

降低海水淡化的能耗

Busch, M., Mickols, W. E., Zeng, H.

1. 摘要

水是一种日益稀少的资源，在许多地区人们正转向新的水源，如海水和废水。近10年来，膜技术的各种进步带来反渗透成本显著地降低。这促使世界上许多大型的饮用水工程选择反渗透海水淡化（SWRO）技术。因为能耗是反渗透海水淡化系统成本中唯一最大的影响因素（通常占整个制水成本的20-30%），所以它成为降低成本的明确研发目标。因此膜技术的新发展不得不集中在降低能耗上。这就需要开发产水量高的膜元件以及与之相适应的设计方案，使之在更低压力下运行成为可能。本文旨在介绍用于海水淡化部分的新产品，其产水量更高（产水量在标准测试条件下为7500-9000gpd），并具有极高的脱盐率（99.70-99.75%）。本文阐述了这些产品的技术特征，并对可能的能耗以及其它成本的节省进行了计算。结果表明这些产品能够应用于所有的海水淡化系统，并且能将能耗降低到2.0kWh/m³淡水的水平或者将膜部分的投资成本降低30%以上。本文结尾部分提供的有关这些新产品的现场测试数据，进一步证实了所介绍的新产品的优良性能以及显著降低投资成本和运行成本的能力。

关键词：海水，制水成本，低能耗，投资和运行成本节省，高产水量，NaCl脱除率，硼

2. 海水淡化的发展

世界上许多地区的淡水资源有限，在过去20年里开始转向从海水制取淡水。反渗透方法成为苦咸水脱盐的选择之一。在过去15年里，从苦咸水中生产淡水所需要的压力已经几乎下降了10倍。这种巨大的成本下降刺激了反渗透苦咸水分离的迅速扩张。

历史上，海水脱盐的成本曾经比苦咸水脱盐的成本高4-5倍。在过去10年里，海水淡化的成本已经有了显著的降低。在20世纪80年代早期，马耳他岛上的海水淡化厂的运行回收率为30-33%（Andrews & Bergmann, 1987），其海水淡化成本为1.08美元/m³淡水。西班牙政府的一份研究估计在1987年一座5.3mgd的海水淡化厂的生产成本为0.9美元/m³淡水（Farinas 1996）。含盐量也在总成本中起了很大的作用。20世纪80年代后期，阿拉伯湾的更高含盐量的给水（42,000 mg/L）估计总成本为1.26美元/m³淡水（Leitner, 1989）。20世纪90年代后期，水的成本估计降低到了0.73-0.83美元/m³淡水（Wilf & Klinko, 2001）。最近的成本预算，比如Ashkelon工程，已经下降到了0.47-0.53美元/m³淡水（Redondo *et al.* 2003）。我们可以看到诸如BOOT（建造，拥有，运行，移交）概念的新型资金运作模式已经激发了技术的进步，并且导致制水成本下降。

海水淡化固有的能耗在基本的热力学上是众所周知的。举例来说，对于含

盐量为35,000

mg/L的海水在回收率为40%和产品水含盐量为300ppm的条件下，所需的最小能量为1.85 kJ/kg产品水(Cerci *et al.* 1999)，这相当于0.52 kWh/m³淡水。在过去5年里我们已经看到了更为先进的有关反渗透淡化系统效率的热力学分析。这些分析考虑采用热力学第二定律来估计浓度差的效率损失以及在不同的热力学状态下将一股进水水流转换为两股水流所引起的效率损失。采用同样的考虑方法可以评估一座反渗透海水淡化厂的效率损失。位于加利福尼亚的某苦咸水反渗透淡化厂(Cerci

2002)的焓(exergy)分析表明，最大成本(73%)，即能耗，主要来自跨膜压降(从给水侧到产品水侧)。第二大成本来自水泵的效率损失和使用节流阀控制水泵流量的效率损失。膜制造商和系统设计人员对跨膜压降的影响最大，并且对减少来自膜的成本，提高膜的产水量作出了关键性的贡献。

如图1所示，典型的螺旋卷式海水淡化反渗透元件最初(20世纪90年代早期)在标准海水条件下(见表1的脚注)的产水量为4000gpd，脱盐率为99.4% (例如FILMTECTM SW30HR-8040)。在这个时期，典型的海水淡化厂在70 bar的压力下运行，其典型的回收率大约为35-40%。通常RO给水设两段。为了达到饮用水水质(含盐量为500 mg/L的无硼水质标准)，也有部分系统需要设两级。

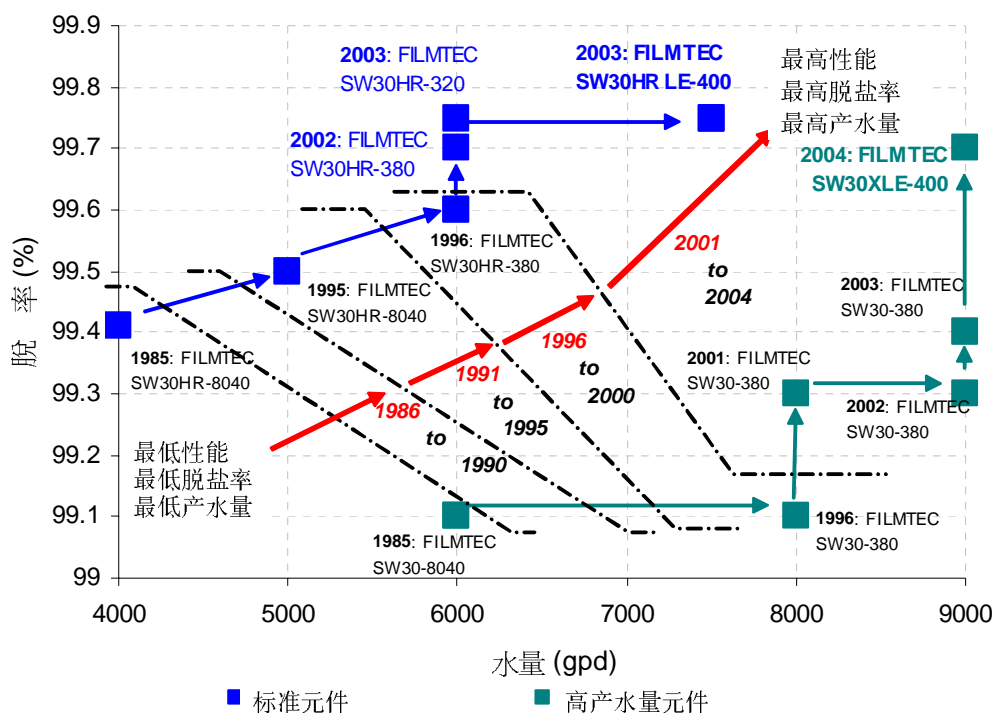


图1：8英寸海水膜元件的产水量和透盐率的历史变迁

20世纪90年代中期，陶氏化学首次向市场推出了产水量6000gpd，脱盐率99

.6%的膜元件(FILMTEC SW30HR-380)。自此, 6000gpd典型产水量的膜元件在20世纪90年代后期成为所有海水膜元件制造商遵循的工业标准。这可以降低运行压力或者增加回收率。在大多数情况下不再需要第二级反渗透。

