高品质工业用再生水的实践

杨京生　孟瑞明　张　韵

（北京市市政工程设计研究总院　100082）

摘　要　以北京经济技术开发区再生水工程实践为研究对象，对开发区高品质工业用再生水工程进行总结，以期为国内类似工业开发区的再生水回用提供经验和决策参考。研究结论表明，工业开发区再生水回用重点应考虑工业企业生产用水，双膜法工艺应用于高品质再生水的回用工程，技术上可靠、经济可行。

关键词　高品质工业用再生水　再生水回用　双膜法

中图分类号　X703　　**文献标志码**　B　　**文章编号**　1673-4637(2008)06-0047-04

1　工程概况

北京经济技术开发区再生水工程，已建成日产高品质工业用再生水2万m^3的再生水厂1座（经开再生水厂）及约17 km配套再生水管线。经开再生水厂以开发区污水处理厂二级出水为水源，经“微滤+反渗透”双膜法工艺深度处理，出水水质达到高品质工业用再生水要求，通过管网向开发区内工业企业提供生产用水水源，替代原生产使用的自来水水源。该项目的建设，节约了大量工业用水，缓解了开发区用水紧张的现

的预测结果进行分析，提出如下建议。

（1）从北京市历年水费支出系数可以看出，2004年以前大部分居民的水费支出负担水平是逐年增加的，2004年之后负担减轻，水费支出系数呈下降趋势。主要原因是水价没有随着物价水平的上涨和收入的增加而相应调整。由于供水工程的成本随着物价的上涨而加大，加之2010年之后南水北调等工程投入运行，建议水价调整一方面要考虑供水成本的增加，另一方面还要考虑物价水平的变化和人民收入水平的提高。

（2）通过对北京市不同收入水平城市居民水费支出现状可以看出，水费支出负担随着收入水平的提高而降低，即低收入用水户的水费负担较重。建议水价的调整以中低收入人群的可承受能力为主要考虑对象，兼顾低收入群体的承受能力。水价实行阶梯水价，对高收入群体用经济杠杆的方式限制其水资源使用量，对低收入群体实行优惠政策，以保证资源使用的公平，并达到节约用水的目的。

（3）鉴于北京市目前的水价水平位居全国首位，并考虑北京市居民的生活水平，建议水价的制定应充分考虑水费支出系数在2.0%左右（在这种水平下，用水能够引起居民重视并注意节约用水）时用水居民的水费负担情况。

参考文献

[1] 柳长顺，陈献，刘昌明，等. 华北地区城镇居民水费支出占收入与消费的比例研究.水利经济[J]，2005(3)，27-32.

[2] 北京市统计局，国家统计局北京调查总队. 北京统计年鉴[M].2007.

[3] 北京市水资源综合规划项目组. 北京市水资源综合规划专题六——城市需水预测与节水规划[M].

（责任编辑：林跃朝）

收稿日期：2008-09-03

作者简介：杨京生（1971—），男，高级工程师。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

状，对于推动北京市污水资源化有着重要的意义。

本工程为目前北京市范围内最大的市政污水高品质回用项目，包括再生水厂及厂外管线，工程总投资约1.5亿元，其中再生水厂设备供货与安装约5 100万元，投资使用了世界银行北京环境二期项目贷款。该工程于2008年7月19日顺利竣工投产。

2　开发区再生水需求特点

2.1　再生水需求调查

工业开发区用水及再生水需求不同于一般的城市建设区域，为此，北京经济技术开发区再生水工程在前期开展了以水平衡测试及用户用水调查为基础的研究工作。

（1）水平衡测试。开发区水务部门对105家用水单位进行了水量平衡测试。这105家单位中，大部分为工业企业，占地面积226.2 hm^2，占总面积的72.7%；工业企业建筑面积为125.7万 m^2，占总建筑面积的67.6%。同时工业企业用水占总用水量93.7%。

（2）用户需水调查。在开发区内开展的用户用水调查中，共发放调查样本41份，回收有效样本33份。不同企业性质其再生水需求结果不同，其中电子企业用水量占总量的59.4%。调查还显示，企业应用再生水主要用于工艺水、冷却水和杂用水3方面，分别占总需求量的68.5%、28.7%和2.8%。在这3方面用途中，冷却水、杂用水可采用污水经过传统再生水处理工艺处理后的产水，其水量之和仅占31.5%，而占68.5%的再生水需求量仅通过传统处理并不能满足用户的水质要求。

