

稳态强磁场实验装置水冷系统水耗分析及回用设计^{*}

周彭, 周辰飞, 唐佳丽[†]

中国科学院合肥物质科学研究院强磁场科学中心, 合肥 230031

收稿日期: 2023-12-15; 接收日期: 2024-03-05

【摘要】 稳态强磁场实验装置水冷系统主要用于带走大功率水冷磁体运行过程中所产生的热量. 为了防止水中的离子导电, 磁体循环冷却水采用去离子水, 因此水冷系统配备了 10 m³/h 的去离子水制备系统及 65 m³/h 的提纯系统, 以保障循环水水质的高稳定性. 磁体循环冷却水的热量通过板式换热器由低温冷冻水带走. 系统在纯水制备及提纯过程中存在排水量大, 排水水质高等特征, 而在冷冻水制备过程中则存在较高的冷却水蒸发损失. 本文结合系统特征对其各环节排水量及其水质等进行了分析, 得出了该类型水冷系统的水耗特征及系统日均水耗. 结合水质, 对纯水系统的主要排水进行了回用方案分析并通过计算得出了最大回用率.

关键词: 20 MW 级水冷系统; 提纯系统; 耗水量分析; 排水回用; 分质处理

PACS: 47. 60. Dx

DOI: 10. 13380/j. ltpl. 2024. 01. 006

Water Consumption Analyzing and Drainage Recycling of Cooling Water System in Steady High Magnetic Field Facilities^{*}

ZHOU Peng, ZHOU Chenfei, TANG Jiali[†]

High Magnetic Field Laboratory, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

Received date: 2023-12-15; accepted date: 2024-03-05

【Abstract】 The 20 MW level cooling water system is mainly used to take away the heat generated during the operation of high-power resistive magnets. In order to prevent ionic conduction in the water, deionized water is used as the magnet circulating cooling water. Thus the cooling water system equips with a 10 m³/h deionized water production system and 65 m³/h purification system. The heat generated by the magnet is carried away by the low-temperature chilled water through the plate heat exchanger, thus a shock refrigeration cycle is applied. The displacement is large and drainage quality is high during the production and purification of deionized water, while existing a high loss of cooling water evaporation in the process of preparation of chilled water. In this paper, the water displacement and water quality of each unit are analyzed, and the water consumption characteristics of this type of water cooling system are obtained. It is indicated that the average daily water consumption of this system is approximately 257.25 tons. According to the difference of drainage, a reuse scheme of the system is designed, and the maximum reuse rate is 48.90%.

Keywords: 20 MW level cooling water system, Purification system, Water consumption analysis, Drainage recycling, Treatment by water quality

^{*} 中国科学院青年创新促进会基金项目(编号:2021448)资助的课题.

[†] tangjl@hmfll.ac.cn

PACS: 47.60.Dx

DOI: 10.13380/j.ltpl.2024.01.006

Reference method: ZHOU Peng, ZHOU Chenfei, TANG Jiali, Low Temp. Phys. Lett. **45**, 0042 (2024)

1 引言

随着我国工业化程度加深,水资源短缺和水污染问题日益突出,节约用水和水资源循环利用已成为各行各业生产生活中不可分割的一部分.如马言言等分析了氯碱行业的水耗特点及回用情况,指出了氯碱企业排水量占比较大的是生产废水、生活废水、热电厂脱硫废水和循环水排污等无机废水,并给出废水减排及零排放的一些建议^[1].肖劲戈对12英寸集成电路生产线的超纯水系统和全厂水系统的水耗特征和重复利用进行分析,给出了该生产线下的超纯水系统回用率宜为60%~70%^[2].赵晓丹等研究了不同水处理剂的阻垢及缓蚀性能,重复利用循环冷却水,提高工业冷却用水效率^[3].然而,针对实验装置配套大功率水冷系统的节水、排水及其回用分析尚不多见.稳态强磁场实验装置(Steady High Magnetic Field Facilities, SHMFF)包含多台水冷磁体,最高磁场可达38.5 Tesla.而高场水冷磁体运行会伴随着巨大的电能消耗,其产生的热量需要用水带走.因此,SHMFF配套了20 MW级的大型水冷系统.为了防止水中的离子导电,磁体循环冷却水采用超纯水,通常其电阻率 $\geq 15 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$,溶解氧 $\leq 10 \text{ ppb}$,故水冷系统配套了去离子水制备及提纯系统,以保证循环冷却水的水质高稳定性.磁体循环冷却水的热量则通过板式换热器,由低温冷冻水带走.板式换热器的最大换热能力约为28 MW.水冷系统在夜间通过串联离心式冷水机组,实现大温差制冷,最低制冷温度可达4℃.制冷运行8小时左右,可储满两台3000 m³蓄水罐,水蓄冷则采用自然分层水蓄冷技术.

