

优化 ESPA4
的性能

2013 年 10 月

美国海德能公司

www.membranes.com



前言

自从第一个醋酸纤维素（CAB）膜在1960年代开发出来之后，膜材料的不断发展提高了其性能，使反渗透膜技术在市政和工业水中成为了广泛应用的一种工艺。

美国海德能公司从1989年起采用聚酰胺做为膜材料（CPA膜）。CPA膜，虽然抗氧化能力差，但与之前的膜材料相比，脱盐率提高的同时，压力能明显降低。

美国海德能于1995年开发出节能超低压ESPA膜。ESPA的压力可以降低60%，脱盐率比CPA膜差距不大。适合那些不需要太高脱盐率、更注重节能效果的应用。

膜材料的发展带来第四代的反渗透膜ESPA4。此膜元件比ESPA系列其它产品压力更低，脱盐率也还是比较高。虽然ESPA4可以大幅节省运行成本，但需要注意一些设计考虑，以便发挥其优势。

ESPA4膜特点

膜元件的发展主要用两个参数来评估：脱盐率和渗透性能。膜的脱盐率表示其在透过水的情况下截留盐的能力。脱盐率可以用以下公式来计算：

$$\text{脱盐率Rej (\%)} = 100 \times (1 - \text{产水浓度 } C_p / \text{平均进水浓度 } C_{\text{avg}}) \quad (1)$$

膜渗透性能或比水通量（ K_a ）是由净驱动压（NDP）和平均产水通量（ J_p ）来定义的功能。渗透性能是与膜本身相关的，由下面的公式来计算：

$$K_a = J_p / \text{NDP} \quad (2)$$

$$\text{NDP} = P_f - dP/2 - P_p - \Delta\pi \quad (3)$$

其中：

P_f : 进水压力

dP : 过膜的平均压力损失

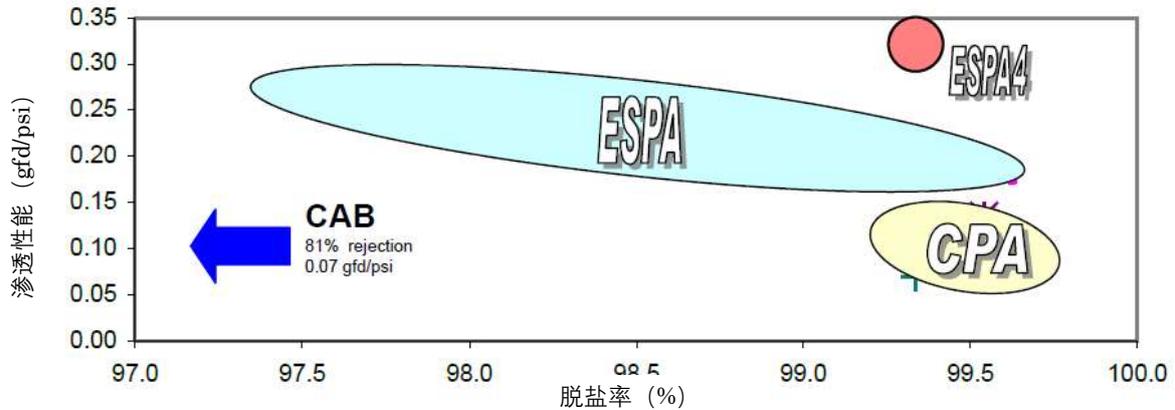
P_p : 产水背压

$\Delta\pi$: 浓水和产水的平均渗透压之差

采用脱盐率和渗透性能两个参数来表征膜，从CAB膜到第四代的节能超低压膜ESPA4的发展，见图1。

图1说明，ESPA4在单位净驱动压下，可以比其它膜透过更多的水量。从另一角度说，在生产相同水量时，其所需要的净驱动压力比最低，这对看重节能效果的系统是非常有吸引力的。

膜性能对比 (100psi, 回收率15%, 温度℃, pH=7)



