

科研成果与理论创新

超滤技术在短流程净水工艺中的应用

何寿平¹ 张国宇² 肖 峰³ 肖 萍³

(1. 中国水网 北京 100086; 2. 京金泽环境能源技术研究有限公司 北京 100101; 3. 中国科学院水资源生态环境研究中心 北京 100085)

摘 要 以浸入式超滤膜为核心的短流程净水工艺,自 2008 年问世以来受到业界的广泛关注。该工艺为净水厂建设和改造提出了一条将预处理、超滤、浓水回收、污泥浓缩、排泥等工序集合在一个构筑物中运行的全新技术路线。该文从工艺系统特点和运行机理进行多方位的分析探讨。

关键词 短流程净水工艺 预处理 浸入式超滤膜 浓水回收 系统布置

中图分类号: TU991 文献标识码: B 文章编号: 1009-0177(2014) 04-0049-06

Application of Ultrafiltration Technology on Short-Process Water Purification

He Shouping¹, Zhang Guoyu², Xiao Feng³, Xiao Ping³

(1. www.h2o-china.com, Beijing 100086, China;

2. Beijing Jinze Environmental Energy Technology Research Co., Ltd., Beijing 100101, China;

3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Science, Beijing 100085, China)

Abstract The immersed-ultrafiltration-membrane shortened-water-process has been a hot topic in water industry ever since its creation. This process offers a new technical route to combine the pretreatment, ultrafiltration, concentrated water reclamation, sludge thickening and sludge drainage into one facility, which has a broad application potential. The characteristics and mechanism of this process were discussed.

Keywords short-process water purification pretreatment immersed ultrafiltration membrane concentrated water reclamation system layout

国内外专家明确了超滤技术将为提高饮用水的生物安全性提供可靠的保障^[1-3]。李圭白院士提出了“以超滤为核心的第三代净化工艺”将使城市饮用水净化工艺产生重大变革^[4]。超滤膜在过去的几十年里得到广泛的应用和推广^[5,6]。

“以超滤技术为核心的第三代净水工艺”不是各种净水处理技术简单的叠加,而是将进入超滤原水的前处理和充分利用超滤的技术特性紧密结合起来。将前处理(包括絮凝、微污染深度处理等)、超滤、滤饼富集浓缩絮体、回收物理清洗水、排泥等集合在一个工艺系统内(简称短流程),从而实现了出水生物安全的可靠和工艺系统的泥量平衡,切实体现了“以

超滤技术为核心的第三代净水工艺”的论断^[7]。

1 短流程净水工艺

短流程净水工艺如图 1 所示。

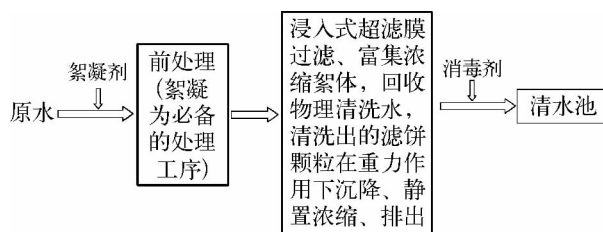


图 1 短流程净水工艺示意图

Fig. 1 Schematic of Shortened-Water-Process

2 试验

2.1 中试试验

南通芦泾水厂为适应新饮用水卫生标准的实

[收稿日期] 2013-11-27

[作者简介] 何寿平(1941—),中国水网顾问总编,研究方向为净水系统中采用超滤替代沉淀、砂滤。E-mail: 577748213@qq.com。

施拟采用超滤技术进行改造。于2008年进行了超滤净水工艺为期一年的中试。中试装置产水能力为 $1\,600\text{ m}^3/\text{d}$ 。研究内容包括同一膜池分膜单元运行的技术参数和变通量运行对膜污染的影响;工艺系统内自行消纳回收物理清洗水的可行性;絮凝水直接进膜的运行效果。

中试结果表明超滤膜可以替代常规工艺中沉淀和过滤功能,并实现自行回收物理清洗水。

2.2 生产性试验

芦泾水厂(如图2) $25\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 生产性试验改造工程于2009年启动,将原有一组斜管沉淀池按短流程进行改建。