水冷系统运行过程中会产生巨大的能耗,本文将聚焦水冷系统运行水耗问题进行分析研究.基于水冷系统各运行单元,统计不同单元不同设备的耗水量,分析水耗特征,并提出排水分质回用的方案.相关研究结论将对类似水冷系统的节水设计及节能运行提供参考.

2 水耗特征与分析

水冷系统的水耗具有分散性,不同子系统耗水量不一.相较于诸如集成电路芯片制造等行业的水耗,本系统水耗仅包括去离子水制备系统、提纯系统及制冷循环.故总耗水量由下式确定:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

式中: Q :总耗水量, m³/d;

Q_1 :去离子水制备系统耗水量, m³/d;

Q_2 :提纯系统耗水量, m³/d;

Q_3 :制冷循环耗水量, m³/d.

2.1 去离子水制备系统

去离子水制备系统以市政给水为原水,经由砂滤、活性炭过滤、两级反渗透膜(RO)过滤、电去离子(EDI)等工序,制备电阻率 $\geq 10 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ 的纯水.这之后,纯水通过脱气膜、TOC/UV、抛光混床,将电阻率进一步提升至 $18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$,并将溶解氧(DO)降至10 ppb以下,总有机碳(TOC)降至25 ppb以下^[4].最后制备完成的去离子水通过增压泵输送至磁体冷却管道.目前系统去离子水制备量为10 m³/h.制备流程如图1所示.

去离子水制备系统水耗为系统排水,耗水量由下式确定:

$$Q_1 = Q_a + Q_b + Q_c + Q_d$$

式中: Q_1 :去离子水制备系统耗水量, m³/d;

Q_a :砂、炭过滤器耗水量, m³/d;

Q_b :RO系统耗水量, m³/d;

Q_c :EDI系统耗水量, m³/d.

Q_d :去离子水输送系统耗水量, m³/d.

2.1.1 砂、炭过滤器

砂过滤器和炭过滤器为去离子水制备工艺的前处理工序,通过吸附作用对原水进行初步过滤,其主要排水为过滤器反冲洗时的清洗水.砂过滤器的清洗频率为1天1次,每次清洗水量约为13 m³;炭过滤器的反洗频率则为2天1次,每次耗水量约为6.3 m³.则砂、炭过滤器平均一天总排水量为:

$$Q_a = (6.3 + 13 \times 2) \div 2 = 16.15 \text{ m}^3/\text{d}$$

2.1.2 RO系统

RO(Reverse Osmosis)系统主要由保安过滤器、增压泵及两级RO反渗透膜等组成,可以有效去除无机和有机溶质^[5],其主要排水为反渗透过程中产生的浓水.RO系统并非连续运行,而是根据RO水箱储水量自动启停,故根据启动频率及浓水产量计算RO系统排水量.排水量计算如下:

I级RO启动时浓水产生速率为7 m³/h,II级RO启动时浓水产生速率为2 m³/h,实际测得启动时间持续10 min,两次启动间隔为74 min,则:

