

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.18.023

高速气浮在伊朗大型海水淡化工程的应用

何才昌

(杭州水处理技术研究开发中心, 浙江 杭州 310012)

摘要: 伊朗某大型海水淡化工程采用高速气浮处理工艺。高速气浮利用特殊的强化溶气技术,可使溶气效率提高至95%以上,微气泡体积浓度大幅提升,气泡粒径更合理、分散能力更强。浮选分离区表面负荷可达 $20\sim 25\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,对海水中藻类的去除率可达95%以上,出水浊度 $<5\text{ NTU}$,同时对水中有机类、油脂等污染物也有较好的处理效果。高速气浮作为膜法海水淡化的预处理工艺,效果显著,明显改善后段工艺的运行工况,对膜系统的安全稳定运行起到了保障作用,可使超滤膜系统的化学清洗周期延长至6个月以上。

关键词: 海水淡化; 高速气浮; 超滤膜

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)18-0141-06

Application of High-speed Air Floatation in Large Seawater Desalination Project in Iran

HE Cai-chang

(Hangzhou Water Treatment Technology Development Center, Hangzhou 310012, China)

Abstract: A large-scale seawater desalination project in Iran adopts the high-speed air floatation process, which uses special technology to increase dissolved gas efficiency to over 95%, greatly improve the volume concentration of micro-bubbles, create more reasonable bubble size and the stronger dispersion ability. The surface load of floatation separation zone can reach $20\sim 25\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, the removal rate of algae in seawater can reach more than 95%, the effluent turbidity is less than 5 NTU, and the organic pollutants, oil and other pollutants in water also have good treatment effect. As the pre-treatment of membrane desalination process, high-speed air floatation obviously improves the operation condition of the latter process, guarantees the safe and stable operation of membrane system, and extends the chemical cleaning cycle of ultra-filtration membrane system to over 6 months.

Key words: seawater desalination; high-speed air floatation; ultra-filtration membrane

因人口增长和经济发展,对淡水量的需求大大增加,现今水已成为中东地区重要的战略资源。伊朗属于水资源紧缺型国家,年平均降雨量238 mm,折合降雨总量约 $3\,979\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$,但蒸发量巨大,损耗水量超过70%,加之缺少自然水源,淡水资源的短缺已成为制约国家经济发展的主要因素。为此,伊朗采取了多种水资源开发和水利建设方式来保障供水。其中,投入巨资进行大规模海水淡化项目建设

就是一项重要举措。据统计,2022年伊朗海水淡化处理能力达到 $50\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的规模。

高速气浮因独特而高效的溶气技术,使其具有较高的表面水力负荷和分离效率,被广泛应用于市政及工业水的净化处理系统,尤其对难沉降型悬浮固体、藻类等低密度颗粒污染物具有较高的去除效率,在大型水处理系统中具有明显的经济效益和技术优势。伊朗某钢厂位于波斯湾东海岸,设计海水

淡化系统处理规模为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,配套预处理高速气浮系统规模为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

1 设计进、出水水质

1.1 原水水质

波斯湾位于阿拉伯半岛和伊朗高原及两河流域之间,为半封闭海湾。海域水深较浅,与公海交流较少,日照强烈,温度较高,年蒸发量大,降水及淡水汇入量稀少,海水中盐度高、藻类含量高;由于工业污染物的排放和人类活动的破坏影响,海域水体已被严重污染,海水有机物浓度较高。

表1 海水原水水质

Tab.1 Parameters of seawater quality

项目	水温/ $^{\circ}\text{C}$	TDS/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Na^{+} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Ca^{2+} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Mg^{2+} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	K^{+} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SO_4^{2-} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
数值	18~35	49 000	15 154	440	1 460	1 100	8 000
项目	Cl^{-} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	HCO_3^{-} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SS/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TOC/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	浊度/NTU	pH	油脂/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
数值	22 933	170	80	12	30	7.9~8.1	0.5~1.2

