



反渗透海水淡化技术在北方海岛的应用实例

唐 维¹, 王立军²

(1. 烟台市城市排水服务中心, 山东烟台 264000; 2. 香山红叶集团有限公司, 山东日照 276825)

[摘要] 为解决长岛有人居住岛屿用水高峰期用水供需矛盾, 确定采用以反渗透(RO)技术为核心的海水淡化工艺建设海水淡化站。介绍了反渗透海水淡化技术在长岛 8 个岛、9 处海水淡化站的应用情况。该项目根据不同的海岛条件采用了不同的取水方式和预处理方案, 主处理工艺采用二级砂滤+一级反渗透+二级反渗透+矿化的组合工艺, 消毒采用现场制备次氯酸钠和管式紫外线方式, 总制水量达 5 200 t/d, 出水水质达到了《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)标准。采用等压正位移式能量回收装置, 总体节能率可达 60%, 产水耗电量为 4.60 kW·h/t, 总计产水成本为 6.075 元/t。该项目在 1.5 a 的运行时间内, 出水效果稳定, 可为北方海岛小规模海水淡化建设项目提供借鉴。

[关键词] 北方海岛; 海水淡化; 反渗透; 能量回收; 矿化; 取水设计

[中图分类号] P747 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1005-829X(2022)10-0176-06

Application case of reverse osmosis seawater desalination technology on northern islands

TANG Wei¹, WANG Lijun²

(1. Yantai City Drainage Service Center, Yantai 264000, China;

2. Xiangshan Hongye Group Co., Ltd., Rizhao 276825, China)

Abstract: In order to solve the contradiction between water supply and demand in the peak period of water consumption on inhabited islands of Changdao island, the seawater desalination process with reverse osmosis (RO) as the core technology was adopted to construct seawater desalination station. Reverse osmosis seawater desalination technology was applied in nine seawater desalination stations on eight islands of Changdao island. The project adopted different water intake methods and pretreatment schemes according to different island conditions. The main treatment process was the combination process of secondary sand filtration+primary reverse osmosis+secondary reverse osmosis+mineralization. Disinfection was carried out by preparing sodium hypochlorite and tube ultraviolet light. The total water production was 5 200 t/d, and the effluent quality could stably reach Standards for Drinking Water Quality (GB 5749—2006). The overall energy saving rate could reach 60% with the isovoltage positive displacement energy recovery device. The electricity consumption of water production was 4.60 kW·h/t, and the total cost of water production was 6.075 yuan/t. Through over one and a half years operation, the effluent quality was stable, which could provide reference for other small-scale seawater desalination projects on northern islands.

Key words: northern island; seawater desalination; reverse osmosis; energy recovery; mineralization; intake design

长岛, 又称庙岛群岛, 位于胶东、辽东半岛之间, 南距蓬莱 7 km, 北距旅顺 42 km。主要的有人居住海岛包括南北长山岛、砣矶岛、大黑山岛、小黑山岛、大钦岛、南隍城岛、北隍城岛等。南北长山岛的供水主要依靠海底输水管线从蓬莱输水; 其余各岛因距离大陆较远, 主要依靠船运淡水、天然雨水和苦咸水

淡化等供水。近年来, 随着进入海岛旅游的游客数量不断增加, 南北长山岛淡水供需矛盾日益突出; 因天气原因导致停航、船运淡水费用过高^[1]、降雨量偏小、当地苦咸水水源出水量逐年减小等原因, 远离大陆的海岛也面临着巨大的供水压力。而长岛的小钦岛已建成的 100 t/d 海水淡化项目基本解决了该岛

的淡水资源供需矛盾^[2]。为了缓解旅游高峰季节淡水需求量与供应量的矛盾,并满足长岛海洋生态文明综合试验区的发展要求,当地政府决定在上述海岛上建设海水淡化项目。

经综合研究海岛上电力、热源等公共条件,该项目决定采用以反渗透(RO)技术为核心的海水淡化工工艺,出水指标达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)要求。该项目2019年7月开工建设,同年12月竣工,2020年6月份通过验收并投入使用。