我们可以通过改进海水淡化厂的设计以及提高反渗透工艺的效率来使上述成本降低的趋势得以延续。近期的技术进步表明, 开发出更高产水量和更高脱盐率的元件是可能的, 并能进一步降低成本。

这样一种可以降低能耗(或者增加产水量)的产品就是陶氏化学公司在2003年开发出的FILMTEC SW30HR LE-400(以前的型号为SW30HR LE-380, 请参照第三节), 其产水量为7500gpd, 脱盐率为99.75%。顺应采用更高产水量的膜元件来降低投资成本和运行成本的趋势, 陶氏化学FilmTec公司又开发了另一种产水量为9000gpd, 脱盐率为99.70%的产品, 并将在今年以型号FILMTEC SW30XLE-400向市场推出。这两种产品也包含在图1中, 并且我们可以看到, 8英寸海水淡化膜元件的产水量达到了一个前所未有的水平, 透盐率则大幅度地下降。

3. 新型低能耗反渗透膜元件的使用

开发这两种新型产水量更高的膜元件得益于下列变化和发展:

- 高脱盐率、低能耗的膜元件FILMTEC™ SW30HR LE-400得益于对SW30HR-380膜和元件构造的许多改进。在前几年里, 膜片制造工艺的多种提高和优化以及膜元件复合结构的增强(膜支撑材料和结构材料)使得大幅度增加产水量和脱盐率成为可能。膜元件结构的新发展也允许其有效面积增加到400ft², 而不会影响28 mil的进水流道宽度。这样就允许在恒定的膜通量下增加每支压力容器的产水量。

- 超低能耗膜元件FILMTEC SW30XLE-400得益于对与SW30HR LE-400同等结构的FT30膜化学材料的改性。产水量更高的膜在制造时并没有经过漂白或者其它氧化性工艺处理, 所以该膜元件表现出和我们所有的海水膜元件一样稳定的脱盐率。其耐长期清洗的稳定性也没有改变。

- 值得注意的是, 对FILMTEC SW30HR LE-400的改进也使我们能够提供流道(用34 mil代替标准的28 mil)更宽的膜元件, 更宽的流道在发生污堵情况下可获得更好的清洗效果和更低的压降。这种膜元件(SW30HR-320)的产水量达到了6000gpd, 与几年前的标准元件SW30HR-380的产水量完全相当。

两种采用ILEC™(Interlocking End Caps)连锁端头专利设计的高产水量的膜元件已经面市, 型号分别为FILMTEC SW30HR LE-400i 和SW30XLE-400i。这消除了内部连接器的不方便, 其实ILEC™的技术原理和益处已在其它地方得到证实(Johnson *et al.* 2003, Gorenflo *et al.* 2003)。上述膜元件在标准海水测试条件下的主要性能特征汇总于表1。

表1：新型海水淡化膜元件的性能特征

| 产品名称 | 有效膜面积 | 产水量 | NaCl脱除率 | 硼脱除率 | 最大压力 |
|--------------------------|---|-------------------------------------|------------------------|-------|---------------------|
| FILMTEC SW30HR LE-400 | 400 ft ² (35.3 m ²) | 7500gpd (28.4 m ³ /d) | 典型 99.75% 最小 99.60% | 91.0% | 1200psi (83 bar) |
| FILMTEC SW30XLE-400 | 400 ft ² (37.2 m ²) | 9000gpd (34.1 m ³ /d) | 典型99.70% 最小99.55% | 88.0% | 1200psi (83 bar) |
| FILMTEC SW30HR-320 | 320 ft ² (29.7 m ²) | 6000gpd (22.7 m ³ /d) | 典型99.75% 最小99.60% | 91.0% | 1200psi (83 bar) |

标准测试条件：给水NaCl 32,000 mg/L，回收率8%，25°C，55 bar，pH 8。

FILMTEC SW30HR-320和FILMTEC SW30HR LE-400可以使大多数海水淡化厂在运行条件维持不变的情况下，提高产水量20-25%。这种产水量的变化为许多海水淡化厂提供了升级性能的机会，即通过计划性的元件更换就可轻易地增加海水淡化厂的产量。当高压泵用变频驱动时，成本节省直接来源于能耗节省。在其它情况下，提高回收率或者增加产水量也可以作为节省成本的来源。产水量更高和脱盐率更高的双重优点使得这些膜元件可以在更低的压力下运行，同时维持或者提高产品水质量。

陶氏化学公司不但提高了膜元件的产水量，而且提高了膜元件的脱盐率。例如，产水量9000gpd，脱盐率99.70%的FILMTEC SW30XLE-400元件的产水量大幅度增加，它的产水量比自2002年以来的SW30HR-380提高了50%，并且具有同样稳定的脱盐率。仅仅在两年前，99.70%的高脱盐率还只有陶氏化学公司低产水量的膜元件能够达到。但是现在产水量更高的膜元件完全能够达到同过去一样高的脱盐率。

新型高产水量产品的潜在应用取决于现场条件（给水含盐量，温度），设计和运行条件（回收率，通量）以及产品水的质量要求。海水反渗透膜元件的脱盐性能将决定水源范围以及采用这些膜元件的设计。基于新的脱盐性能，产水量以前本来就高的膜元件如FILMTEC SW30HR LE-400和FILMTEC SW30XLE-400具有宽得令人惊讶的适用范围，在很多新系统和老系统（改造）中应该是可派上用场的。

产水量最高的海水膜元件FILMTEC SW30XLE-400对于从中等到低等的含盐量和温度范围将是最适合的，它也适用于对产品水质量要求不高的情况。在最高给水含盐量和最高温度设计中，它的适用范围很有限，而新型FILMTEC SW30HR LE-400膜元件适用于上述整个范围。也许展示SW30HRLE-400和SW30XLE-400广泛用途的最好方法是采用FILMTEC SW30XLE-400元件建一座标准的海水淡化厂，而后将产品水质同世界卫生组织的标准（500 mg/L）进行比较（图2）。