1.2 设计出水水质

膜法海水淡化工艺预处理系统的主要目的是去除水中的悬浮物、胶体类物质、藻类微生物、有机污染物等杂质,以防止后续工艺段反渗透(RO)膜污堵及性能劣化,影响RO膜元件运行性能和使用寿命。RO膜系统进水的污染程度通常按 $\text{SDI}<5$ 控制,海水淡化工艺中RO膜前设有超滤(UF)膜系统,能够保障RO膜系统进水 $\text{SDI}<5$,因此预处理系统高速气浮的出水水质要求按UF系统进水浊度 $<10 \text{ NTU}$ 执行。

2 设计工艺流程

2.1 项目分析

在膜法海水淡化项目中,从某种意义上讲,衡量项目成功与否的标准是反渗透膜的使用寿命,而反渗透膜的使用寿命长短则主要由预处理效果是否有效决定。在相同的水源水质和运维管理水平下,由于预处理工艺及技术不同,会造成反渗透膜的使用寿命千差万别。国际上标准膜寿命一般为8年,但大部分海水淡化项目反渗透膜的寿命仅为5年左右,有的甚至更短。理论上,常规的混凝沉淀/澄清、砂滤和超滤处理即可满足反渗透膜的进水水质要求,但很多项目往往会忽略藻类微生物污染的危害问题。实际上,有效消除藻类微生物的危害已成为反渗透膜法海水淡化项目成功与否的关键因素之一。因藻类密度相对较小、絮凝体不易沉

另外,受限于波斯湾较为特殊的地理及自然环境,该海域内赤潮时有发生,每年可能发生一次或多次,一般发生在4月—10月,每次持续时间为6~8周。赤潮入侵会导致海水中藻类含量增加,藻类浓度高达60 000个/mL,使海水具有明显的颜色和气味,水中总有机碳(TOC)高达12 mg/L以上,浊度为30 NTU。

该项目海水进水来自南侧海岸以外1.5 km处的波斯湾海域,由两根DN900的输水管送入处理区域,水质指标见表1。

降,采用沉淀或澄清等预处理技术很难有效去除。若处理不当,藻类会在预处理工艺中死亡、变质和降解,变成溶解性的有机物质穿透后续工艺段的砂滤或超滤系统,导致反渗透膜系统内的微生物获得营养物质而生长,膜表面产生生物污染,使得反渗透通量和脱盐率下降,严重影响膜的使用性能和寿命。因此,选择适宜的预处理工艺非常有必要。

2.2 工艺流程

膜法海水淡化处理一般采用预处理系统加反渗透膜脱盐工艺,对于常年浊度较低且藻类含量较高的海水,预处理采用混凝气浮能达到较好的效果。气浮是依靠高分散的微气泡黏附于水中絮体颗粒或污染物,使气泡裹挟杂质形成的基团密度小于水,从而实现絮体颗粒或污染物强制性上浮,达到固液或液液分离的目的。由于气泡的密度远小于水,浮力很大,因此能够促使絮粒杂质等污染物迅速上浮,气浮法尤其适合分离处理轻质的胶体或细小悬浮型污染杂质及颗粒物。有关试验研究及项目运行结果表明,采用混凝气浮工艺处理地表水时,在有效去除悬浮物、胶体的同时,对藻类污染物的去除效率可达90%以上^[1-2]。

高速气浮采用具有特殊导流结构的溶气反应器,使溶气效率更高,微气泡粒径更小、更均匀,并通过增强气泡分散程度而使这些大量的微气泡渗入絮凝体或黏附在其表面,形成大而轻质的带气絮凝体,加快絮体上浮速度,从而提高对污染杂质的

