

饮用水深度净化工艺现场对比试验

吴舜泽 王宝贞 王琳 杨玉楠 杜彦武

提要 考察了实际生产规模的臭氧粒状活性炭工艺以及小型超滤、纳滤、反渗透膜法两种典型饮用水深度净化工艺的处理效果。试验结果发现臭氧活性炭工艺具有优良、稳定的去除有机污染物功能,而孔径较小的活性炭纤维除污染效果并不好,臭氧氧化出水、超滤出水再用压缩活性炭进行吸附处理对有机物的去除效率要比直接处理原水高。超滤膜除有机物效率不高,而反渗透和纳滤膜在较好地去除水中有机物的同时,也去除了水中绝大部分无机物,出水有机物和无机物浓度都较低。

关键词 饮用水深度净化 臭氧活性炭工艺 压缩活性炭 超滤 纳滤 反渗透

随着水污染日益严重,大量的污染物尤其是有
机污染物通过不同的方式进入水体,饮用水水源受到日趋广泛的污染。传统的混凝、过滤、消毒等自来水工艺是以去除水中的悬浮物、浊度、色度为主,对溶解性有机物去除能力相对不足,而且加氯消毒本身还形成了“三致物质”(致癌、致畸、致突变),直接影响饮用者的身体健康^[1]。因此,最大可能地去除水中的微量有机污染物、消毒副产物等就是饮用水深度净化的目的。人们开发了许多技术如生物预处理、高级氧化、活性炭吸附、膜法水处理工艺等对饮用水进行深度处理。本文即以实际生产规模的臭氧活性炭联用工艺饮用水深度净化水厂为基础,现场进行了臭氧活性炭、膜法水处理工艺的对比试验,它们是目前去除水中有机物的两种典型饮用水深度净化工艺^[1~2]。其中臭氧活性炭工艺采用砂滤、臭氧粒状活性炭吸附、木鱼石矿化过滤工艺,于1999年建成并投入使用,处理水量为200m³/d,基建投资125万元。臭氧接触罐为0.5m(直径)×3.2m(高),臭氧接触时间为10min,臭氧浓度为2mg/L左右并保持臭氧接触塔出水剩余臭氧浓度为0.2mg/L左右;活性炭罐尺寸是1.2m×3.7m,接触时间为18min。在现场同时利用小型压缩活性炭、活性炭纤

维、超滤膜、纳滤膜、反渗透膜等对原臭氧粒状活性炭工艺的各个出水如原水、臭氧氧化出水、活性炭出水等进行对比试验。其中超滤采用的是0.01μm的聚砜超滤膜,反渗透膜和纳滤膜都是2寸膜组件,纳滤膜为Hydranautics公司的ESNA纳滤膜(产水量为320L/d,标准脱盐率为80%),反渗透采用的是Filmtech公司生产的TW30型反渗透膜(产水量为144L/d)。试验测试项目为COD_{Mn}、UV₂₅₄、电导率、色度、浊度以及TOC等。

1 臭氧活性炭工艺水处理效果及分析

沿生产性臭氧活性炭工艺流程方向,水中有机污染物的浓度变化情况如图1中几组典型试验数据所示。臭氧对COD_{Mn}和UV₂₅₄的去除效率分别为11%~17%和6%~20%,低剂量臭氧的加入并不能使水中的有机物完全氧化降解为二氧化碳和水,反而使水中有机物更容易被高锰酸钾氧化,所以臭氧出水COD_{Mn}变化不是太大。试验中臭氧对浊度和色度的去除效果不好,尤其是臭氧出水的色度有时从砂滤出水的5度左右升高到18度和45度,增加幅度很大,测量结果表明这种色度的提高与铁、锰等含量没有关系,对臭氧出水色度增加的现象、原因我们还在进行跟踪调查。臭氧氧化虽然对有机物总