一天启动的次数约为: $24 \times 60 \div 74 = 19.46$ 次,

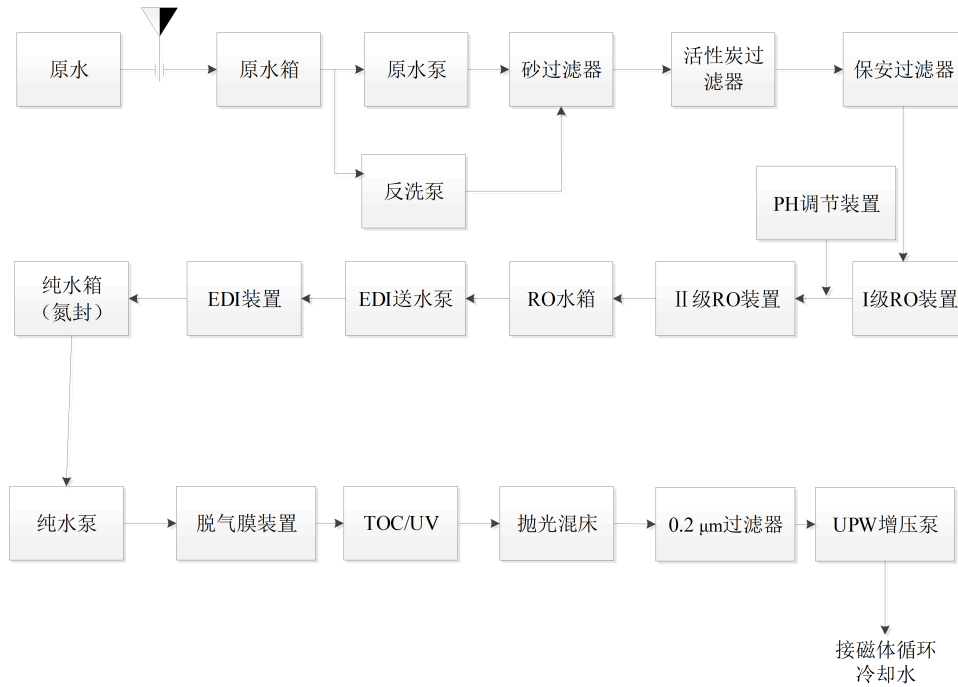


图1 去离子水的制备及输送.

计算结果取 20 次.

一天产生的浓水量约为:

$$Q_b = 20 \times (7 + 2) \times 10 \div 60 = 30 \text{ m}^3$$

其中 I 级 RO 浓水量为 $23.33 \text{ m}^3/\text{d}$, II 级 RO 浓水量为 $6.67 \text{ m}^3/\text{d}$.

2.1.3 EDI 系统

EDI(Electrodeionization)技术,又称电去离子、连续电除盐技术,通过阳、阴离子膜对阳、阴离子的选择透过作用以及离子交换树脂对水中离子的交换作用,在电场的作用下实现水中离子的定向迁移,从而达到水的深度净化除盐,并通过水电解产生的氢离子和氢氧根离子对装填树脂进行连续再生^[6]. EDI 系统主要包含 3 个 EDI 模块,排水主要为 EDI 浓水. EDI 系统全天开启,不以纯水箱水位为判据自动启停. 目前 EDI 系统的浓水产生量为:

$$Q_c = 1.2 \text{ m}^3/\text{h}(28.8 \text{ m}^3/\text{d}).$$

2.1.4 去离子水输送系统

去离子水输送系统包括增压泵、脱气膜、TOC/UV、抛光混床及 $0.2 \mu\text{m}$ 过滤器,主要功能是将除盐部分的出水电阻率进一步提升至 $18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ 左右,将溶解氧降至 10 ppb 以下,以及将 TOC 降至 25 ppb 以下. 去离子水输送系统全天运行,保证循环冷却水管道的压力,其主要排水为真空泵的冷却水,排水量为 $Q_d = 15.81 \text{ m}^3/\text{d}$. 去离子水制备系统

总耗水量为:

$$Q_1 = Q_a + Q_b + Q_c + Q_d = 16.15 + 30 + 28.8 + 15.81 \text{ m}^3/\text{d} = 90.76 \text{ m}^3/\text{d}$$

