

第一章 美国海德能公司反渗透和纳滤膜元件的特点及优势

1.1 美国海德能公司反渗透和纳滤膜元件发展史

40多年来，美国海德能公司通过毫不间断的技术研发，不断推出新产品、完善产品系列，为不同需求的客户提供不同性能的产品。

- 1963年美国海德能公司在美国加利福尼亚州Oceanside市成立；
- 1970年开始致力于反渗透膜元件的研发；
- 1989年推出芳香聚酰胺复合膜CPA系列的第一支膜元件CPA2，实现了产水量和脱盐率的完美结合，并成为苦咸水淡化反渗透膜元件的制造标准；
- 1995年在世界范围率先推出超低压高水通量反渗透复合膜ESPA®系列。第一代ESPA1膜元件以其优异的性能，迅速在全球普及。目前美国海德能公司的ESPA®系列反渗透膜元件在世界同类产品中已经占据了绝对的主导地位；
- 1996年推出的ESNA®系列节能型纳滤膜元件，可以在极低的压力下工作并脱除水中的硬度、铁、色度及三卤甲烷（THM）等有害物质；
- 2003年，抗污染的电中性技术被成功应用到ESNA®系列纳滤膜元件上，ESNA1-LF系列抗污染纳滤膜元件应运而生；
- 2003 – 2004年，美国海德能公司在海水淡化膜SWC®系列中添加了SWC3+、SWC4+、SWC5三种新的海水淡化膜元件，分别适用于不同的应用范围；
- 2004年，电中性抗污染LFC®系列迎来了新的成员LFC3-LD。
- 2006年3月美国海德能公司推出了增强型PROC™系列反渗透膜元件家族的第一款抗污染反渗透膜元件PROC10。该款膜元件具备世界上最高脱盐率（达到99.75 %），同时增加了端板排气结构并采用了新型34 mil（毫英寸）的低压降进水隔网，这些专利技术的结合使该膜元件的耐污染以及易清洗性发挥得淋漓尽致。
- 2009年4月，推出世界首支节能型抗污染反渗透膜元件PROC20。该膜除了具有34mil宽通道、端板排气构造和强化学清洗稳定性等PROC™系列的共同特性之外，通过结合美国海德能公司独特的第三代平膜技术，可降低反渗透系统能耗高达30%。
- 2010年，膜面积为440ft²的膜元件命名为MAX，加在膜型号后面。例如：ESPA2+更名为 ESPA2 MAX。膜卷制技术的提高使海水淡化膜元件也可做成MAX膜，如SWC5 MAX等。

- 2016年推出PROC30和ESPA2-LD MAX膜元件，引领反渗透技术突破到新高度。PROC30实现产水量最大、脱盐率最高；ESPA2-LD MAX采用创新膜片制备技术，采用34mil隔网实现440ft²膜面积。
- 2016年Hydranautics品牌部分RO膜元件分别获得进口或国产涉及饮用水卫生安全产品卫生许可批件。
- 2016年美国海德能公司在中国成功注册海德能品牌。

1.2 美国海德能公司反渗透膜和纳滤膜元件的特点

1.2.1 领先的膜片制备技术

随着30余年来膜片技术的不断发展，美国海德能公司至今已有三代同时期领先于其它膜制造商的膜片制备技术，见图1.1。第一代膜片技术由于压力高、产水量低等性能的局限性几乎已退出高分子反渗透膜和纳滤膜市场。第二代和第三代膜片是对膜分离皮层表面微观形态进行控制的技术。分离皮层表面皱褶的增大，可提高有效分离皮层的比表面积，使单位有效膜面积下的微观表面积增大，在同等操作压力下提高产水量。实际使用时，制备相同产水量所需的操作压力下降，降低运行成本，达到节能的效果。美国海德能公司的节能型超低压大通量ESPA膜自1995年推出以来，已发展为美国海德能公司主要产品系列之一，技术优势至少领先其它膜制造商3-10年。