絮凝后的水经细格栅直接进入膜池,如图3所

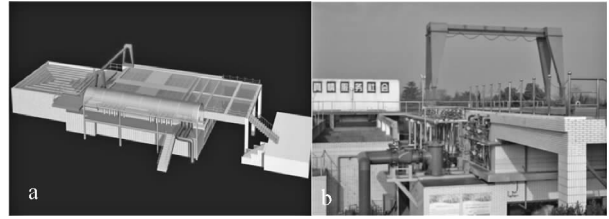
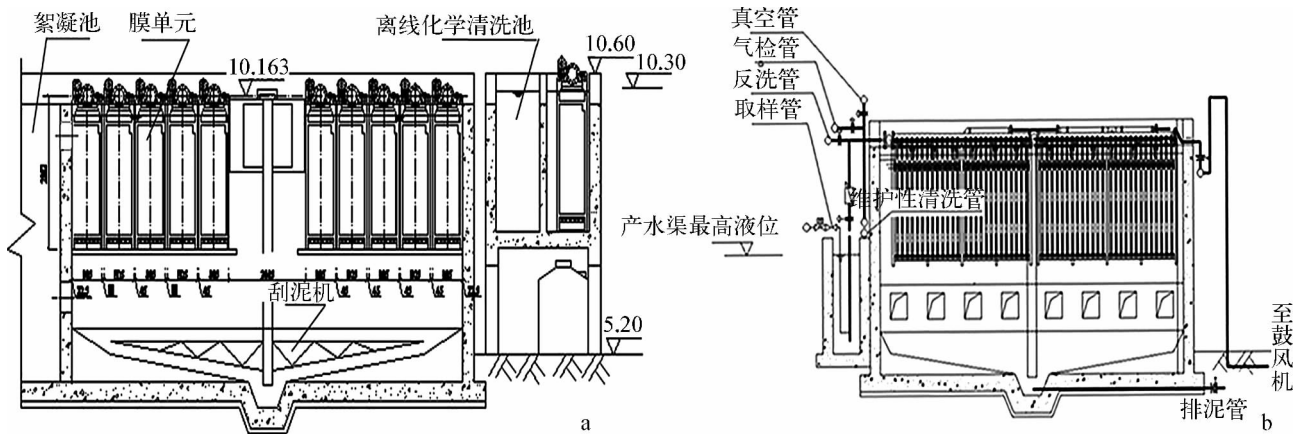


图2 芦泾水厂图

Fig. 2 Schematic of Lujing Water Treatment Plant

示。膜组件分成10个可以单独进行物理清洗的膜单元。采用均分物理清洗周期,依次对膜单元进行清洗的变通量运行。并在系统内自行回收物理清洗水。清洗出的滤饼颗粒在重力作用下沉降、浓缩后定时排出。采用离线方式对超滤膜进行恢复性化学清洗。



注: a—纵剖面; b—横剖面

图3 超滤膜池构筑物

Fig. 3 Schematic of Ultrafiltration Cell Structure

(1) 设计运行参数

10个单元的中空纤维帘式超滤膜组件。设计通量为 $30\text{ L}/\text{m}^2\cdot\text{h}$;跨膜压差控制在 3.2 m 以内(系原有工艺系统内的工作水头);物理清洗周期为 1.5 h ;物理清洗历时为 $1\sim 1.5\text{ min}$;物理清洗水强度为 $60\sim 90\text{ L}/\text{m}^2\cdot\text{h}$;清洗曝气强度为 $60\text{ L}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ (投影面积);系统排泥周期为 3.0 h ;系统产水率为98%以上(若扣除原有沉淀池的排泥水量,则超滤部分的产水率可以认为达到了100%);在线维护性清洗周期为 14 d ;离线恢复性清洗周期为 $4\sim 6$ 个月。