假定这座海水淡化厂每个容器采用7支FILMTEC SW30XLE-400膜元件，并且回收率为45%，通量为15 L/h/m²。这与后面第4节将讨论的认为能够节省成本的海水淡化厂非常相似（降

低运行和投资成本)，但是我们可以改变给水的含盐量和温度。

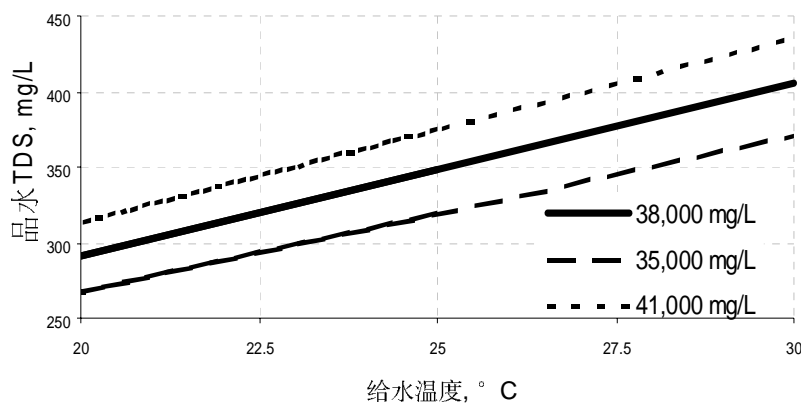


图2：FILMTEC SW30XLE-400的运行范围

在含盐量为38,000 mg/L，温度为25°C的条件下，这是全球大多数海水淡化厂的平均条件，产品水通常达到TDS 350 mg/L。在大多数条件下（含盐量为35,000-41,000 mg/L，温度为20-30°C），渗透液的TDS能够保持在400 mg/L以下。这意味着SW30XLE-400在大多数条件下都能满足产品水的质量要求，因而被认为是一个通用产品。

对于TDS和温度更高的给水，产品水的含盐量可能会超过正常的设计极限。例如，在含盐量大于41,000 mg/L，温度高于30°C的条件下，产品水的TDS将会超过400mg/L。如果希望产品水TDS降低，我们可以要么稍微增加产品水的通量，要么采用SW30HR LE-400。为了满足脱盐率的需要，巧妙调整海水淡化厂的另外一个选择是混合使用膜元件。例如，FILMTEC SW30HR LE-400可以用在压力容器的给水端，安装在第一，第二或者第三支元件的位置，而FILMTEC SW30XLE-400可以用在压力容器的浓水端。这不仅能够完全达到脱盐率的要求，而且能够降低给水端膜元件的通量，进而降低污染。当有意将给水端和浓水端的产品水分开时，这也是一种很好的选择。

当提高脱盐率和产水量是反渗透的主要考虑因素时，特定离子的脱除率也是非常重要的。氯离子在海水淡化中传统上是被引用最多的特定离子，但是现在硼的脱除变成成为重要的考虑因素（Redondo *et al.* 2003）。当采用FILMTEC SW30HR LE-400时，如果采用单级反渗透或者稍高pH的第二级反渗透（更适合处理浓水端的产品水），通常硼的浓度可以达到小于1.0 mg/L。当要将硼脱除到小于0.5mg/L时，通常还需要第二级反渗透，其出力必需大到能够处理至少60%的一级产品水，特定情况下甚至需要处理80-100%的一级产品水。当我们要满足TDS（例如<50 mg/L），氯离子（例如<25 mg/L）以及其它溶质更严格的限制要求时，也需要设计二级反渗透。在这种情况下，第一级RO不需要最高的脱盐率，因为一、二级产品水混合后会有非常好的水质，并且可以通过采用产水量高的元件如FILMTEC SW30XLE-

400来节省运行成本。

4. 运行和投资成本的降低

产水量更高的新型产品能够进一步降低投资成本(CAPEX)和运行成本(OPEX)，这两项成本组成了海水淡化的总成本。取决于系统设计人员的着眼点不同，新产品带来的好处可能会随之变化，设计人员和/或运行人员要么选择降低投资成本，要么选择降低运行成本，或者选择二者结合以适合特别的经济指标(能耗，工程寿命，投资成本)。

投资成本导向型的系统设计员，在同等的条件下，会采用相同数量的压力容器和膜元件获得更高的产水量，或者用较少的压力容器和膜元件获得相同的产水量。

另一个节省制水成本的途径是提高产水量和回收率。这也将节省压力容器和膜元件的成本，并且也可以降低预处理和泵的投资和运行成本。而倾向于节省运行成本的设计员或者操作员，最有可能采用降低膜系统运行压力的方法来降低能耗。

将传统的产水量为6000gpd的膜元件更换成更高产水量7500gpd和9000gpd的膜元件的可能方案请见表2所述。该表列出了各种高水平的方案，设计策略的变化及由此产生的影响。在表2下的脚注中，就怎样选择方案的实践提示作了概括总结，并在最近的出版物中作了更加详细的描述(陶氏化学公司2003，Busch 2003)。

表2：用产水量更高的膜降低投资(CAPEX)和运行(OPEX)成本的策略

| 方案 | 设计策略 | 产生的影响 | 实践提示 |
|---------------------------------|--|---|-------------------------------|
| 方案1(降低运行成本)：降低给水压力 | 相比于低产水量膜元件的设计，采用相同数量的压力容器和膜元件，在相同的回收率下产生相同的流量(恒定渗透液流量) | 给水压力降低导致高压给水泵的能耗下降。因此，可以节省能耗。 | (1)，(2) |
| 方案2(降低运行和投资成本)：增加海水淡化厂的出力和回收率 | 相比于低产水量膜元件的设计，采用相同的给水压力，以及相同数量的压力容器和膜元件 | 产水量和回收率增加。更高的产水量意味着可以节省压力容器和膜元件的投资，更高的回收率意味着更低的预处理投资成本以及更低的水泵和预处理运行成本 | (3)，(4)，(5)，(6)，(7) |
| 方案3(降低投资成本)：在相同回收率下以更高的通量运行 | 与采用更低产水量膜元件的设计相比，采用相同的给水压力和回收率，但是增加平均产品水通量 | 方案3a：在相同的出力下，采用较少的压力容器和膜元件，节省投资成本 | (8)，(9) |
| | | 方案3b：采用相同数量的压力容器和膜元件，出力增加 | (3)，(7)，(8)，(9) |