2.2 提纯系统

提纯系统可将循环冷却水管道中水质已经下降的去离子水再纯化,保持水质的高稳定性. 如图 2 所示,提纯系统分为电源提纯系统(a)和磁体循环冷却水提纯系统(b). 电源提纯系统主要包括抛光混床和 $0.2 \mu\text{m}$ 过滤器,提纯流量 $10 \text{ m}^3/\text{h}$,保证电源循环冷却水电阻率 $\geq 1 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$. 提纯系统主要由脱气膜、TOC/UV、抛光混床和 $0.2 \mu\text{m}$ 过滤器组成,提纯流量 $65 \text{ m}^3/\text{h}$,保证磁体循环冷却水电阻率 $\geq 10 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$, $\text{DO} \leq 10 \text{ ppb}$. 提纯系统的水耗也为系统排水,其中电源提纯系统无额外排水,故耗水量由下式确定:

$$Q_2 = Q_e + \overline{Q_f}$$

式中: Q_2 : 提纯系统耗水, m^3/d ;

Q_e : 真空泵冷却水排水, m^3/d ;

$\overline{Q_f}$: 溶解氧仪排水, m^3/d ;

磁体循环冷却水提纯系统有两套脱气膜装置,其配套的真空泵在运行时有冷却水排水,排水流量皆为 $15.81 \text{ m}^3/\text{d}$,则:

$$Q_e = 15.81 \times 2 = 31.62 \text{ m}^3/\text{d}$$

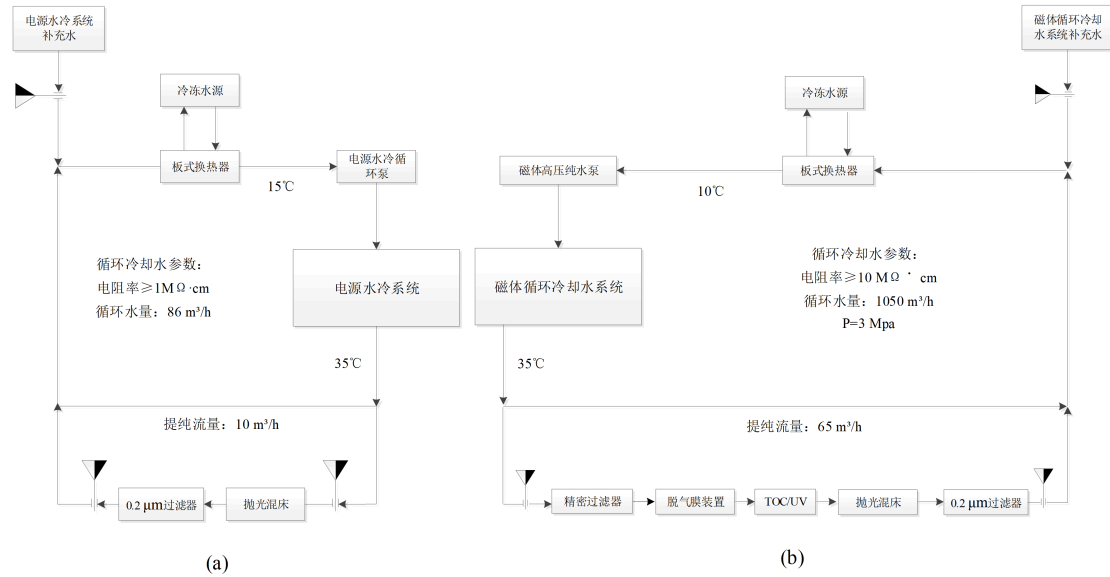


图 2 电源提纯系统(a)和磁体循环冷却水提纯系统(b).

由于管道中冷却水与磁体直接接触,为防止冷却水导电,要求去离子水的溶解氧 ≤ 10 ppb,需对循环冷却水溶解氧的含量进行实时监测. DO 溶解氧仪在线监测时会产生排水,排水量由下式计算:

$$Q_f = \frac{V}{t}$$

式中: Q_f :排水量, m^3/h ;

V : t 时间内水的体积, m^3 ;

t :时间, h ;

实际测得三组数据分别为(210, 5.34), (420, 10.22), (500, 13),单位为(ml, s). 依据上式可得排水量分别为 39.32, 41.10 和 38.46 ml/s, 则:

$$\overline{Q_f} = \frac{Q_{1a} + Q_{1b} + Q_{1c}}{3} = \frac{39.32 + 41.10 + 38.46}{3} \times \frac{24 \times 3.6}{1000} = 3.42 (m^3/d)$$

