

文章编号:1674 - 991X(2011) 04 - 0359 - 06

中水回用于循环冷却系统的影响因素与对策研究

殷勤 , 年跃刚* , 闫海红 , 雪梅 , 颜亚玮

中国环境科学研究院 北京 100012

摘 要:综述了国内外中水回用于循环冷却系统的现状,分析了在中水回用过程中浊度、有机物、氯离子、氨氮、硫酸根对系统腐蚀的机理,归纳了中水回用于循环冷却系统的深度处理方法,比较了各处理方法的应用条件以及建设和运行成本,讨论了各影响因子的相关标准与浓度限值,阐明了中水作为循环冷却系统补充水的应用前景。

关键词:中水回用;循环冷却系统;影响因素;腐蚀

中图分类号:X703 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1674-991X.2011.04.061

Research on the Affecting Factors and Countermeasures of Regenerated Water Reused for Circulating Cooling System

YIN Qin , NIAN Yue-gang , YAN Hai-hong , XUE Mei , XIE Ya-wei

Chinese Research Academy of Environmental Sciences , Beijing 100012 , China

Abstract: The current status of regenerated water reuse for circulating cooling system both at home and abroad was reviewed. The mechanisms of corrosion in this process due to turbidity , organism , ammonia-nitrogen , chloride ions and sulfate radical were analyzed. Deep treatment methods for the regenerated water reused for circulating cooling system were concluded , and the applicable conditions , construction cost and operation cost of different methods compared. Finally , related standards and concentration limits of various impact factors were discussed and the broad application prospect of regenerated water reused for circulating cooling system expounded.

Key words: reuse of regenerated water; circulating cooling system; affecting factors; corrosion

随着新鲜水资源的日益短缺,中水被认为是一种重要的非饮用水资源而逐渐应用到工业领域中。工业领域是用水大户,其中循环冷却用水占有很大比重,中水代替新鲜水回用于循环冷却系统是缓解我国水资源短缺、提高我国用水效率的一个重要举措。目前我国已有较多企业开始采用中水作为循环冷却系统的补充水,并取得了初步成效,获得了环境效益和经济效益的双赢。

1 中水回用于循环冷却系统的应用现状

1.1 国外应用现状

工业循环冷却水是各国中水回用方面的研究重

点,其中美国、日本、南非等国在该领域的研究水平处于世界领先行列。

美国将城市污水回用于循环冷却水开始于 20 世纪 30 年代,目前很多电厂均用中水代替新鲜水作为循环系统的补充水,尤其是在美国西南部地区,其利用方式是将一部分中水与新鲜水混合后回用,或者将其经进一步处理到更优的水质直接回用,以确保循环冷却系统的安全运行^[1]。

日本在中水回用于循环冷却系统方面的研究也起步较早,中水水源大部分取自城市污水厂,规模较大的有东京污水处理厂、名古屋污水处理厂和川崎污水处理厂中水回用项目,处理规模分别为 4 万,

收稿日期:2011 - 04 - 08

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07208 - 006 - 02)