(1)可能的话，采用变频驱动(VSD)的活塞泵和离心泵(CP)。对于无变频驱动的离心泵，叶轮必须处理平整或者多级泵的叶轮部分必须去除。

(2)为与产水量低的元件设计相配备，产水量高的膜元件在低压下运行，可能会导致产品水含盐量增加，所以这应该校核。

(3)应核实浓水控制阀、产品水和浓水管道系统、储存和后处理系统，是否适应流量的改变。

(4)增加平均通量和回收率可能会稍微改变产品水水质。

(5)应该核对回收率提高对浓水结垢的影响，并采取必要的预防措施。

(6)应该确定预计更高的浓水浓度是否符合排污限制及其它环境规定。

(7)第一支元件的产水流量提高，平均产水通量提高和/或浓水流量下降可能会引起污染性能的改变。应该评估这些因素可能造成的影响。

(8)因为盐通量保持不变，在相同的回收率下增加平均通量会导致盐透过率下降。因此，这是我们提高产品水质量的一种方法。

(9)应该核实预处理和给水泵的容量能否适应给水流量提高的要求。

我们可以看到，当采用相同数量的膜元件并且降低给水压力(方案1)时，高产水量的膜元件可以降低能耗，当系统占地面积减少时(方案3a)，采用这些膜元件也可以降低投资成本(压力容器和膜元件)。当在方案3a建议的更高通量下运行时，海水淡化厂现有的压力容器可以继续使用，并且出力增加(方案3b)。接下来(表3)进一步说明方案3a和3b从概念上讲节省投资成本是相同的。另一个策略是增加回收率和产水量，这都可以降低运行成本(较少的预处理成本和更低的水泵输送的成本)和投资成本(预处理和膜段的占地面积较少)。这三种方案代表基本的决策方向，它们当然可以根据设计人员的判断合并采用或者变化采用。

举例说明这些不同的方案引起的成本降低，采用新型膜元件SW30HR LE-400 和SW30XLE-400的示范性海水淡化厂的成本将同采用FILMTEC SW30HR-380膜元件的海水淡化厂(参考案例)做比较。该示范性海水淡化厂的运行条件为：给水含盐量为38,000 mg/L，温度为25°C(77°F)；设计采用115个压力容器，每个容器装7支元件，每支压力容器的产水流量为3.45 m³/h(15.2gpm)；该厂的产水量为9,500 m³/d，设计的平均通量为14.0 L/h/m²(8.2gpd)，系统回收率为45%。

对膜段的成本进行评估，包括5年运行能耗(“电费成本”，OPEX)以及压力容器和膜组件投资成本的折旧费(“投资成本”，CAPEX)。预处理，清洗以及其它的成本将不考虑，因为产水量为7500gpd和9000gpd的膜元件采用的是非常相似的元件结构，因此和传统的产水量6000gpd的膜元件一样容易清洗。由于回收率更高，这也可能降低预处理的成本，但是本文的分析将不包括这项成本。下列为假定的条件：

- 运行时间：5 年
- 元件更换率：20%
- 泵效率：90%
- 电费：0.08 美元/kWh

本评估如表3所示包括两种情形：其一采用能量回收装置(效率90%)，其二不采用能量回收装置。除了5年的能耗和投资成本外，将会计算海水淡化厂更换成新元件新设计的价值。并以单支元件的价值来表示。单支元件的增值与通过更换传统的6000gpd的元件所节省的能耗和投资成本是一致的。

我们将考虑降低给水压力，并且采用FILMTEC SW30HR LE-400来增加出力和回收率。在所有的这些案例中，产品水的质量(253-258 mg/L)与传统膜元件(6000gpd、99.70%)的产品水质大致相同(248 mg/L)。当在原回收率45%下提高产水量时，产品水质提高了13%，达到216 mg/L。采用FILMTEC SW30XLE-400，在降低压力或者增加出力和回收率的情况下，产品水的TDS增加到359-368 mg/L。在提高出力而维持原回收率时，产品水浓度仅稍微增加，从248 mg/L增加到261 mg/L。所有情况都能满足饮用水水质要求<500mg/L，并且为后处理和/或运行条件的改变提供了至少27%的安全缓冲。

表3：用产水量更高的海水元件降低投资成本和运行成本

| 参数 | SW30HR LE-400 | | | | SW30XLE-400 | | | |
|---------------------------|--------------------|----------------------|------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|------------------------------|------------------------|
| | SW30HR-380 参考案例 | 方案1 ： 降低 压力 | 方案2 ： 增加 出力和回 收率 | 方案3 a： 更高的通 量 | 方案3 b： 更高的通 量 | 方案1 ： 降低 压力 | 方案2 ： 增加 出力和回 收率 | 方案3 a： 更高的通 量 |
| 产水量， m ³ /d | 9,500 | 9,500 | 10,000 | 11,500 | 9,500 | 9,500 | 10,400 | 9,500 |
| 回收率， % | 45 | 45 | 47.3 | 45 | 45 | 45 | 49.2 | 45 |
| 给水量， m ³ /h | 880 | 880 | 880 | 1,070 | 880 | 880 | 880 | 880 |
| 给水TDS ， mg/L | 38,000 | 38,000 | 38,000 | 38,000 | 38,000 | 38,000 | 38,000 | 38,000 |
| 产品水TDS | 248 | 258 | 253 | 216 | 216 | 368 | 359 | 261 |
| 压力 | 58.3 | 55.8 | 58.3 | 58.3 | 58.3 | 53.8 | 58.3 | 58.3 |
| 元件数量 | 805 | 805 | 805 | 805 | 665 | 805 | 805 | 567 |
| 压力容器 数量 | 115 | 115 | 115 | 115 | 95 | 115 | 115 | 81 |

泵效率90%，能量回收效率90%

| | | | | | | | | |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 能耗, kWh/m ³ | 2.27 | 2.17 | 2.34 | 2.27 | 2.27 | 2.09 | 2.19 | 2.27 |
| 电费, 百万美元(在5年内) | 2.39 | 2.29 | 2.47 | 2.89 | 2.39 | 2.21 | 2.31 | 2.41 |
| 制水成本, 美分/m ³ | 19.0 | 18.5 | 18.5 | 18.1 | 18.1 | 18.0 | 18.3 | 17.6 |
| 每支元件所增加的NPV, 美元/元件 | 0 | 61 | 61 | 136 | 136 | 129 | 95 | 248 |