外,尚应严格控制污水的收集环节,绝不允许污水混接的状况发生。实践证明,一旦分流制被搅乱,造成雨污混流,将使当地的水环境遭到严重污染,大大降低工程效益,再要恢复到严格的分流制排水系统难度很大。

◎作者通讯处:200092 上海市国康路3号

上海市政工程设计院

电话:(021)65026899

收稿日期:1999-8-9

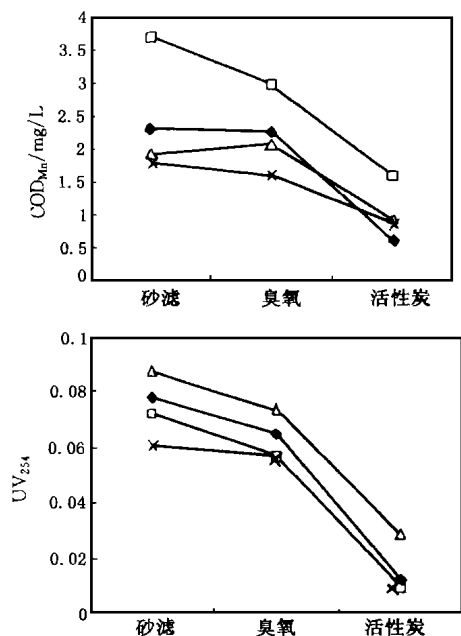


图1 臭氧活性炭对水中有机物的去除

量指标去除不多,但是适量臭氧的加入使有机物可吸附性、可生化性增强,因此臭氧之后活性炭的运行效果一直比较稳定可靠,它对 COD_{Mn} 和 UV_{254} 的去除效率一般在 45 % ~ 72 %、60 % ~ 82 % 之间,对浊度、色度的去除效果也比较好,分别为 55 % ~ 61 %、75 % ~ 91 %。臭氧和活性炭联用后对 COD_{Mn} 、 UV_{254} 总的去除效果分别是 50 % ~ 72 %、83 % ~ 86 %,对 UV_{254} 的去除效果比较稳定而且一般要高于对 COD_{Mn} 的去除,反映出该工艺对水中吸收紫外线的饱和有机物、含氮有机物去除效果较好,有一定的倾向性。臭氧活性炭工艺是费用较低、操作简单、处理效果稳定可靠的饮用水深度净化工艺。

为了解臭氧活性炭工艺净水机理以及活性炭吸附效率的影响因素,我们对比考察压缩活性炭、活性炭纤维 (ACF) 对水中有机物的去除情况。活性炭纤维只有单一的微孔,而没有过渡孔和大孔之分,孔径仅 $5\mu\text{m} \sim 14\mu\text{m}$,是粒状活性炭的一半左右甚至更小,比表面积较大 (有的高达 $2000\text{m}^2/\text{g}$)^[3]。但是它对水中有机污染物去除效果并不好,处理自来水时,ACF 对 COD_{Mn} 的去除效率在 8 % ~ 18 % 之间,去除 UV_{254} 的效率也仅在 20 % 左右,去除色度的效率在 27 % ~ 45 % 之间,而且 ACF 处理效果不是很稳定,多次发现出水有机物浓度较高的现象。比较而

