

工程实例

沙漠油田苦咸水多效板式蒸馏淡化系统设计与性能测试

苗超¹, 齐春华¹, 谢春刚¹, 张令品¹, 肖亚苏¹, 邢玉雷¹, 郭超²,
殷刚²

(1. 国家海洋局 天津海水淡化与综合利用研究所, 天津 300192; 2. 江苏巴威工程技术股份有限公司, 江苏 扬中 212200)

摘要: 针对新疆沙漠油田地下水水质差, 现场作业人员饮水困难问题, 研制了一套沙漠油田板式蒸馏淡化装置。该装置采用8效蒸发器加1效冷凝器结构, 热源为槽式太阳能集热器或燃气发电机组配套余热锅炉提供的热水, 额定产水量为1 m³/h。通过理论分析, 建立了传热传质数学模型, 并对预处理系统、进料水系统、产品水系统、浓盐水系统、抽真空系统、加热水系统和清洗系统的设计, 以及装置关键部件的研发做了分析说明。该装置在现场通过了全流程稳定性测试, 应用结果表明, 能够满足新疆沙漠油田现场作业人员饮用水要求, 具有较好的推广应用前景。

关键词: 沙漠油田; 苦咸水; 多效板式蒸馏; 淡化

中图分类号: P747.13 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)08-0095-05

Design and Performance Test of a Multi-effect Plate Distillation System for Brackish Water Desalination in Desert Oil Field

MIAO Chao¹, QI Chun-hua¹, XIE Chun-gang¹, ZHANG Ling-pin¹, XIAO Ya-su¹,
XING Yu-lei¹, GUO Chao², YIN Gang²

(1. The Institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, SOA, Tianjin 300192, China;
2. Jiangsu Bavi Engineering Technology Co. Ltd., Yangzhong 212200, China)

Abstract: According to the problems of the poor water quality in Xinjiang desert oil field and the lack of drinking water for the field staff, a set of multi-effect plate distillation device for underground brackish water desalination is developed. The device consists of eight-effect evaporators and one-effect condenser. The heating source is hot water provided by trough solar collectors or waste heat boiler of gas generator. The device produces freshwater at a rated output of 1 m³/h. The relative mathematical model about heat and mass transfer is established on the basis of the theoretical analysis. All the items including the pretreatment unit, feed water unit, product water unit, brine system, vacuum unit, heating unit, cleaning unit and the key components of the device are analyzed and explained in detail. The test of operation stability indicates that the device can meet the drinking water requirements for the staff in Xinjiang desert oil field. So it has good promotion and application prospect.

Key words: desert oil field; brackish water; multi-effect plate distillation; desalination

新疆塔克拉玛干大沙漠腹地油田生产区,地下水为苦咸水,矿化度高,严重影响了现场作业生产及生活^[1],若靠外部引水,则距离较远,很难铺设,经济投入大,工程周期长,投资效益差。目前在大部分沙漠采油区投入使用的是反渗透淡化制水,但是通过统计分析,油区作业人员相对流动性较大,膜法制水设备投入后管理难度大,反渗透膜长期无人更换,一方面导致饮用人员身体健康出现问题,另一方面后续使用成本居高不下。而低温多效蒸馏淡化产水水质好,后期运行、维护成本低,还可结合新疆地区丰富的太阳能可再生资源,将低温多效蒸馏淡化与太阳能有机结合,充分利用新能源制取淡水。另外,在阴雨、沙尘天气太阳能辐射强度较低时可利用现场燃气发电机尾气余热锅炉水作为热源,实现能源的梯级利用。

板式蒸馏苦咸水淡化装置是由板式蒸发器组成的最基本的蒸发单元,再配上冷凝器、泵、阀门、管路、仪表、热源供给系统及真空系统,组成单效、双效及多效板式蒸馏淡化装置^[2]。板式蒸发器以板片为主要传热元件^[3],相对于传统的管式蒸发器传热效率高, K 值一般为 $3\,500 \sim 5\,800 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,比管式蒸发器高 $2 \sim 4$ 倍^[4],因而在同等条件下所需传热面积小、结构紧凑。内部板片可拆,清洗方便,可以根据需要增加或减少板片的数量以改变产水量。物料在蒸发器中停留时间短、内部死角少、清洁干净、产水水质好。

