膜法海水淡化反渗透系统中排气阀的安装设计探讨

曾德榜（三沙蓝水科技有限公司，海南　三沙　573199）

摘　要：排气阀是水处理行业常见的设备之一，合理安装利用排气阀可减少管道水锤损坏，泵叶腐蚀。在膜法海水淡化反渗透系统中，排气阀的合理安装对反渗透系统安全运行起着重要作用。本文重点介绍采用 PX 能量回收装置的膜法海水淡化反渗透系统管道中气体产生原因以及流体中气体运动对反渗透系统的破坏，探讨排气阀在反渗透系统最合理安装位置，为膜法海水淡化反渗透排气系统提供参考。

关键词：海水淡化；反渗透；排气阀；PX 能量回收装置

0 引言

随着如今经济的快速增长，淡水资源的短缺问题也越来越成为制约社会发展的关键问题，而渗透膜以及能量回收设备迭代更新使得膜法海水淡化成为现今沿海地区解决大规模缺水问题最现实和最有效的手段之一。

反渗透过程的操作原理与自然渗透现象相反。渗透是一种自然现象，流体会渗透一个半渗透膜，自低浓度侧渗透向较高浓度一侧以平衡浓度，离子或其他大分子阻流在渗透膜后面，渗透膜两侧渗透压将按照溶解固体成分比例趋向平衡。这种自然渗透过程在高浓度流体一侧施加物理压力，比渗透压高，流体则会从高浓度侧流向低浓度侧，而离子或大分子则留在渗透膜后面。在海水淡化过程中，海水渗透压为 55bar，高压泵提供物理压力克服海水渗透压驱动水穿透 65–70bar 的反渗透膜，实现海水淡化。

膜法海水淡化反渗透技术的核心设备为海水反渗透膜组、高压泵、增压泵、能量回收装置。其中能量回收装置是将海水反渗透膜组高压浓水的压力回收，经增压泵增压进入反渗透膜组进水端，从而减少进入高压泵流量而降低高压泵的能耗，一般带有能量回收系统的高压泵流量占反渗透膜组进水流量的 40%，进而降低整个海水淡化系统的运行能耗和造水成本。

大型膜法海水淡化反渗透设备采用的能量回收装置主要分为水力涡轮式和压力交换式两大类。目前 ERI 公司生产的 PX 系列能量回收装置占膜法海水淡化能量回收装置约 90% 的市场，是压力交换式能量回收装置的代表，其回收效率最高可达 98%，具有设计简单、占地小等优点 [1]。

由于 PX 能量回收装置市场份额相当大，投资成本占比较高，且对膜法海水淡化的设计及运行要求较高，本文重点探讨采用PX能量回收装置的海水淡化系统中，排气阀在膜法海水淡化反渗透系统中的应用和安装位置的设计。

1 气体在海水淡化反渗透系统的危害

在海水淡化反渗透系统停机的情况下，系统管道一般为空管状态，设备启动后海水高速运动，夹带大量气体在管道运行，在未安装或未合理安装排气阀的情况下对反渗透系统的影响主要有：



图 1



图 2

①海水淡化系统的输水管道，一般都受到空间的制约，管道弯头、垂直管道数量较多，管内水的流速有急有缓，水流运动造成的掺气以管道内压力的变化，在输送水过程中溶解的气体会析出并聚集在管道的最高点，

加之在运行过程中各种控制闸阀的开启，在管道中会产生气阻的现象，气阻现象严重时，管道输水严重受阻，甚至无法向反渗透系统供水；

②高压带气体水流对高压泵、增压泵产生强大的汽蚀作用；

③对拷贝林管件、阀门产生日积月累的撞击造成管道滴漏，甚至爆管；

④尤其对反渗透膜产生严重后果，水锤作用导致产水中心管破裂，甚至反渗透膜破裂、聚乙酰胺层结构剥离脱网（图 1、图 2）导致脱盐率降低，影响反渗透膜使用寿命，设备运营成本增加；

⑤设备急停时管道迅速从高压降至负压甚至真空，甚至造成反渗透膜变形影响产水功能。

2 海水淡化反渗透系统常见工艺

在海水淡化反渗透系统中，设备投资成本几乎与设备运营成本持平，高能耗的海水淡化反渗透系统已经被淘汰，现阶段膜法海水淡化系统：等压式能量回收装置系统和涡轮式能量回收装置系统应用最广。

