孙永龙. 能量回收装置在多段膜系统中的应用分析[J]. 盐湖研究,2026,34(1):94-98.
Sun Y L. Application analysis of energy recovery device in multi-stage membrane system[J]. Journal of Salt Lake Research,2026,34(1):94-98.
DOI:10.3724/j.yhyj.2025067
CSTR:32273.14.j.yhyj.2025067

能量回收装置在多段膜系统中的应用分析

孙永龙
(青海盐湖蓝科锂业股份有限公司,青海 格尔木 816000)

摘 要:膜分离技术越来越广泛地应用在环保水处理和物料分离行业,能量回收是其重要的节能措施。目前,能量回收装置在反渗透海水淡化领域应用最为广泛,由于海水淡化工艺多采用一段膜装置,正位移式能量回收装置的节能效果更具有优势。而在环保及物料分离领域常见的多段膜系统中,能量回收装置的应用较少,应用方式的选择和节能效果的评价依据尚不完善。文章对能量回收装置的分类、原理、技术特点及其使用工艺进行了介绍,并通过盐湖资源利用领域应用案例的深入分析,对比了常规系统、正位移系统和离心式系统三种不同系统的能耗,探讨了在多段膜系统中不同形式能量回收装置选择的依据,为能量回收装置在多段系统中的广泛应用提供支撑。

关键词:能量回收装置;多段膜系统;能耗分析
中图分类号:TQ424;TS396.5 **文献标志码**:A **文章编号**:1008-858X(2026)01-0094-05

能量回收装置是反渗透海水淡化系统中常见的核心系统之一[1],其应用可以大幅度地降低系统的制水电耗,对推动海水淡化技术发展具有举足轻重的作用[2]。目前,反渗透过程凭借高效的分离性能及选择性,也越来越多地被应用于除海水淡化之外的各种行业中,包括环保领域和物料分离领域。与海水淡化不同,物料分离过程为了尽可能提高物料的收率普遍采用多段过程。在压力较高的场合,特别是系统的后段,能量回收装置同样是重要的节能措施。而由于多段式膜系统结构设置复杂,能量回收系统在应用时面临水量、能量匹配等问题[3]。因此,针对不同能量回收装置特征,开展能量回收装置在多段膜系统中的应用研究及选型依据探讨,对推动能量回收系统在多段式系统中的应用,实现物料分离膜系统节能降耗具有非常重要的意义[4]。

1 能量回收装置的应用及工艺

能量回收装置按照工作原理的差异可分为两类:离心式和正位移式[5]。截至目前,上述两种能量回收装置在反渗透海水淡化领域均得到了工程应用,且节能效果明显,为用户创造了巨大的经济效益,已成为海水淡化系统中不可或缺的核心设备[6]。

反渗透海水淡化系统的操作压力一般在5.0~6.0 MPa,同时受限于高盐度带来的高渗透压以及海水结垢风险,反渗透系统在海水淡化中多采用一段设置的方式,淡水回收率相对较低,一般在40%~45%之间[7]。不同形式能量回收装置的海水淡化工艺如图1和图2所示。

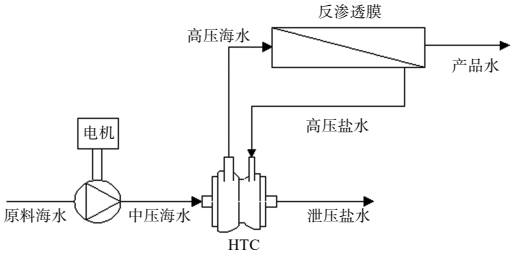


图1 应用离心式能量回收装置的海水淡化工艺
Fig. 1 Seawater desalination process using centrifugal energy recovery device

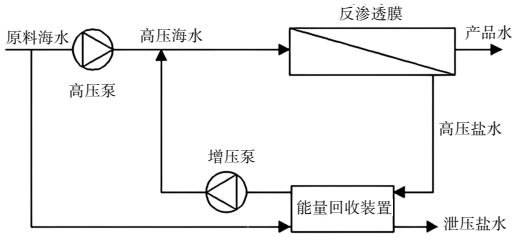


图2 应用正位移式能量回收装置的海水淡化工艺
Fig. 2 Seawater desalination process using positive displacement energy recovery device