分离负荷和去除效率。本项目海水淡化处理工艺流程见图 1。

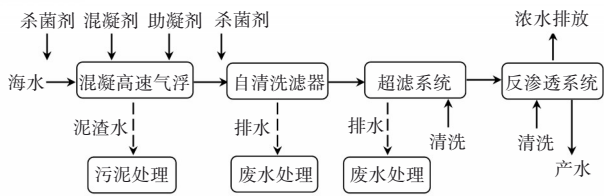


图 1 海水淡化处理工艺流程
Fig.1 Flow chart of seawater desalination treatment

3 气浮工艺及设备设计参数

3.1 常规气浮和高速气浮的比较

根据对现有建成运行项目的情况分析,常规气浮和高速气浮的比较见表 2。

表 2 常规气浮和高速气浮的比较

Tab.2 Comparison of conventional and high-speed air floatation

项目	常规气浮	高速气浮
气浮方式	溶气气浮	溶气气浮
进水水质要求	浊度 <100 NTU 及含有藻类等密度较小的悬浮类物质	浊度 <100 NTU 及含有藻类等密度较小的悬浮类物质
结构形式	平流式	平流式
表面负荷/(m ³ ·m ⁻² ·h ⁻¹)	5.4~7.2	20~25
出水浊度/NTU	<10	<5
对藻类、悬浮物等去除率/%	>90	>95
回流比/%	5~10	10~15
溶气方式	空压机+溶气罐溶气,罐内加填料或射流器	空压机+溶气罐溶气,罐内独特设计的导流结构
溶气压力/MPa	0.2~0.4	0.5~0.6
溶气效率/%	80~90	90~95
污泥含固率/%	3~4	3~5
吨水能耗/(kW·h·m ⁻³)	0.052	0.058
占地面积/m ²	(3~4)A	A
系统投资/万元	3 900	2 500

溶气气浮工艺一般由加压溶气系统和气浮澄清分离系统两部分组成。利用加压泵和空压机提升系统压强,将气体溶解于水中,形成饱和溶气水,使污染杂质黏附微气泡后与水分离。根据溶气技术和溶气效率的不同,所对应的气浮工艺参数、设备大小、对污染物的去除效率和运行能耗等均有所差异。由表 2 分析可知,高速气浮具有处理效率高、占地面积小、投资成本低和运行维护简单等优点。

3.2 气浮表面负荷分析

气浮分离过程中带气絮体在水中的综合上浮速度是由其自身的上浮速度和液面整体下降速度(即表面负荷)两者的作用差形成的,即 $V_{上浮} = V_{带气絮体上浮} - V_{液面下降}$,要使絮体不被出水带出,带气絮体的上浮速度就必须不小于液面的下降速度,即在表面负荷小于或等于带气絮体平均上浮速度的情况下,才能完成气浮的分离过程。因此,带气絮体的平均上浮速度是气浮表面负荷大小的关键影响因素。根据带气絮体在水中上浮运动时的受力分析可知,絮体在宏观上受到重力 G 、浮力 F 和液流阻力等多个外力的作用。根据牛顿第二定律可导出层流区($Re < 1$)絮体的上浮速度为:

$$V_{带气絮体上浮} = [(\rho_{水} - \rho_{絮})gd^2]/18\mu$$
 (1)

式中: $\rho_{水}$ 为水的密度; $\rho_{絮}$ 为带气絮体的密度; d 为带气絮体的直径(特征直径); μ 为水的动力黏度。

由式(1)可知,在其他工况相同的条件下决定絮体上升速度的主要因素是絮体的大小(直径)和密度,带气絮粒中气泡所占的比例越大则絮粒的密度越小,同时其特征直径也相应增大,两者的这种变化可使上浮速度大大提高^[3]。

在凝气浮工艺中,原水中的悬浮及胶体污染物经加药反应后生成了大量絮凝体,这种呈絮状结构的絮凝体中有许多微小孔隙,当絮凝体与溶气水中的大量微气泡接触后,微气泡会进入絮凝体的微小孔隙中,与絮凝体形成稳定、可靠的结合体,从而使絮凝体获得浮力。有研究表明,微气泡进入絮凝体微孔缝隙中可以降低其表面能,根据热力学现象,自然界中任何系统都有尽可能使自己处于最低能级的趋势,这就使得微气泡能够自发地进入絮凝体^[4]。气泡直径越小,表面能越高,自发进入絮凝体的趋势就越强,进入絮凝体微孔缝隙中的气泡数量越多,絮凝体获得的浮力也越大,上浮速度就越快,所对应的气浮分离表面负荷就可相应提高。有研究表明,当量气泡直径减小 1/2 时,絮凝体上浮几率至少可以提高 2.5%~30%^[5]。