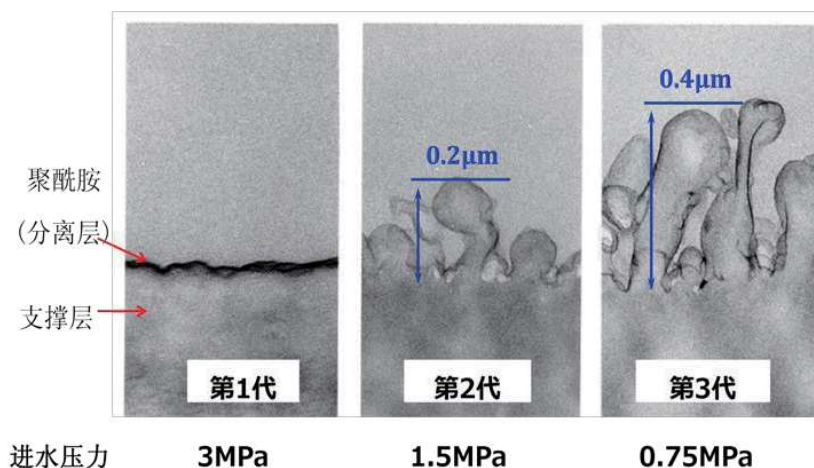


图 1.1 三代膜片断面透射电镜图像

由于分离皮层表面积的增加，污染物仅堆积在分离皮层皱褶顶部表面。图1.2表明一个膜表面污染严重的膜元件，在电镜照片下能看清楚看出底部部位没有污染物。平膜表面与污染物间缝隙的存在能减缓膜因受到污染所导致的产水量下降；并且易于通过冲洗和化学浸泡使污染物从膜表面剥离，提高清洗恢复效果。



图 1.2 膜表面污染物堆积图

ESPA2膜正是因为这种膜表面污染特征和清洗恢复性好的特点，在美国和新加坡的几个大型市政污水回用项目的现场试验中表现出了优于其它公司抗污染膜的性能，至今每天在世界各地处理500 000 m³以上的市政污水回用。

美国海德能公司利用先进高分子合成控制技术，提高交联度，从而提高脱盐率，见图1.3。例如：美国海德能公司在2006年推出的PROC10膜元件，采用独特配方，提高平膜分离层致密度，达到高脱盐率和高稳定性的有机结合。在2016年，通过创新技术研发和生产工艺的精准控制，美国海德能公司推出产水量和脱盐率同时达到最高值的PROC30，诠释出低压等级膜元件的尖端技术。



图 1.3 交联结构示意图

2016年，为实现单支膜元件更大膜面积，美国海德能公司的研发人员成功开发了新的三层膜片结构，见图1.4。表面的聚酰胺分离层结构没有改变，但UF支撑层比传统膜片的支撑层做得更薄一些，支撑强度没有受到任何影响。通过这个独有创新技术，我们开发出膜面积510ft²的ESPA2 ULTRA，是目前膜面积最大的8英寸膜元件。