ESPA4系统特点

大家都知道RO膜元件的改进不会直接变成RO系统的改进。采用渗透性能更好的ESPA4膜，对于系统的性能影响需要做评估。

从公式2和3可以看出，系统如果使用渗透性能低一些的膜（例如CPA），需要更高的NDP，意味着进水压力（ P_f ）也会更高-远高于浓水渗透压（ π ），因此对系统性能影响很小。但是如果膜的渗透性能高，所需进水压力降低，渗透压对系统的影响会增高，直至完全主导系统性能，而渗透性能不再是一个影响因素（1）。我们通过模拟一个两段系统来说明这种情况，运行条件见表1。

系统运行条件	
排列	12: 7
膜元件数量/压力容器	7
水通量	13.5 gfd
TDS	1500 ppm
温度	25℃
回收率	85%

表1 模拟系统的运行条件

图2比较了分别采用CPA和ESPA的两级系统，NDP的沿程变化情况。水力损失和渗透压提高的共同作用，使NDP快速下降，前端膜元件比后端膜元件的通量大很多。虽然CPA系统的NDP损失75%，比ESPA系统的71%大一些，但差值相对来说不是很大。

当同样系统采用ESPA4膜元件时，会有明显不同。如图3所示，进水压力很低、NDP下降很快，后端膜元件已没有NDP，也就不会产水。

净驱动压 (NDP)

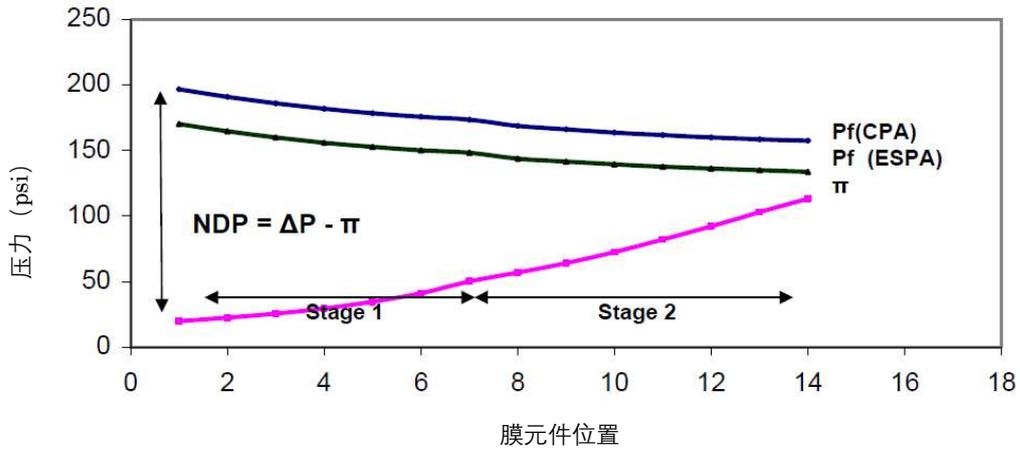


图2 采用CPA和ESPA膜的两段系统沿程NDP

净驱动压 (NDP)