系统运行4年表明工艺设计达到了预期效果。出水浊度在 0.05 NTU 以下,大大提高了水质的生物安全性。停止运行闲置下来的虹吸滤池,将来拟作为突发性水质污染的应急处理构筑物。系统产水率达98%以上。由于使用低跨膜压差操作,运行费用较低,主要来自清洗药剂费用、电费和膜的折旧费

用(以5年折旧计算),项目每立方米产水比常规工艺费用仅高 0.087 元 。

(2) 运行中出现的问题

设计方案对原斜管沉淀池进行改造,保留了原有斜管沉淀池的中心传动刮泥机,因此无法将10个膜单元分别进行在线化学清洗。恢复性化学清洗只能采用离线方式进行,操作比较麻烦。

膜组件采用整体式框架结构,若发现某一膜帘断丝、密封胶泄漏,必须将整个膜组框架吊离,进行维护、维修,操作颇为困难。

3 短流程与常规工艺的比较

短流程充分利用超滤技术的特性,超滤替代了常规工艺中的沉淀和砂滤,生物安全性大为提高。与其他膜处理工艺相比,短流程节省了建设或改造费用,大大节省了占地,解决了原有水厂改造无空置

地块的问题。絮凝只要反应充分,絮体无需很大,节约了投加的混凝剂费用,也减少了泥量和降低了化学物质污染的几率。两种工艺的对比如表 1 所示。

表 1 短流程与常规工艺的对比
Tab. 1 Comparisons between Shortened-Water-process and Traditional Process

比较项目	常规工艺	短流程工艺
工艺流程	若增加超滤会更长	紧凑
微污染水处理	需前处理或后处理	需前处理或后处理(采用前处理对超滤更为有利)
沉淀处理	根据原水水质设置	膜表面富集絮体,清洗时滤饼在重力作用下沉降
过滤处理	砂滤	截留除小分子有机物、溶解性物质以外的其他颗粒
消毒处理	必须	防止二次污染,滤后投加消毒剂保持一定的余氯
出水水质	可以达到 0.1 NTU 左右	浊度低,保持在 0.05 NTU 以下,提高了生物安全性
构筑物	根据工艺分别独立设置	系统可以集中在一个构筑物内布置
回收反冲洗水	需另行设置回收设施	采用多膜单元均分周期运行,系统内自行消纳回收
占地	大	小
建设费用	增加超滤,造价更高	综合经济技术比较,与常规工艺相当或略省
运行费用	增加超滤,运行费用较高	略高,包括了按膜使用寿命更换膜的分摊费用

4 短流程的系统特点

絮凝水直接进行超滤,超滤膜承担了过滤和在膜表面富集浓缩絮体的双重功能,在一定条件下替代了常规工艺中的沉淀和砂滤,并大大提高了出水水质的生物安全性。

絮凝水直接进行超滤,絮凝阶段只要有清晰界面的絮体即可,絮体的成长则通过膜表面的富集浓缩,使之形成较原有絮体更大的滤饼,清洗后在重力作用下沉降。

采用低通量、低跨膜压差的运行方式,无需额外增设提升泵,节约能耗,更适用于对原有水厂净水工艺的改造。如对原有水厂工艺采用超滤技术进行改造时,可以充分利用沉淀池与清水池的水位差(一般情况下在 3.0 m 左右)。超滤膜产水仅靠系统中原有的水头即可运行,这样可以避免使用提升泵或抽吸泵来提高运行水头,在保证产水量的前提下节约能耗。

采用在同一跨膜压差的膜系统内多膜单元并列运行,均分物理性清洗周期的变通量运行方式。基

本恒定对超滤膜的渗透压,减轻了对膜的深度污染,保证了超滤膜抗污染性能的稳定。

在多单元的处理系统内,某膜单元物理清洗出带滤饼颗粒的反洗水,通过正在运行的其他膜单元予以回收,大大提高了系统产水率。

膜表面富集絮体形成的滤饼清洗脱离膜表面后,在较为平稳的水流环境下,通过重力作用沉降到污泥浓缩区加以排除,从而完成了短流程膜系统内进出泥量的平衡,确保了膜池在物理清洗过程中不会出现“浓水”,使整个工艺系统得以长时间稳定运行。

5 短流程的运行机理

沉淀水或滤后水已经将原水中的绝大部分颗粒去除,沉淀水或滤后水进膜的颗粒数量确实少了很多,膜运行所承受的负担应该较轻。而絮凝水絮体较多,经膜过滤会不会给超滤膜的运行带来沉重的泥量负担?