膜片在制造过程中采用表面检查装置进行监控，如果发现有缺陷，该处膜片不会用于膜元

件的卷制。因此，膜元件上没有被修补的膜片。而且美国海德能公司对每支膜元件产品进行性能检测，合格后才出厂。

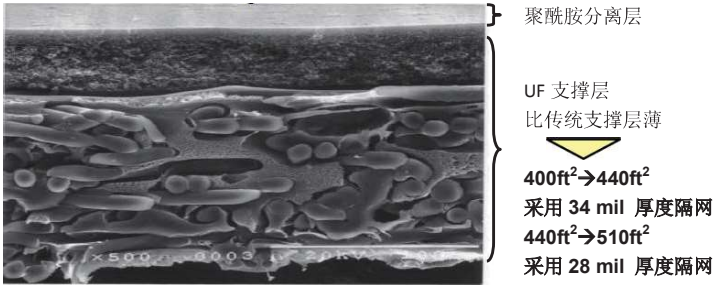


图 1.4 创新膜片结构实现大膜面积

1.2.2精湛的膜元件卷制技术

膜元件的卷制技术一直在不断提高和优化，最早期的卷制技术只能做到采用28mil隔网卷出365ft²的膜元件（见图1.5）。2009年位于日本滋贺的反渗透膜制造基地扩建投产，全新优化设计的全自动化生产线可以精确地控制膜元件卷制过程中的每一道工艺。全自动化控制能使外型尺寸固定的膜元件得到最大的有效膜面积。因此，美国海德能公司不仅在超低压膜中有大膜面积440ft²（40.9m²）的ESPA2 MAX，2009年还率先在海水淡化膜的全系列推出了MAX膜，即有效膜面积为440ft²（40.9m²）的海水淡化膜。2016年，通过采用创新膜片技术并结合精湛的全自动化卷制技术，美国海德能推出两款独特节能大膜面积大流量膜元件：ESPA2-LD MAX拥有宽流道且440 ft²的大膜面积；而ESPA2-ULTRA是膜面积达到510 ft²，产水量高达1 3900gpd。

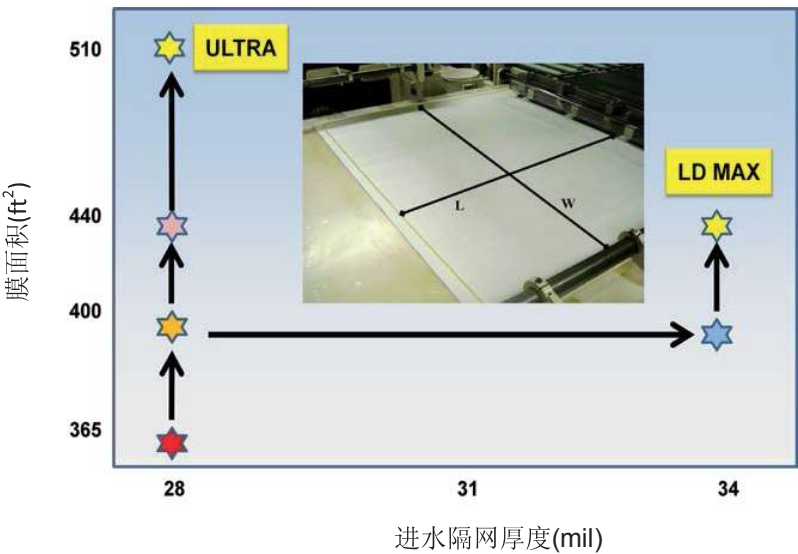


图 1.5 膜元件优化发展

1.2.3 LD技术

进水隔网是反渗透膜元件结构中重要的组成部分。一般来说，进水隔网厚度经纬线的交叉角度和网格的大小、经纬线的横断面形状等特点影响到反渗透膜元件的性能。美国海德能公司2006年开发的34mil进水隔网，优化后的经纬线交叉角度及横断面形状，降低了膜元件压降，减少了污堵。LD技术主要特点：

- 特殊形状34mil隔网，降低阻力，减少胶体、颗粒物污堵。
- 结构设计降低系统压降，易清洗，产水通量分布均衡。

图1.6显示传统隔网和LD两种膜元件8个月的运行数据。采用传统隔网技术的膜元件在半年时间内进行了6次清洗；但采用LD技术的膜元件8个月之后一段压差仍保持在0.1MPa，表明膜元件没有受到明显污染，说明LD技术可明显延长清洗周期。