2.2　再生水水质要求

开发区再生水用户调查，除对再生水需求量进行调查，同时也对主要的大用户进行了再生水水质要求的重点调查。其重点用户调查结果如表1。

表1　再生水重点用户调查

用户	需水量/(万 m^3/d)	用途	水质要求
电子企业A	1.1	工艺用水	TOC、S_iO_2、金属离子、固体颗粒
汽车企业	5.0	清漆表面循环水	
电子企业B	0.7	工艺用水	TOC、S_iO_2、金属离子、固体颗粒
电子企业C	0.6	工艺用水	TOC、S_iO_2、金属离子、固体颗粒
热电企业	1.5	锅炉补水冷却水	
高尔夫	0.4	喷灌草坪	超滤级以上

对比国家规范《城市污水再生利用分类》(GB/T18919–2002)及相应分类再生水水质指标，开发区再生水水质如仅达到上述标准，是无法满足本工程主要再生水用户的要求，特别是上述分类中的《城市污水再生利用工业用水水质》(GB/T19923–2005)也不能满足开发区内电子类企业用水的水质要求。

再生水用户提出的主要指标均高于常规再生水指标，同时再生水用户使用再生水的主要期望是能够用以替代生产用自来水水源，达到节约用水和降低生产成本的目的。因此，本工程在此引入一个新的再生水概念，即开发区再生水工程生产的再生水，其水质应高于目前再生水水质标准，可用于替代工业工艺生产使用的自来水水源，称之为“高品质工业用再生水”。本工程高品质工业用再生水水质指标与自来水、常规再生水水质指标比较如表2所示。

表2　再生水厂进出水水质指标　　mg/L

项目	COD_{cr}	BOD_5	SS	NH_3-N(以N计)	TN(以N计)	TP(以P计)	TDS	pH	浊度/NTU	色度(稀释倍数)	石油类	阴离子表面活性剂	Fe	Mn	嗅	S_iO_2	TOC	DO	粪大肠菌群数/(个/L)	游离性余氯	总硬度(以碳酸钙计)	总碱度(以碳酸钙计)
设计进水	≤100	≤10	≤30	≤5	≤15	≤5	1 000	≤8.0		≤30	≤1	≤0.5	0.18	0.06					≤10^3			
设计出水	<15	<3	<1	<2.5	<5	<0.5	<150	6~8	<0.1	<5	<0.3	<0.3	<0.1	<0.1	无	<1	<1	≥1.0	不得检出	管网末端≥0.2	<60	<45
景观杂用水		≤6	≤10	≤5	≤15	≤0.5	≤1 000	6~9	≤5	≤30	≤1.0	≤0.5	≤0.3	≤0.1	无不快感			≥2.0	不得检出	管网末端≥0.2		
自来水	≤3(Mn法)						≤1 000	6.5~8.5	≤1.0	≤15		≤0.3	≤0.3	≤0.1	无				不得检出	管网末端≥0.05	≤450	

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.3　再生水需求特点

根据上述研究分析，可以得出开发区再生水需求的主要特点如下。

（1）开发区再生水的需求量将有接近70%为工业企业工艺生产用水。

（2）再生水需求量中将近60%为电子类企业用户所使用。

（3）开发区再生水水质指标应优于常规再生水水质指标，高品质工业用再生水应满足替代工业企业工艺生产使用的自来水水源的要求。

3　工艺选择

3.1　再生水进水水源

经开污水处理厂设计处理规模5万m^3/d，采用C-TECH生物处理工艺，其有机物去除率高，并具有一定脱氮除磷效果，其设计出水为北京市《水污染物排放标准》(DB11/307-2005)中二级排放标准。2007年底，污水厂进水已经超过4万m^3/d，其出水主要水质指标均好于设计标准，将作为经开再生水厂生产的进水水源。

3.2　再生水水量

经开再生水厂将分2期建设：一期工程已建设1座日产高品质再生水2万m^3/d的再生水厂及厂外配套再生水管线；二期工程再生水产量将扩大到4万m^3/d。其中一期建设中已预留二期设备的安装位置。在工程二期建设后，其生产的再生水总量，可满足替换开发区工业企业60%生产用水水源的要求。