2.1 水力涡轮式能量回收装置

涡轮式能量回收装置主要是利用反渗透浓水的能量给进入反渗透装置的原水进行增压以达到降低高压泵的扬程，能量转换方式为压力能→轴能→压力能，能量回收效率最大可达 80%，从而起到节能的作用。因水力涡轮式能量回收装置进水与浓水不直接接触，流体中气囊无交换条件，反渗透系统的气体来自反渗透膜进水端，在反渗透膜系统进水端合理安装排气阀也可以保障反渗透系统安全运行。

2.2 等压式能量回收装置

等压式能量回收装置可以直接利用压力能，减少轴功的能耗，能量回收率可达到 98%。PX 系列能量回收装置由于其特殊结构，高压浓盐水和原海水直接接触实现等压，使低压海水瞬间增压实现能量回收的目的。

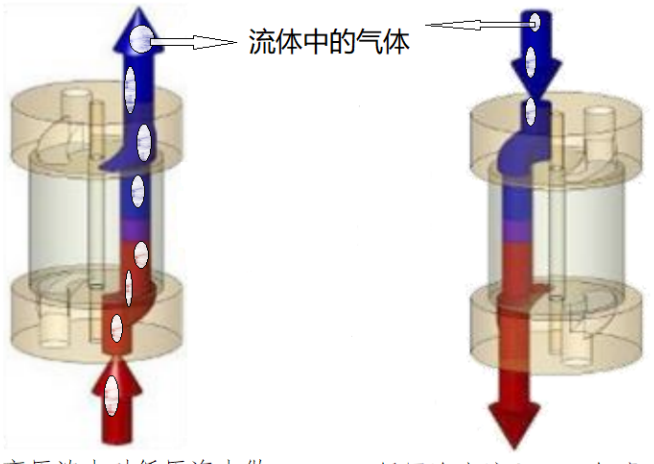


图 3

在海水淡化反渗透系统实际安装过程中，很多等压式能量回收装置一般立式安装以便节约空间，对此，在无排气阀或排气阀安装不合理的情况下，反渗透系统中反渗透膜进水端气囊直接撞击反渗透膜，而夹杂在高压浓水中的气囊在能量回收装置内重新回到反渗透膜进水端，形成气囊流动循环，反渗透系统内气囊将无法排净（图 3）。这种情况下，反渗透系统开关机形成的水锤会对反渗透膜产生极大的破坏力，极易造成设备损坏。

3 海水淡化反渗透系统常见排气方式

气体在海水淡化反渗透系统的危害得到越来越多海淡工艺设计工程师的关注，但是仍有很多人不够重视反渗透系统排气问题，在系统调试时经常发生管道爆裂、拷贝林崩开、反渗透膜中心管损坏等诸多问题，导致设备成本增加甚至极大威胁运行人员的人身安全。

在海水淡化反渗透系统采取何种排气设施，其适用条件、优缺点及可靠性方面很少有人论述，在海水淡化反渗透系统常见的排气方式主要有以下三种：

3.1 手阀排气

在管道上端连接短管，在短管上装有手动球阀，在开机送水后开启阀门排气，目视出水水柱无明显气泡后关闭。反渗透系统停高压泵后手动打开阀门进气，消除管道真空。

3.2 电磁阀排气

电磁阀作用与手阀作用一致，优点方便操作人员操作，保障操作人员人身安全。缺点设备停机时无法自动协调反渗透设备内外压力，极易导致反渗透膜发生浓差极化现象，造成膜表面结垢。

3.3 自动排气阀

自动排气阀采用正压排气和负压进气设计，具备进、排气功能。排气阀在管道有压力的情况下自动排放内部少量空气，在高、低压运行过程中实现脱离人手动操作，实现设备的安全运行。当设备停机时，管道排空，自动排气阀自动进气，消除管道真空。

4 排气阀的布置

根据相关资料，结合相关工程运行、设计实例，在一定距离内和管道的最高点必须安装排气阀，用以排除管道内聚集的气体防止气阻现象发生，保证管道正常输水，反渗透系统正常运行[2]。因此，在以下位置需要安装自动进排气阀。