3.3 高速气浮溶气系统

溶气反应器是气浮溶气系统的核心设备,压缩空气与压力水在溶气反应器内通过扩散、迁移等传质过程,使大量空气溶于水中。根据气体传质系数和水的过流密度,溶气反应器被设计成一定的高度和容积,在溶气反应器内空气的溶解基本符合气体

传递的双膜理论。溶气效率与溶气压力、水流喷淋方式、水流过流密度、水温等因素有关。鉴于空气溶解主要受液膜阻力控制的影响,在设计溶气反应器时常采用增大液相紊流、加快水流速度、减少液膜厚度、提高液膜更新等方法强化溶气效率。

据此,在设计高速气浮的溶气反应器时,其内部采用了特殊设计的导流结构。回流水经加压后与压缩空气分别从设备顶端的两侧同时切向进入,在反应器内进行高速射流螺旋运动,使气与水充分接触混合,在导流结构的作用下进行剧烈的湍流和紊动,能够极大地溶解气体,提升溶气效率,使溶气率达到95%以上,微气泡平均粒径 $<5\ \mu\text{m}$,气泡稳定,不易破裂,溶气效率较常规系统可提高5%以上。该反应器溶气反应停留时间短,10~20 s即可完成溶解,设备体积小、占地小,无需配套辅助释放设备,易于维护管理。

3.4 气浮处理系统设计

气浮处理系统由混凝反应系统、气浮分离系统、空气压力溶气系统、加药系统和泥渣收集排放系统等部分组成。溶气高速气浮构筑物构造见图2。

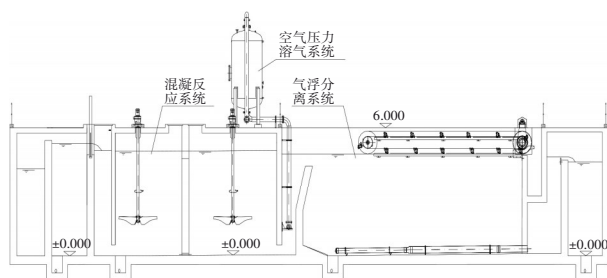


图2 高速气浮构筑物构造

Fig.2 Schematic diagram of high-speed air floatation structure

① 混凝反应系统

混凝反应的作用主要是使水中胶体或颗粒脱稳、凝聚为较大粒径的絮体网,提高气浮分离效果。混凝反应系统和气浮分离系统组合建设,混凝反应池设4组,单组设计规模为 $3.75\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 。混凝反应系统前端为混合反应池,每两组混凝反应池设一座混合反应池,海水经配水渠分配后分别进入混合反应池,混合反应池设2组,单组有效容积 $100\ \text{m}^3$,混合反应时间2 min,配套混合反应搅拌机1台, $N=1.1\ \text{kW}$,变频,碳钢衬胶材质;混合反应池出水进入

两组混凝反应池,每组混凝反应池进口处各设 $1\ 000\ \text{mm}\times 1\ 000\ \text{mm}$ 手动闸门1套,双相不锈钢2205材质,用于检修时作为隔断。单组混凝反应池规格为 $10\ 500\ \text{mm}\times 10\ 000\ \text{mm}\times 6\ 000\ \text{mm}$,池内设隔板,水流呈折流式,有效容积 $580\ \text{m}^3$,混凝反应时间20 min,配套反应搅拌机4台, $N=1.1\ \text{kW}$,变频,碳钢衬胶材质,反应速度梯度为 $70\ \text{s}^{-1}$ 。