3.3　进出水水质

根据经开污水处理厂设计出水水质及实测指标，确定再生水厂进水设计指标。根据用户调查结果，综合平衡主要生产企业工艺用水水质要求及工业企业厂内现有深度处理设施的情况，参考国内外其他类似工程的经验，确定本工程的高品质再生水指标。进出水水质指标如表2所示。

3.4　生产工艺

由表2可见，再生水生产工艺应以去除TDS、SS为主。常规处理方法就可去除SS。因此，研究的重点主要为TDS的去除。理论上去除TDS可采用蒸馏法、离子交换法、电渗析和反渗透法等处理方法。

3.4.1　反渗透工艺的特点

反渗透工艺是以外加压力克服滤液渗透压的一种膜分离技术。反渗透工艺对于溶解性有机物质、溶解盐类、金属离子、微生物病毒和胶体物等均具有很强的去除能力，其出水指标可以达到很高的标准，再辅以消毒等配套措施，可满足本工程再生水水质的要求。与其他3种方法相比，反渗透工艺技术成熟可靠，整个分离过程不发生相变，从而节能、经济、装置简单、操作方便。同时反渗透工艺具有大规模工业生产实践，一次性投资与运行费用比另3种方法更经济。

采用反渗透技术获得高质量的去离子水已在工程中得到广泛的应用，但同时反渗透系统对进水水质要求非常严格，必须对反渗透进水进行有效的预处理。

实际运行经验表明，反渗透系统不能正常运行、膜使用寿命降低的原因大部分是由于反渗透进水水质不合格造成反渗透膜元件污染和劣化而引起的，其主要源于以下5个原因。

（1）悬浮物、胶体颗粒对膜的污堵。

（2）微溶解性盐的溶度积超过饱和值而产生结垢。

（3）微生物、细菌、藻类污染。

（4）氧化反应。

（5）有机物污堵如油、脂、酮类有机溶剂和大分子阳离子型聚合物等。

3.4.2　反渗透工艺预处理方法

目前反渗透工艺预处理方法主要为常规预处理和膜法预处理2种。常规预处理为混凝、澄清和过滤或活性炭吸附，一般采用多介质过滤器和砂过滤二级过滤并加氯消毒来去除水中微生物。膜法预处理主要为超/微滤工艺。

（1）常规预处理。实际工程中，采用常规工艺作为反渗透预处理存在着许多问题：①工艺流程及运行维护较复杂；②出水中尚存有相当含量的微生物，容易引起反渗透膜的微生物污染，仅加氯消毒不满足反渗透膜对氯的进水要求；③处理中投加化学药剂，处理后的出水和沉淀污泥中存在残留物。

（2）膜法预处理。超/微滤膜技术作为反渗透的预处理系统，可大大减少设备占地面积，产水水质高并且水质稳定，可以延长反渗透系统的使用寿命；系统自动化控制程度高，可以降低劳动强度及运行成本，是新一代的高效预处理系统。

（3）双膜法。目前双膜法工艺“超/微滤+反渗透”已经广泛用于工业废水和市政废水的深度处理回用以及海水淡化工程。美国、新加坡及国内天津经济技术开发区、北京燕山石化等工程实践经验已经充分证明了双膜法工艺可成功应用于高品质再生水的生产。

本工程即采用“微滤+反渗透”双膜法工艺作为高品质工业再生水的生产工艺。

4　工程设计

4.1　工艺流程

工程设计的工艺流程简图见图1。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

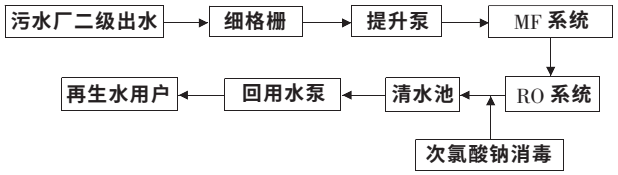


图1　工艺流程简图

4.2　微滤（MF）系统

微滤系统的进水系统由细格栅、提升水泵、自清洗过滤器和次氯酸钠投加系统组成。细格栅为倾斜安装的转鼓滤筐式格栅，格状网孔，孔径ϕ1.0 mm，格栅直径1 400 mm。自清洗过滤器过滤精度200 μm，采用吮吸式清洗方式。次氯酸钠投加装置，可去除原水中的微生物和降低有机物含量，保证微滤膜的稳定运行，其余氯含量控制在（0.2～0.5）ppm。