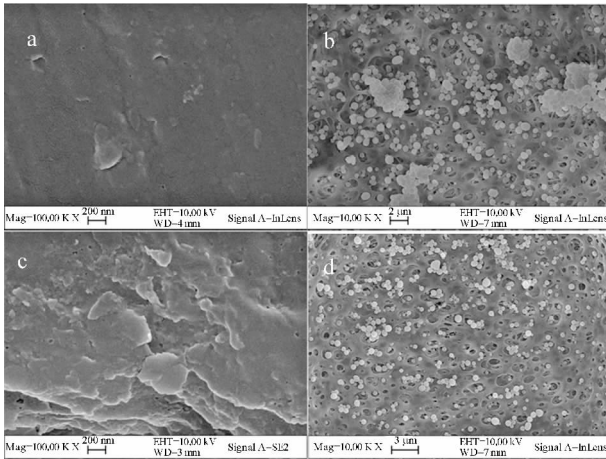
就实际情况而言,以滤后水为例,虽已去除了绝大多数的颗粒,但留存的细微颗粒运行中在膜表面会形成较薄且密实的滤饼层,增加了继续过滤的阻力,需增加跨膜压差,或降低膜的通量,将会缩短运行周期。物理清洗后,细微的颗粒分散在水中,无法自行下沉,则会形成“浓水”,不利于继续正常运行,只能排除。

通过试验和实践证明,絮凝水的絮体具有活性,即使浊度较高,只要充分反应(形成的絮体不一定很大),超滤过程中水被滤过,而具有一定透水性的絮体全部被截留在膜的表面形成滤饼层。保持一定活性的滤饼层可以吸附后续的絮体,形成更为厚重的滤饼,相比之下,絮体进膜的运行周期得以延长。这与絮凝过程必须通过颗粒相互碰撞使絮体不断成长的机理出现了不一样的后期滤膜“富集浓缩絮体”的过程,从而保证了清洗下来的滤饼颗粒“大而重”,具有良好沉降特性。因此,短流程絮凝水进膜运行,整个系统只排“泥”,不排水,实现了进出泥量的平衡。由于膜池内不产生“浓水”,所以工艺系统能够得以长时间的稳定运行。

5.1 短流程运行的絮体进膜的机理

利用扫描电镜对两种工艺的膜表面和截面进行了分析,如图 4 所示。

砂滤水进膜,残留的细微颗粒很小也很少。这些细微颗粒被膜截留,在膜的表面形成较薄但又较为密实的滤饼层,细微颗粒进入膜断面内引起深层污染。物理清洗出的细微颗粒分散且稳定,悬浮在水中无法靠重力作用下沉,形成了“浓水”^[7-8]。若



注: a—表面; b—截面; 短流程超滤膜; c—表面; d—截面

图 4 膜表面和截面照片

Fig. 4 SEM Analysis of Surface and Cross-Section Membrane

不排除,膜池内水体中的颗粒将会不断增加而无法继续运行。

絮凝水中的絮体全都被浸入式中空纤维超滤膜截留在膜丝表面,形成具有一定透水特性的滤饼层。保持活性的滤饼层凝聚吸附后续的絮体,形成较为厚重的滤饼。物理清洗时,滤饼从膜表面脱落,在重力作用下沉降^[7-9]。图 5 为短流程膜在不同阶段的实物照片。由图 5 可知运行中膜池水面清澈,而物理清洗时水面较浑浊,清洗结束池内显现出比进水絮体大的絮体颗粒能够很快下沉,膜池内水浊度下降。



