

大型市政污水再生回用工程的节能路线

——ESPA2+ 在新加坡 Ulu Pandan 新生水项目的应用

1. 前言

市政污水再生回用是解决我国水资源供需矛盾的手段之一。近年来，城市污水处理回用于城市绿化、农业灌溉、工业冷却以及生活非饮用水等方面。北京市以奥运为契机，提出了以再生水为“第二水源”，率先在北小河等污水处理厂建成了膜法再生水回用工程，将膜技术引入了大型市政污水回用领域。

反渗透膜、超/微滤膜、MBR 等膜技术在国内的饮用纯净水、工业纯水、海水淡化、废水回用处理等方面已有不同程度的应用经验。再生水回用工程中，因回用目的不同，采取的工艺组合会有较大区别。反渗透膜因其良好的脱除水中溶解性物质的能力，适用于生产高品质的回用水。

在大型市政污水回用方面，美国已有 30 多年的应用历史，进行了多次的技术路线的提升和改进。以全球污水回用领域的技术先锋——美国的 21 世纪水厂为例，从上个世纪 70 年代起，即采用传统的混凝澄清与醋酸纤维素膜的组合工艺进行市政污水的回用处理。后来随着膜技术的不断发展，在 90 年代以后进行了多年的不同膜种类和工艺的现场试验，最终确定了采用以微滤、超低压反渗透膜、UV 为核心技术的方案。2004 年建成了 18,900m³/d 的一期工程，节能型超低压反渗透膜 ESPA2 在几年的稳定运行中证明了其抗污染性能良好、节能效果明显等特点。2007 年，该厂二期扩建成为 265,000m³/d 的污水回用规模。

近年来，一些缺水国家和地区，如中东、新加坡等，在市政污水回用领域也得到了快速发展。本文主要介绍新加坡 NEWater 项目发展历程和应用经验。

2. 新加坡早期 NEWater 项目背景和历程

新加坡水土资源有限，需从邻国马来西亚买水以满足约 450 万居民的用水需求。新加坡公用事务局（PUB）为了保证有限的水资源用于饮用，决定采用膜集成技术（超/微滤+反渗透）来回用再生污水，即 NEWater 项目，主要用于半岛体行业或其它工业用途。

Bedok 示范水厂于 2000 年 4 月投入运行，反渗透膜采用美国海德能公司的低污染膜 LFC1，系统设计为六芯、三段，回收率为 85%。运行不到一个月，在系统的第三段出现了水通量和脱盐率的下降现象，检测结果表明发生了 Ca₃(PO₄)₂ 的结垢。在回收率降到 75%-80%、并采用了新型的阻垢剂之后，系统运行恢复稳定。

2002 年建成投产的 Bedok 32,000m³/d 和 Kranji 40,000m³/d 的两个 NEWater 项目，设计上吸收 Bedok 示范水厂运行经验，并做了一些改进，具体如下：

每个系列的基本设计:

- 产水量: 5000 m³/d
- 膜数量: 511 支 LFC1
- 设计水通量: 10.4gfd (17.6 l/m²/h)
- 排列: 每支压力容器装 7 支膜,
49: 24 两段排列
- 回收率 75%



3. 节能型超低压膜 ESPA2+的现场试验

美国 21 世纪水厂在 1996-2003 年期间, 曾采用不同膜制造商提供的低污染、低压和超低压膜 (见表 1) 进行 5000 个小时的现场试验。试验结果表明, 超低压膜 ESPA2 具有同样的抗污染能力, 且运行压力更低。[1] 最终产水量为 265,000m³/d 的污水回用工程采用了 ESPA2 膜。

表 1 21 世纪水厂现场试验采用的膜型号和系统

膜厂商	膜型号	膜种类	测试时间	测试装置		
				排列	回收率(%)	水通量 (lmh)
Koch	TFC-HR	低压	1996/8-2000/12	(9: 6: 3) *7	85	17-20.4
Hydranautics	ESPA2	超低压	2001/2-2002/4	(6: 4: 2) *7	85	20.4
Dow	BW30-400FR	低污染	2002-5-6	(3: 2: 1) *7	85	20.4
Dow	XLE-440	超低压	2002/8-2003/2	(3: 2: 1) *7	85	20.4
Dow	XLE-4040FR	低污染	2001/6-2002/3	(2: 1) *6	75	20.4
Hydranautics	LFC1-4040	低污染	2001/6-2002/2	(2: 2: 1: 1) *3	75	20.4

新加坡的再生水回用项目中, 虽然已有低污染膜 LFC1 多年的成功运行经验, 但为了更节省运行费用, Ulu Pandan 污水回用项目确定采用 ESPA2+来做现场试验。