收稿日期:2025-08-13;**修回日期**:2025-08-25
作者简介:孙永龙(1988—),男,主要从事盐湖资源综合利用方面的研究。Email:602572146@qq.com。

离心式能量回收装置又称为透平式或涡轮增压式能量回收装置。在膜系统中,离心式能量回收装置一般与高压泵串联使用,通过降低高压泵所需的扬程来降低膜系统的能耗。它主要由透平叶轮和泵叶轮两部分组成,两者在同一壳体中工作,透平叶轮和泵叶轮安装在同一轴上。离心式能量回收装置工作时,膜系统浓水侧排出的高压流体由入口喷嘴进入透平部分,冲击透平叶轮转动的同时带动同轴的泵叶轮旋转,高压流体携带的能量经过“压力能—轴功—压力能”的二次转化之后传递给由泵入口进入的低压流体,泄压后的流体由透平出口以常压排出,被增压的流体由泵高压出口排出,进入膜系统(图 3)。在离心式能量回收装置过程中,能量经过了不同形式的转化、传递,因此,仅对能量回收装置本身来讲,能量存在一定的损失,其回收效率一般在 60% ~ 80%之间。

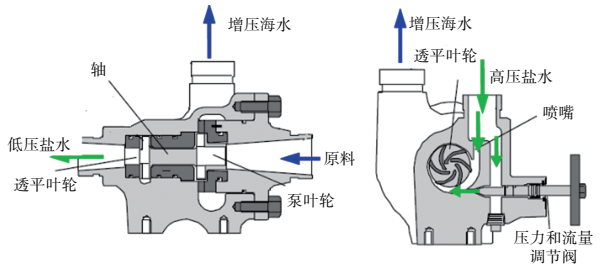


图 3　离心式能量回收装置的工作原理

Fig. 3　Configuration and principle of centrifugal energy recovery device

正位移式能量回收装置又称为压力交换式能量回收装置,其工作原理与柱塞泵类似,图 4 为常见的正位移式能量回收装置(美国 ERI 公司的 PX 能量回收装置)的工作原理,在该装置中,转子上开有压力交换通道,在工作过程中,通过转子的转动,实现高压盐水和低压海水间的压力能交换。如图 2 所示,在膜系统中它与高压泵并联使用,通过减少由高压泵增压的进料流量来降低膜系统的总能耗。该类型能量回收装置的典型应用工艺特点为:低压原料分为两路,一路经由高压泵直接加压到膜系统进口操作压力,流量约等于膜系统的透过液流量;另一路直接进入能量回收装置。由于高压流体在经过膜元件后存在一定的压力降(0.05 ~ 0.2 MPa),在能量回收装置及管路中也存在一定的压力损失(0.02 ~ 0.1 MPa)。因此,虽然高压流体中的能量以较高的效率传递给了原料,但增压后的原料压力仍低于膜元件进口操作压力,这是所有正位移式能量回收装置的共同特点。所以需要在能量回收装置后安装增压泵,将增压物料进一步加压到系统操作压力后,再与高压泵提供的增压物料混合,一同进入膜系统。在正位移式能量回收装置中,能量传递形式为“压力能—压力能”,相应地,其能量回收效率较高,一般在 95% 以上。

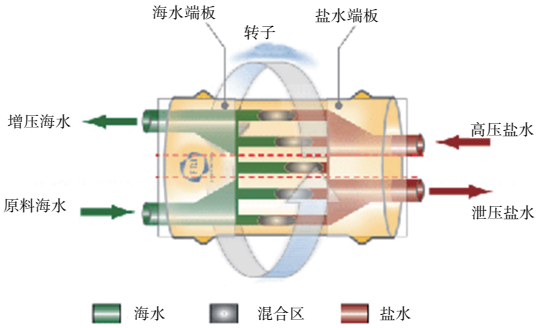


图 4　正位移式能量回收装置的工作原理

Fig. 4　Principle of positive displacement energy recovery device

相关研究表明,采用正位移式能量回收装置的海水淡化系统,淡水制水能耗为 3.03 kWh/m^3;而采用离心式能量回收装置,淡水制水能耗为 3.37 kWh/m^3 [8]。正位移式能量回收装置节能效果更为明显,系统运行三年后,即可回收采用正位移式能量回收装置引起的成本增加。

综上所述,反渗透海水淡化的膜系统相对简单,而正位移式能量回收装置能量回收效率较高,故其节能效果更好,虽然其设备投资成本较高,但依然是反渗透海水淡化系统的首选[7]。