注: a—运行中; b—物理清洗时; c—清洗结束

图 5 短流程运行中膜池

Fig. 5 Membrane Module in Shortened-Water-Process

人们对絮体结构与滤饼阻力的关系已经形成了一定的认识,以 Guan 等^[10]提出的改进的 Carman-Kozeny 方程如下:

$$\alpha_c \propto \frac{1}{(d_a/d_p)^{3-dF} \times (1 - (d_a/d_p)^{dF-3})^3} \quad (1)$$

滤饼比阻抗(α_c)理论上会随着絮体分形维数(dF)的增大而增加,随着絮体粒径(d_a)的增大而减小。Choi 等^[11]研究发现高腐殖质含量地表水混凝所形成的絮体,具有较低絮凝指数 FI 值,较高的分形维数 dF ,较小的絮体粒径,同时较低腐殖酸含量水混凝所形成的絮体,其所形成的滤饼比阻抗更高,也更易压缩。Barbot 等^[12]报道称絮体抗剪切的能力越强,相应的膜通量也越大,这也是絮体进膜物理清洗周期较长的原因。

5.2 短流程运行的泥量平衡机理

超滤属物理筛滤,沉淀、过滤后的水所存留的细微颗粒,经膜处理被截留下来,在膜表面形成较薄且密实的滤饼层,物理清洗后则会增加膜进水侧的悬浮固体浓度。该浓度以体积浓度因子 V_{CF} 表示(如式(2)),即膜进水侧悬浮固体浓度与膜过滤进水悬浮固体浓度的比率^[13]。常规膜处理工艺若不排除“浓水”, V_{CF} 会随着物理清洗次数增加越来越高,将使整个系统难以为继。

$$V_{CF} = C_m / C_f \quad (2)$$

其中 V_{CF} ——体积浓度因子(无量纲);

C_m ——膜进水侧悬浮固体浓度(数量或质量/体积);

C_f ——膜系统进水的悬浮固体浓度(数量或质量/体积)。

短流程运行中,在膜过滤和膜表面富集絮体的双重作用下,物理清洗下来的滤饼颗粒大且易于沉降。清洗后绝大部分的颗粒会以比原来“絮体”还要大的形态出现在水中,在相对静止的状态下沉降到污泥区,浓缩后排除。少量破碎了的颗粒在超滤回收过程中被其他膜表面的滤饼层吸附。此时系统内的 V_{CF} 保持在略大于 1。整个系统排除的泥量相当于原水进入膜池的泥量(悬浮颗粒总量),从而完成了在膜系统内进出泥量的平衡,因此不会因膜单元的反反复复进行物理清洗并在自行消纳回收物理清洗水的情况下出现“浓水”。