1 规模及水质

长岛用水高峰出现在旅游旺季的夏季,而在旅游淡季的冬春季节,用水量较少。海水淡化水站的建设规模以满足旅游旺季的用水需求为目标。项目包括海水取水部分、海水淡化处理系统、与现有供水系统的连接部分等。项目总淡水产量为5 200 t/d,各海岛的建设规模见表1。其中,南、北长山岛和砣矶岛北村海水淡化站采用2条500 t/d的海水淡化产水线,建设规模为1 000 t/d;其他海水淡化站均为单条产水线。

长岛海域海水的盐质量浓度约为36 000 mg/L,浊度一般不高于5 NTU,水温为10~25 ℃,其他指标见表2。水质符合《海水水质标准》(GB 3097—1997)中二类水质标准^[3]。

表1 各岛海水淡化项目的建设规模

Table 1 Construction scale of seawater desalination projects on each island

建设地点	建设规模/(t·d ⁻¹)
南长山岛海水淡化站	500×2
北长山岛海水淡化站	500×2
砣矶岛北村海水淡化站	500×2
小黑山岛海水淡化站	200
大钦岛东村海水淡化站	500
大黑山岛土岛海水淡化站	500
南隍城岛海水淡化站	500
北隍城岛山前村海水淡化站	300
北隍城岛山后村海水淡化站	200

表2 长岛海域海水水质

Table 2 Water quality of Changdao sea area

项目	实测值	二类水质标准
pH	7.9~8.4	7.8~8.5
DO/(mg·L ⁻¹)	6.2~7.2	>5
COD/(mg·L ⁻¹)	1.36~2.52	≤3
无机氮/(mg·L ⁻¹)	0.099~0.113	≤0.30
石油类/(mg·L ⁻¹)	0.031~0.044	≤0.05
Cd/(mg·L ⁻¹)	0.000 15~0.000 58	≤0.005
Cu/(mg·L ⁻¹)	0.001 52~0.003 67	≤0.010
Zn/(mg·L ⁻¹)	0.001 60~0.005 00	≤0.050

2 工艺流程

海水淡化工艺流程见图1。

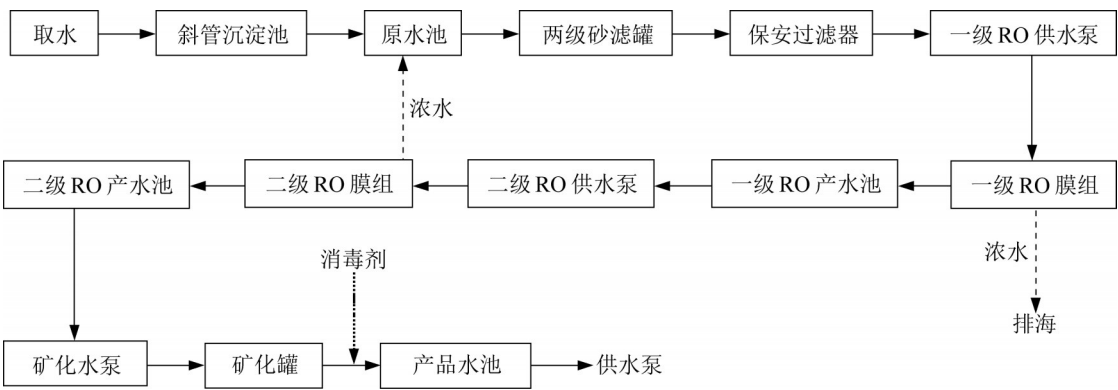


图1 海水淡化工艺流程

Fig. 1 Seawater desalination process flow

根据取水点位置的海滩类型、地形地质等特点,取水分为岸边渗井取水、岸边渗井+渗渠取水以及自吸泵取水等方式。前2种取水方式的水质较好,不设斜管沉淀池,原水直接进入原水池;采用自吸泵取水的项目,设置斜管沉淀池,上清液进入原水池。原水进入原水池或斜管沉淀池前需投加0.2 mg/L