综上所述，LD技术可以确保系统运行更稳定，清洗周期延长和易清洗性能降低系统清洗费用，低压降减少能耗，从而降低系统总制水成本。

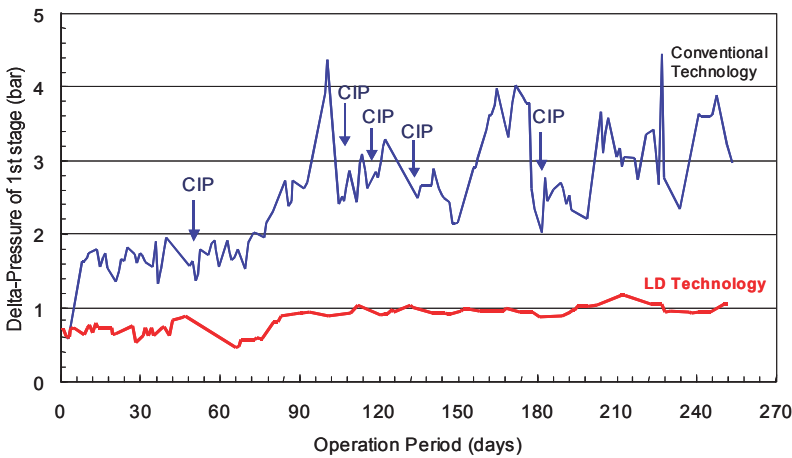


图 1.6 采用 LD 技术膜元件与传统膜元件对比运行数据

1.2.4 独特的抗污染技术

1997年美国海德能公司在世界范围率先推出抗污染反渗透膜元件。由于美国海德能公司的抗污染反渗透膜元件LFC®系列在世界市场上取得了巨大成功，并在新加坡Newater等大型项目中得到应用，世界各主要反渗透膜元件供应商也开始相继推出各类抗污染膜元件。目前反渗透和纳滤膜的抗污染技术，存在两种不同的理论：

- 膜表面电中性、亲水性；
- 膜表面光滑、宽进水隔网、耐/易清洗。

美国海德能公司的抗污染纳滤（ESNA1-LF1/LF2）、反渗透膜元件（LFC3-LD）采用的是电中性和亲水性耐污染理论，通过改变了膜表面的荷电性和亲水性（水与膜接触界面的接触角从 62° 降低到 47° ），使得阳离子型和两性污染物不易与膜发生吸附，因此不会导致产水量和脱盐率下降，或者即使下降了，也可以通过清洗来恢复。美国海德能公司利用其精湛的高分子合成技术，甚至制造出世界上唯一的膜表面荷正电的反渗透膜元件（LFC2）。图1.7为美国海德能公司抗污染膜元件LFC®系列的膜表面改性示意图。图1.8比较了美国海德能公司不同型号反渗透膜元件及其他公司抗污染反渗透产品的膜表面荷电性示意图。

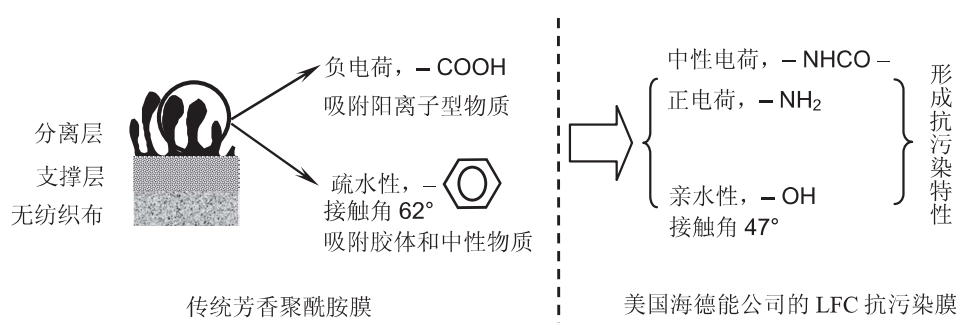


图 1.7 膜表面改性示意图

为了不断适应客户对抗污染反渗透膜元件的要求，适应不同给水水质的需要，同时也为了完善抗污染产品的系列，美国海德能公司于2006年推出了增强型反渗透膜元件PROC™系列。该系列膜元件采用宽进水隔网，有效降低胶体污堵，提高清洗恢复性。PROC10做为该系列的第一款产品，具备了更宽的进水隔网、更低的压力损失以及更致密的芳香聚酰胺分离皮层，这些特点均使PRCO10拥有高脱盐、低压降、少污堵、易清洗、长寿命等优势。PROC10的推出伴随着多个发明专利，无一不是美国海德能公司研发人员智慧的结晶，该款膜元件的特点涉及平膜制备以及膜元件卷制技术的革新，详细的技术说明，请参见第一部分第二章2.2.1。