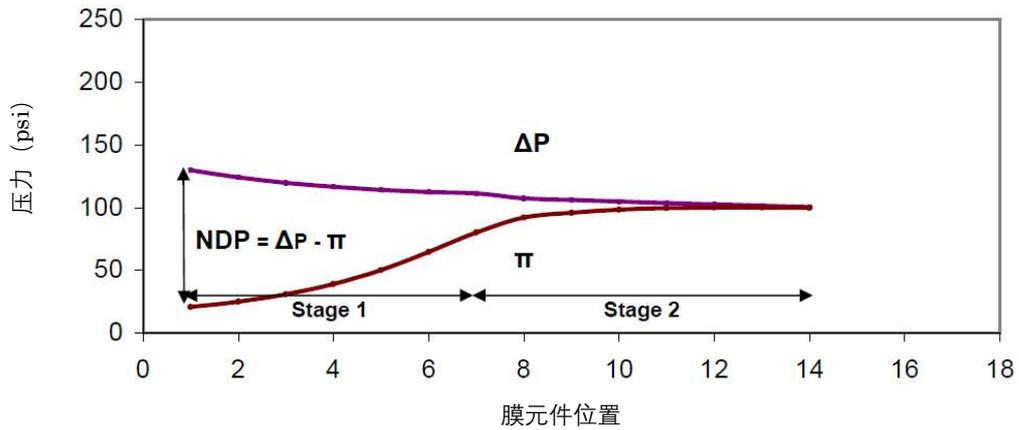


图3 采用ESPA4膜的两段系统沿程NDP

为更好地说明NDP损失对于系统性能的影响，考虑NDP和产水通量的直接关系，公式2可以转成：

$$J_p = K_a \times NDP \quad (4)$$

图4可见ESPA4系统14支膜位置的水通量变化值，因为NDP的迅速下降，前9支膜产水了95%的水量，尾端膜几乎没作用。采用CPA和ESPA的系统同样在图里做出比较，在此模拟系统中，采用其它ESPA膜与CPA膜相比，与ESPA4的表现情况截然不同。

运行条件：系统平均水通量13.5 gfd, TDS 1500ppm, 25℃,回收率85%

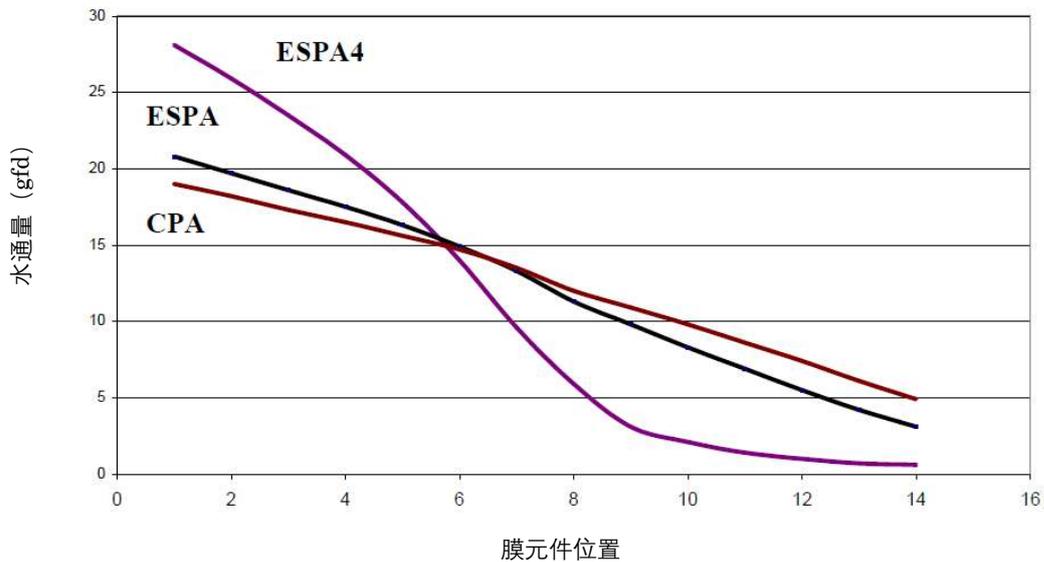


图4 采用三种膜的两段系统沿程水通量

ESPA4系统设计改进

上述无效率系统不是ESPA4膜元件仅有的新现象。对于高温和高盐的进水，ESPA系统的尾端膜也不会得到充分利用。

自从推出ESPA系列以来，我们提出了一些系统改进建议，以便提高采用高渗透性能膜元件时系统的效率。这包括产水背压、段间增压和混装膜设计，这些也可用来提高ESPA4的系统效率。

如图5a所示，第一段产水侧可以安装一个阀门。这个阀门不全开，会提高产水管路的压力。根据公式3，提高产水背压将降低NDP，降低第一段膜元件的水通量。为补偿第一段的水量，系统进水压力需提高，以便形成足够的NDP和提高第二段产水量。但是，进水压力的提高削弱了采用ESPA4膜节省能耗的收益。