即 DO 溶解氧仪日排水量为 3.42 m^3 . 故提纯系统总排水量为:

$$Q_2 = Q_e + \overline{Q_f} = 31.62 + 3.42 = 35.04 (m^3/d)$$

2.3 制冷循环

制冷循环主要功能为制备 6 °C 以下冷水并储存,为磁体循环冷却水提供冷源. 目前该循环制冷量 13 MW,总蓄冷量达 6000 m^3 . 如图 3 所示,制冷循环由冷却塔、冷水机组、冷冻泵,冷却泵、蓄水罐等组成,主要水耗为开式冷却塔运行时的蒸发及漂水损失,以及冷却塔除垢时的排水. 目前系统有三台正在运行的开式冷却塔.

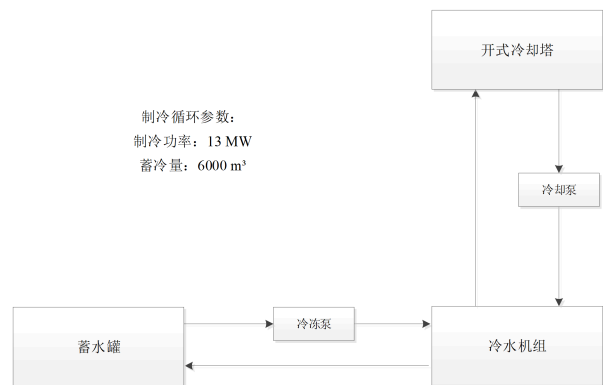


图 3 制冷循环.

开式冷却塔运行时蒸发耗水由下式计算^[7]:

$$Q_g = \frac{(TW_1 - TW_2)C_P L t}{R}$$

式中: Q_g :开式冷却塔耗水量, m^3/h ;

TW_1 :出口水温, °C;

TW_2 :入口水温, °C;

C_P :定压比热容, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$;

R :汽化潜热, kJ/kg ;

L :循环流量, m^3/h ;

t :运行时间, h .

实际运行过程中,不同磁体运行功率的差异会导致冷冻水回水温度不同,冷水机组的制冷温差也不尽相同;由于蓄水罐中存在自然分层现象,蓄水罐底部存在温度较低的水,因此制冷后期冷水机组会处于低负荷运行状态. 而制冷温差决定了冷却塔的

循环冷却水温差,根据实际运行情况,水温的温差 ΔTW 取 $3\text{ }^\circ\text{C}$,温度约在 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 左右.查表知此时水的定压比热容 C_p 为 $4.178\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$,汽化潜热 R 为 $2432.3\text{ kJ}/\text{kg}$,三台开式冷却塔的循环流量分别为 $900,900,1020\text{ m}^3/\text{h}$,开式冷却塔的运行时间平均一天按 9 小时计.由此计算可得三台开塔运行时的蒸发耗水量为:

$$Q_g = \frac{(TW_1 - TW_2)C_p L t}{R} =$$

$$\frac{3 \times 4.178 \times (1020 + 900 \times 2)}{2432.3} \times 9 = 130.77\text{ (m}^3/\text{d)}$$

目前国内广泛使用的高效收水器逸出水率的实验室测试结果均较低,约为 $0.003\% \sim 0.005\%$ ^[8].根据冷却塔厂商的数据和现场实际运行监测结果,开式冷却塔的漂水损耗定为循环水量的

0.001% ,则:

$$Q_h = (1020 + 900 \times 2) \times 0.001\% \text{ m}^3/\text{h} = 0.68\text{ m}^3/\text{d}$$

冷却塔在除垢时需要将水盘里的水排净,则该排水量与水盘容积相等.三台开式冷却塔的储水池长宽 $L \times D$ 为 $9.1\text{ m} \times 11.7\text{ m}$,高度 H 为 0.5 m ,则单塔每清理一次所排放的水量为 53.24 m^3 .清理的次数由实际运行情况决定,故不计入日均水耗.则制冷循环日均耗水量为

$$Q_3 = Q_g + Q_h = 130.77 + 0.68 = 131.45\text{ (m}^3/\text{d)}$$

则系统每日耗水量为:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 90.76 + 35.04 + 131.45 = 257.25\text{ (m}^3/\text{d)}$$

水冷系统各单元耗水汇总如下:

表 1 水冷系统各单元耗水量汇总表.