言,压缩活性炭的处理效果较好,它是由细炭粉压缩而成^[4],对自来水 COD_{Mn} 的去除效率在 30 % ~ 57 % 之间,去除 UV_{254} 、浊度、色度的效率分别是 50 % ~ 100 %、82 % ~ 86 %、27 % ~ 82 %。试验发现当用压缩活性炭处理自来水、超滤出水、臭氧出水时,除污染效果有一定区别。进水为自来水时,处理效果最差,当自来水先经过超滤膜处理后,压缩活性炭对 COD_{Mn} 、 UV_{254} 的去除效率为 70 % ~ 76.7 %、65 % ~ 100 %。在压缩活性炭-超滤工艺中压缩活性炭对进水 TOC 的去除效率为 68 %;而在超滤-压缩活性炭工艺中,压缩活性炭对进水 TOC 的去除效率为 90 %,相应的出水 TOC 浓度仅为 0.2mg/L。当用压缩活性炭处理臭氧氧化出水时,处理效率又有了一定的提高,它对进水的 COD_{Mn} 、 UV_{254} 的去除效率分别为 60 % ~ 99 %、100 %。此时压缩活性炭出水水样的 UV_{254} 一般为负值 (相对于蒸馏水空白)。尤其应该注意的是,臭氧出水的色度很大,而压缩活性炭可以将臭氧出水的色度从 18 度、45 度降到 2.5 度和 1 度,下降幅度很大,臭氧氧化压缩活性炭工艺的出水与反渗透膜、纳滤膜出水有机物含量相差不多。以试验数据的平均值作出的压缩活性炭对三种进水处理效率对比如图 2 所示。

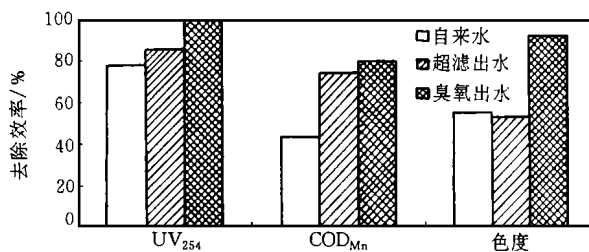


图2 不同进水时压缩活性炭处理效果对比

很多研究结果都表明活性炭只能吸附中间分子量 (如 1 000 ~ 5 000) 的有机物^[5~6]。若进水有机物分子量太大,那么由于活性炭孔径的空间排斥位阻作用,有机物难以进入活性炭的微孔吸附区。对于一定孔径分布的活性炭来说,进水中的有机物的线形尺度大小对活性炭吸附效果有很大的影响。活性炭纤维尽管具有很大的表面积,但是相应的微孔孔径太小,水中的大部分有机物难以进入 ACF 的有效吸附面积中。有人认为,活性炭纤维可以吸附的有机物分子量仅在 300 左右^[7],用 GAC 吸附水中小分

子杀虫剂(分子量 215)时,水中的其他有机物可以进入活性炭孔径中进行吸附并堵塞吸附通道,但是 ACF 吸附处理时,水中的大部分有机物对 ACF 吸附杀虫剂的影响很小^[8],因为水中的有机物往往难以进入活性炭的微孔中而与杀虫剂形成直接的竞争吸附关系,活性炭纤维的使用周期也比较长,这也从一个侧面反映出活性炭纤维对水中大部分有机物吸附作用很差。试验中曾测定对 COD_{Mn} 已经没有去除效率的粒状活性炭,发现此时活性炭的碘值有 850,与新炭的碘值 890 相差不大,考虑到活性炭的碘值反映的是活性炭微孔吸附面积的大小,说明活性炭失效的原因是其中的绝大部分微孔吸附面积没有得到有效的利用而不是比表面积不足。目前所使用的活性炭大多为气相炭,过渡孔所占的比例很小,有机物的吸附往往阻塞了有机物通向微孔有效吸附区的通道,导致去除有机物的效果不好、不稳定,所以活性炭纤维较小的孔径和较大的比表面积并不能获得较好的有机物去除效果。压缩活性炭与超滤或臭氧氧化相串联时,自来水中大分子有机物或者被超滤膜所截留,或者被臭氧氧化为分子量稍小的有机物,相应的出水有机物与活性炭的孔径分布比较吻合,所以处理效果较好。考虑到所用的压缩活性炭在测试前停止运行很长一段时间,可以认为其中的微生物作用是可以忽略的。从这个角度出发,可以认为,臭氧氧化之所以可以提高活性炭处理效率,臭氧活性炭联用工艺之所以有稳定、高效的有机物去除效率,有很大一部分原因在于臭氧氧化导致活性炭进水有机物分子量的减小、可吸附性的提高并使得有机物尺寸等特性与活性炭孔径分布协调一致。