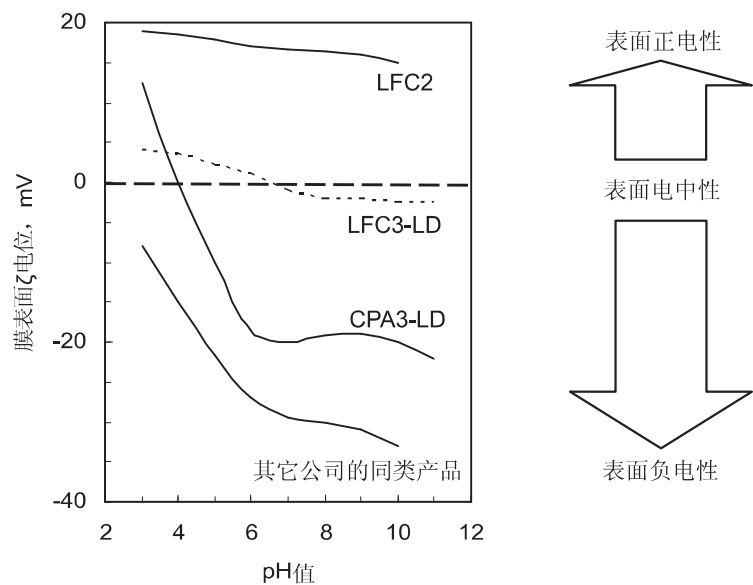


图 1.8 各类反渗透膜元件的表面电荷

两类不同的抗污染膜元件使用户有了更广泛的选择空间，可以选择最恰当的膜元件满足生产的需要。表1.2对比了美国海德能公司两类抗污染膜的性能，并给出了选择的指导性建议。

表 1.2 美国海德能公司两类抗污染反渗透膜元件的特点以及适用范围

参数	LFC3-LD	PROC10
膜面积, ft ²	400	400
公称脱盐率, %	99.7	99.75
最低脱盐率, %	99.6	99.6
产水量, GPD	11 000	10 500
进水隔网厚度, mil	34	34
膜表面电性	电中性	负电性
耐污染特点	抑制有机物在膜表面的吸附	降低胶体、微生物的污堵
适用范围	含有两性的、阳离子型的表面活性剂或类似的化学物质的工业废水或其他水源；污染物需要采用阳离子型表面活性剂清洗时。	受到一般有机物污染的天然水体，比如污染严重的地表水或地下水；不含阳离子型物质的工业废水和市政污水。

1.2.5 膜元件端板快速排气专利技术

美国海德能公司目前已在全部8英寸膜元件上采用了端板快速排气专利技术。膜元件机械性能的损坏，主要是在系统启动时，膜元件内过大的水流流入，导致压力急速地上升，膜元件与膜壳之间的空气很难排放出去，膜元件内部和膜元件与膜壳间会产生压差，造成膜元件的膨胀，最终导致膜元件的破损。因此，2006年PROC™率先采用了美国海德能公司的新

发明专利，即新型可快速排气的ATD，如图1.9所示。该端板快速排气的工作原理见图1.10。新型可快速排气端板可以在系统启机时，可快速进行膜壳内和膜元件之间的气水交换，防止膜元件内、外部压差过大，有效缓解系统启动时对膜元件的冲击，避免膜元件FRP破损。