5.3 短流程的变通量运行

采用同一跨膜压差下,均分物理清洗周期,属变通量方式运行,如图 6 所示。运行中膜的渗透压在较小的范围内波动,有利于减轻膜的深层污染。

6 短流程的应用要点

采用低跨膜压差、大通量,具有良好抗污性能的超滤膜,有利于延长运行周期。

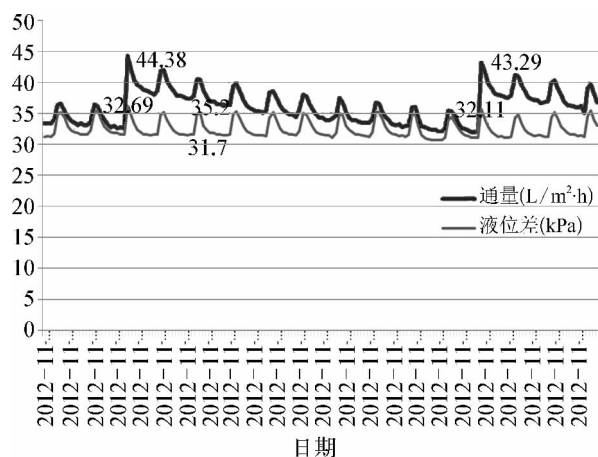


图6 短流程变通量运行膜通量与跨膜压差的对应曲线

Fig. 6 Relationship between Flux and TMP under Variation Flux Operation

应根据原水水质和超滤膜性能,通过试验获取设计和运行参数,并提出与之相适应的前处理方案。

絮凝系短流程前处理的必备手段。絮体的大小对膜过滤并不重要,只要水中的界面清晰具有一定的活性即可,可以节约混凝剂的耗用,减轻化学物质的污染。

短流程采用多膜格、多膜单元在同一跨膜压差下并列变通量运行,能够有效地缓解物理清洗及回收清洗水对膜系统处理水量负荷的冲击。

膜系统进水及物理清洗时,应尽可能防止在膜组件和膜池内产生剧烈紊流,以免影响物理清洗出来泥饼颗粒的沉降。

为防止漂浮物和杂物进入膜池,在絮凝池出口需设置普通除污格栅。

管路系统设计应尽量降低沿程和局部水头损失,以节约运行能耗。

考虑到运行温度对超滤膜通量的影响,在水厂系统设计时可考虑采用调整清水池的水位来变化跨膜压差,满足产水量的要求,并节约能耗。

短流程可以直接在工艺系统内自行消纳回收物理清洗水,提高系统产水率,省却了额外设置的回用设施。

7 短流程的运行

由于超滤属物理筛分,去除不了小分子和溶解性物质,因此应根据对原水水质试验的结果,采取针对超滤膜特性的前处理手段(包括絮凝、生化处理、氧化、活性炭吸附等等)尤为重要。

当膜系统装置的硬件固化以后,运行管理(软件)则变得极为重要,所以必须根据实际运行效果,

不断探索、优化运行参数。

当进水量产生较大波动时,应自动根据膜池水位调整物理清洗周期,防止出现膜池溢流或水位降低,将膜丝露出水面。

研究探讨提高物理清洗和维护性化学清洗效果,尽可能延长恢复性化学清洗的周期,可以减轻恢复性化学清洗过程中高浓度清洗药剂对膜的损伤,以延长超滤膜的使用寿命。

物理清洗时应注意避免已经脱离膜表面的滤饼颗粒受到剧烈冲击。虽然一些被冲散的滤饼颗粒可以通过与源源不断进入的絮体进行二次絮凝,或被膜表面的仍具活性的滤饼层吸附,但仍应通过调整物理清洗参数,尽可能地减少此类现象的发生。

8 短流程应用中的问题及思考

浸没式帘子膜组件在短流程应用中,膜帘下方的死角易产生积泥现象。采用膜丝上方单向出水,膜丝下方为自由端的柱状膜元件,可以有效防止膜间积泥,如图7所示。



图7 柱状膜组件

Fig. 7 Module of the columnar membrane

整体组装的膜箱如出现膜断丝或封胶问题,需将膜箱整体吊出进行维护或维修,操作较为麻烦。若对膜系统和膜单元进行整合优化设计,既保持膜系统在同一跨膜压差下分单元运行,又可以对出现问题的膜元件,定向在小范围内进行拆卸、维护和维修,不会对系统运行产生大的影响,将有利于运行管理。

化学清洗(包括维护性清洗和恢复性清洗)采用离线清洗操作工作量大,拆卸、起吊均比较麻烦。在线清洗可以实现自动控制操作,(下转第83页)

参考文献

- [1] 中国铝业股份有限公司青海分公司[J]. 中国经贸导刊, 2005, 22(22): 57.
- [2] 洪奎. 西宁也有一个“青铝”[J]. 中国发明与专利, 2005, 2(7): 34-35.
- [3] 海星铝业 5.5 万 t/年电解铝工程进展顺利[J]. 电器工业, 2001, 2(2): 49.
- [4] 张志超, 杨建平, 李得福. 铝用炭阳极企业的环境保护[J]. 炭素技术, 2009, 28(1): 61-6.
- [5] 谢曦. 炼铝用炭阳极生产环境治理技术研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2003.
- [6] 文公. 活性炭性能表示[J]. 净水技术, 1989, 8(2): 41-43.