2 膜法饮用水深度处理工艺对比

超滤工艺对水中有机物(以 COD_{Mn} 、 UV_{254} 表示)和一般污染物(以浊度和色度表示)的去除效果如图 3 所示。

一般来说,超滤膜的浊度去除效果较好,但它对水中有机物的去除效率不高,而且变化很大,试验中就曾发现有时超滤膜没有什么有机物去除效果。它的孔径较大,截留分子量较大,对 COD_{Mn} 、 UV_{254} 的去除效率分别在 0~49%、20%~36%之间,出水的 COD_{Mn} 值比较高。在饮用水深度净化上,将超滤膜作为饮用水除浊、去除悬浮物、避免管道的二次污染

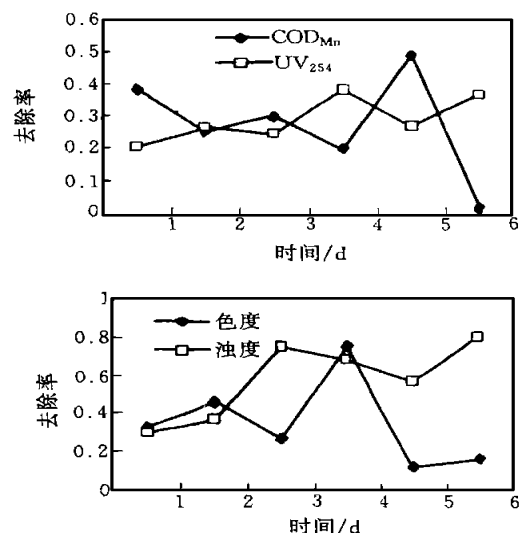


图 3 超滤膜的除污染效果

现象是比较可靠的,超滤出水一般也没有检测出细菌,但是饮用水深度净化的目的是去除传统混凝、沉淀、过滤、消毒等工艺所不能去除的有机污染物,所以应该以去除有机物的效果来衡量饮用水深度净化工艺的好坏,因此我们认为单独的超滤工艺尤其是截留分子量比较大的超滤膜是不能作为饮用水深度净化工艺的主体工艺,它必须与高级氧化、吸附等去除有机物效果比较好的工艺联合使用,才有可能达到较好的饮用水深度净化效果。

纳滤膜和反渗透膜对水中污染物的去除如图 4、图 5 所示。试验中纳滤膜和反渗透膜淡水出水 COD_{Mn} 都在 0.5mg/L 以下,去除效率在 50% 以上,出水浊度一般在 1 度以下,淡水 TOC 值一般在