1 多效板式蒸馏苦咸水淡化工艺设计

本系统是沙漠油田员工生活基地热、电、水联供系统中淡水供应部分,联供系统由一台 600 kW 燃气发电机组配套余热锅炉、槽式太阳能集热器及多效板式蒸馏苦咸水淡化装置组成。冬季利用燃气发电机组缸套高温水采暖供热,利用尾气余热进行苦咸水淡化;夏季发电机组停用,生活热水和苦咸水淡化热能转换为电太阳能集热器提供。本沙漠油田多效板式蒸馏淡化系统既能适应冬季发电机尾气余热,又能适应太阳能集热热源。装置额定产水规模设计为 $1 \text{ m}^3/\text{h}$,针对太阳能热源供给有限的运行条件,采用8效蒸发器加1效冷凝器串联实现热能重复利用。

工艺流程如图1所示。

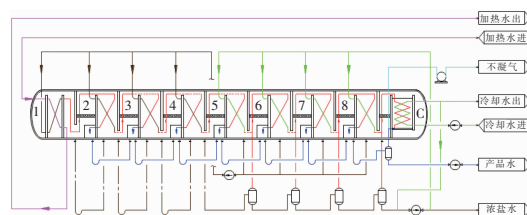


图1 多效板式蒸馏淡化系统工艺流程

Fig. 1 Schematic diagram of multi-effect plate distillation system

① 预处理系统

从地下井水取样,经国家海水及苦咸水利用产品质量监督检验中心检测,主要检测结果见表1。

表1 新疆沙漠油田地下苦咸水水质主要检测结果

Tab. 1 Main test results for underground brackish water in desert oil field

项 目	含 量
pH 值	7.86
$\text{CO}_3^{2-}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.00
$\text{HCO}_3^{-}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	385.1
$\text{Ca}^{2+}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	488.8
$\text{Mg}^{2+}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	682
$\text{SO}_4^{2-}/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	4.34
$\text{Cl}^{-}/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	6.19
$\text{Na}^{+}/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	4.02
$\text{K}^{+}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	36.7
$\text{TDS}/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	15.53

原水中 HCO_3^{-} 、 SO_4^{2-} 含量远高于标准海水中离子含量。在原水pH值为7.86条件下,温度超过 40°C 时,碳酸氢根将出现热分解,产生可以成垢的碳酸根离子,在海水淡化浓缩的高温段,盐水中的碳酸根会进一步水解,形成二氧化碳和氢氧根。因此,原水会生成 CaCO_3 、 CaSO_4 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 沉淀,从而在板片上出现结垢,降低板片传热系数,严重时堵塞板片流道,降低传热面积,影响蒸发效率。

由于草酸钙具有和碳酸钙相当的低溶度积,且草酸在pH值=6时即可完全电离形成草酸根离子,因此比较适合在含镁混合盐溶液中去钙离子,而不会引起镁离子的共沉淀。添加草酸后利用曝气去除水中的碳酸氢根和碳酸根,溶液的pH值=2.0~2.3。考虑到盐酸化将加速蒸馏淡化装备的腐蚀,并影响预处理絮凝剂的沉淀效果,因此,需要在添加草酸曝气后,加入烧碱将溶液pH值调至约7.0。

② 进料水系统

装置进料水采用沙漠油田员工生活基地的地下苦咸水。苦咸水作为冷却水直接供至冷凝器,经预热后,部分苦咸水作为各效蒸发器蒸馏过程中的进料水。进料水首先进入预处理系统软化,然后在5~8效板式蒸发器受热蒸发,蒸发后的浓盐水汇合后再送至1~4效蒸发器。各效进料口管路设置流量计,用于调节进料量。

③ 产品水系统

原料苦咸水在第1效与太阳能热水/燃气发电机余热锅炉水换热,受热蒸发,产生的蒸汽在2效板式蒸发器中凝结,凝结淡水汇聚到2效淡水箱。2效淡水依靠压差自流至3效淡水箱闪蒸,闪蒸后与第3效的淡水一起自流至4效淡水箱闪蒸,以此类推,第8效淡水和冷凝器淡水汇合后经淡水泵输送至产品水箱。淡水排放管路设置压力、温度、流量、电导等监控仪表。