为平衡水通量且节省能耗，第二种方式是在最后一段前放一个增压泵（见图5b）。增压泵避免了进水压力的提高，两段的进水压力也会更平均。

混装膜可以带来有类似的效果。渗透性能低一些的ESPA或CPA膜放在第一段，ESPA4放在第二段中。ESPA2仅装在第二段比两段全部安装ESPA4的系统进水压力会高，但是渗透性能略低的膜装在第一段的优势是其脱盐率会高一些。混装膜系统不仅解决了水通量分布问题，也会带来更好的产水水质。

图6是三种改进设计后水通量分布的结果对比。增压50psi和产水背压50psi的水通量分布曲线是完全重合的。一段膜采用ESPA、二段膜采用ESPA4的混装膜设计，是水通量分布最好的一种方式。采用其中任一方式，都会带来水通量分布更有效的系统，但是ESPA4的节能优势没有完全利用到。

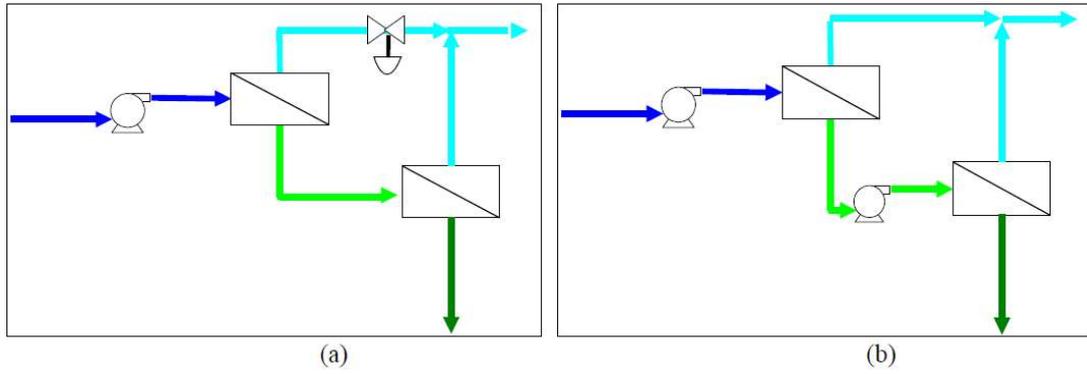


图5 两段系统设计(a)第一段产水背压(b)最后一段前加增压泵

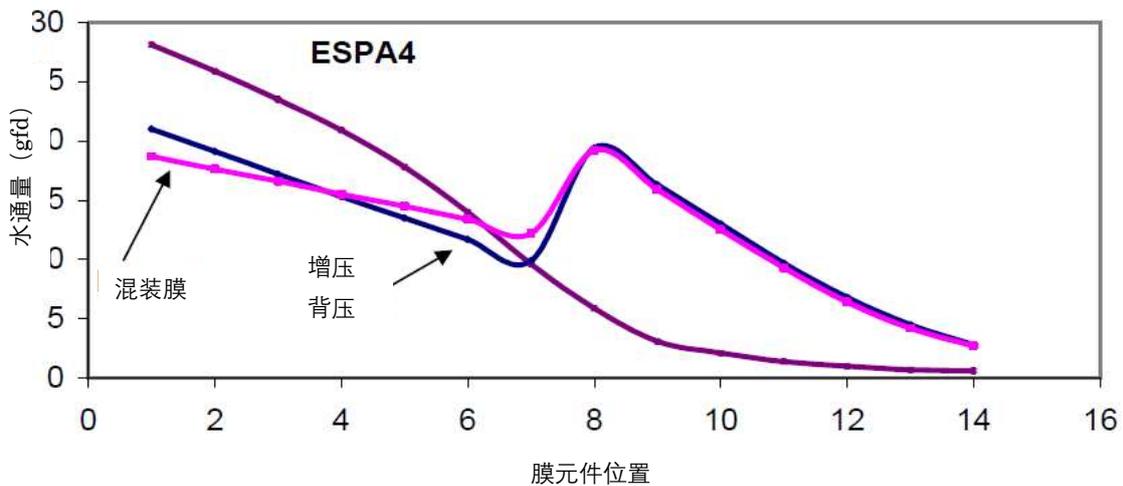


图6 改进设计为水通量分布带来的效果

为了使水通量分布更有效而做的改动，设计人员应考虑这种改动带来的能耗增加。比能耗（SPC）可以用来比较3年设计改进与标准系统。SPC与进水压力（Pf）、系统回收率（R）、电机和泵效率（Em、Ep）相关，用C做为一个转换因子，SPC可以用下述公式表示：