超低压节能型膜的膜表面电性和亲水性与低污染膜 LFC1 有所不同。表 2 列出了 ESPA2+、ESPA2 和 LFC1 三种膜型号的技术参数。由此表可以看出, 在脱盐率更高的情况下, 节能型超低压膜的比水通量比低污染低压膜高, 其中 ESPA2+的比水通量比 LFC1 的高 47%。而在节能型系列中, 改进型产品 ESPA2+比 ESPA2 膜面积大 10%, 产水量高出 33%。

表 2 各型号反渗透膜元件性能参数

膜元件	类型	面积,m ²	脱盐率,%	产水量, m ³ /d	测试压力, MPa	比水通量 LMH/MPa
ESPA2+	节能型超低压	40.9	99.6	45.4	1.05	44.0
ESPA2	节能型超低压	37.2	99.6	34.1	1.05	36.4
LFC1	低污染低压	37.2	99.5	41.6	1.55	30.0

现场试验始于 2006 年 3 月，采用 42 支 ESPA2+ 按 7 芯装、4: 2 两段排列布置，模拟项目的实际工况进行。图 1、图 2 分别列出了试验 7 个月的比水通量与压差的数据。试验第一个月，数据均保持平稳。后来由于停止加入氯胺，导致第一段的压差在 20 天内上升了一倍。在重新加入氯胺后，第一段压差下降了 50% 但仍然高于初始压差 1.7kg/cm²。说明氯胺只能抑制生物膜的继续生长，不能将生物膜污染完全消除。第二段的压差在试验四个月后才上升，表明有结垢现象。在 8 月初进行常规的酸、碱化学清洗，接下来 3 个月的试验数据表明系统一直稳定运行。[2]

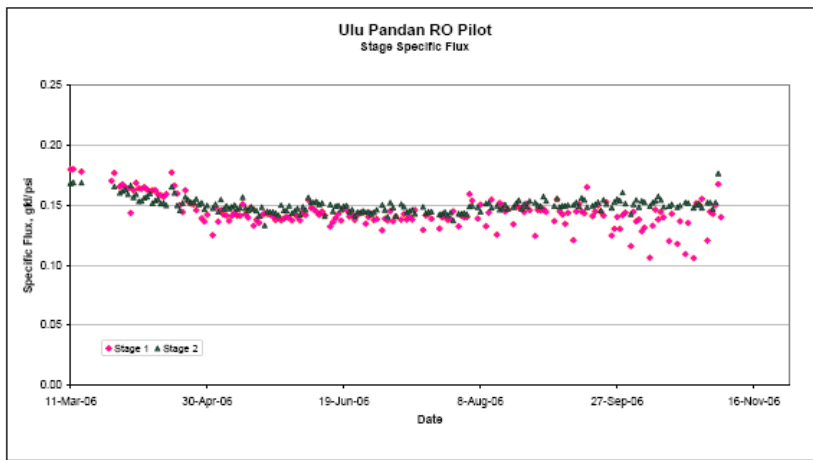


图 1 比水通量试验数据

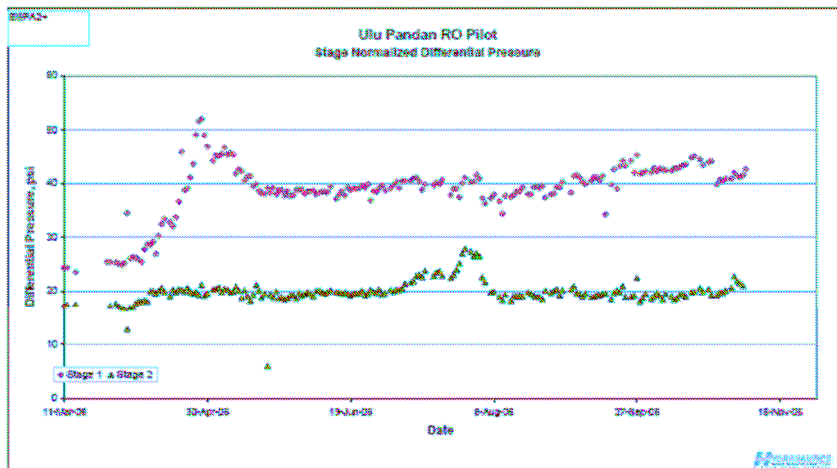


图 2 压差试验数据

4. Ulu Pandan 156, 000 m³/d 新生水项目应用

Ulu Pandan 项目的单套系统流程图见图 3。与其它新生水项目的流程大体一致，即采用二级市政污水为水源，进水中保持有 2-3mg/l 浓度的氯胺；经过微滤膜和保安过滤器，进入到反渗透系统。在反渗透进水中加入酸调节 pH 至 6.8，并加