2　多段膜系统案例分析

2.1　案例概况

本文以某企业的实际工程为例,对不同形式的能量回收装置及不同应用工艺的节能效果进行了分析研究,在设备投资总额相近的条件下,探讨了在多段系统实际应用过程中,能量回收装置选型的依据。

该项目所在企业地处青海省格尔木市察尔汗盐湖湖区,主要生产碳酸锂产品,在生产过程中会产生大量的高盐卤水,主要成分为 $MgCl_2$,原本排放至矿区用于溶矿。为了开源节流,降低企业的淡水消耗,拟采用膜分离系统对高盐卤水进行淡化制取淡水。

由于工程所在地淡水资源极为匮乏,该工程要求系统达到尽可能高的淡水回收率。本项目原水

TDS为29 g/L，略低于标准海水的含盐量，且无易结垢成分，具备采用多段系统提高回收率的条件[9,10]。前期采用6支4寸反渗透膜串联的实验装置进行了小试实验，膜元件采用节能型反渗透膜元件，获得了相关的操作参数。实验数据表明，采用两段系统，第一段膜系统淡水回收率可达60%，第二段膜系统淡水回收率可达45%，总的淡水回收率可达到78%，远高于常规海水淡化系统的淡水回收率。在两段膜系统中，为了更好地平衡一段膜装置和二段膜装置的产水量，设置了二段高压泵，对一段膜装置浓水进行增压。该项目主要技术参数如表1所示。

表1 某工程项目的主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of the project

项目	单位	数值
进水TDS	mg/L	29 000
进水温度	℃	~30
进水量	m^3/h	440
第一段进水压力	MPa	4
第一段淡水回收率	—	60%
第一段膜通量	$L/(m^2·h)$	18.0
第二段进水压力	MPa	7
第二段淡水回收率	—	45%
第二段膜通量	$L/(m^2·h)$	11.8

根据本项目的具体操作参数要求，对不同的技术方案，即未配置能量回收装置，以及配置上述两种不同形式的能量回收装置的技术方案进行了分析，以确定最优方案。

2.2 技术方案设计

（1）常规系统

若系统不采用能量回收装置，则该系统的工艺流程如图5所示，分别在第一段膜系统和第二段膜系统进水处设置一段高压泵和二段高压泵，以满足系统淡水回收率的要求。本系统中所有压力能均由电能驱动，此方案简称为S1。

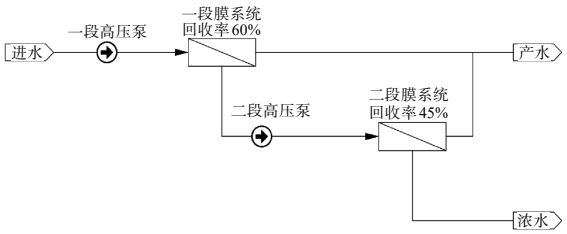


图5 无能量回收装置的两段膜系统

Fig. 5 Two-Stage membrane system without energy recovery devices

（2）采用离心式能量回收装置的技术方案

采用离心式能量回收装置的两段膜系统工艺流程如图6所示，系统的整体回收率较高，若使用离心式能量回收装置对第一段膜系统的进料进行增压，则离心式两侧水量相差较大，导致能量回收效率较低。因此，在两段膜系统中，能量回收装置设置在第一段和第二段膜之间，通过回收第二段膜系统中浓盐水的压力能量，对第二段膜系统的进水进行增压，压力不足部分由第二段高压泵进行补充。此方案简称为S2。

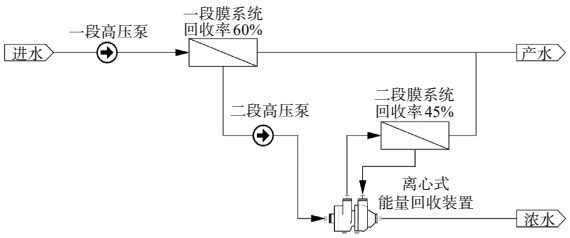


图6 采用离心式能量回收装置的两段膜系统

Fig. 6 Two-Stage membrane system using centrifugal energy recovery device

（3）采用正位移能量回收装置的技术方案

如前文所述，正位移能量回收装置通常与水泵并联使用，在两段膜系统中，可采用正位移能量回收装置对第一段进水进行增压，其工艺流程如图7所示。由于第二段浓水的压力要高于第一段膜的进水压力，而正位移式能量回收装置的能量交换过程基本为等压交换，被增压后的流体压力也会高于第一段的进膜压力，故在进入第一段膜前，需要设置节流阀，对增压后的该股流体进行减压，造成了一定的能量损失。此方案简称为S3。