④ 浓盐水系统

料液在1~4效板式蒸发器中受热蒸发,1效蒸发后的浓盐水依靠压差自流至2效闪蒸,然后汇同2效浓水一起自流至3效闪蒸,以此类推进入4效闪蒸,然后依次进入5~8效浓水闪蒸罐。8效闪蒸罐的浓水分两部分,一部分作为浓盐水排放,大部分与补充原料水混合经循环泵送至5~8效蒸发器蒸发,5~8效浓水汇合后作为1~4效料液,重复循环。浓盐水排放管路设置压力变送器和压力开关以及流量仪表。

⑤ 抽真空系统

本装置为负压操作,通过水环式真空泵将装置内不凝气抽出排入大气,建立和维持系统的真空度。不凝气从1~8效蒸发器和冷凝器的淡水侧抽出。在1~8效蒸发器和冷凝器壳体分别设置真空度和温度仪表。

⑥ 加热水系统

本装置热源为太阳能热水或燃气发电机余热锅炉水,压力为0.3 MPa,温度为95℃,流量为25 m³/h。热水进入1效蒸发器加热料液,降温至90℃返回,加热水只参与热量传递,不发生质量交换。

⑦ 清洗系统

为清除板片污垢,装置设有清洗功能。清洗装置由清洗药溶解箱、清洗泵和清洗管路组成。清洗时该系统与各效的给水管路配合使用。清洗泵将清

洗箱中的清洗液分别打入各效蒸发器及冷凝器中,对各效蒸发器和冷凝器进行清洗。清洗环路的选择通过管路阀门调节控制。

2 多效板式蒸馏苦咸水淡化装置研制

装置主体为矩形框架式结构(见图2),通过在内部布置隔板分离出各效空间,在每个隔断空间内布置板片组合、进料水管路、抽真空管路、汽液分离器、淡水收集器等,使得每一隔断空间构成低温多效蒸馏传统意义上的1“效”。1~8效蒸发器依次串联,最后一效蒸发器再与冷凝器连接。



图2 多效板式蒸馏苦咸水淡化装置

Fig. 2 Multi-effect plate desalination device

2.1 1效升膜蒸发器

1效蒸发器属于单侧相变,热源热水对料液苦咸水加热,使之部分蒸发,由于1效蒸发器温度最高,板片内苦咸水侧温度最高达85℃,采用升膜蒸发能有效避免“干壁”,降低结垢倾向。由于逆流操作的平均推动力大于并流,传递同样的热流量,所需的传热面积较小^[5],因此1效蒸发器采用逆流。为充分利用热源热量,采用二级升膜蒸发器(见图3),选用总传热系数较高的串联组合逆流操作,加热水自一级升膜蒸发器的上端角孔进入、下端角孔流出,然后进入二级升膜蒸发器;料液自升膜蒸发器的下端角孔流入,蒸发蒸汽和浓盐水在上端板缝流出。

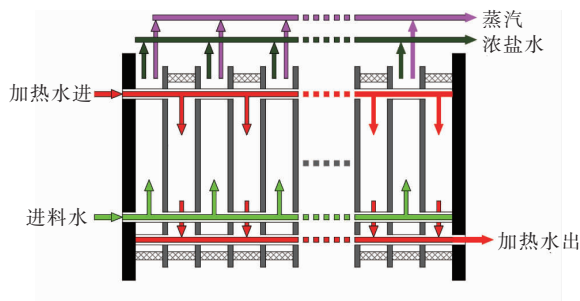


图3 1效升膜蒸发器分程流动示意

Fig. 3 Flow of No. 1 effect rising film evaporator

2.2 2~8效降膜蒸发器

低温多效蒸发器属于双侧相变、薄膜蒸发,传热系数高^[6~9],在相同的热负荷条件下所需传热面积可大为节省;其次,降膜蒸发传热温差小,易于实现多效蒸发,利于提高造水比^[7,10],因此2~8效蒸发器采用降膜蒸发(见图4)。