作者简介:殷勤(1980—),女,助理研究员,硕士, yinqin@ craes. org. cn

* 责任作者:年跃刚(1963—),男,研究员,博士,主要研究生态修复、中水回用, nianyg@ craes. org. cn

1.4 万和 2 万 t/d^[2]。

南非在中水回用方面是很多国家的典范,如约翰内斯堡的奥兰多电站,凯尔文 A、B 电站等,都使用经过二级处理的城市污水作为循环冷却系统的补充水^[3]。

此外,英国、以色列等很多国家也相继开展中水回用于循环冷却系统的研究并建设了回用工程,取

得良好效果。

1.2 国内应用现状

我国的中水回用建设虽然起步较晚,但随着研究的深入和对国外成功经验的借鉴,中水回用于循环冷却系统的工程也相继建立起来,部分中水回用工程实例见表 1^[4-6]。

应用于循环冷却系统的再生水不仅限于城市污

表 1 国内部分城市中水回用工程实例^[4-6]
Table 1 The instance of urban water reuse projects

工程	规模/ (万 m ³ /d)	工艺	目标
北京高碑店污水处理厂	30	消毒过滤	城市回用及热电厂冷却
天津开发区中水集中处理	—	—	天津滨海热电厂冷却
天津市纪庄子污水处理厂	—	连续微滤	天津陈塘庄热电厂冷却
太原杨家堡污水处理厂	2.4	生物接触氧化、过滤消毒	工业用水及冷却
青岛海泊河中水回用工程	1	—	工业冷却及城市杂用
西安西郊污水处理厂	6	絮凝、过滤消毒	工业冷却、绿化
河北邯郸回用水工程	6	—	电厂冷却
泰安污水处理厂	2	砂滤、消毒	工业、景观
浙能长兴发电有限公司 城市中水综合利用工程	3	曝气生物流化池(ABFT) + 机械搅拌澄清池	冷却用水
淮北市中水回用工程	9	微絮凝/UF(RO) / 消毒工艺	淮北市大唐虎山发电厂冷却、 城市景观、杂用

水,企业自身排放水经过深度处理后回用的应用实例也很多,如北京华能热电厂、大庆油田采油厂、克拉玛依采油厂、燕山石化等很多工业企业内均已建成了用于循环冷却系统的中水回用工程。

2 中水回用于循环冷却系统的影响因素

中水作为补充水回用于循环冷却系统时,氨氮、有机物、氯离子、硫酸根、浊度是引起腐蚀的主要因素,笔者重点研究和分析这 5 项指标。

2.1 氨氮

氨氮对系统的影响主要有以下几方面: 1) 对于铜材质换热器,氨能够在系统内与铜发生电化学反应。阳极反应生成铜氨络离子, $\text{Cu} + 4\text{NH}_3 \rightarrow [\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+} + 2\text{e}^-$; 阴极发生溶解氧的还原, $1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$ ^[7]。2) 氨氮在冷却塔内与外界接触的过程中发生硝化反应,硝化细菌大量滋生,引起系统腐蚀。3) 氨氮本身的存在会降低含氯杀菌剂的杀菌效果,加剧系统换热器的腐蚀程度^[8]。4) 氨氮含量较高时,会与水中碳酸根和碳酸

氢根反应,并且伴随塔内游离氨的挥发,使水中碱度和 pH 减低,导致系统腐蚀^[9-10]。

进入冷却系统的补充水氨氮含量较高时会因条件不同而产生不同的结果,氨氮在一定条件下会发生脱氮反应,高浓度的氨氮在冷却塔中会发生吹脱。当 pH、温度、碱度适宜时,这种脱氮反应会很充分,冷却系统中氨氮浓度迅速降低^[11-12],可避免对换热器的腐蚀。当条件不适宜,如北方寒冷地区冬季温度较低时,脱氮反应不充分,容易导致冷却系统的腐蚀。另外,调整循环冷却水的碱度和 pH,对保障脱氮反应也是非常必要的。

2.2 有机物

有机物浓度较高时,会促进微生物的滋生,所以有机物引起的腐蚀实际上就是微生物腐蚀,微生物腐蚀机理主要分为以下 3 个方面^[13]: 1) 微生物的代谢产物引起金属腐蚀,如硫细菌和亚硝化杆菌能够利用溶解氧将硫化物和氨氧化成硫酸和硝酸,使局部 pH 降到 1.0~1.4,直接腐蚀金属; 2) 由微生物的代谢作用引起氧和其他化合物的消耗,形成浓差电

池、缺氧区的金属表面成为阳极,发生金属的溶解导致腐蚀;3) 阴极去极化作用,如在缺氧条件下,含有氢化酶的硫酸盐还原菌可以从铁的阴极表面除掉氢原子,并利用它使硫酸盐还原,促进阳极金属溶解。