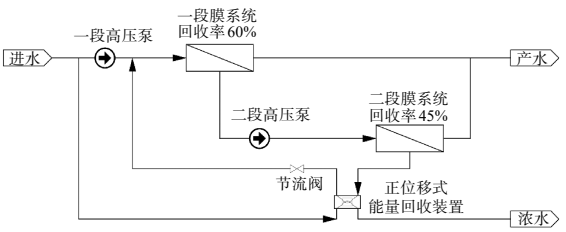


图7 采用能量回收增压第一段进料的两段膜系统

Fig. 7 Two-Stage membrane system using positive displacement energy recovery device to boost feed-in of 1st stage

2.3 能耗分析

针对上述技术方案，对不同工况下的离心式高压泵及能量回收装置进行了选型，获取水泵的效率和能量回收装置的能量回收效率，相关的能耗分析如表2所示。

表2　不同技术方案的能耗分析

Table 2　Energy consumption analysis of different technical solutions

技术方案		S1	S2	S3
给水泵	流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	440	440	440
	扬程/m	35	35	35
	效率/%	68	68	68
	功率/kW	63.5	63.5	63.5
一段高压泵	流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	440	440	343.2
	扬程/m	380	380	380
	总效率/%	81	81	78
	功率/kW	578.7	578.7	468.8
二段高压泵	流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	176	176	176
	扬程/m	320	50	320
	总效率/%	60	72	60
	功率/kW	268.3	34.9	268.3
能量回收装置	形式	—	离心式	正位移式
	能量回收效率/%	—	66	95
	流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	—	176	96.8
每吨淡水电耗/($kWh \cdot m^{-3}$)		2.95	1.97	2.59

在表2中,

$$水泵功率 = \frac{\rho g H Q}{1000\eta} \tag{1}$$

其中,ρ 为流体密度(kg/m³),本项目卤水密度约为1 030 kg/m³;g 为重力加速度(m/s²),通常取9.81 m/s²;Q 为水泵流量(m³/s);H 为水泵扬程(m);η 为水泵的总效率,为水泵效率与电机效率之积。

$$能量回收效率 = \frac{Q_1(H_1 - H_2)}{Q_2 H_3} \tag{2}$$

其中,Q_1 为被增压流体的流量(m³/s);H_1 为被增压流体出口压力(m H_2O);H_2 为被增压流体入口压力(m H_2O);Q_2 为增压流体的流量(m³/s);H_3 为增压流体入口压力(m H_2O)。

从上述分析可以看出,虽然正位移式能量回收装置本体的能量回收效率明显高于离心式,但对于整体系统,即采用离心式能量回收装置的S2方案能耗最低。这是因为选择不同形式的能量回收装置,所配套的水泵流量和扬程会发生变化,而离心泵的整体效率与比转速呈正相关关系(比转速与流量成正比,与扬程成反比)。本项目两段膜系统选择离心式能量回收装置时,所采用的一段高压泵流量为440 m³/h,扬程为380 m,采用正位移式能量回收装置时,一段高压泵扬程一致,但流量仅为343.2 m³/h,故前者的一段高压泵整体效率更高;对于二段高压泵,各方案流量一致,均为176 m³/h;但采用离心式能量回收装置时,其扬程仅需50 m,明显低于其他方案,整体效率更高。

由此可见,在本项目中,当系统采用离心式能量回收装置时,所配套的一段高压泵和二段高压泵的整体效率相对较高,可以弥补离心式能量回收装置本身能量回收效率较低的缺点,使得该技术方案的能耗更低。

2.4　设备投资分析

上述三种方案所采用的膜元件类型和数量均一致,不同方案的设备成本差异主要集中在一段高压泵、二段高压泵和能量回收装置。本项目水泵和能量回收装置均采用工程业绩较多的某进口品牌,其设备投资成本如表3所示。采用正位移式能量回收装置的设备投资成本最高,采用离心式能量回收装置次之,不采用能量回收装置时设备投资成本最低。按照项目所在地平均电价0.5元/kWh计算,采用离心式能量回收装置时,系统仅需运行1 190 h,所节省电费即可涵盖所增加的设备投资成本。