(以有效氯计)左右的次氯酸钠以杀灭海水中微生物;冬季风暴潮时,海水浊度较大,采用自吸泵取水的项目还需在斜管沉淀池加药。经原水泵提升,海水进入两级砂滤罐,去除海水中的胶体、悬浮物等,降低海水浊度。经保安过滤器处理后,出水经高压泵加压进入一级反渗透系统,反渗透系统带压浓水

进入能量回收装置进行能量回收, 低压浓水排出。一级反渗透系统产水进入二级反渗透脱盐系统, 二级反渗透浓水返回原水池进行循环, 产水通过矿化水泵进入矿化后处理系统。矿化系统出水加次氯酸钠消毒后进入产品水池, 通过供水泵送入用户管网或者高位水池。

3 主要构筑物及参数

3.1 取水构筑物

3.1.1 取水位置

取水位置应考虑台风、冬季寒风大潮、洋流等对取水构筑物、取水水质的影响, 同时还要兼顾投资及运行成本。在确保取水量、取水水质的前提下, 取水点尽量选择冬季寒风大潮的背侧, 还应尽量远离海港、码头等登陆点, 避免水质污染。此外, 还要考虑取水点的地质情况、海滩情况及取水构筑物类型等。

3.1.2 取水方式

根据取水点的地质情况及现场位置, 取水方式主要分为岸边取水井取水、自吸泵取水。

(1) 岸边取水井取水。

海滩平缓且为卵石滩的海岛, 采用岸边渗井的取水方式。取水采用非完整井, 井壁和井底同时进

水, 井底低于低潮位 2 m。此方案共设计 2 处: 大钦岛、北隍城岛山前村, 各 1 座, 内径分别为 3 m 和 2 m。

海滩平缓、卵石滩层较浅的海岛, 采用完整井, 且沿海滩朝向海水的方向开挖渗渠, 渗渠内回填当地卵石, 井底及渗渠的渠底均低于低潮位 2 m, 渗渠内敷设穿孔花管。此方案共设计 4 处: 南长山岛、北长山岛、大黑山岛、北隍城岛山后村。其中, 南、北长山岛各设 2 个取水井, 内径 3 m; 大黑山岛和北隍城岛山后村各设 1 个取水井, 内径分别为 3 m 和 2 m。花管材质为钢筋混凝土, 直径均为 0.5 m。

取水井内均采用潜水泵取水, 材质为双相不锈钢。每个取水井安装 2 台潜水泵, 1 用 1 备。

(2) 自吸泵取水。

海滩陡峭且为不透水的石英岩的海岛, 采用自吸泵取水。自吸泵带有自动抽真空装置, 吸程较大, 取水管采用 316L 不锈钢材质^[4]。取水头设置 90° 向上弯头, 尽量减少吸取水中的砂砾。取水头设置超声波除菌器, 利用特定超声波段产生的空化、剪切作用以及微射流、自由基的氧化作用预防取水头滋长海藻、牡蛎等杂质。砣矶岛、小黑山岛和南隍城岛均采用此方式。

系统的总产水率按 30% 计, 淡化站自用水率按 5% 计, 取水构筑物的设计参数见表 3。

表 3 各岛海水淡化项目取水点设计

Table 3 Design of water intake points of seawater desalination projects on each island

海水淡化站	取水点位置	取水方式	取水流量/(m ³ ·h ⁻¹)
南长山岛海水淡化站	南长山岛南侧	岸边取水井+渗渠	73×2
北长山岛海水淡化站	北长山岛北侧	岸边取水井+渗渠	73×2
砣矶岛北村海水淡化站	砣矶岛东北外侧	自吸泵取水	73×2
小黑山岛海水淡化站	小黑山岛南侧	自吸泵取水	30
大钦岛东村海水淡化站	大钦岛东南侧	岸边取水井	73
大黑山岛土岛海水淡化站	大黑山岛东南侧	岸边取水井+渗渠	73
南隍城岛海水淡化站	南隍城岛东南侧	自吸泵取水	73
北隍城岛山前村海水淡化站	北隍城岛南侧	岸边取水井	44
北隍城岛山后村海水淡化站	北隍城岛东南侧	岸边取水井+渗渠	30