严格控制有机物的含量是抑制微生物大量繁殖,降低腐蚀程度的有效措施。

2.3 氯离子

对于不锈钢材质换热器,氯离子是诱发换热器点蚀的重要因子,若金属材料的残余应力未消除或有较高温度时,氯离子的存在就会造成应力腐蚀开裂。

鲍其霖^[14]认为,点蚀的发生是由于 MnS 包裹体的存在,而 MnS 是不锈钢生产中不可避免的产物,MnS 在不确定的情况下生成富硫的硬壳而附着于不锈钢原始凹穴表面,为氯离子提供了腐蚀场所。

Ryan 等^[15]在 2002 年提出了氯离子对不锈钢的腐蚀机理: MnS 包裹体使周围的不锈钢组分发生变化,紧靠 MnS 包裹体的贫铬区发生腐蚀形成一圈窄的沟槽(宽 200~400 nm),当氯离子大量存在时,它会进入沟槽维持电荷平衡,金属氯化物水解导致沟槽内的局部酸化,诱发腐蚀。

2.4 硫酸根

硫酸根对循环冷却系统的直接影响不大,为氯离子的 1/10,但其影响不容忽视。硫酸根对循环冷却系统的影响体现在以下 3 个方面^[16]: 1) 硫酸根吸附在金属表面的钝化膜上,引起钝化膜的去极化作用,导致腐蚀; 2) 硫酸根浓度较高时,能够与水中 Ca^{2+} 结合,生成 CaSO_4 沉积在金属表面,引起垢下腐蚀; 3) 硫酸根有利于硫酸盐还原菌的生长,促进腐蚀的发生。

研究表明,含氧阴离子对不锈钢有一定的缓蚀作用,通常在有氯离子存在的情况下,硫酸根的作用可用竞争吸附学说解释,即在阳极极化电位下,这些阴离子在金属氧化物表面发生竞争性吸附,置换出表面的氯离子而使点蚀受到抑制^[17]。但这一点只有在氯离子含量低,硫酸根离子含量高时才能成立。

2.5 浊度

浊度是判断循环冷却系统水质状况的重要指标,循环水系统中如果浊度较大,则水中的悬浮物会降低水的流速,逐渐形成沉积,降低换热器的传热效率,严重时还会堵塞管道,同时会引起沉积物下金属氧浓差电池腐蚀,加快局部腐蚀^[18]。若浊度过大,还会吸附药剂,降低缓蚀阻垢剂及杀菌剂的效果,引

起系统腐蚀^[19]。

3 中水回用于循环冷却系统的深度处理方法

中水不同于新鲜水,在应用过程中要考虑到各指标是否满足回用要求,尤其对于上述 5 项关键因子更要严格控制,目前中水回用于循环冷却系统的深度处理方法总体可以分为石灰混凝沉淀法、生物处理法和膜处理法 3 类。

3.1 石灰混凝沉淀法

石灰混凝沉淀法可以有效去除水中的硫酸根离子、有机物及浊度,同时可以降低中水的硬度,减少水中的微生物和细菌含量^[20],避免微生物腐蚀,但对氨氮去除效果一般^[21]。国外的应用实例证明,石灰法可以满足电厂循环冷却系统补水水质要求^[22],我国采用石灰法处理的中水在火电厂领域应用越来越多^[23]。如徐塘发电有限责任公司所需中水来源于邳州市城北污水处理厂,其中一期工程 2 万 m^3/d 的中水全部回用于循环冷却系统^[20]。还有山西古交电厂、山西侯马电厂、山东邹县电厂、山东潍坊电厂等^[23]均采用石灰法处理中水回用作循环冷却水。

虽然石灰法的处理成本较低,但是也有其不足的一面,如对无机盐离子的去除效果较差,结垢腐蚀倾向较大,运行维护人员在处理堵塞等问题时的工作强度大等。

3.2 生物处理法

中水深度处理方法以曝气生物滤池、生物接触氧化法居多,生物处理法一般都是用来处理城市污水厂二级出水,处理后用作工业冷却。

生物处理方法不能满足回用要求时,一般后续可经过砂滤或活性炭吸附法进一步去除污染物,如石化企业废水含油量、悬浮物、硫化物和挥发酚浓度较高,活性炭具有发达的微孔结构和巨大的比表面积,具有良好的吸附性能,对色度、悬浮物以及有机物和某些无机物都能很好地去除^[24-26]。