泵效率90%，无能量回收

| | | | | | | | | |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 能耗, kWh/m ³ | 4.01 | 3.84 | 4.01 | 4.01 | 4.01 | 3.70 | 3.66 | 4.01 |
| 电费, 百万美元(在5年内) | 4.22 | 4.04 | 4.23 | 5.44 | 4.22 | 3.90 | 3.86 | 4.23 |
| 制水成本, 美分/m ³ | 29.6 | 28.6 | 28.2 | 28.7 | 28.7 | 27.7 | 27.2 | 28.0 |
| 每支元件所增加的NPV, 美元/元件 | 0 | 128 | 187 | 136 | 136 | 231 | 307 | 271 |

如果旨在降低运行成本，那么参考案例中的运行压力可用7500gpd的元件降低2.5 bar，用9000gpd的元件则可降低运行压力4.5 bar。这相当于降低能耗 4-8%，而且如果采用高效率的电机，水泵和能量回收，那么能耗可以降低到2.09 kWh/m³淡水。我们可以看到，采用通量更低的设计甚至可以把能耗降低到小于2.0 kWh/m³淡水。采用FILMTEC SW30HR LE-400，节省的制水成本在采用能量回收时为0.5美分/m³淡水，无能量回收时为1.0美分/m³淡水。采用FILMTEC SW30XLE-400制水成本可以进一步降低到1.0美分/m³淡水(有能量回收)，及1.9美分/m³淡水(无能量回收)。在这个案例选择的成本计算条件下，元件的价值增加介于61美元(SW30HR LE-400，有能量回收)和231美元/膜元件(SW30XLE-400，无能量回收)之间。这意味着只要价格差(price delta)低于这个界限，最终用户的总成本仍将持平。

从极端的降低运行成本的观点来看，我们可以修改标准情况下的经济条件来考虑工程寿命更长(举例来说，寿命为10年而不是5年)、更换率更低(10%而不是20%)以及采用能量回收的情况。这样，制水成本从13.6下降到12.7美分/m³淡水，每支膜元件的价值增加是227美元。

如果旨在降低投资成本，那么采用FILMTEC SW30HR LE-400元件，则压力容器和膜组件的数量可以降低17%，采用SW30XLE-400则有可能降低30%。这相当于7500gpd的元件将制水成本降低0.9美分/m³淡水(每支膜元件的价值增加为136美元)，或相当于9000gpd的元件将制水成本降低1.6美分/m³淡水(每支膜元件的价值增加为260美元)。

海水淡化系统设计人员和运行人员可以采用其它许多方案，这些方案可以根据经济条件（例如工程持续时间，更换率，能耗，利率）和设计方法（例如每个压力容器的元件数，平均通量，回收率）来进行优化。

5. 采用低能耗膜元件的现场经验

在上市之前的现场测试阶段，膜元件已经在许多海水淡化厂按照不同的配置使用过。这些现场经验将在本文的最后部分论述。对于两种新型产水量高的产品，本文列出它们现场试验地点的名单以及从这些现场得到的运行数据。

产品稳定性能的建立，是通过对比各个现场的运行数据与ROSA(Reverse Osmosis System Analysis)设计软件预算数据实现的。采用下列方法把标准测试条件（见表1的脚注）下的指定性能和海水淡化厂的实际性能进行比较，并报告“标准化的性能”（海水淡化厂膜元件的性能经转换后反映元件在标准测试条件下的性能）：

- 我们确定在某个运行条件下（TDS，温度，产品水流量，回收率）的污堵因子（FF），并且通过ROSA设计软件准确地预计实际的压力。标准化的产水量是指定的产水量（在技术规范表上，能通过ROSA设计软件在标准测试条件下进行计算）乘以污堵因子（公式1）得到的。

- 计算运行条件下预计的产品水浓度（TDS，氯离子或硼），建立透盐因子（SPF），即实测浓度与预计浓度的比率，这可以用来把指定脱盐率转换为某个条件下的标准化脱盐率（公式2）。

$$\text{公式1: } Q_{norm} = FF * Q_{spec}$$

$$\text{公式2: } R_{norm} = 1 - SPF * (1 - R_{spec})$$

5.1. FILMTEC SW30HR LE-400

表4所示为14个现场测试点，均为采用FILMTEC的新型产品SW30HR LE-400元件的工程和系统，已经全部交付使用，其以前使用元件SW30HR LE-380。元件数量较少时，常指的是中试试验点；而数量较多时，则指的是工业规模的装置。12个工程从2002年到2004年，共交付并安装2670支膜元件，还有2个工程已订购了5190支膜元件。这些工程中仅有部分愿意提供详细的运行数据，并列述如下。

表4：FILMTEC SW30HR LE-400的参考工程

| 地点 | 国家 | 最终用户 / 工程公司 | 应用领域 | 元件数量 | 膜元件类型 | 给水类型 | 安装年份 |
|----|----|-------------|------|------|-------|------|------|
|----|----|-------------|------|------|-------|------|------|

| 地点 | 国家 | 最终用户 / 工程公司 | 应用领域 | 元件数量 | 膜元件类型 | 给水类型 | 安装年份 |
|----------------|-------|--------------------|------|------|---------------|-------|------|
| Terneuzen | 荷兰 | Dow Chemical | 工艺用水 | 528 | SW30HR LE-380 | 海水(开) | 2002 |
| Belize | 伯利兹 | Consolidated Water | 饮用水 | 48 | SW30HR LE-380 | 海水(井) | 2002 |
| Galdar | 西班牙 | Aragua | 灌溉用水 | 360 | SW30HR LE-400 | 海水(井) | 2003 |
| 未知的 | 德国 | Kaercher | 未知的 | 48 | SW30HR LE-380 | 海水 | 2003 |
| Lanzarote | 西班牙 | INALSA | 饮用水 | 18 | SW30HR LE-380 | 海水(井) | 2003 |
| Dhekhelia | 塞浦路斯 | Caramondani | 饮用水 | 6 | SW30HR LE-380 | 海水(开) | 2003 |
| 未知的 | 意大利 | Epuro | 未知的 | 12 | SW30HR LE-400 | 海水 | 2003 |
| 未公开的 | 未公开的 | 未公开的 | 饮用水 | 48 | SW30HR LE-380 | 海水(开) | 2003 |
| Lanzarote | 西班牙 | Inalsa | 饮用水 | 560 | SW30HR LE-400 | 海水(井) | 2004 |
| Ummluj | 沙特阿拉伯 | SWCC | 饮用水 | 6 | SW30HR LE-400 | 海水(开) | 2004 |
| 未公开的 | 未公开的 | 未公开的 | 饮用水 | 800 | SW30HR LE-400 | 海水(开) | 2004 |
| Boudjour | 摩洛哥 | Proagua | 饮用水 | 238 | SW30HR LE-400 | 海水(井) | 2004 |
| Fuerteventura | 西班牙 | La Oliva | 饮用水 | 154 | SW30HR LE-400 | 海水(井) | 2004 |
| Rambla Morales | 西班牙 | Tecnicas | 饮用水 | 5040 | SW30HR LE-400 | 海水(井) | 2004 |