①取水部分和预处理部分管道最高点是最主要的安装点；

②预处理密闭水箱、罐体顶部应装有低压排气阀，防止在关启设备时流体内气体气囊冲击水箱、罐体造成破坏；

③低压海水进入高压泵前在管道最高处安装自动排气阀；

（下转第 161 页）

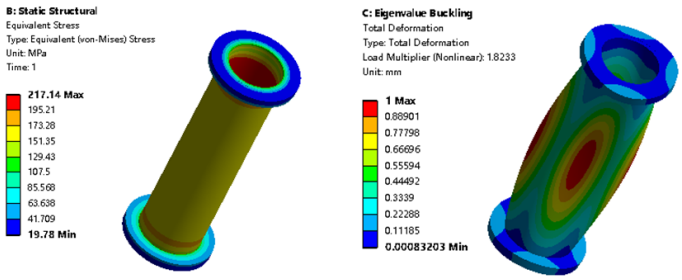


图 10　vonMises 云图（左）、一阶屈曲云图（右）

其中图 10 中 vonMises 云图（左）为静力学模块分析得到的 voMises 强度分析结果，该图说明，隔水管在 30MPa 外水压下，最高 vonMises 强度为 217.1MPa，低于钛合金屈服强度，其安全系数达 1.5。一阶屈曲云图（右）为屈曲模块分析得到的屈服强度分析结果，该图说明，隔水管在 30MPa 外水压下，其第一阶屈曲系数为 1.8。



图 11　隔水管（优化）试验后状态图

3.5 试验分析结果

根据优化设计结果，对结构进行改进加工，使原壁厚减至 7mm，采用压力釜对该结构进行加压试验验证，试验结果见图 11，经 30MPa 外水压试验后的改进型隔水管结构完整，无明显缺陷，满足设计要求。

4 结论

本文通过有限元优化分析得到结构最优尺寸，充分的优化了原隔水管重量，优化结构见表 2，最后通过试验验证证明该优化结果可行。

表 2　隔水管优化结果

规格	优化前重量（kg）	优化后重量（kg）	减重比
短（360mm）	8.908	5.019	43.65%
长（410mm）	10.0	5.537	44.63%

参考文献：

[1] 闻邦椿 . 机械设计手册 : 第 6 卷 [M]. 北京 : 机械工业出版社 ,2020.

[2] 张洪武 , 等 . 有限元分析与 CAE 技术基础 [M]. 北京 : 清华大学出版社 ,2004.

[3] 陈黎明 , 陈国明 , 孙友义 , 等 . 深水钻井隔水管避台撤离动力和长度优化 [J]. 海洋工程 ,2012.

[4] 王进全 , 王定亚 . 国外海洋钻井隔水管与国产化研究建议 [J]. 石油机械 ,2009.

作者简介：

胡林，男，汉族，重庆人，研究生，力学专业，中级工程师，重庆前卫科技集团有限公司。

（上接第 158 页）

④进膜管道前端最高处安装高压自动进排气阀，防止高压气体对膜表面形成水锤造成破坏；

⑤出膜浓水管道最高处安装高压自动进排气阀，防止膜内气囊通过等压式能量回收装置形成闭环循环，启停高压泵形成水锤造成膜表面破损、中心管破裂以及汽蚀增压泵；

⑥在产水管道侧单向阀前最高处安装自动进排气阀，防止反渗透系统停机时形成真空，自动协调反渗透设备内外压力，消除反渗透膜浓差极化现象，减少反渗透膜表面结垢条件。

表 1　不同工艺以及排气阀安装位置对反渗透膜的影响

序号	能量回收装置	排气阀安装	RO 进水工况	膜运行年长	脱盐率 %
1	涡轮式	安装不规范	少量气囊	2	98.0
2	等压式	安装不规范	大量气囊	2	97.0
3	等压式	安装规范	无气囊	5	98.7

通过永兴岛海水淡化厂运行了 5 年的 3 套 500T/D 膜法海淡设备研究发现，排气阀安装位置对反渗透膜稳定运行起着重要作用。表 1 为永兴岛 3 套海水淡化设备生产工艺及其脱盐率。

5 结论

在反渗透系统中，排气阀成本微不足道，却是整个反渗透系统安全运行必不可少的装置。工程实践证明，不装或者排气阀安装不合理，都可能造成爆管、反渗透膜表面破损、中心管爆裂，造成一定程度的经济损失。为避免设备因汽蚀、水锤导致损坏，排气阀的合理安装决定着反渗透系统后期运行的成本，所以在反渗透系统的设计与施工过程中应引起足够重视，在考虑反渗透系统的中不同设备运行情况以及管道流体高压力的特殊性，合理安装，以达到预期设计的效果，让反渗透系统充分发挥高效节能的效益。

参考文献：

[1] 翁晓丹 , 张希建 , 张建中 , 何钦雅 , 余浩 , 陈亮 , 陶如钧 . 我国反渗透海水淡化能量回收装置研究与应用现状 [J]. 中国给水排水 ,2021,37(04):11-15.

[2] 靳卫华 , 李志鹏 , 秦武 , 吴兴 , 姚睿 . 排气阀的结构特点与应用研究 [J]. 给水排水 ,2008(07):112-115.