② 气浮分离系统

气浮分离池设4组,单组设计规模 $3.75\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 。单组气浮分离池规格为 $16\ 000\ \text{mm}\times 10\ 000\ \text{mm}\times 6\ 000\ \text{mm}$,分离池前端为溶气水和海水经混凝反应后的接触反应区,接触反应时间2 min;接触反应后的带气泡颗粒在分离区内完成固液分离,分离后上浮的浮渣经刮渣机排至排渣槽。气浮分离区设计表面负荷为 $20\ \text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,上部设链板式表面刮渣机1套, $N=0.25\ \text{kW}$,变频,非金属铰链、聚缩醛树脂轴、乙烯酯刮板和双相不锈钢2205滑轨,链板式刮渣机通过埋件固定在分离区的池壁上;分离区下部设出水穿孔集水管,为保障集水均匀,安装了DN200的穿孔集水管15根,长10 m,PE材质,管间距650 mm。穿孔集水管一端封堵,另外一端接至清水出水渠,集水管底部 45° 角处两侧交叉开 $\varnothing 20\ \text{mm}$ 集水孔,孔间距200 mm,每根穿孔集水管通过支架固定在池底部。分离区后端的上部设排泥集渣槽,经浮选分离后的浮渣通过刮渣机送至集渣槽后排至污泥处理系统。分离区的后端为清水出水渠,在出水渠上端设置出水调节堰板,用以调节控制气浮分离池内液位,以便于浮渣排出。出水调节堰板采用锯齿堰,长10 m,宽250 mm,双相不锈钢2205材质,分离区的出水经调节堰板后排至清水池。

③ 空气压力溶气系统

空气压力溶气系统设4套压力溶气反应罐,与4组气浮分离池一一对应,压力溶气反应罐规格为 $\varnothing 800\ \text{mm}\times 2\ 560\ \text{mm}$,容积 $1\ \text{m}^3$,设计压力0.686 MPa,钢衬胶材质,设安全阀、液位变送器和压力变送器等控制仪表;设空气压缩机3台,2用1备, $Q=70\ \text{m}^3/\text{h}$, $H=70\ \text{kPa}$, $P=37\ \text{kW}$,配套储气罐规格为 $\varnothing 1\ 000\ \text{mm}\times 2\ 265\ \text{mm}$,容积 $1.5\ \text{m}^3$,设计压力0.883 MPa,碳钢材质;设计回流比12%,设回流泵5台,4用1备,与4套压力溶气反应罐一一对应, $Q=250\ \text{m}^3/\text{h}$, $H=650\ \text{kPa}$, $P=90\ \text{kW}$,变频,双相不锈钢2507材质。

④ 全自动加药系统

设计投加三氯化铁、聚丙烯酰胺(PAM)和次氯酸钠等3种药剂,加药系统根据进、出水水质情况采用全自动投加方式,既可合理控制加药量,又能节省人力。

a. 混凝剂、助凝剂加药。混凝剂采用液态三氯化铁,原液浓度38%,稀释至10%后用计量泵投加,最大设计投加量为10 mg/L;助凝剂采用PAM,设2套一体化自动溶药装置,配制料液熟化后以0.1%的浓度用计量泵投加,设计最大投加量为0.2 mg/L。
b. 加氯系统。在气浮进水管处和气浮出水清水池设加氯投加点,加药量按有效氯2 mg/L投加,杀菌剂采用次氯酸钠药液通过计量泵投加,根据反渗透进水ORP检测自动控制投加量。

⑤ 泥渣收集排放系统

浮选分离后的泥渣排至泥渣收集池,定期外排至污泥处理系统。设泥渣收集池1座,有效容积250 m³,配套搅拌机2台, $N=5.5$ kW,碳钢衬胶材质;排泥泵2台,1用1备, $Q=20$ m³/h, $H=250$ kPa, $N=7.5$ kW,2205双相不锈钢材质。

4 技术经济分析

该海水淡化项目设计规模为 5×10^4 m³/d,系统占地面积约6 500 m²,总投资约2.0亿元,其中高速气浮部分为2 500万元。高速气浮运行费用约为0.057元/m³,主要包括药剂费和电费等,其中电费约0.025元/m³、药剂费约0.032元/m³。