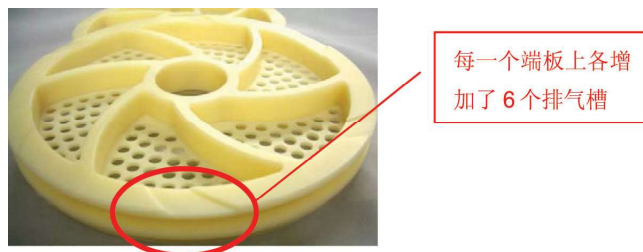


图 1.9 新型可快速排气端板（ATD）

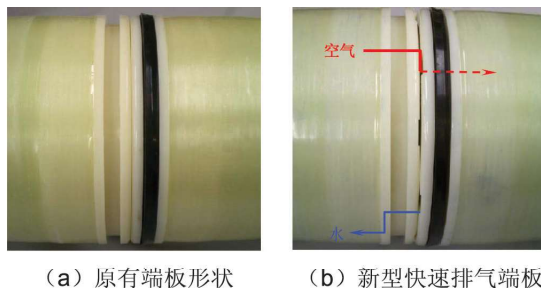


图 1.10 新型可快速排气端板和原有端板的比较

端板快速排气专利技术（图1.9、1.10）由我公司自主研发，已经在以下国家取得如下专利：

（我司持有专利权）

日本专利：第4222279号

日本专利：第4237818号

美国专利：7,172,697

美国专利：7,198,719

中国专利：100,553,750

韩国专利：10-0789032

韩国专利：10-0789041

可快速排气端板仍然具有切流式端板的优异性能：

- 更好的端面接触，使水力负荷分布得更加均匀；
- 保持了美国海德能公司原有端面多孔板的特点，可以保护膜元件免受因较大颗粒物撞击而造成的损坏；
- 切流式设计使得膜元件的进水从最内侧（中心管侧）到最外侧（玻璃钢侧）分布更加均匀、膜元件外部和中心管处所受压力更加平衡；

- 使得膜元件的每一个部位都在相似的环境下工作，最大限度地保证了膜元件性能的均衡及更长的使用寿命¹。

切流式端板可以很容易的由其象牙色和涡旋式结构辨认，而不同于以前多孔端板的灰色及直线式，见图1.11。



新型涡旋切流式端板



传统多孔直流式端板

图 1.11 新型切流式端板和传统端板的对比

为了配合切流式端板，美国海德能公司同时推出了新型内连接适配器²（PN. 11518.0000），它既适用于切流式膜元件，也适用于传统的多孔直流式膜元件。该新型内连接适配器具有更多优点：

- 在负载和操作过程中不会脱离；
- 采用每侧双层O型圈连接，最大限度的降低泄漏风险；
- 在不影响强度的前提下，适配器的两端设计使得产水侧的阻力更小，从而使整个系统更加节能；
- 当系统进行探针法检测时，探针可以很容易的在中心管内伸展，到达每一个希望测试的位置（探针检测法请参见第三部分第七章7.2.3）。

例如在一套100 m³/h的反渗透系统中，采用108支8英寸反渗透膜元件（第一段12支压力容器，第二段6支压力容器，每支压力容器装填6支膜元件）。在该系统内共有90个新型内连接适配器（PN. 11518.0000），存在180处产水侧管径变化，若采用传统适配器，由于管径骤变导致产水阻力升高，从而使得整个系统的能耗加大，但是当您采用美国海德能公司精心设计的新型内连接适配器时，由于9°倾角的存在，最大限度的减少了管径变化带来的能量损失，从而保证了系统的低能耗。另外，为了适应海水淡化用反渗透膜元件（SWC®系列）耐高压的需要，美国海德能公司同样开发了更耐压的海水淡化专用内连接适配器（PN. 11574.0000）。

¹ 指在满足其它要求的设计条件下，由于我们不能控制用户的使用条件，因此不能对实际使用年限做出规定。

² 该连接件以及海水淡化反渗透膜专用连接件（PN. 11574.0000）均包含在每一支膜元件的包装箱中，不需要另外购买。

1.2.6 特种浓缩分离专用膜元件的特点

浓缩分离是一个与水处理有所不同的分离领域。通常的水处理系统都是采用物理或/和化学的方法将水中的不纯物质或污染物质去除，因此水处理是一个净化的过程。而在浓缩分离中，被分离的载体不一定是水溶液，期望得到的成分也不一定是水。有时我们希望得到经过纯化，具有更高纯度的某些物质；有时我们甚至希望得到浓缩液，以获得更高浓度的产品。从实际应用的角度出发，浓缩分离通常包括：

- 乳制品的浓缩；
- 生物制剂和药物的分离、纯化及浓缩；
- 有价物质的回收；
- 食品、饮料及医药制品的浓缩分离；
- 工艺废水的脱色。

为了满足市场对浓缩分离的不同需求，美国海德能公司先后推出了QUALSEP™ DairyRO系列乳制品浓缩反渗透膜元件和HYDRACoRe™系列脱色纳滤膜元件。并已经取得了广泛的应用。