$$SPC = C \times Pf / (R \times Ep \times Em) \quad (5)$$

SPC以kwhr/kgal表示。加增压泵设计时，把增压泵的能耗加入到了进水泵中。表2中可以看出，增压泵设计是节能明显的。然而，第二个泵会增加投资成本，可以采用产水背压和混装膜两种方式。

膜元件	改进设计	Kwhr/kgal
ESPA	无	1.84
ESPA4	与ESPA混装	1.68
ESPA4	背压50psi	1.65
ESPA4	无	1.41
ESPA4	增压50psi	1.32

表2 不同RO系统比能耗（运行条件：系统平均水通量13.5 gfd, TDS 1500ppm, 25℃, 回收率85%）

ESPA4应用

ESPA4在不同的现场和运行条件下做了一些测试。一个研究是采用ESPA4膜处理Colorado河水用于饮用。预处理采用微滤，然后两段排列的RO系统：(2:1)*6。系统需要76psi进水压力，产水量为12.5gpm。进水TDS 500ppm，产水11ppm，系统脱盐率为991.%(见表3)。

参数	单位	ESPA4
进水温度	°C	13.3
进水压力	psi	76
进水TDS	ppm	500
产水TDS	ppm	11
产水通量	gfd	11.8
回收率	%	71.8

表3 ESPA4处理Colorado河水试验

在德国处理软化自来水用于实验室的试验，采用ESPA膜与ESPA4膜做了对比。系统包括两个压力容器，每支装入4支4”膜元件。通过采用浓水循环达到75%回收率。对比结果请见表4，ESPA4的产水结果与ESPA相当，但压力低22%。

参数	单位	ESPA	ESPA4
进水温度	°C	10.2	9.5
进水压力	psi	111	87
进水电导	μs/cm	330	325
产水电导	μs/cm	4.83	4.79
系统脱盐率	%	99.5	99.5
产水通量	gfd	12.7	12.7
回收率	%	77.3	77.3

表4 ESPA4和其它ESPA膜对比数据

在佛罗里达的一个饮用水厂中，原先采用CPA膜处理井水。8年成功运行之后，需要提高产水量和降低能耗。CPA膜被换成ESPA4膜。因增压泵的设计超出的升级的要求，因此采用背压方式来平衡水通量。因之前产水管中无背压设计，因此在产水管线上安装了阀门。图6-7比较了之前采用CPA运行和ESPA4投运初期的运行数据。