3.2 斜管沉淀池

砣矶岛、小黑山岛及南隍城岛均设置 1 座斜管沉淀池, 斜管倾角 60°, 斜管直径 35 mm, 表面负荷 3.0 m³/(m²·h), 采用多斗式排泥砂系统, 设置气动排泥阀。絮凝剂投加系统包括制备和储存系统, 投加量为 2~5 mg/L。当取水中含有较多海藻时, 投加现场制备的次氯酸钠, 有效氯投加量为 0.2 mg/L 左右。

3.3 原水池

各设 1 座, 钢混结构, 采用“界面剂+无毒防腐涂料”

为防腐层, 水力停留时间为 1.2 h, 有效容积不小于 100 m³。原水池吸水管设置在水池一半高度的位置, 可以沉降一部分砂砾。原水池内配套原水泵, 南、北长山岛及砣矶岛项目 3 台, 2 用 1 备; 其余项目 2 台, 1 用 1 备。

3.4 砂滤罐

砂滤罐可以去除原水中的藻类、细微砂砾等, 保护膜组件, 延长保安过滤器的使用时间。每个站点的每个系统均设置两级砂滤罐, 采用无烟煤石英砂双层滤料, 滤速为 10 m/h, 采用气水反冲洗。各个站

点砂滤罐的配置情况见表4。

表4 各岛砂滤罐配置表

Table 4 Configuration table of sand filter tank on each island

建设地点	砂滤罐规格及数量
南长山岛海水淡化站	D 3.0 m×2级×2条
北长山岛海水淡化站	D 3.0 m×2级×2条
砣矶岛北村海水淡化站	D 3.0 m×2级×2条
小黑山岛海水淡化站	D 1.9 m×2级
大钦岛东村海水淡化站	D 3.0 m×2级
大黑山岛土岛海水淡化站	D 3.0 m×2级
南隍城岛海水淡化站	D 3.0 m×2级
北隍城岛山前村海水淡化站	D 2.3 m×2级
北隍城岛山后村海水淡化站	D 1.9 m×2级

3.5 保安过滤器

两级砂滤罐出水进入反渗透主机前均需经过滤精度为10 μm和5 μm的保安过滤器过滤,配置情况见表5。保安过滤器集成在膜架上,外壳材质为纤维增强复合塑料(FRP)。

表5 保安过滤器配置表

Table 5 Configuration table of security filter

建设规模/(t·d ⁻¹)	10 μm过滤器数量/支	5 μm过滤器数量/支	过滤器型号
500	3	3	8040,骨架PP棉
300	2	2	
200	1	1	

表6 一级反渗透膜组件主要设备技术参数

Table 6 Main equipment technical parameters of primary reverse osmosis membrane module

建设规模/(t·d ⁻¹)	设备名称	主要技术参数	设备数量
500	高压泵	额定流量24.7 m ³ /h,额定扬程600 m,功率55 kW	1台
	能量回收装置	型号 iSave50,流量45.5 m ³ /h,功率18.5 kW,转子式,回收效率≥95%	1台
	RO膜元件	脱盐率99.8%,脱硼率92%,最大进水SDI=5.0	48支
300	高压泵	额定流量14.7 m ³ /h,额定扬程600 m,功率30 kW	1台
	能量回收装置	型号 iSave40,流量27.3 m ³ /h,功率11 kW,转子式,回收效率≥95%	1台
	RO膜元件	脱盐率99.8%,脱硼率92%,最大进水SDI=5.0	30支
200	高压泵	额定流量9.8 m ³ /h,额定扬程600 m,功率22 kW	1台
	能量回收装置	型号 iSave21Plus,流量9.8 m ³ /h,功率7.5 kW,转子式,回收效率≥95%	1台
	RO膜元件	脱盐率99.8%,脱硼率92%,最大进水SDI=5.0	18支