DairyRO可以浓缩乳制品中的蛋白和乳糖成分，并降低排水中的生化耗氧量（BOD₅）含量，不但得到了经过浓缩的乳制品，而且还可以利用系统的产出水，这些水源于乳品本身。因此QUALSEP™系列纳滤、反渗透膜元件的使用，不但提高了乳制品的品质，同时还减轻的企业的用水成本。

HYDRACoRe™系列脱色纳滤膜元件是美国海德能公司推出的脱色专用膜。最新型的膜元件是HYDRACoRe 70pHT，图1.12为HYDRACoRe 70pHT的外观图。

- 在80 °C时可以耐受pH = 13.5的碱溶液；
- 全部配件采用聚砜材料制作，使膜元件可以适应更广泛的应用条件；
- 膜元件的外壳采用了全填充形式（Full-Fit技术，请参见第一部分第二章2.2.7.2），不易积存污染物；
- 膜元件的进水隔网进行了改进，降低了膜元件的阻力；
- 采用了更耐高温和溶剂的粘接剂。



图 1.12 HYDRACoRe-70pHT 的外观

在实际应用中，HYDRACoRe 70pHT可以脱除废水中的色度，但保持含盐量（TDS）基本不变。因而使得运行的压力极低，在0.6 – 0.7 MPa的压力下就可以脱除80 %以上的色度。采用HYDRACoRe™的系统对TDS的脱除率很低，并不是因为它本身不具备脱盐的性能，而是由于它的脱盐率随着TDS的升高而迅速下降，所以虽然每一支在系统中运行的膜元件均具有脱盐率，但由于系统中的给水随着流经膜元件的增多不断被浓缩，而使得实际产品水中的TDS接近进水中的数值。HYDRACoRe 70pHT的使用实例请参见第四部分第十章10.9。

1.3 美国海德能公司膜元件在各应用领域中的主要应用业绩

自从1996年在北京设立代表机构以来，美国海德能公司已经伴随中国水处理行业走过了十多年的历程。在这十几年中，美国海德能公司与中国水处理市场共同成长，各型号产品在中国均取得了广泛的应用，并连续多年占据中国反渗透膜元件市场的最大份额。目前，国内外大多数大型反渗透系统均采用美国海德能公司膜产品。苦咸水反渗透膜元件、海水淡化膜元件以及纳滤膜元件均获得了中国最大规模的订单：

- 国内最大海水淡化项目—天津大港新泉海水淡化厂（100 000 m³/d）全部采用了美国海德能公司的SWC5海水淡化膜元件。
- 国内最大的地表水反渗透处理系统（48 000 m³/d）已经在广东东莞玖龙纸业投运，全部膜元件均采用美国海德能公司的CPA3。
- 国内最大的炼油废水纳滤膜处理回用系统，位于新疆维吾尔自治区的中石油克拉玛依炼油厂，全部采用美国海德能公司的纳滤膜元件ESNA1和ESNA1-LF1，该系统已经连续稳定运行近五年，充分说明了该纳滤膜元件的脱盐率的稳定性以及耐污染性。
- 国内最大的双水道饮用净水项目，2008年北京奥林匹克运动会主体育场（鸟巢）、奥运村以及其他配套场馆，均采用美国海德能公司的超低压反渗透膜元件ESPA2和节能型纳滤膜元件ESNA1-K1，每天可为参加奥运会的运动员和观众提供超过720m³的安全饮用水。

在全球范围，美国海德能公司同样在纳滤和反渗透市场占据了主导地位。目前，世界上多数大型反渗透系统均采用美国海德能公司的产品，尤其在海水淡化应用中SWC®系列膜元件在全球大型海水淡化项目中占有率第一。在北非的阿尔及利亚（Algeria），Skikda和Beni Saf的300 000 m³/d海水淡化产自于美国海德能公司的26 250支SWC5反渗透膜元件；在阿联酋（United Arab Emirates）的Fujairah，170 000 m³/d海水淡化系统全部采用了美国海德能公司的SWC3型反渗透膜元件；在全球范围内，美国海德能公司的SWC®系列海水淡化膜元件累计日产水量已超过4 300 000 m³/d。