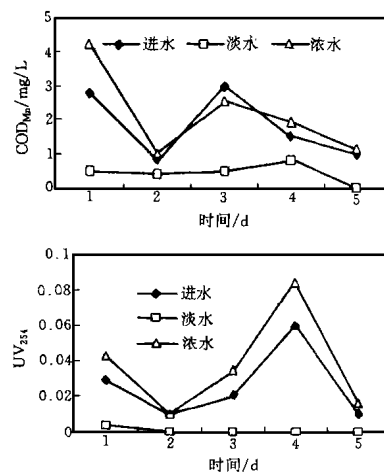


图 4 纳滤对 COD_{Mn} 、 UV_{254} 的去除

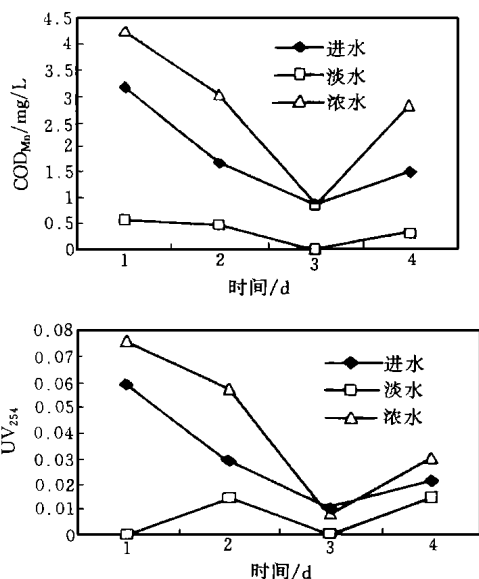


图5 反渗透对 COD_{Mn}、UV₂₅₄ 的去除

0.5mg/L 以下,纳滤膜和反渗透膜淡水出水 UV₂₅₄ 很多都为负值(比相应的蒸馏水空白水样的紫外线吸收值小,在图中一律以 0 表示)。纳滤膜和反渗透膜的孔径较小,纳滤膜的截留分子量在 200~500 之间,反渗透膜的截留分子量在 100 或 100 以下^[9],一般小于膜截留分子量的有机物可以以较大的截留率被去除,所以出水水质比较稳定。试验中曾将纳滤膜的浓水水样再次进行纳滤处理,此时纳滤膜的 COD_{Mn}从进水(前面一级的纳滤浓水)的 0.96mg/L 降到 0mg/L,色度从 2 度降到 1 度,UV₂₅₄从进水的 0.01 降到 -0.008,都有一个较大的下降,而且相应的去除效率与其他进水情况相比没有什么区别,反映出纳滤膜和反渗透膜对各种进水水质都有比较好的处理效果。

从试验结果来看,纳滤膜和反渗透膜都有较好的去除有机物效果,相对而言纳滤膜的除污染效果比反渗透膜略高。表 1 就是纳滤膜和反渗透膜处理臭氧活性炭工艺出水的情况,对于同样的进水,两个

表 1 纳滤和反渗出水水质对比

项 目	进 水	纳 滤	反 渗 透
UV ₂₅₄	0.029	0.004	0.014
UV ₂₅₄	0.021	0	0.014
色度/度	4.5	2	2.5
色度/度	2	0	1

工艺出水的浊度基本一致,但是在试验的原水有机物性质下,纳滤膜淡水的色度和 UV₂₅₄ 等指标要好于相应的反渗透膜淡水。在图 4、图 5 纳滤膜和反渗透膜对水中有机物的去除数据中可以看到,纳滤膜淡水出水的 UV₂₅₄ 往往都为 0,实际上有 4 个测试结果是负值,只有一个出水 UV₂₅₄ 为 0.004,反映出纳滤膜淡水出水中有机物浓度很小,比反渗透膜淡水出水水质略好。纳滤膜尽管比反渗透膜的截留分子量和孔径都大,但是纳滤膜一般在制造工艺中有意识地引进了一些负电荷基团,它在反渗透膜单纯的孔径截留基础上附加了电性作用,有时这种电性作用所起的作用远远大于膜孔径的作用,臭氧氧化出水有机物往往电性作用比较强,此时纳滤膜与有机物之间的电性作用对有机物的去除效率影响很大,带负电荷的纳滤膜对有机物去除效率要高于反渗透膜也是可能的,在我们的多次试验中也经常观察到这种现象。

纳滤膜和反渗透膜在去除水中有机物等污染物的同时,对水中的无机离子截流率也很大。试验进水电导率为 200μS/cm~300μS/cm,一般纳滤膜和反渗透膜的淡水出水电导率分别为 10μS/cm~20μS/cm 和 0~10μS/cm,都可以将自来水总硬度从 138mg/L 降到 4mg/L~5mg/L 左右,相对而言纳滤膜的脱盐率要高些,两者对硬度的去除效率类似。对饮用水处理来说,反渗透膜和纳滤膜淡水出水中无机离子的含量太小,不太适合于长期饮用,维持过高的脱盐率是不必要的,同时也给纳滤膜和反渗透膜系统带来了结垢、操作压力过高、运转费用大、预处理和浓水处理难度加大等一系列问题。所以说,纳滤膜和反渗透膜适合于进水无机离子多、硬度过高的原水,同时发展和应用低脱盐率、高有机物截流率的新型纳滤膜是十分有意义的。具体应用纳滤膜或反渗透膜于饮用水处理时,还可在纳滤膜或反渗透膜去除水中的各种污染物后通过麦饭石矿化过滤等方式提高出水的无机离子和矿物质含量。