Dhekhelia海水淡化厂为敞开式取水口，给水的含盐量为40,700 mg/L(40,500-41,000)，温度为28°C(24-31)，pH6.7(6.4-7.0)，SDI值为2.7(2.1-2.9)，含硼量为5.7mg/L(5.1-6.2)，原采用杜邦公司的中空纤维膜。该厂取了一个压力容器作试验，内装SW30HR LE-380膜元件。给水压力大约为72.5 bar(72-73)，产品水背压2.5 bar(1.5-3.5)，给水的流量为8.0 m³/h(7.5-8.5)，最终性能如下：在回收率为52%(49-55%)时，有6支膜元件的压力容器产水4.0 m³/h(3.6-4.6 m³/h)，产品水含盐量为230 mg/L(180-280)，产品水含硼量为1.1 mg/L(0.75-1.35)，这相当于启动时标准化的性能：产水量7500gpd，NaCl脱除率99.69%，硼脱除率90%。在运行过程中，观测到通量略有降低而NaCl和硼脱除率增加。

Belize的Ambergris
Caye海水淡化厂的运行条件为：给水含盐量为37,500mg/L，温度为25-28°C，给水来自缺氧的水井，因而含有腐殖酸和高含量的铁。预处理只使用了保安过滤器(5μm)，没有做任何进一步的预处理，是为了保持了井水缺氧状

态并且避免铁形成沉淀。SW30HR LE-380膜元件和旧的膜元件混合使用提升了海水淡化厂的性能。由于不同元件的混合使用，我们没法报告SW30HR LE-380元件的标准化性能。然而，在相同的运行条件下（回收率为42%，产水量为70 m³/h），据说安装新型低能耗膜元件使运行压力从67.9 bar下降到了57.9 bar，而产品水TDS保持在相同水平320 mg/L。

Lanzarote的海水淡化厂的运行条件为：沙滩沉井取水，给水的SDI值为1左右，含盐量为38,500 mg/L，温度范围为20-22°C。试验采用一个压力容器，装有6支膜。当采用SW30HR LE-380时，在这些条件下每个压力容器的产水量为4.7 m³/h，相当于通量为22 L/h/m²，回收率为34%。给水压力为63.5 bar，产品水压力为1.5 bar，这相当于标准化的产水量7200gpd。产品水的TDS为100 mg/L，而预计的TDS为120 mg/L，这相当于标准化的脱盐率99.78%。给水含硼量为5.6 mg/L，pH7，产品水的含硼量为0.60 mg/L，这相当于标准化的硼脱除率92.0%。

一个未公开的的海水淡化厂的给水含盐量为40,700 mg/L（40,500-41,000），温度为18-21°C，敞开式取水口，预理由絮凝加多介质过滤组成，反渗透进水的SDI值一直在3以下，系统由6个压力容器组成，装有产水量7000gpd的样品元件。运行压力为70-71bar（背压为0.8bar），回收率为49-50%，典型的8元件压力容器的产水量为4.6-4.8 m³/h，产品水的TDS为220 mg/L。这相当于标准化的性能：产水量7200gpd，NaCl脱除率99.73%。在pH 7.0下，给水含硼量5.5 mg/L，产品水含硼量0.85-1.01 mg/L，这相当于标准化的硼脱除率90.7%。

位于Terneuzen的海水淡化厂为两级反渗透，生产工艺用水，北海入海口敞开式取水，采用微滤膜作为预处理。给水的含盐量介于15,000和20,000 mg/L之间，由于季节性变化，温度变化在12到17°C之间。该海水淡化厂的配置为两段，共有44个压力容器，每个压力容器内装6支元件（共264支膜元件）。在通量为22 L/h/m²时，回收率为55%。给水的压力为36.9 bar，相当于标准元件的平均性能：产水量7860gpd。产品水的TDS为47 mg/L，相当于标准化脱盐率99.79%。给水硼浓度为2.55 mg/L，pH7.3，产品水的硼浓度为0.21 mg/L，相当于标准化的硼脱除率91%。启动5到10天后，产水量下降到原来的（7100-7500gpd）90-95%，并且保持在这个水平。透盐率也下降到原来的大约90%，相当于平均标准脱盐率99.81%。

位于Gran Canaria的Galdar海水淡化厂制水是为了农业灌溉之用，原设计采用杜邦公司的中空纤维反渗透元件。其中的一列改造成了螺旋卷式反渗透膜元件，采用60个压力容器，每个压力容器内装有6支FILMTEC SW30HR LE-400元件。这使得运行人员不仅能够降低给水压力，并且在降压时增加产水量。给水的含盐量为39,000mg/L，温度为21°C，回收率为45%，该厂在给水压力为6.3.2bar和产水压力为3.2bar的情况下，产水207 m³/h，产水含盐量为170

mg/L。这相当于标准化的性能：产水量7200gpd，脱盐率99.79%。

5.2. FILMTEC SW30XLE-400

第一批SW30XLE-400样品元件已经在2003年推出，并且安装在不同的地点，其主要目的是为了在不同的条件下对它们进行测试（请参考表5）。

某海水淡化厂（位置未公开）的给水含盐量为41,000 mg/L，含硼量为5.4 mg/L，温度为21°C。压力容器装有8元件，在给水压力70.7 bar下运行，回收率50%。其出力为5.3 m³/h，产品水的含盐量为310mg/L，硼的浓度为1.18-1.36 mg/L。这相当于标准化的性能：产水量8000gpd，脱盐率99.67%，硼脱除率88.0%。

表5：FILMTEC SW30XLE-400的参考工程

| 地点 | 国家 | 最终用户 / 工程公司 | 应用领域 | 元件数量 | 膜元件类型 | 给水类型 | 安装年份 |
|-----------|------|-------------|------|------|-------------|-------|------|
| 未公开的 | 未公开的 | 未公开的 | 饮用水 | 8 | SW30XLE-400 | 海水（开） | 2003 |
| Bodrum | 土耳其 | OWV | 饮用水 | 36 | SW30XLE-400 | 海水（井） | 2003 |
| Lanzarote | 西班牙 | INALSA | 饮用水 | 16 | SW30XLE-400 | 海水（井） | 2003 |
| 未公开的 | 未公开的 | 未公开的 | 饮用水 | 8 | SW30XLE-400 | 海水（开） | 2004 |