耗水单元	耗水来源	耗水流量/(m^3/d)	备注
砂、炭过滤器反冲洗水	去离子水制备系统	约 16.15	炭过滤器反洗频率为 2 d/次,砂过滤器为 1 d/次
I 级 RO 浓水	去离子水制备系统	约 23.33	一天启动 20 次
II 级 RO 浓水	去离子水制备系统	约 6.67	一天启动 20 次
EDI 浓水	去离子水制备系统	约 28.8	全天运行
真空泵冷却水	去离子水制备系统、提纯系统	约 47.43	全天运行
DO 溶解氧仪出水	循环冷却水系统	约 3.42	全天运行
开式冷却塔耗水	冷却水系统	约 131.45	一天运行约 9 小时
耗水总量			257.25 m^3/d

由表 1 可知,水冷系统日均水耗 $257.25\text{ m}^3/\text{d}$.其中去离子水制备系统总排水量为 $90.76\text{ m}^3/\text{d}$,提纯系统总排水量为 $35.04\text{ m}^3/\text{d}$,制冷循环总耗水量为 $131.45\text{ m}^3/\text{d}$.不同子系统耗水形式有所不同:去离子水制备系统、提纯系统耗水形式为常排水,排水既包括设备制水产生的废水,也包括设备冷却水及设备在线监测排水.而制冷循环的耗水主要为开塔的蒸发.

3 排水回用方案设计

水冷系统耗水中开式冷却塔耗水为蒸发及漂水,无法回用,其余各系统由于排水水质与水量差异较大,从节能的角度考虑尽可能将排水回用于系统,以减少水资源的消耗,部分水质较好的排水可考虑

其他用途.

3.1 系统回用

在去离子水制备与提纯系统中,II 级 RO 浓水和 EDI 的水质较好,直接排放会对资源造成一定浪费.而循环冷却水系统中的 DO 出水电阻率 $\geq 15\text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$, $\text{DO} \leq 10\text{ ppb}$,回用于系统也可减少新水的制备.故这两部分水可直接回用于系统.

3.1.1 RO 浓水与 EDI 浓水

RO 系统中有两处产生浓水.其中 I 级 RO 浓水属于高盐废水,无法在系统中回用. II 级 RO 浓水是对 I 级 RO 过滤后的水浓缩时产生的浓水,其水质与原水相近.故将 II 级 RO 浓水回流至原水箱.

EDI 系统是将 RO 系统过滤后的水进行再加工,其浓水电阻率在 $2.6 \sim 2.8\text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ 间,而 II 级

RO 出水电阻率一般在 $2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ 左右, 较 II 级 RO 出水电阻率更高, 故可将 EDI 浓水回流至 RO 水箱, 若出于系统安全考虑也可回流至原水箱。

3.1.2 DO 出水(方案一)

DO 溶解氧仪的出水水质与循环冷却水水质相同, 故对此高质量排水回收利用。DO 出水有两种回用方式。第一种方式是将 DO 出水回流至磁体冷却循环水管道中, 这样可以减少磁体循环冷却水的制备。第二种方式是将 DO 出水重新利用。由于磁体冷却循环水电阻率 $\geq 15 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$, 因此可作为实验室去离子水用水, 满足分析仪器、设备用水, 生化实验培养等^[9]。本方案将 DO 出水直接回流至循环冷却

水管道, 但是也给出另一种回用的方案。

3.2 分质回用

3.2.1 DO 出水(方案二)

如图所示, 排水分质回用方案包括 DO 出水、真空泵出水、I 级 RO 浓水和反冲洗水。在设计中, 利用现有的纯水箱作为缓冲水箱, 用以存储优质的去离子水。纯水箱尺寸为 $\Phi 0.75 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$, 容积约为 2.65 m^3 。然而 DO 出水的流量较大(为 $3.42 \text{ m}^3/\text{d}$), 存在因无人使用导致纯水溢出的可能, 因此设立阀 3 作为排水。此外, 传感器用来测定水质, 当水质达标时, 阀 1 打开阀 2 关闭, 直至去离子水箱到达高液位; 然后关闭阀 1 开启阀 2。