微滤膜采用UNA-620A型微滤膜，为PVDF材质中空纤维膜，过滤精度0.1 μm，外压式过滤。总套数为6套，每套系统含微滤膜组件92支。微滤膜设计通量为60 L/(m²·h)，产水率超过90%，其浓水将回流至前端进水系统。

微滤系统运行周期由正常过滤、气水反洗（AS/RF）、正冲（FL）、恢复正常过滤4个阶段组成。每套微滤系统每天需要进行（40～60）min的强化通量维持（EFM，Enhanced Flux Maintance），以恢复膜的过滤性能。当微滤系统的跨膜压差（TMP）超过0.15 MPa或连续运行超过2个月时，微滤膜需要进行化学在线清洗（CIP），以彻底恢复膜的过滤性能，每次CIP的时间为（8～10）h。

微滤膜在运行过程中，有可能会出现断丝现象。如果气水反洗时发现产水侧收集端，接头透明处出现连续气泡，可开启在线的膜完整性自动检测系统进行检测处理。

4.3　反渗透（RO）系统

反渗透系统由低压供水泵、紫外杀菌器、加药系统、保安过滤器、高压供水泵、反渗透主机、段间增压泵和清洗系统组成。保安过滤器直径ϕ800 mm，过滤精度为5 μm。加药系统主要投加非氧化性杀菌剂、还原剂、盐酸和阻垢剂等药剂。高压供水泵提供了克服RO第一段渗透压所需的能量，并采用变频控制以平衡温度变化及化学清洗时对膜通量的不利影响。段间增压泵的设置及部分浓水回流措施可提高二段进水流速和流量，以克服RO第二段的渗透压阻力降。

反渗透膜元件采用BW30-365FR型，为交联芳香族聚酰胺复合膜，总套数为5套，每套系统含反渗透膜壳57支。两段之间按照2:1的比例进行膜壳排列（即第1段38支，第2段19支），其中每支膜壳含8"抗污染膜元件6只。

RO系统设计膜通量为15 L/(m²·h)，反渗透系统的设计产水率超过75%，其浓水将回流至污水处理厂系统进行处理。整个生产系统的总产水率接近70%。

RO系统每台主机每天需进行1次停机产水冲洗，冲洗水取自RO冲洗水箱的反渗透产水，冲洗时间为（15～20）min。此外，反渗透系统每2个月左右需进行1次化学清洗（CIP）。

4.4　附属设施

本工程全部生产环节均由自控系统电脑进行控制，其中进水、各生产流程及出水水质受到严格的监测和控制。再生水厂的中控计算机系统，与经开污水厂中控及再生水管网水质监测控制系统均联网，可及时检测、反馈、调整再生水的生产运行，以确保再生水水量水质的稳定，保证用户用水的安全。

本工程采用污水水源热泵系统为厂区生产及生活提供采暖及制冷，有效地节约了能源。热泵系统的热源为经开污水厂二级出水，供回水系统用水为厂内生产再生水。水源热泵系统主要由热、冷源换热系统、水源热泵机组和末端系统3部分组成。

4.5　技术经济

本工程直接费用为7 100万元。工程装机容量2508 kW。预计水价约为5.0元/m³左右，低于开发区工业自来水6.0元/m³水价。

5　结论

（1）北京经济技术开发区再生水需求量超过60%为替代工业企业工艺生产水源使用，其再生水水质要求远高于常规再生水水质指标。

（2）高品质再生水采用双膜法工艺进行清洁生产，其水质中浊度、总溶解固体、总硬度、铁锰等金属含量远优于自来水水质要求，远优于景观\杂用再生水指标。不仅能满足工业企业替代生产水源，也同样可以用于城市景观河湖补水、绿地道路浇洒和冲厕使用。

（3）北京经济技术开发区再生水工程的顺利投产，是一次非常有益的工程实践。它表明“高品质再生水”这一概念在工业开发区具有完全的技术适用性、经济可行性，是可以使城市水环境管理、工业再生水用户及水务投资公司多方受益的解决方案。

（责任编辑：林跃朝）

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net