3 结语

通过饮用水深度净化现场对比试验,我们可以得出如下结论:

(1) 臭氧活性炭联用工艺对有机污染物去除效率较高,效果稳定可靠,臭氧氧化压缩活性炭联用工

城市排水管道泥沙问题浅析

刘 成 何 耘 韦鹤平

提要 城市排水管道设计中,普遍采用最小流速准则控制排水管道中的泥沙淤积。从世界各地排水管道的运行历史及近年的研究成果来看,这种设计准则是存在问题的。对排水管道泥沙运动的研究进行了较为全面的综述,结合相关的排放口扩散器泥沙淤积规律模型试验研究成果,对典型的排水管道泥沙运动方程进行一定分析,提出排水管道设计推荐公式。并希望能引起我国科研和工程界对排水管道泥沙问题的重视,达到抛砖引玉之效。

关键词 排水管道 泥沙 临界不淤流速

0 概述

泥沙问题是排水管道设计中必须考虑的一个重要方面,从运行角度看,应满足污水中所挟带的泥沙不会在管道内淤积(或存在有限淤积),影响排水管道水力性能、减小设计排水能力;从技术经济上看,应使排水管道在满足不淤条件和排水能力的前提下,具有最佳管径、坡度和水头损失,降低工程造价和运行费用。在考虑泥沙问题上,现行的排水管道设计标准一般是以自清流速作为管道设计最小流速

来控制,最小流速往往是仅根据污水管、雨水管或合流管提出一固定值,如表1所示。但是,世界各地排水管道的运行历史及近年来对排水管道泥沙运动规律的研究成果表明,这种设计标准存在一定的问题,表现在以下几个方面:

(1)设计标准没有考虑泥沙特性(泥沙浓度、粒径、重度及粘性等)的影响。不论是管道泥沙运动,还是河流泥沙运动,泥沙特性对输沙率有明显的影响,而排水管道的泥沙特性随排水管道的类型、不同

艺出水水质与反渗透膜等基本类似。压缩活性炭对色度、有机物等的去除效果要好于活性炭纤维,压缩活性炭进水先经超滤或臭氧氧化处理后,其去除有机物的效率有一定的提高,这些都反映出活性炭进水有机物尺寸或分子量大小对活性炭吸附效果的影响。设计合理的臭氧氧化压缩活性炭工艺出水中有机物浓度与反渗透膜和纳滤膜出水基本相同。

(2)超滤膜对有机物的去除效率不高,不能作为单独的饮用水深度净化去除有机污染物的主体工艺。反渗透和纳滤膜出水水质较好,对于各种进水都有良好的有机物去除效果,相对而言,纳滤膜对有机物的去除效果比反渗透膜略好,反渗透膜和纳滤膜淡水中无机离子含量都很小。

参考文献

- 1 王宝贞. 水污染控制工程. 北京:高等教育出版社,1990
- 2 许保玖. 给水处理理论与设计. 北京:中国建筑工业出版社,1992
- 3 李正凯,等. 纤维活性炭在水处理中的应用. 中国给水排水,1993,9(2):27~29

- 4 Linda, A, et al. removal of Cyanobacterial toxins and Cyanobacterial cell from drinking water using water using domestic water filters. Wat Res, 1998,32(3):633~639
- 5 James, E K, et al. adsorption of NOM by activated carbon: a size-exclusion chromatography study. Environ Sci Technol, 1996,30(4):1336~1343
- 6 Duguer J P, et al. influence of NOM on water treatment. Water Supply, 1998,16(1):505~509
- 7 刘振宇,等. ACF的孔结构控制与表面改性. 离子交换与吸附,1997,5:455~460
- 8 Hopman R, et al. the impact of NOM presence on pesticide removal by adsorption: problems and solution. Water Supply, 1998,16(1):497~505
- 9 Rautenbach, R 著. 膜工艺——组件和装置设计基础. 王乐夫译. 北京:化学工业出版社,1998