3.7 二级反渗透膜组

二级反渗透膜组主要包括二级反渗透增压泵、高压泵、膜组件和产品水池。增压泵过流部件材质为304不锈钢,出口压力为300 kPa。高压泵过流部件材质为304不锈钢,出口压力为980~1 150 kPa,进出口设置低压和超压保护开关。

二级反渗透的设计产水率为85%,采用TM720D-400的8040架桥芳香族聚酰胺复合膜,单支膜有效膜面积为37.16 m²,流道宽度0.863 6 mm,具有高脱盐率、

3.6 一级反渗透膜组

一级反渗透膜组主要包括一级反渗透供水泵、高压泵、能量回收装置、膜组件和一级反渗透产水池。一级反渗透供水泵出口压力为350 kPa,过流部件材质为2205双相不锈钢。高压泵采用柱塞泵,过流部件材质为2507超级双相不锈钢,额定出口压力6 MPa,进出口设置低压和超压保护开关。为降低系统能耗,采用等压正位移式的能量回收装置iSave系列产品,过流部件材质为2507超级双相不锈钢,能量回收总效率可达95%,与不设能量回收的系统相比可节能60%以上;该装置具有自适应能力,运行时无需人工额外调解和操作;该装置可将回收的能量用于提升低压海水的压力,但提升后海水压力仍低于高压泵的出口压力,iSave集成的增压泵可将这部分海水的压力提升至一级反渗透所需压力,增压泵扬程为50 m。

一级反渗透膜设计产水率35%,采用TM820V-400的8040高通量高脱盐节能型海水淡化反渗透膜元件,单支膜有效面积为37.16 m²,流道宽度0.863 6 mm,材质为架桥芳香族聚酰胺复合膜。膜壳材质为玻璃钢,承压能力为6 895 kPa,6芯装。采用一级一段排列。一级反渗透膜组件主要设备技术参数见表6。

高产水量、高化学耐久性、抗污染的性能。膜壳材质为玻璃钢,承压能力为2 068 kPa,6芯装。采用一级一段排列,浓水回流入原水池。二级反渗透膜组主要设备技术参数见表7。

3.8 矿化、消毒和供水

采用填充方解石填料的矿化罐对二级反渗透出水进行矿化,矿化罐设备技术参数见表8。采用现场制备的次氯酸钠进行消毒,有效氯投加量为2~4 mg/L。考虑到海岛对化学品运输存在一定限制,

表7 二级反渗透膜组件主要设备技术参数

Table 7 Main equipment technical parameters of secondary reverse osmosis membrane module

建设规模/(t·d ⁻¹)	设备名称	主要技术参数	设备数量
500	增压泵	额定流量 24.7 m ³ /h, 额定扬程 30 m, 功率 4 kW	南、北长山岛及砣矶岛项目 3 台, 2 用 1 备; 其余项目 2 台, 1 用 1 备
	高压泵	额定流量 24.7 m ³ /h, 额定扬程 115 m, 功率 15 kW	1 台
	RO 膜元件	脱盐率 99.8%, 脱硼率 92%, 最大进水 SDI=5.0	18 支
300	增压泵	额定流量 14.7 m ³ /h, 额定扬程 30 m, 功率 3 kW	2 台, 1 用 1 备
	高压泵	额定流量 14.7 m ³ /h, 额定扬程 98 m, 功率 7.5 kW	1 台
	RO 膜元件	脱盐率 99.8%, 脱硼率 92%, 最大进水 SDI=5.0	12 支
200	增压泵	额定流量 9.8 m ³ /h, 额定扬程 30 m, 功率 1.5 kW	2 台, 1 用 1 备
	高压泵	额定流量 9.8 m ³ /h, 额定扬程 110 m, 功率 5.5 kW	1 台
	RO 膜元件	脱盐率 99.8%, 脱硼率 92%, 最大进水 SDI=5.0	9 支