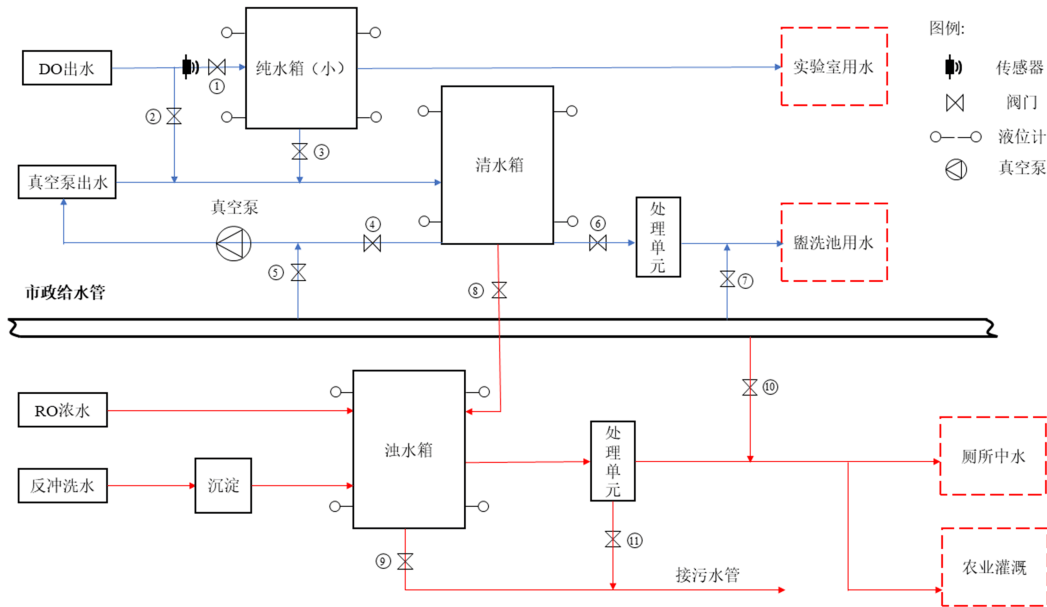


图 4 纯水系统排水分质回用。

3.2.2 真空泵出水

真空泵出水实为真空泵的冷却水。由于提纯系统在运行过程中真空需不间断运行, 因此该冷却水量较大。但是冷却水的原水为市政给水, 冷却过程中也无其他杂质, 故考虑将冷却后的水收集并重复利用。建立一个清水箱, 主要用来存放真空泵的出水(平均水温 $\leq 25 \text{ }^\circ\text{C}$) 及多余的 DO 出水。由于 DO 出水水温常年小于 $12 \text{ }^\circ\text{C}$, 因此利用多余 DO 出水可对真空泵出水进行冷却, 冷却后的水可再次用于真空泵的冷却。清水箱的尺寸为 $\Phi 5 \text{ m} \times 2 \text{ m}$, 容积约为 39.25 m^3 。如图 2 所示, 当用于回流的水温高于一定温度时, 关闭阀 4, 开启阀 5, 并根据液位显示开启阀 8。当清水箱液位较高时, 阀 6 开启阀 7 关闭; 而当清

水箱液位较低时, 关闭阀 6 开启阀 7。阀 8 仅当清水箱液位较高且阀 4 关闭, 阀 6 管道用水量无的情况下开启。

3.2.3 I 级 RO 浓水与反冲洗水

I 级 RO 浓水实际上是 I 级 RO 膜过滤时膜前的浓水。由于浓水是将原水化合物浓缩的过程, 浓水中氨氮、COD 及无机盐等含量较高, 故无法直接利用, 考虑通过处理为中水回用。但在水冷系统中, RO 单元的原水为市政给水, 而非一般污水处理厂的处理水。故浓水中有有机物、盐等含量相对较低。由于碳过滤器和砂过滤器反冲洗水可能存在颗粒, 因此反冲洗水在进入浊水箱前需先沉淀, 沉淀池后用滤网拦截, 沉淀底部可做漏斗型用以除砂。由于反冲洗水和