Bodrum海水淡化厂的给水含盐量为38,700mg/L，温度为21°C，为沙滩沉井取水。产品水流量为21 m³/h，采用6元件装的压力容器，回收率为40%，需要的运行压力为55 bar。这相当于污堵因子0.9或者标称产水量8100gpd。为了确定最适合的制水条件，交付给Bodrum厂的这批元件是专门设计的，以提供较低的产水量，这就解释了产水量比规范值稍低的原因。该厂采用最新的轴向活塞泵和压力交换器（Ludvigsen & Valbojern, 2003），能耗仅为2.04kWh/m³淡水（Mace, 2003），这印证了在上文表3中已讨论过的能耗估计2.09 kWh/m³淡水。产品水的含盐量为295 mg/L，比预计的255 mg/L稍高一点，这相当于标准化的脱盐率99.65%。该厂已经运行了1年，性能稳定。

Lanzarote海水淡化厂的给水含盐量为38,500mg/L，温度为22°C。Lanzarote厂三期工程，即第4列，安装了SW30XLE-400的系统由两段串联组成，一段低回收率和一段高回收率，分别采用60和48个压力容器（每个容器内装6支元件）。一个装有SW30XLE-400元件的压力容器安装在低回收率段，另一个压力容器安装在高回收率段，这里给水含盐量增加到了57,000 mg/L。在低回收率段的第3个压力容器内，安装两支FILMTEC SW30HR-

320元件(产水量为6000gpd, NaCl脱除率99.75%)和4支SW30XLE-400的元件(产水量为9000gpd, 脱除率为99.70%)。这些元件混合使用的平均性能就像是一支产水量8000gpd, NaCl脱除率99.72%的膜元件。表6所示为这些条件下的运行结果。

表6: Lanzarote 海水淡化厂的性能数据

| 段 | 产品型号 | 给水TDS, 温度 | 产水量, 回收率 | 给水、浓水、产品水压力 | 标准化性能, 产水量 | 标准化性能, 脱盐率 |
|-------|----------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------|---|---|
| 低回收率段 | SW30XLE-400 | 38,500 mg/L, 21 °C | 5.8 m ³ /h, 42% | 65.5, 64.4, 2.7 bar | 预计给水压力65.9 bar, 校正污堵因子为1.04或产水量为9400gpd | 预计TDS 170 mg/L, 实测TDS 150-170 mg/L, R=99.72% |
| 低回收率段 | 2支SW30HR-320和4支SW30XLE-400 | 38,500 mg/L, 21 °C | 5.3 m ³ /h, 40% | 65.2, 64.1, 2.3 bar | 预计给水压力65.9 bar, 校正污堵因子为1.03, 对混合元件产水量为8200gpd, 对于SW30XLE-400产水量为9300gpd | 预计TDS为160 mg/L, 实测TDS为150 mg/L, R=99.74%, 对于SW30XLE-400, R=99.72% |
| 高回收率段 | SW30XLE-400 | 57,000 mg/L, 21 °C | 2.4 m ³ /h, 20% | 63.8, 62.5, 1.4 bar | 预计给水压力61.7 bar, 校正污堵因子为0.80或产水量为7200gpd | 预计TDS为470 mg/L, 实测TDS为340 mg/L, R=99.81% |

我们可以看到, 在高回收率段测得的产水量比预计的产水量低, 但是脱盐率比预计的脱盐率高。这可能是由于较低的运行压力和较高的渗透压导致非常低的净驱动压力(大约为10bar), ROSA设计软件预算的数值有不确定性, 这是因为测定稍微不准确就可能造成大的影响。这也可能是因为在高的TDS下这种膜的性能和预算的稍微不同, 然而结果是我们所期望的, 因为尽管产水量低、给水TDS高, 这种膜进一步提高了脱盐率, 其所在的容器仍然可以产出小于500 mg/L的水质。由于这些数据点的不确定性稍高, 所以没有包含在最后的结论中。

低回收率段(150 mg/L和170 mg/L)的压力容器产出的产品水质量极好。它们正好可以达到预计的规范脱盐率99.70%。5.3和5.8 m³/h的容器产水量需要用大于1.0的污堵因子来模拟实测压力(FF=1.03-1.04)。SW30XLE-400标准化的性能为产水量9300和9400gpd, 这是极好的性能。平均的产品水通量非常高, 为26.5和27.5

L/h/m²，大致是Lanzarote海水淡化厂原设计通量的两倍。将产水量低的元件前置、产水量高的元件后置的这种混合使用概念，其目的是为了降低前面元件的通量和污染趋势，尽可能地防止污染，保持长期在高通量下运行。虽然不应该用如此高的通量来设计大型的海水淡化厂，初始结果还是验证了表3中有关新型元件能大幅度增加产水量及显著减少制水成本的估计。

6. 总结和结论

由于饮用淡水需求的日益增加以及采用海水淡化作为水源的趋势增加，海水淡化技术的发展取得了重大进步。在过去的岁月里，这已经导致了成本降低，并可能进一步大幅度降低成本。

技术上的提高取决于产水量超过50%和脱盐率大幅度提高的反渗透元件。这些产品潜在的应用领域将取决于现场条件（给水的含盐量，温度），设计和运行条件（回收率，通量），还有产水水质的要求。用产水量最高的元件FILMTEC SW30XLE-400作设计，产品水的TDS可以低至400 mg/L，而给水含盐量可高达41,000 mg/L和温度高达30°C，这从3个海水淡化厂的现场数据可得到验证。而当给水TDS为38,500-41,000 mg/L，回收率为40-50%，温度为21°C左右时，其产水的TDS可达150-310 mg/L。含盐量和温度更高或者产品水质量要求稍高时（例如，把硼脱除到1.0 mg/L以下），我们就不得不混合选用FILMTEC SW30HR LE-400元件或者单独使用它。对于最严格的产水水质要求（例如，把硼脱除到0.5 mg/L以下或者要求非常低的TDS和氯离子），就需要采用第二级反渗透。在这种情况下，可以采用产水量最高的膜元件来节省能耗。

5个淡化厂的现场数据表明FILMTEC SW30HR LE-400的产水量在7200gpd到7800gpd之间，平均7400gpd，标准偏差为270gpd；NaCl脱除率为99.69-99.79%，平均99.76%，标准偏差0.04%；硼的脱除率为90-92%，平均91%（标准偏差0.8%）。选作最后评估FILMTEC SW30XLE-400元件的4份现场报告表明其产水量介于8000到9400gpd之间，平均8700gpd，标准偏差750gpd；NaCl脱除率为99.69%（99.65-99.72），标准偏差0.04%；硼的脱除率为88.0%。这意味着规范产水量和脱盐率确实与现场性能吻合得非常好。