生物处理法技术成熟,但是也有一定的局限性,如对污水中的盐类物质去除能力不佳,因此针对含盐量高的污水不能单纯采用生物处理法,应结合其他工艺以满足回用要求。

3.3 膜处理法

膜技术的开发是对以往传统生物处理方式的突破,它以物理的形式将污染物截留,使出水水质得到很大程度的提升。对含盐量较高的中水,选择膜处

理法在技术上是可行的。在中水回用于循环冷却系统方面的应用以微滤、超滤和反渗透居多。

微滤的过滤精度相对较低,约为 0.025 ~ 10 μm ,可以截留水中大部分悬浮物、胶体和细菌,出水效果稳定^[27]。目前采用微滤技术处理污水厂二级出水的工程在国内外均有应用,如我国在天津纪庄子污水处理厂和天津开发区污水处理厂就是采用微滤技术作为中水回用于循环冷却系统的深度处理工艺^[5]。

超滤的过滤精度为 0.001 ~ 0.2 μm ,可截留胶体、大分子有机物、油脂、病菌、悬浮物等^[28]。超滤出水水质稳定。淮北市污水处理厂中水回用工程采用超滤作为深度处理工艺,出水回用作循环冷却水,满足回用要求^[29]。

近几年应用较多的膜生物处理工艺就是将超滤膜组件与生物反应器相结合,其处理效果好,出水水质稳定^[30-34]。如呼和浩特市金桥电厂采用膜生物反应器(MBR)深度处理城市中水,处理规模为 3 万 m^3/d ,是世界较大规模的膜生物反应器再生水厂之一。经过 1 年多的运行,获得较优质的电厂再生水,为同类企业的中水回用提供了技术支持,也为其他

领域提供了借鉴^[35]。

反渗透是利用外压使渗透过程向相反的方向进行,反渗透工艺可以将污水水质处理到优于地下水,出水可以用作锅炉用水和生产工艺用水。但该技术污水处理领域没有大范围的推广,主要是因为反渗透的成本仍然较高^[36-39],因此在中水回用于循环冷却系统方面应用不多,一般是对冷却系统所排污水进行处理再回用到冷却系统,该类污水排放量少,处理成本及维护操作方面容易被企业接受。

反渗透工艺可以满足严格的水质要求,但反渗透对进水要求也比较严格,一般需要结合超滤形成双膜,但目前在我国很少采用双膜法处理循环冷却系统补水,原因仍是成本和维护的问题不能得到认可,还有待技术的进一步提高,降低成本和维护难度。据文献介绍^[40],科威特建立了 17 418 m^3/h 的反渗透装置用于污水回用,为反渗透的应用和推广奠定了良好的基础。

石灰混凝沉淀法、生物处理法和膜处理法均有其各自的特点和适用性,笔者针对污染物的去除能力、维护难度以及投资和运行成本进行了对比,结果见表 2。

表 2 3 种工艺方法的比较
Table 2 The comparison of three wastewater treatment techniques

项目	石灰混凝沉淀法	生物处理法	膜处理法
去除的污染物	浊度、有机物、硫酸根、氨氮	有机物、氨氮、浊度	微滤(MBR): 有机物、氨氮、浊度 反渗透: 有机物、氨氮、浊度、硫酸根、氯离子
维护难度	大	小	小
耗材更换频率	低	低	高
占地面积	大	小	小
建设成本	低	低	高
运行成本	较高	低	较高