同时设置管式紫外消毒设备。各海水淡化站的供水方式不同,南、北长山岛直接由供水泵与供水管网连接,其他各岛均由供水泵将淡水输送到原有的高位水池。

表8 矿化罐设备技术参数

Table 8 Technical parameters of mineralization tank

建设规模/(t·d ⁻¹)	矿化罐规格	矿化罐数量/个
500	D 1.8 m×3.5 m	1
300	D 1.4 m×3.0 m	1
200	D 1.2 m×3.0 m	1

4 运行效果

自正式运行以来,系统的产水水质良好,一级反渗透出水电导率在 300~600 μS/cm,二级反渗透出水电导率不超过 20 μS/cm;经矿化系统后,出水 pH 在 7 左右。系统正式供水 2 个月后对各站点矿化罐出水进行现场例行取样,主要检测数据见表 9。出水各项指标检测数据均优于设计标准(GB 5749—2006)。本项目在 1.5 a 的运行时间内,出水效果稳定。

表9 各站点的矿化罐主要水质检测数据

Table 9 Main water quality data of mineralization tank of each station

项目	pH	肉眼可见物	嗅味	浊度/NTU	溶解性总固体/(mg·L ⁻¹)	色度/度	氟化物/(mg·L ⁻¹)	氯化物/(mg·L ⁻¹)	硝酸盐/(mg·L ⁻¹)
南长山岛	7.03	无	无	<1	54	<5	<0.2	0.94	0.19
北长山岛	6.85	无	无	<1	31.5	<5	<0.1	1.22	0.18
砣矶岛	6.8	无	无	<1	18.5	<5	<0.1	0.84	<0.15
小黑山岛	6.89	无	无	<1	23	<5	<0.1	2.43	<0.15
大钦岛	6.89	无	无	<1	20.0	<5	<0.1	7.56	<0.15
大黑山岛	6.95	无	无	<1	12	<5	<0.1	2.08	<0.15
南隍城岛	6.89	无	无	<1	23	<5	<0.1	0.69	<0.15
北隍城山前村	7.03	无	无	<1	12	<5	<0.1	2.47	<0.15
北隍城山后村	6.99	无	无	<1	25	<5	<0.1	2.73	<0.15
设计指标 (GB 5749—2006)	6.5~8.5	无	无	≤1	≤1 000	≤15	≤1.0	≤250	≤10

因冬夏季海水水温差异较大,夏季运行时运行压力相对较小,产水量较设计规模偏大;冬季水温较低,运行压力较大,产水量较设计规模偏小,但冬季用水量较小,系统间断运行。

5 技术经济分析

本项目总投资 4 890 万元,其中设计费 85 万元,工程费 4 805 万元。运营成本包括电费、药剂费、膜更换费及人工费。其中产水耗电量为 4.60 kW·h/t(含海水取水泵和淡水供水泵),山东省发展和改革委员会《关于烟台市海水淡化用电价格有关事项的

通知》规定海水淡化优惠电价为 0.555 元/(kW·h),电费为 2.55 元/t;化学药剂费(含阻垢剂、消毒剂和化学清洗剂)为 0.42 元/t;材料更换费(反渗透膜每 3 a 更换 1 次,滤芯每 3 月更换 1 次)为 0.85 元/t;人工费(每个站点按 3 人计)为 0.865 元/t;设备维护费(按投资额的 3% 计)为 0.76 元/t,管理费(含日常检测、第三方检测等)为 0.63 元/t,总计产水成本为 6.075 元/t。

总体来说,我国海水淡化成本普遍在 5~8 元/t^[5],其中,最大单项成本为电力能源费用,约占总成本的 41.49%^[5]。当有光伏或风力发电等可再生能源时,总