表3　不同技术方案的水泵和能量回收装置投资成本

Table 3　Investment costs of water pumps and energy recovery devices for different technical solutions

技术方案	一段高压泵投资成本/元	二段高压泵投资成本/元	能量回收投资成本/元	总投资成本/元
S1	180	90	0	270
S2	180	55	55	290
S3	160	75	65	300

3　结　论

(1) 能量回收装置可以显著降低膜系统的能耗,尤其在操作压力较高的情况下;在分析案例中,采用S2方案可降低能耗33.2%,采用S3方案可降低能耗12.2%。

(2) 经过对投资成本差异的分析,采用离心式能量回收装置时,其投资回报率最高。

(3) 在单段膜系统中,能量回收装置本身性能对节能效果影响较大,由于无段间增压,增压后的流体无需减压,未造成能量损失,故正位移式能量回收装置优势明显;在多段膜系统中,能量回收的选择依据除了能量回收装置本身的性能外,还要综合考虑水泵的选型参数和相关设备的整体投资,以系统整体能耗和投资回报率作为考量依据。

参考文献

[1] WANG X P, WANG YY, WANG J P, *et al*. Comparative study on stand-alone and parallel operating schemes of energy recovery device for SWRO system[J]. Desalination, 2010, 254: 170-174.

[2] 苏立永,潘献辉,葛云红,等.大型反渗透海水淡化工程能耗降低方法探讨[J]. 工业水处理,2008,28(3):81-83.

[3] MASARU T, MASARU K, SHOJI K. Behavior of a reverse osmosis plant adopting a brine conversion two-stage process and its computer simulation [J]. Journal of Membrane Science, 2001, 18: 249-257.

[4] 宋杰民,汪程鹏,王生辉,等. 不同能量回收组合工艺下海水淡化系统比能耗分析[J]. 工业水处理,2024,44(5):212-217.

[5] 汪程鹏,李东洋,王生辉,等. 两类能量回收装置的海水淡化工程应用对比[J]. 净水技术,2021,40(7):113-118.

[6] 肖建群,李鹏. 海水淡化能量回收装置系统设计[J]. 南方能源建设,2021,8(S1):73-79.

[7] 汪程鹏,王生辉,肖业祥,等. 海水淡化能量回收装置能耗分析与设计比选[J]. 水处理技术,2023(12):51-54.

[8] WANG C P, MENG P Y, WANG S H, *et al*. Comparison of two types of energy recovery devices: Pressure exchanger and turbine in an island desalination project case [J]. Desalination, 2022, 533: 1-10.

[9] GRUNDISCH A, SCHNEIDER B P. Optimising energy consumption in SWRO system with brine concentrate[J]. Desalination, 2001(138) 223-229.

[10] PASQUALIN P, DAVIES P A. Multi-Stage nanofiltration for brine concentration: experimental and modelling study[J]. Desalination, 2023, 566: 1-29.

Application Analysis of Energy Recovery Device in Multi-Stage Membrane System

SUN Yonglong

(*Qinghai Salt Lake LanKe Lithium Industry Co., Ltd., Golmud*, 816000, *China*)

Abstract: Energy recovery has become a significant energy-saving measure in the application of membrane separation technology in environmental water treatment and material separation industries. Currently, energy recovery devices (ERDs) are most widely used in reverse osmosis seawater desalination systems, where single-stage membrane processes are predominant; in such configurations, positive displacement energy recovery devices demonstrate notable advantages in energy efficiency. However, in the multi-stage membrane systems commonly employed in environmental and materials separation applications, the adoption of energy recovery devices remains relatively limited, and the criteria for their selection and the evaluation of their energy-saving effects are still not well established. This paper introduces the types, working principles, technical characteristics, and suitable processes of energy recovery devices. Through in-depth analysis of practical cases, it examines the system energy consumption associated with different processes and different types of energy recovery devices, and discusses the basis for selecting ERDs in multi-stage membrane systems. These findings are expected to contribute to the broader application of energy recovery devices in such configurations.

Key words: Energy recovery device; Multi-Stage membrane systems; Energy consumption analysis