在工业废水和市政污水回用领域，美国海德能公司的抗污染膜元件LFC®系列和PROC™系列以及超低压反渗透膜元件ESPA®系列同样得到了广泛的应用。在新加坡，市政污水回用项目采用抗污染反渗透膜元件LFC®系列的累积制水量已经超过230 000 m³/d。世界最大的污水处理系统之一，位于美国加利福尼亚州桔县（Orange County）的反渗透系统全部采用ESPA2超低压膜元件，总制水能力达276 000 m³/d；在新加坡最大的Newater工厂Ulu Pandan，9 100支ESPA2 MAX大面积超低压反渗透膜元件被选用。国外大型市政污水处理厂没有采用抗污染反渗透膜元件，而大量选择超低压反渗透膜元件ESPA2/ESPA2 MAX，主要原因是这些污水处理厂考虑运行成本。工作压力更低的超低压反渗透膜元件在运行时，比抗污染膜元件的运行压力低大约30 %，从而节约了成本。而低的制水成本使得水价降低，更有利于促进污水回用的发展。

在市政给水应用中，美国佛罗里达州Boca Raton日产152 000m³的纳滤系统全部采用ESNA1节能型纳滤膜元件。

从饮用纯净水处理、苦咸水淡化、电厂锅炉补给水处理，到工业废水、市政污水回用和海水淡化，美国海德能公司的各种型号的反渗透和纳滤膜元件均取得了广泛的应用业绩。

表 1.3 PROC™ 系列膜元件的主要业绩

用户	产水量, m ³ /d	膜元件型号
山东滨州魏桥创业集团	76 800	PROC10
中石化镇海炼化	33 600	PROC10
包头神华集团	91 200	PROC10
首钢迁安钢铁	24 000	PROC10
中海油天野化工	8 640	PROC20
华能沁北电厂	3 360	PROC20

表 1.4 CPA 系列膜元件的主要业绩

用户	产水量, m ³ /d	膜元件型号
山东滨州魏桥创业集团	50 000	CPA3
安徽马鞍山钢铁集团	27 360	CPA3-LD
河南新乡白鹭化纤厂	14 400	CPA3-LD
重庆钢铁公司	14 400	CPA3-LD

表 1.5 ESPA®系列膜元件的主要业绩

用户	产水量, m ³ /d	膜元件型号
Orange County, 美国	276 000	ESPA2
拷潭&翁公园净水厂, 台湾	150 200	ESPA4
Ulu Pandan, 新加坡	148 000	ESPA2 MAX
KIRIKKALE, 土耳其	90 000	ESPA4
BAFRA, 土耳其	40 000	ESPA4
武汉名幸电子	15 600	ESPA2 MAX
四川长虹集团	7 200	ESPA2 MAX
慈东自来水厂	7 200	ESPA2

表 1.6 SWC®系列膜元件的主要业绩

用户	产水量, m ³ /d	膜元件型号
Melbourne, 澳大利亚	440 000	SWC6 MAX
Skikda & Beni Saf, 阿尔及利亚	300 000	SWC5
Fujairah, 阿拉伯联合酋长国	170 000	SWC3/SWC4+
Gold Coast, 澳大利亚	133 000	SWC5
天津大港新泉海水淡化厂	100 000	SWC5
广东惠来电厂	35 500	SWC5
广东平海电厂	16 700	SWC5
浙江浙能乐清电厂	21 600	SWC5-LD
辽宁红沿河核电厂	3 960	SWC5

表 1.7 ESNA®和 HYDRACoRe 纳滤膜元件的主要业绩

用户	产水量, m ³ /d	膜元件型号
Boca Raton, 美国	155 000	ESNA1-LF2
Ft. Lauderdale, 美国	45 400	ESNA1-LF
Irvine Ranch, 美国	27 800	HYDRACoRe
山西晋煤集团	22 080	ESNA1-LF
拷潭&翁公园净水厂, 台湾	15 800	ESNA1-K1
中石油克拉玛依炼油厂	3 360	ESNA1-LF