入阻垢剂。单套系统产水量 12,900m³/d, 7 芯装, 64: 36 两段排列, 设计水通量 18.8lmh, 回收率为 80%。12 套运行, 1 套备用。此项目侧重于节能设计, 共用了 9100 支超低压节能型膜 ESPA2+。除此之外, 在两段中加入带有能量回收装置 (ERD) 的涡轮增压泵, 将浓水压力回收利用增压到第二段上, 从而进一步降低整个系统能耗。

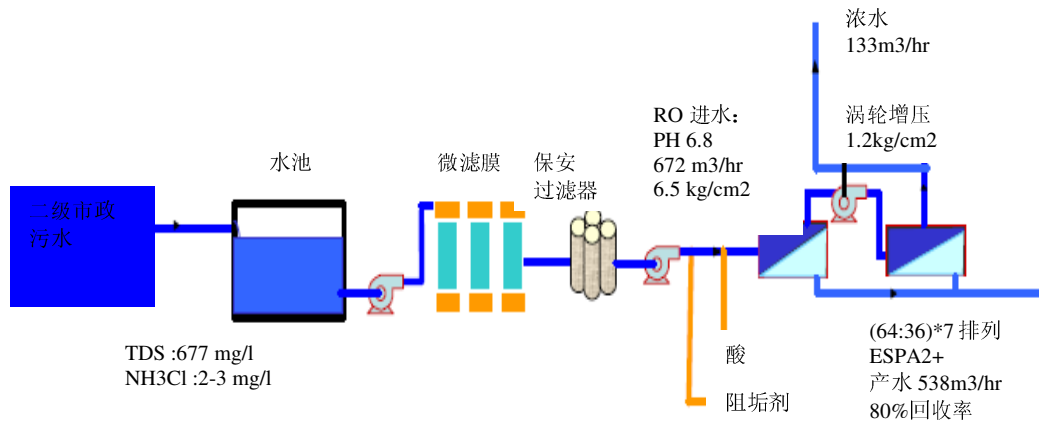


图 3 Ulu Pandan 单套系统流程示意图 [3]

表 3 各种设计条件下的吨水能耗

	设计 1 (LFC1, 普通增压)	设计 2 (ESPA2+, 普通增压)	Ulu Pandan 实际设计 (ESPA2+, 有能量回收的增压)
产水量 (m ³ /d)	12900	12900	12900
进水 TDS (mg/l)	677	677	677
平均水通量 (lmh)	18.8	18.8	18.8
回收率 (%)	80	80	80
膜排列	(74:36)*7	(64:36)*7	(64:36)*7
进水压力 (kg/cm ²)	7.5	6.0	6.0
浓水压力 (kg/cm ²)	6.1	4.4	4.4
泵效率 (%)	80	80	80
电机效率 (%)	90	90	90
能量回收效率 (%)	N/A	N/A	58
吨水能耗 (kwh/m ³)	0.38	0.31	0.29

为了直观看出 Ulu Pandan 节能设计的特点, 表 3 列出了实际设计与假定设计 1: 采用低污染膜 LFC1 普通增压, 以及与假定设计 2: 采用 ESPA2+ 但普通增压的两种方式运行对比。从表中可以看出:

- 1) 在同样平均水通量的设计下，每套产水量 12,900m³/d 的系统，所需的 ESPA2+膜数量比 LFC1 少 70 支。13 套总计少用膜数量 910 支，且降低膜壳和管道等初期建设费用；
- 2) 在同样设计条件下，都采用普通增压泵时，ESPA2+的吨水能耗为 0.31kwh/m³，比 LFC1 的 0.38kwh/m³ 能耗降低了 18.4%；
- 3) 当系统都采用 ESPA2+时，采用有能量回收装置的涡轮增压能耗为 0.29kwh/m³，比普通的增压方式的 0.31kwh/m³ 能耗降低了 6.5%。

5. 结论

大型市政污水回用项目中，随着污染的有效控制和应用经验的不断累积，节能设计成为技术提升的一个关键方向。以 2007 年建成投产的新加坡最大的 Ulu Pandan 新生水回用项目为例，设计中除借鉴前期的工艺和污染控制经验外，全面设计了节能路线。采用的节能型超低膜 ESPA2+所需运行压力低，与传统低污染膜的设计相比，可降低吨水能耗约 18%，同时降低膜数量节省项目初期投资。有能量回收的涡轮段间增压设计，再为系统能耗降低 6.5%。对于运营管理 20 年及以上的污水回用厂，低能耗降低运行费用，所带来的长期经济效益十分可观。