技术基础 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 113-115.
- [2] 闻瑞梅, 王在忠. 高纯水的制备及检测技术 [M]. 北京: 科学出版社, 1997: 176-178.
- [3] 中国特钢企业协会不锈钢分会编. 不锈钢实用手册 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003: 1031-1036.
- [4] 左景伊, 左禹. 腐蚀数据与选材手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1995: 455-617.
- [5] 国家食品药品监督管理局组织编写. 药品生产验证指南 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 90-157.