产水量为7500和9000gpd的新型膜元件，要么在优化运行成本的平均条件下，能把压力降低2.5-4.5 bar；要么能把膜元件和压力容器的数量减少17-30%，实质性地降低投资成本。运行成本和投资成本的节省估计已经在现场试验中得到了验证。结果表明，当超低能耗的膜元件SW30XLE-400与高效率的电机、水泵以及能量回收一起使用时，估计能耗可以降低到2.0 kWh/m³淡水。在高通量和超高通量下的成功运行，例如在Lanzarote海水淡化厂通量达到了不同寻常的大于25 L/h/m²，这证明了大幅度降低投资成本的可能性。多数设计人员从工程的寿命周期成本考虑，很可能会合理安排投资成本和运行成本的节省比例，以实现最大的经济价值。

采用FILMTEC SW30HR LE-400元件，制水成本的降低介于0.5和1.4美分/m³淡水之间，平均为0.9美分/m³淡水。采用FILMTEC SW30XLE-

400元件，可能降低的制水成本介于0.7和2.4 美分/m³淡水之间，平均为1.5 美分/m³淡水。平均制水成本的降低相当于把FILMTEC SW30HR-380更换为FILMTEC SW30HR LE-400后每支元件的价值增加123 美元，也相当于把FILMTEC SW30HR-380更换为FILMTEC SW30XLE-400后每支元件的价值增加214 美元。

总之，陶氏化学海水淡化反渗透膜元件在脱盐率和产水量上展现出的大幅度突破，为节约制水成本提供了巨大的潜力。

7. 致谢

我们希望对本文中提到现场的设计人员和运行人员表达诚挚的谢意，感谢他们所做的深入的评估工作。我们尤其要感谢：

- Antonio Sanchez, Juan Manual Bethencourt, Fernando Casro和Julio Gonzalez (INALSA) 提供Lanzarote海水淡化厂的数据

- Jeroen Boom (Rossmark), Marc Slagt和Peter Vaal (Delta) 提供Terneuzen海水淡化厂的数据

- Olga Sallangos (Caramondani)提供Dhekhelia海水淡化厂的数据

- Juan Vargas, Maria del Carmen Velazquez (Cadagua) 和Toni Casanas (DOW) 提供Galdar海水淡化厂的数据

- Peter Mace (OWV)和Peter Sehn (DOW) 提供Bodrum海水淡化厂的数据

- John Kavanaugh (Consolidated Water)和Craig Broden (DOW) 提供Belize海水淡化厂的数据

8. 参考文献

Andrews, W., Bergmann, R. "The Malta seawater RO facility", Paper resented at First World Congress on Desalination and Water Re-Use, Florence, Italy, 23-27 May, 1983

Busch, M., "High-flow, high-rejection RO membranes reduce production costs by 20%", Water & Wastewater International, Volume 18, Issue 8, November 2003

Cerci, Y., Cengel, Y., Wood, B., "The Minimum Separation Work for Desalination Processes", Proceedings of the ASME Advanced Energy Systems Division (1999), AES-Vol. 39, p. 545-552

Cerci, Y., "Exergy Analysis of a Reverse Osmosis Desalination Plant in California", Desalination 142, (2002) 257-266

The Dow Chemical Company Literature Archive, "How FILMTEC's new high rejection low energy seawater element can reduce your desalination costs", Form No. 609-00437-803, Midland (2003), <http://www.dow.com/liquidseps/prod/sw.htm>

Farinas, M. "Reverse Osmosis in Seawater Desalination Plants. Cost per m³ of desalinated water", PRIDESA, 1996, based on The Eighth Commission of the Spanish

Water Supply and Sanitation Association, 1987

Gorenflo, A., Redondo J., Busch, M., Casanas, A., Jonson, J., “Innovaciones Tecnológicas en la Osmosis Inversa de Agua de Mar”, IV Congreso nacional AEDyR - Desalación y Reutilización Mirando al Futuro, Las Palmas de Gran Canaria, 19-21 Nov 2003

Jonson, J., Hallan, M., Peery, M., Johnson, L. “Say good-bye to the weakest link – introducing a new method for coupling membrane elements”, IDA World Congree on Desalination and reuse, Sep. 28 – Oct. 3, Paradise Island, Bahamas, BAH03-048

Leitner, G., “Costs of Seawater Desalination in Real Terms, 1979 through 1989, and projections for 1990”, Desalination, 76 (1989), p. 201-213

Ludvigsen, F., Valbjorn, A., “Newest pump technology uses only 2.7 kWh/m³ for SWRO”, Desalination and Water Reuse, Volume 13, Issue 1, 2003

Mace, P., “Publication of operation results for the seawater desalination plant in Turkey”, press release by Salcon Austria GmbH, 10-Jul-2003

Redondo, J., Busch, M., De Witte J. P., “Boron removal from sea water using FILMTEC high rejection SWRO membranes”, Conference on Desalination and the Environment – Fresh Water for All”, 4-8 May 2003, Malta, published in Desalination 156 (2003)

Wilf, M., Klinko, K., “Optimization of Seawater RO System Design”, Desalination 138 (2001), p. 299-306

9. 声明

任何人不得推定其在本文件下有使用Dow Deutschland GmbH & Co. OHG / FilmTec

公司或其他人所拥有的任何专利的自由。由于使用条件和适用法律可能因地而异，顾客有责任确定本文件里的产品和信息是否适合顾客使用，并确保自己的工作场地和处理产品的方式符合可适用的法律和其它政府法规。Dow Deutschland GmbH & Co. OHG / FilmTec 公司对本文件中的信息不承担任何责任或者义务，也未提供任何保证。在本文件下关于产品的可售性或对某一特殊用途的可适用性的所有默示保证均在此明确地予以排除。

如果您需要了解更多陶氏膜元件的中文详细资料，请与陶氏化学液体分离部台北、北京和上海办事处联络。

上海办事处 电话：0086-(0)21-6336 6998 传真：0086-(0)21-6387 5622 手机：0086-(0)13916036316

北京办事处 电话：0086-(0)10-8518 3399 传真：0086-(0)10-8518 3999 手机：0086-(0)13901226490

台北办事处 电话：00886-(0)2-2775 6066 传真：00886-(0)2-2776 5757 手机：00886-(0)932201730

敬请访问液体分离部网站 www.filmtec.com www.dowex.com www.dow.com/liquidseps/