5 运行效果

该项目于2017年8月满负荷投产,整个系统运行稳定,产水水质及其他各项指标参数均达到了设计要求。其中,高速气浮出水浊度均稳定在5 NTU以下,最优产水浊度可达1 NTU,系统回收率99%,藻类去除率可达95%以上,同时对原海水中的有机类、油脂等污染物质也有较好的去除效果,具体见图3。

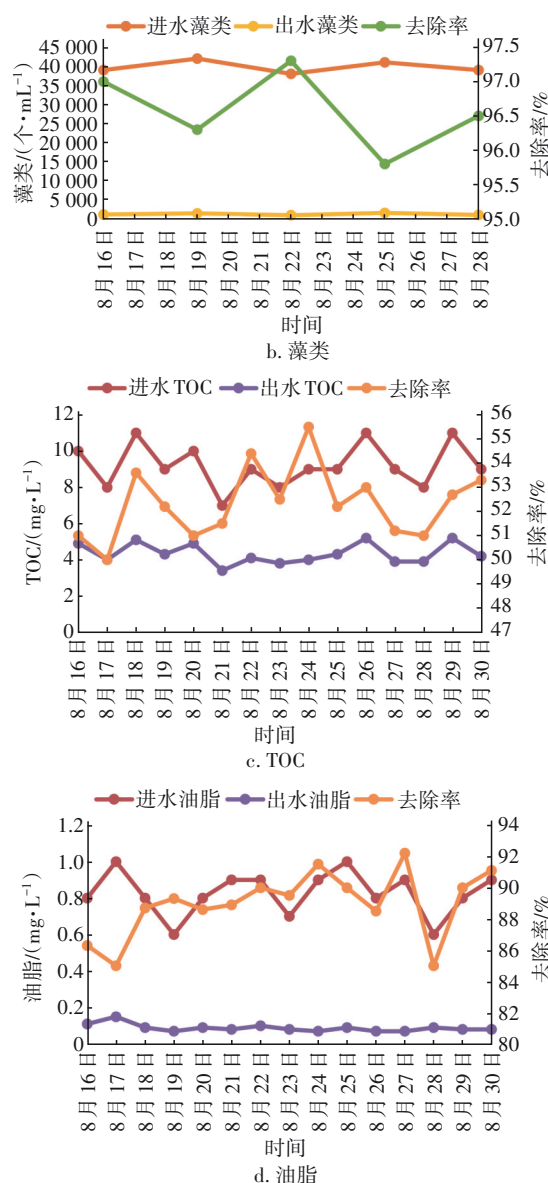
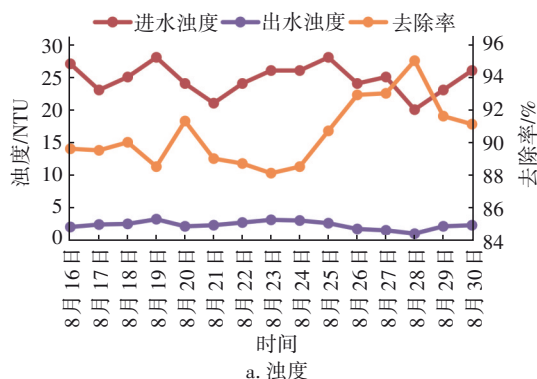


图3 2017年8月16日—30日系统对浊度、藻类、TOC和油脂的去除效果

Fig.3 Removal efficiency of turbidity, algae, TOC and grease by the system from August 16 to 30, 2017

后段工艺中超滤膜系统进水温度为24~32℃,膜通量为65.0 L/(m²·h),其产水浊度<0.2 NTU,产水SDI≤2.5(最小值1.8,平均值2.13),如图4所示。

超滤膜系统的运行跨膜压差(TMP)上升速度较慢,相对平稳。随着运行时间的延长,其跨膜压差随之上升,经加药反洗后压差明显下降,基本可恢复至初始运行状态(见图5)。因高速气浮处理效果显著,明显改善膜系统的运行工况,对后端膜系统的安全稳定运行起到了保障作用。该项目投入运行半年多,超滤膜系统未进行过化学清洗。