4 我国现行的中水回用标准及规范

我国出台的中水回用于循环冷却系统的相关标准和规范包括: GB/T 19923—2005《城市污水再生利用 工业用水水质》,GB 50050—2007《工业循环冷却水处理设计规范》,GB/T 50335—2002《污水再生利用工程设计规范》,HG/T 3923—2007《循环冷却水用再生水水质标准》,这 4 个标准(规范)中均有对补充水的规定,针对腐蚀影响较大的指标进行对比

发现(表 3),最新出台的 GB 50050—2007 相对严格。

由表 3 可知,BOD₅ 最高限值为 5 ~ 10 mg/L ,COD_{Cr} 最高限值为 30 ~ 80 mg/L ,COD_{Cr} 范围较宽,更说明了控制有机物浓度的意义在于抑制水中微生物的生长,因此控制 BOD₅ 更为重要。另外,虞启义等^[41]通过动态模拟试验得出,循环水在浓缩的过程中,COD_{Cr} 变化不大,控制补充水中 COD_{Cr} 可以适当放开到循环水的指标范围内。

表 3 中水回用于循环冷却系统主要水质指标

Table 3 The quality standards of regenerated water reusing as circulation cooling water

指标	GB/T 19923—2005	HG/T 3923—2007	GB/T 50335—2002	GB 50050—2007
浊度/NTU	5	10	5	5
BOD ₅ /(mg/L)	10	5	10	5
COD _{Cr} /(mg/L)	60	80	60	30
氯离子浓度/(mg/L)	250	500	250	250
氨氮浓度/(mg/L,以 N 计)	10 ¹⁾	15	10 ¹⁾	5

1) 当敞开式循环冷却水系统换热器为铜质时,循环冷却系统中循环水的氨氮浓度应小于 1 mg/L。

表 3 显示,补充水氯离子浓度为 250 ~ 500 mg/L,若浓度倍数控制在 3 时,系统内氯离子浓度为 750 ~ 1 500 mg/L。这与通过试验确定的氯离子浓度限值有着很大差别:苟晓东等^[42]建议补充水中氯离子浓度应该控制在 100 mg/L 以下;张颢等^[19]认为,氯离子浓度为 1 500 mg/L 时,腐蚀速率仍增加

缓慢。通过氯离子腐蚀试验发现,在氯离子浓度为 1 000 mg/L,扫描电镜放大 4 000 倍的条件下,可以观察到挂片表面已经出现了明显的点蚀(图 1)。因此,若浓缩倍数控制在 3 ~ 5 时,补充水的氯离子浓度在 250 mg/L 以下是非常必要的。

由表 3 可见,氨氮浓度建议控制在 5 ~ 15 mg/L。

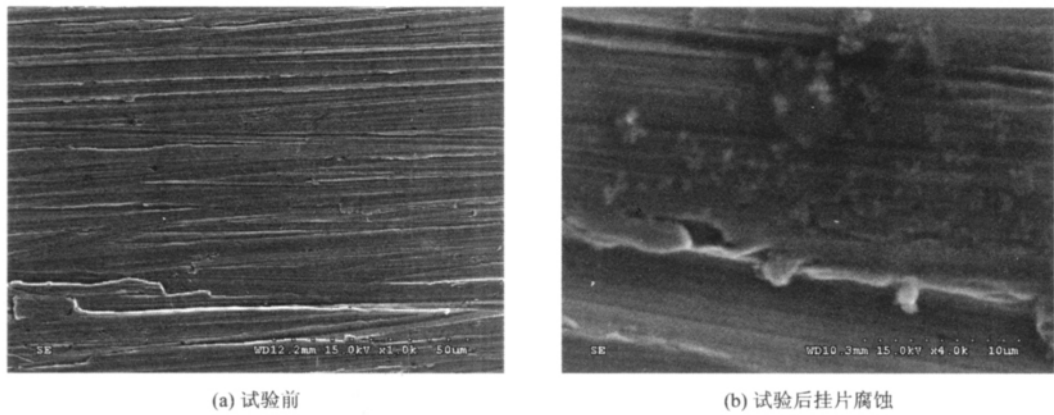


图 1 试验前后不锈钢挂片电镜观察

Fig. 1 SEM micrographs of stainless steel before-and-after test

虽然补充水中高浓度的氨氮可在一定条件下发生吹脱,但是调整 pH 和碱度同时维持适宜的温度并不十分容易,因此采用前端处理降低氨氮的浓度是有必要的,若要控制系统浓缩倍数为 5,则补充水中氨氮的浓度以小于 5 mg/L 为宜。