RO浓水的流量较大(分别为 16.15 和 23.33 m³/d),故建立浊水箱(池)用于储水. 浊水箱(池)的尺寸为 $\Phi 5\text{ m} \times 2\text{ m}$, 容积约为 39.25 m³, 下设污水管, 污水管连接排水沟汇入市政污水管网. 当浊水箱(池)的液位较高时打开阀 9 排水. 由于该部分水水量较大, 可考虑用于灌溉道路绿化或者厕所的中水. 此时在浊水箱后设一组紫外线消毒灯, 对浊水箱的出水进行消毒灭菌. 消毒后的水可用于中水回用或灌溉.

3.3 回用量计算

表 2 水冷系统排水回用统计表.

回用单元	回用方案	回用水量/(m ³ /d)	耗水回用率/%
II级 RO 浓水, EDI 浓水, DO 出水	直接回用于系统	38.89	15.11
I级 RO 浓水, 反冲洗水, 真空泵冷却水	根据水质不同分质回用	86.91	33.78
总回用量	—	125.80	48.90

如表 2 所示, 本次设计的回用方案中, 直接回用于系统的排水为 II 级 RO 浓水, EDI 浓水和 DO 出水, 回用水量为 $Q_1 = 6.67 + 28.8 + 3.42 = 38.89$ (m³/d), 直接回用率为 15.11%, 也即新水耗损率降低 15.11%. 用于分质回用的排水为反冲洗水, I 级

RO 浓水和真空泵出水, 回用水量为 $Q_2 = 16.15 + 23.33 + 47.43 = 86.91$ (m³/d), 回用率为 33.78%. 总回用量为

$Q = Q_1 + Q_2 = 38.89 + 86.91 = 125.80$ (m³/d)
系统耗水的总回用率为 48.90%.

4 结 论

本文分析了稳态强磁场实验装置水冷系统各单元的水耗特征, 并根据排水水质差异进行回用设计. 结论如下:

①水冷系统每日耗水量为 257.25 m³, 其中去离子水制备系统每日耗水量为 90.76 m³, 提纯系统为 35.04 m³, 制冷循环为 131.45 m³.

②不同子系统耗水形式有所不同: 去离子水制备系统、提纯系统耗水形式为常排水, 排水既包括设备制水产生的废水, 也包括设备冷却水及设备在线监测排水, 部分排水可以回收利用. 而制冷循环的耗水主要为开式冷却塔的蒸发及漂水.

③设计排水分质回用方案, 总回用量为 125.80 m³/d, 回用率 48.90%. 其中, II 级 RO 浓水, EDI 浓水, DO 出水为高质量排水, 可直接回用于系统, 回用量为 38.89 m³/d, 可使耗水量降低 15.11%. 而 I 级 RO 浓水, 反冲洗水, 真空泵冷却水等排水可通过不同处理单元回收利用, 回收率为 33.78%.

参 考 文 献

- [1] 马言言, 陶英烈. 氯碱工业, **56** (2020), 27
- [2] 肖劲戈. 中国西部科技, **10** (2011), 1
- [3] 赵晓丹, 吴春华, 龚云峰. 上海电力学院学报, **29** (2013), 497-500+512
- [4] J. Choi, J. Chung, *Water Res.* **158** (2019), 411
- [5] H. M. Park, J. Yoo, Y. T. Lee, *J. Ind. Eng. Chem.* **76** (2019), 344
- [6] F. T. Qian, J. Q. Lu, D. G. Gu, Li, G. H. Li, Y. Liu, P. H. Rao, S. N. Fang, N. Zhang, *J. Clean. Prod.* **372** (2022), 133754
- [7] 张军. 现代煤化工水系统特性分析及优化研究[D], 中国矿业大学, 2019
- [8] 刘芳, 彭嫚, 董佩文, 乐海林, 徐霄燕. 建设科技, **19** (2019), 85-88+94
- [9] GB/T 33087—2016, 仪器分析用高纯水规格及试验方法[S]