(上接第 53 页) 运行管理较为方便,但系统内所有的膜格必须进行全方位的防腐处理,需分别对各个膜格配置全套的化学清洗管道和阀门,且清洗药剂消耗量较离线清洗大。

目前超滤膜的完整性检测较为麻烦。采用间接检测产水浊度、水中颗粒数及直接气检相结合的方法实现自动检测,并提供图像定位,能够迅速对出现损伤的膜元件进行维修,将会大大提高运行管理水平和工作效率。

9 结语

超滤作为第三代净水工艺的核心技术,是净水工艺的进步,为水质的生物安全可靠提供了保障。

短流程是超滤技术在净水工艺应用方面的创新。在一定条件下替代了沉淀、砂滤,并在工艺系统内自行回收物理清洗水,是一条体现第三代净水工艺的新型技术路线。

短流程的应用虽然取得了一些成果,仍需不断地深入探讨,特别是针对超滤的前处理技术的研究,去除原水中的小分子有机物,提高超滤的抗污性能尤为重要!

参考文献

- [1] 安树林. 膜科学技术实用教程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

- [7] 李秀辉, 于海波. 活性炭吸附水中污染物[J]. 广州化工, 2011, 39(1): 117-8, 33.
- [8] 赵静. 浅谈活性炭的研究现状及趋势[J]. 黑龙江科技信息, 2012, 6(20): 100.
- [9] 李勇. 为了蓝天为了白云为了碧水——中国铝业青海分公司节能减排初见成效[J]. 有色冶金节能, 2009, 25(2): 6-8.
- [10] 伏洋, 张国胜, 颜亮东, 等. 青海省农业结构调整与发展循环经济的途径[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(27): 13267-13270.
- [11] 杨春英, 宋慧明. 青海转变工业发展方式的现状及路径选择[J]. 柴达木开发研究, 2011, 25(6): 26-8.
- [12] 朱永松, 刘西江, 周觉程. 试论青海省铝工业发展环境及发展思路[J]. 攀登, 2007, 26(4): 93-6.

- [2] Judd S J, Jefferson B. Membranes for industrial wastewater recovery and reuse[D]. UK: Cranfield University, 2003.
- [3] 郑伟青. 膜分离技术在给水处理中的应用[C]. 2010 年全国给水排水技术信息网年会论文集, 2010.
- [4] 李圭白, 杨艳玲. 第三代城市饮用水净化工艺——超滤为核心技术的组合工艺[J]. 给水排水, 2007, 34(4): 1.
- [5] 闫昭辉, 董秉直. 混凝/超滤处理微污染原水的试验研究[J]. 净水技术, 2005, 24(6): 4-6.
- [6] 罗敏. 浸没式超滤膜在大型水厂的应用[J]. 给水排水, 2009, 35(12): 17-22.
- [7] 何寿平, 张国宇. 以浸没式超滤膜为核心的短流程净水工艺的应用与思考[J]. 给水排水, 37(1): 27-33.
- [8] 董秉直, 陈艳, 高乃云, 等. 混凝对膜污染的防止作用[J]. 环境科学, 2005, 30(1): 90-93.
- [9] Jaewoon Cho, Gary Amy, John Pellegrino. Membrane filtration of natural organic matter: factors and mechanisms affecting rejection and flux decline with charged ultrafiltration (UF) membrane[J]. Journal of Membrane Science, 2000, 164: 89-110.
- [10] Guan J, Amal R, Waite T. Effect of aggregate size and structure on specific resistance of biosolids filter cakes[J]. Water Science and Technology, 2001, 44(10): 215-220.
- [11] Choi Y H, Kim H S, Kweon J H. Role of hydrophobic natural organic matter flocs on the fouling in coagulation-membrane processes[J]. Separation and Purification Technology, 2008, 62(3): 529-534.
- [12] Barbot E, Moustier S, Bottero J Y, et al. Coagulation and ultrafiltration: Understanding of the key parameters of the hybrid process[J]. Journal of Membrane Science, 2008, 325(2): 520-527.
- [13] 王学松. 现代膜技术及其应用指南[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.