5 结语

由于我国新鲜水资源的日益短缺,更加凸显了中水回用的重要意义,循环冷却用水量占工业用水总量的 50% ~ 80%,如果能将中水回用于循环冷却系统这一环节,将是缓解我国水危机、提高用水效率的一个重要举措。

中水回用于循环冷却系统工程的建设已取得初

步成效,但中水回用仍是未来节水减排工作的重点,是未来的发展趋势,应该继续对中水回用技术进行深入的理论研究,同时也要进一步创新工艺,使中水回用的适用性和经济性得到有力结合。

参考文献

[1] LI H, HSIEH M K, CHIEN S H, et al. Control of mineral scale deposition in cooling systems using secondary-treated municipal wastewater[J]. Water Res 2011 45: 748-760.

[2] 肖锦. 城市污水处理及回用技术[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社 2002: 281-331.

[3] 张玉忠. 城市污水回用于工业循环冷却水的研究[D]. 天津: 天津大学 2005.

[4] 商永鑫, 刘光华, 李映川. 中水回用循环冷却水系统现场应用[J]. 工业水处理 2005 25(12): 70-72.

- [5] 高轩, 吴智泉. 中水回用于火电厂循环冷却水的现状和经济性研究[J]. 能源技术经济 2010 22(9): 14-21.
- [6] 鲁欣南, 章春生. 城市中水回用于火电厂循环冷却水系统的应用研究[J]. 能源环境保护 2010 24(2): 42-44.
- [7] 林根仙, 何蓉, 郭俊文. 氨氮对循环冷却水系统的危害与对策[J]. 工业水处理 2006 26(5): 82-84.
- [8] 武红霞, 刘裕明. 氨氮对城市污水回用于循环冷却水系统的影响[J]. 工业水处理 2004 24(10): 30-32.
- [9] 姜琳, 郝和生, 王崇, 等. 含氨氮污水回用于循环冷却水的技术[J]. 工业水处理 2007 27(4): 28-30.
- [10] 王建敏, 王丽波. 循环水系统碱度降低的原因分析[J]. 工业水处理 2010 30(8): 78-79.
- [11] 曹国凭, 陈北秦, 张树德, 等. 用中水做电厂补充水的冷却塔吹脱氨氮实验[J]. 工业水处理 2006 26(5): 60-62.
- [12] 周彤. 污水的零费用脱氮[J]. 给水排水 2000 26(2): 37-39.
- [13] 唐受印, 戴友芝. 工业循环冷却水处理[M]. 北京: 化学工业出版社 2003.
- [14] 鲍其翥. 氯离子与冷却水系统中不锈钢的腐蚀[J]. 工业水处理 2007 27(9): 1-6.
- [15] RYAN M P, WILLIAM D E, CHATER R J. Why stainless steel corrodes[J]. Nature 2002 415: 770-774.
- [16] 纪芳田, 包义华. 循环冷却水处理基础知识[M]. 北京: 化学工业出版社 1986.
- [17] 解群, 梁磊. 冷却水中 SO_4^{2-} 对凝汽器不锈钢管的缓蚀作用[J]. 上海电力学院学报 2000 16(2): 33-34.
- [18] 张步继. 浅谈循环冷却水中浊度的影响因素[J]. 工业水处理 1999 19(5): 14.
- [19] 张颖, 侯盾, 李雨松, 等. 污水回用于循环冷却水系统腐蚀影响因素的研究[J]. 工业水处理 2001 21(3): 1-3.
- [20] 戴建强, 郑敏. 城市中水回用于电厂循环冷却水的处理技术实例[J]. 环境科学与管理 2008 33(8): 108-111.
- [21] 王洪臣, 周军. 石灰法投药量对循环冷却水水质的影响[J]. 中国给水排水 2006 22(6): 80-83.
- [22] 张国斌. 火力发电厂中水回用技术与应用前景[J]. 中国给水排水 2005 21(7): 89-91.
- [23] 李锐, 何世德, 张占梅, 等. 城市中水在电厂循环冷却水系统的应用与展望[J]. 环境科学与管理 2008 33(3): 152-155.
- [24] 刘守新, 李海潮, 张世润. 污水处理用活性炭流化床再生影响因素研究[J]. 新型炭材料 2001 16(1): 59-62.
- [25] PATRICK J W. Porosity in carbons: characterization and application[M]. New York: Halsted Press 1995.