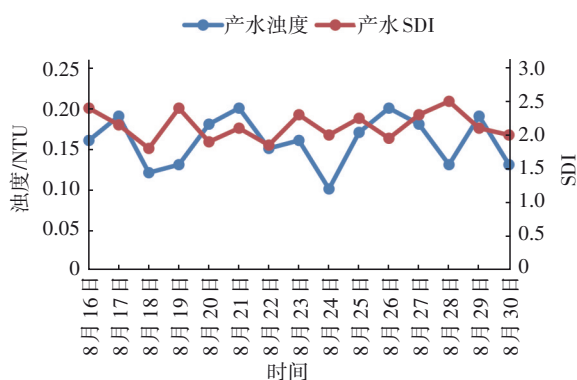


图4 超滤产水的浊度及SDI

Fig.4 Turbidity and SDI of ultrafiltration water

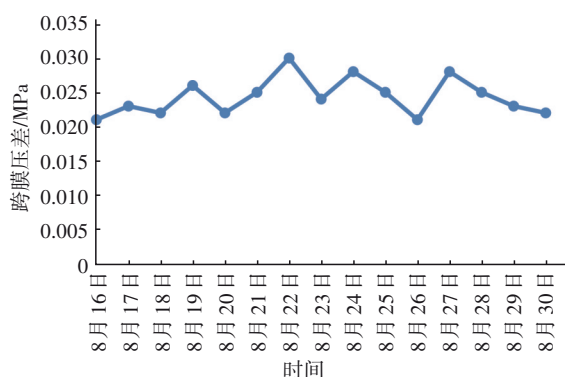


图5 UF运行中的跨膜压差变化

Fig.5 Change of transmembrane pressure (TMP) during UF operation

6 结论

伊朗大型海水淡化工程调试和实际运行结果表明,高速气浮系统运行稳定,出水水质优良,各项指标均优于设计要求,适于作为低浊、高藻原水的膜法海水淡化项目的预处理工艺。同时,相对于常规溶气气浮而言,高速气浮具有处理效率高、占地面积小、投资成本低和运行维护简单等优点。

参考文献:

[1] 季华, PERRIN Didier, 杨燕华. 预臭氧/混凝/气浮工艺

去除水库原水中的藻类[J]. 中国给水排水, 2016, 32(21): 60-62.

JI Hua, PERRIN Didier, YANG Yanhua. Removal of algae from raw water of reservoir with pre-ozonation/coagulation/flotation process [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(21): 60-62 (in Chinese).

[2] 刘军, 余国忠, 李晓梅, 等. 气浮除藻的工艺设计及运行经验[J]. 中国给水排水, 2003, 19(1): 70-72.

LIU Jun, YU Guozhong, LI Xiaomei, et al. Design and operating experience of flotation process for removal of algae[J]. China Water & Wastewater, 2003, 19(1): 70-72 (in Chinese).

[3] 陈翼孙, 胡斌. 气浮净水技术的研究与应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.

CHEN Yisun, HU Bin. Research and Application of Air Flotation Water Purification Technology [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985 (in Chinese).

[4] 王静超, 马军, 王静海. 气浮净水技术在给水处理中的应用及研究概况[J]. 工业水处理, 2004, 24(7): 9-12.

WANG Jingchao, MA Jun, WANG Jinghai. Survey and application of flotation to water treatment[J]. Industrial Water Treatment, 2004, 24(7): 9-12 (in Chinese).

[5] 王广丰. 气浮净水系统运行效率的理论分析与试验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2002.

WANG Guangfeng. Theoretical Analysis and Experimental Study on Operation Efficiency of Air Flotation Water Purification System [D]. Shenyang: Northeastern University, 2002 (in Chinese).

作者简介: 何才昌(1981-), 男, 云南大理人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事污/废水深度及回用处理、海水淡化处理的设计和研究工作。

E-mail: 343294186@qq.com

收稿日期: 2022-02-17

修回日期: 2022-05-10

(编辑: 衣春敏)