运行成本可大大降低^[6]。另外,化学药剂费以及材料更换费也是主要的直接费用。本工程与类似项目的直接运行费用对比见表10。与较大规模(产水10 000 t/d)的海水淡化项目相比,本项目费用略高^[6-7]。

表 10 类似项目的直接运行费用对比
Table 10 Comparison of the direct operating costs of similar projects

项目	产水规模/ (t·d ⁻¹)	主工艺流程	电费/ (元·t ⁻¹)	药剂费/ (元·t ⁻¹)	材料更换 费/(元·t ⁻¹)	小计/(元·t ⁻¹)	备注
本工程	5 200	二级砂滤+二级反渗透	2.55	0.42	0.85	3.82	电价0.555元/(kW·h)
三沙市永兴岛项目 ^[1]	1 000	超滤+二级反渗透	6.66	3.2	0.54	10.4	电价1.8元/(kW·h),保安过滤器滤芯费用计入药剂费内
小钦岛项目 ^[2]	100	砂滤+反渗透	2.438	0.376	0.692	3.506	电价0.555元/(kW·h)

6 结论

本项目采用主处理工艺为二级砂滤+一级反渗透+二级反渗透+矿化的组合工艺进行海水淡化,年总制水量可达1.56×10⁶ t(年满负荷运转时间按300 d计),出水指标均优于设计标准(GB 5749—2006),解决了长岛有人居住岛屿用水高峰期用水供需矛盾问题。采用高效的iSave能量回收装置,电耗降低,产水电耗控制在4.60 kW·h/t左右,总计产水成本为6.075元/t,明显降低了反渗透海水淡化装置的制水成本。在1.5 a多的运行时间里,出水效果稳定,为长岛的经济发

展做出了贡献。

GAO Junguo, KANG Jing, SUN Yonggen. Comparison between seawater qualities respectively east and west of Changdao tombolo[J]. Coastal Engineering, 2010, 29(4): 57-64.

[4] 肖威,王楠,李丹.膜法海水淡化工程中材质及设备的选型[J].工业水处理,2020,40(9):124-127.

XIAO Wei, WANG Nan, LI Dan. The material and equipment selection in membrane seawater desalination project [J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(9): 124-127.

[5] 王锐浩,黄鹏飞,王小军,等.海水淡化成本构成与成本控制问题研究[J].盐科学与化工,2020,49(7):19-23.

WANG Ruihao, HUANG Pengfei, WANG Xiaojun, et al. Study on cost composition and cost control of desalination[J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 2020, 49(7): 19-23.

[6] 李露,靳少培,潘春佑,等.海岛小型海水淡化系统设计要点[J].盐科学与化工,2017,46(5):6-8.

LI Lu, JIN Shaopei, PAN Chunyou, et al. Design essentials of small island seawater desalination system[J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 2017, 46(5): 6-8.

[7] 黄鹏飞,王小军,张寅,等.我国海水淡化现状与开发方案研究[J].盐科学与化工,2020,49(8):6-10.

HUANG Pengfei, WANG Xiaojun, ZHANG Yin, et al. The state of the art of desalination development and research on exploration scheme in China[J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 2020, 49(8): 6-10.

参考文献

[1] 杨树军,周冲,晏鹏.海水淡化在海岛应用的工程案例[J].中国给水排水,2018,34(6):89-92.

YANG Shujun, ZHOU Chong, YAN Peng. Case study on desalination application in an island[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(6): 89-92.

[2] 田林,李东洋,王晓丽,等.反渗透技术在小钦岛海水淡化工程中的应用[J].工业水处理,2018,38(9):100-103.

TIAN Lin, LI Dongyang, WANG Xiaoli, et al. Application of reverse osmosis to Xiaoqin island seawater desalination project[J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(9): 100-103.

[3] 高俊国,康婧,孙永根.长岛连岛坝两侧海域海水水质比较研究[J].海岸工程,2010,29(4):57-64.

[作者简介] 唐维(1975—),本科,高级工程师。电话:13688669861, E-mail:2522117456@qq.com。

[收稿日期] 2022-07-27(修改稿)