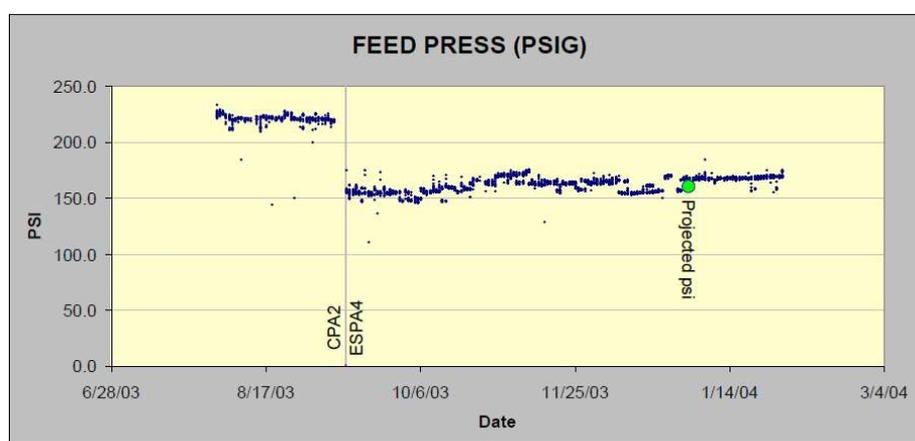


图6 采用ESPA4替换CPA2，进水压力下降

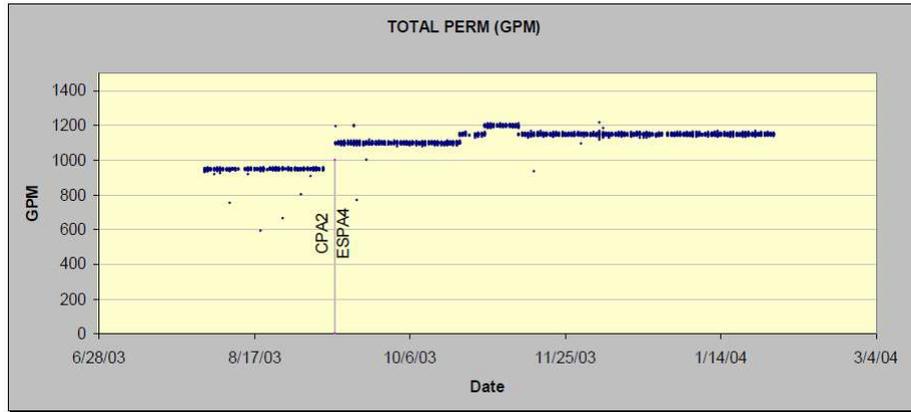


图7 采用ESPA4替换CPA2，产水量提高

讨论

随着ESPA4渗透性能的提高，渗透压对于系统性能的影响也提高。因此，当采用ESPA4设计时，需要考虑进水TDS、设计灵活性、能耗要求和产水目标。

如果系统采用常规的回收率，那么采用ESPA4首先受制于进水TDS。在进水TDS \leq 1000mg/L，ESPA4不需要采用上述改进设计方式。另外，ESPA4膜相比低渗透能力的其它膜型号，透盐率与TDS相关性更大。低盐时脱盐率会提高，但含盐量升高时，脱盐率下降更快。从图8可以看出，当进水TDS低于2000mg/L以下时，脱盐率会大幅上升。具体离子的透过率也会受到进水总含盐量、离子电荷和大小的影响。当进水TDS较低，但要处理某些污染物时，例如砷或软化，可以使用ESPA4。ESPA4也适用地其它领域例如商业/家用供水、洗衣、洗车等。