作者通讯处:吴舜泽 100012 北京安外大羊坊中国环境科学研究院环境规划所

电话:(010)84915266(O)

王宝贞 王琳 杨玉楠 杜彦武 150008 哈尔滨建筑大学

收稿日期:1999-5-31

CONTENTS

Considerations on Urban Drainage System Hong Jianian (1)

Abstract : The unfavorable appearances arisen in operating of both separated and combined urban sewer systems are considered and the probable factors and potential causes , which disturb the normal performance of sewer system , are discussed. Finally recommendations to solve these problems are proposed.

Parallel Pilot Study on Advanced Drinking Water Purification Wu Shunze *et al* (3)

Abstract : The operation experiment of pilot-plant of ozonation-activated carbon process and bench experiment of membrane process such as UF , NF , RO were carried out for comparison of the treatment effects of the two typical advanced water treatment processes. The results show that granular activated carbon and extruded carbon block are effective to remove organic substance in ozonation effluent. UF can not be considered as the main organic-removing process , RO and NF are very efficient in the removal of pollutants and treated water contains little organic and inorganic substances.

Superficial Analysis on Sediment Transport in City Sewer Liu Cheng *et al* (7)

Abstract : The limiting velocity criteria are generally adopted in the city sewer designing to control the sediment deposition in the pipe. But these kinds of criteria are questionable from the sewer operation history and researches in recent years all over the world. In this paper , the researches on sediment transport in sewer are reviewed. Combined with the modeling study on sediment deposition in outfall diffuser , the typical sewer sediment transport functions are analyzed , and functions used in sewer designing are recommended. The authors hope that this paper can catch the researchers ' and engineers ' attention to sediment transport in sewer , and has the effect of throwing out a minnow to catch a whale.

On Enhanced Purification of Slightly Polluted Raw Water Xiao Jin *et al* (14)

Abstract : The enhanced coagulation processes using natural in-nocuous acromolecular flocculants are studied to purify the slightly polluted raw water and compared with the traditional coagulation processes. Also the mechanism of enhanced process has been explored.

On Planning of Urban WTP Reformation Chen Lidao *et al* (16)

Abstract : In consideration of the problems risen from some urban WTPs of large cities in this country , an evaluation scheme has been proposed and the feasibility of this scheme has been approved by the practical application for 11 WTPs in Shanghai. The verdict of this scheme is quite conformable with the argumentation of experts. This scheme would be helpful to policy making about reform and resignation of existing urban WTPs.

Shutter Filter : Air-Water Backwashing Filter Wu Jihua *et al* (21)

Abstract : "Shutter filter" , one type of air-water backwashing filter , was originally developed by a Swiss company. Based on the investigation abroad and a design practice at home the feature , the operating principle and the design precautions of this type of filter are explained.

Water Level Calculation of Water Tower in Dynamic Simulation of Water Supply Network Yu Guoping *et al* (25)

Abstract : On the basis of the principle of dynamic simulation of water supply networks , an accurate calculation of water level for water tower has been proposed. Also the calculation results of water level change by some methods are compared with examples.

Design and Operation of Reformed Hydraulic Circulating Clarifier Hu Fengping *et al* (28)

Abstract : The hydraulic circulating clarifier (HCC) with capacity of 160 cubic meters per hour for single unit in the Dongmen water station of Shangrao Railway in Jiangxi province was reconstructed to expand the capacity to 320 cubic meters per hour for single unit. The design consideration is presented in this paper. In the foregoing two years operation shows that the turbidity of output water of the new tank is stable under 8 degree , much lower than that of the former.