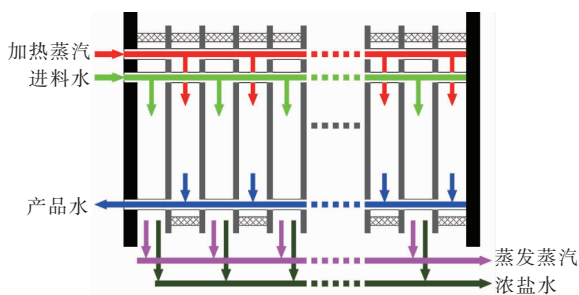


图4 2~8效降膜蒸发器分程流动示意

Fig. 4 Flow of No. 2 to No. 8 effect falling film evaporators

加热蒸汽自换热板片上部一角孔进入,冷凝后由下部角孔流出至淡水箱;料液自换热板片上部另一角孔进入,在重力作用下沿板片侧壁成膜状下降,并在此过程中部分受热蒸发,蒸发蒸汽和浓盐水在下端板缝流出。

2.3 冷凝器

冷凝器一方面将来自第8效的蒸发蒸汽和8效浓水闪蒸罐的蒸汽冷凝成为淡水,另一方面将原料苦咸水预热作为装置补充进料水(见图5)。

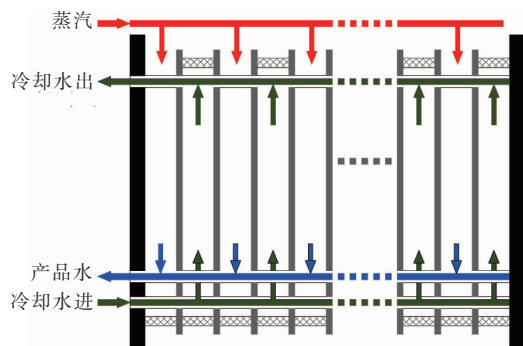


图5 冷凝器分程流动示意

Fig. 5 Flow of condenser

冷凝器同样采用逆流,即蒸汽自板片上端板缝进入,冷凝后的淡水由下端角孔流出至淡水箱;原料苦咸水作为冷却水自板片下端角孔流入,上端角孔流出。

3 多效板式蒸馏淡化装置性能测试

全部设备安装完成具备全流程开机运行条件后,

首先启动装置控制系统,进行设备冷调测试,满足要求后开启燃气发电机余热锅炉水作为加热热源,进行装置热调运行。系统开车后,逐步将热源流量、操作温度、进料量等运行参数调节至设计值,实现全部设备满负荷自动稳定运行,完成稳定性测试,检验装置的综合性能。

2015年7月2日,装置产水量在额定工况下达到设计值1 m³/h左右,见图6。在稳定性运行过程中,产品水电导率随着装置运行时间的延长而下降,逐渐稳定在7.0 μS/cm左右,产品水水质优良。

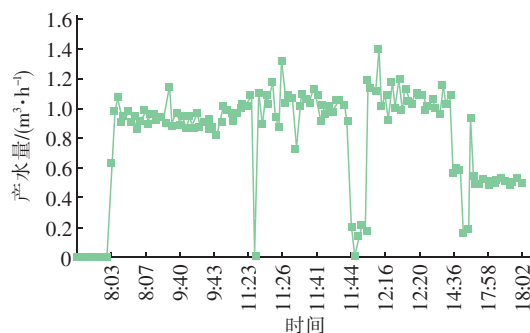


图6 装置产水量随时间变化

Fig. 6 Variation of water yield with time

4 结论

针对沙漠油田地下苦咸水水质差的问题,完成了多效板式蒸馏苦咸水淡化系统的工艺设计与装置研制。该多效板式蒸馏苦咸水淡化装置在新疆沙漠油田生活基地现场通过了全流程稳定性测试,结果表明,装置的热效率高、产水水质好、结构简单、质量轻、易于现场的安装和维护。该装置的成功运行,为油田企业进军沙漠腹地提供了一个很好的保障,为大型多效板式蒸馏淡化技术的优化设计提供了依据。

参考文献:

- [1] 康建中,李育良,胡志祥,等. 塔里木油田沙漠苦咸水淡化与软化技术[J]. 西安石油学院学报,1995,10(1):40-45.
- [2] 宋金虎,官兵,张守圣,等. 板式蒸发技术[J]. 石油化工设备,2013,42(1):107-110.
- [3] 王虎虎,马学虎,兰忠,等. 板式蒸发器的研究进展[J]. 化工进展,2009,28:343-345.
- [4] 刘清明,周泽广,朱冬生. 板式蒸发器的工业应用概述[J]. 流体机械,2009,37(7):37-41.

(下转第103页)