进水浓度对脱盐率的影响（测试条件：单支膜元件，25℃，15gfd，pH=7，回收率13%）

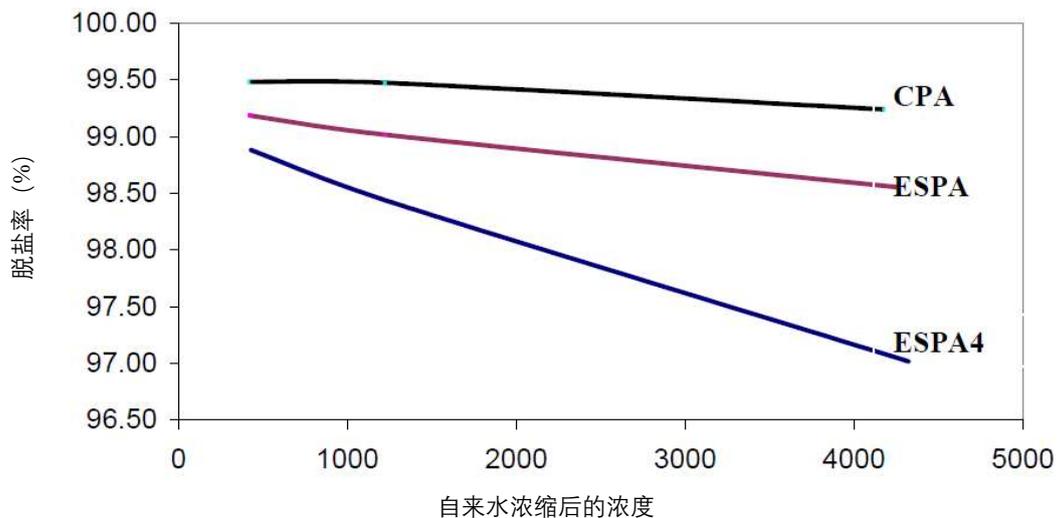


图8 进水浓度对脱盐率的影响

进水浓度对离子透过率的影响

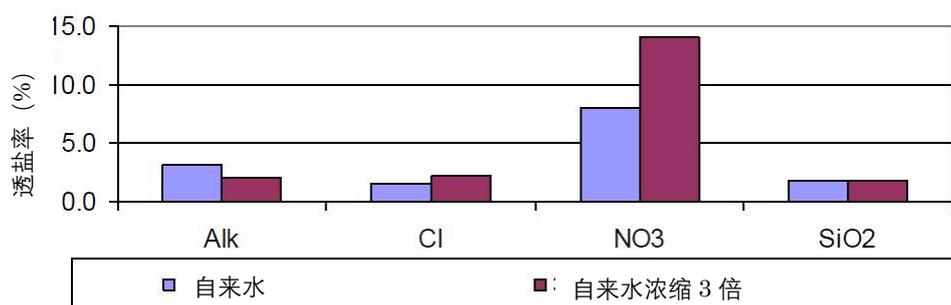


图9 进水浓度对离子透过率的影响

当设计两级系统时，第一级产水含盐量很低，且第二级的水通量一般设计比较高，ESPA4成为很好的选择。然而，第二级回收率会设计更高，这样带来渗透压的快速提高，可能需要采用混装膜的设计。

当进水TDS在2000-10000mg/L时，需要考虑前面提到的三种设计改进。背压的设计因削弱了ESPA4节能的效果，应该是其中最后选择的办法。以比能耗来计，混装膜与背压设计相当，产水水质会更好。当系统不想增加新设备时，混装膜是改造的好方法。

对于要处理较高TDS进水的新建系统，如果要能耗更低，增压泵是更好的方法。这种设计可能会增加投资成本，系统构造也更复杂，但ESPA4的节能优势发挥出来，能更节省系统的运行成本。

结论

ESPA4膜可以明显降低能耗，提高反渗透系统做为水处理工艺的竞争力。因ESPA4的渗透性能高，可以会造成系统前端水量过大、而尾端膜不出水的运行。系统设计需要考虑几个因素，优化并尽力发挥其节能特点。对于具体的项目，在满足要求的前提下做出合理的设计，可以为客户节省10-35%的能耗。ESPA4的设计导则如下：

- 进水TDS<1000mg/L
- 使用点市场
- 两级系统的第二级
- 当TDS在1000-2000mg/L时，新系统可采用增压泵，改造系统可混装膜

ESPA4膜元件带来膜未来发展的新问题。回顾本文的图1，超越ESPA4的开发意味着提高渗透性能或提高脱盐率。但是从ESPA4的设计改进可以看出，渗透性能已达到天花板，压力不受膜限制而是受到了渗透压的限制。未来的性能提高应是混合离子的脱盐率的提高。

参考文献

¹ L. Song, J.Y. Hu, S.L. Ong, W.J. Ng, M. Elimelech, M. Wilf, Performance limitation of the full-scale reverse osmosis process, Journal of Membrane Science 214 (2003) 239-244.

² M. Wilf, Design consequences of recent improvements in membrane performance, Desalination 113 (1997) 239-244.

3 J. Nemeth, Innovative system designs to optimize performance of ultra-low pressure reverse osmosis membranes, Desalination 118 (1998) 63-71.

4 M. Wilf, Effect of new generation of low pressure, high salt rejection membranes on power consumption of RO systems, American Water Works Association Membrane Technology Conference, New Orleans, LA, 1997

(此文件出自 2003 年 10 月 19-23 在美国举办的第 64 届国际水大会上的论文 (IWC-03-29))