- [26] 张玲玲, 顾平. 微滤和超滤膜技术处理微污染源水的研究进展[J]. 膜科学与技术 2008 28(5): 103-109.
- [27] HOWELL J A, SANCHER V, FIELD R W. Membrane in bioprocessing: theory and applications [M]. London: Chapman and Hall 1993.
- [28] 陈欢林, 戴兴国, 吴礼光. 反渗透、纳滤膜技术脱除小分子有机物的研究进展[J]. 膜科学与技术 2009 29(3): 1-10.
- [29] 陈见, 李俊, 王明. 淮北市污水处理厂中水回用工程的设计[J]. 中国给水排水 2010 26(10): 73-75.
- [30] PIERRE L C, CHEN V, FANE T A G. Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment[J]. J Membr Sci 2006, 284: 17-53.
- [31] DECAROLIS J, HONG S K, TAYLOR J. Fouling behavior of a pilot scale inside-out hollow fiber UF membrane during dead-end filtration of tertiary wastewater [J]. J Membr Sci 2001, 191: 165-178.
- [32] XING C H, TARDIEU E, QIAN Y, et al. Ultrafiltration membrane bioreactor for urban wastewater reclamation [J]. J Membr Sci, 2000 177: 73-82.
- [33] WEN C, HUANG X, QIAN Y. Domestic wastewater treatment using all anaerobic bioreactor coupled with membrane filtration [J]. Process Biochemistry 1999 35: 335-340.
- [34] XING C H, YAMAMOTO K, FUKUSHI K. Performance of an inclined-plate membrane bioreactor at zero excess sludge discharge [J]. J Membr Sci 2006 275: 175-186.
- [35] 格根图雅, 丁杰, 苏尼娜, 等. 膜生物反应器在城市中水回用中的应用[J]. 水处理技术 2008 34(10): 71-74.
- [36] JEISO D, VAN LIER J B. Cake layer formation in anaerobic submerged membrane bioreactors (AnSMBR) for wastewater treatment [J]. J Membr Sci 2006 284: 227-236.
- [37] JANG N J, SHON H, REN X H, et al. Characteristics of bio-foulants in the membrane bioreactor [J]. Desalination 2006 200: 201-202.
- [38] BELLA G D, DURANTE F, TORREGROSSA M, et al. The role of fouling mechanisms in a submerged membrane bioreactor during the start-up [J]. Desalination 2006 200: 722-724.
- [39] 欧志阳, 汤兵, 王仲旭. 膜生物反应器中的膜污染及其防治[J]. 污染防治技术 2006 19(5): 40-43.
- [40] 许骏, 王志, 王纪孝, 等. 反渗透膜技术研究和应用进展[J]. 化学工业与工程 2010 27(4): 351-357.
- [41] 虞启义, 吴俊芬. 二级处理出水回用作循环冷却水的可行性[J]. 中国给水排水 2004 20(3): 92-94.
- [42] 苟晓东, 黄种买, 虞启义, 等. 城市二级污水回用作电厂循环冷却水铜管腐蚀研究[J]. 化工进展 2004 23(3): 304-306. ▷