

## 分析测试

## 饮用水中污染物的检测及处理工艺

王欢欢, 张和鹏, 王冀蕾, 王雷锋, 张宝亮  
(西北工业大学理学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:**综述了近年来国内外饮用水处理过程中污染物质的检测方法和处理工艺。现有的检测方法主要有分光光度法、气相色谱法、液相色谱法、质谱法以及各种方法的改进和联合使用,主要采用的去除污染物的手段有臭氧氧化、活性炭吸附、树脂吸附和一些传统工艺的改进等,并对现有的检测方法和去除手段进行了评价,同时提出了未来饮用水处理领域的发展方向。

**关键词:**饮用水污染物;检测方法;处理工艺

**中图分类号:** X523

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2011)05-0092-05

### Progress in determination and treatment of pollutant in drinking water

WANG Huan-huan, ZHANG He-peng, WANG Ji-lei, WANG Lei-feng, ZHANG Bao-liang  
(School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The determination and treatment of the pollutant in the drinking water in recent years are reviewed. The commonly used determination methods include spectrophotometry, gas chromatography, liquid chromatography, mass-spectrometry, the improved and/or combined methods mentioned above. Ozone oxidation treatment, activated carbon absorption, resin absorption and some improved traditional methods can be used to remove the pollutant in the drinking water. The existing determination methods and pollutant-removal techniques are evaluated. The future prospects of the drinking water treatment is put forward as well.

**Key words:** pollutant of the drinking water; determination methods; treatment technique

随着世界经济的快速发展和城市化的加快,工业化过程中出现了很多新兴的物质,人们的饮用水水源遭到越来越多的污染破坏。饮用水中的溴酸盐类物质、酚类化合物、激素类物质、人类腺病毒、细菌病毒、偶氮染料、胺类物质以及常见的重金属离子及其化合物等<sup>[1-9]</sup>所造成的危害也越来越凸显。本文综述了近几年来饮用水体中有毒有害物质的检测方法和主要去除手段。

## 1 饮用水污染物检测方法

常见的检测方法包括分光光度法、离子色谱法、气相色谱法、液相色谱法以及荧光光谱法等。由于科学技术的进步和对于水质检测要求的不断提高,各种方法的联合使用以及衍生的高精度、高灵敏度的检测方法不断出现,给污染物质的检测提供了很大的方便。

### 1.1 气相色谱-质谱联用技术

气相色谱-质谱联用(简称气质联用, GC-MS)是利用气相色谱对混合物的高效分离能力和质谱对纯物质的准确鉴定能力而开发的分析方法<sup>[10]</sup>。在

分析仪器联用技术中气相色谱-质谱联用是开发最早、仪器最完善、应用最广泛、最成功的一种。

Holger 等<sup>[2]</sup>研究了饮用水中影响内分泌的酚类化合物以及激素类物质的检测方法。他们使用高灵敏度气相色谱技术和阴离子化电离质谱检测技术对样品进行检测,经离子捕捉分析得到结果。其检测灵敏度可达到飞克级( $10^{-15}$  g)。

Jiang 等<sup>[11]</sup>研究了饮用水中氯均三嗪(TCT)的检测和水厂的相关去除工艺。利用气相色谱-质谱联用及双层固相萃取技术可对 TCT 进行高精度的检测,这种检测方法可以精确到  $0.01 \mu\text{g/L}$ 。结果表明,活性炭吸附对饮用水中 TCT 的处理效果不错。

Carsten 等<sup>[12]</sup>研究了饮用水处理过程中二甲基亚硝胺(NDMA)在氧化时的形成机理。*N,N*-二甲基磺酰胺(DMS)是生成二甲基亚硝胺的前驱物。他们用气相色谱-质谱联用仪分析 NDMA 的浓度,用高效液相色谱-质谱连用法分析 DMS 的浓度,灵敏度可以达到  $\text{ng/L}$ ,为后续研究二甲基亚硝胺在氧化时的形成机理提供了技术保证。

收稿日期:2011-02-08;修回日期:2011-03-28

基金项目:西北工业大学“国家大学生创新性实验计划”项目(09-26);西北工业大学基础研究基金(G9KY1020)资助

作者简介:王欢欢(1989-),男,本科生;张和鹏(1978-),男,博士,讲师,主要从事水处理、磁性树脂的制备研究,029-88431675, zhanghepeng@nwpu.edu.cn.

## 1.2 高效液相色谱-质谱联用技术

液相色谱-质谱联用技术(简称液质联用,LC-MS)以液相色谱作为分离系统,质谱为检测系统<sup>[10]</sup>。样品在质谱部分和流动相分离,被离子化后,经质谱的质量分析器将离子碎片按质量数分开,经检测器得到质谱图。

Zhao等<sup>[13]</sup>建立了1套固相萃取、液质联用结合的分析方法,对于饮用水氯化消毒过程中产生的氯代苯系物和溴代苯系物进行检测。实验结果表明这种检测方法的灵敏度可以达到ng/L,为氯化消毒副产物的检测提供了很好的方法。Sebastian等<sup>[14]</sup>研究了污水和地表水中常见的极性药物残余的检测。他们通过自动化的固相萃取和液相色谱分离污染物以及质谱检测技术对痕量污染物进行测定,并与一个国际标准对比得到具体数值,最低检测质量浓度在0.01~0.02 μg/L。

Mira等<sup>[15]</sup>利用高灵敏度液相色谱和质谱联用仪检测确定饮用水处理厂处理工程中不同的处理步骤对壬基酚化合物处理效果。Zhao等<sup>[6]</sup>研究饮用水中可能存在的亚硝胺类物质的特性。他们运用固相萃取技术来提高目标物质的浓度,联合使用液相色谱和串联四极杆线性离子阱质谱仪进行检测,可使检测精度达到亚纳克级( $10^{-10}$  g/L),可以有效的检测超痕量的物质含量。

色谱与质谱的联用集高效分离、多组分同时定性和定量为一体,充分体现了色谱和质谱优势的互补,是分析混合物最有效的工具。但由于许多有机物的高极性、热不稳定性、高相对分子质量和低挥发等原因,色谱质谱的检测对它们的检测也较为困难,因此也出现了一些新兴的检测方法。

## 1.3 其他方法

Nestor等<sup>[4]</sup>研究了细菌、病毒在饮用水体中的分布情况及检测方法。他们采用一种结合美国环保局检测方法和基于超速离心和在甘氨酸缓冲剂中洗脱的方法对饮用水中的病毒颗粒进行检测,运用实时定量聚合酶链反应和嵌入式聚合酶链反应等对特定的病毒种类进行检测。Sunny等<sup>[3]</sup>研究了水体中人类腺病毒,采用综合性细胞培养聚合酶链反应技术对其含量进行了检测。Danielle等<sup>[5]</sup>研究了饮用水中的偶氮染料在水的氯化消毒过程中产生致使基因突变的化合物的过程。他们采用高效液相色谱法和二极管矩阵检测法进行分析,并且对其使用了环形伏特分析和光谱分析。研究结果表明,在饮用水的氯化消毒过程中产生了具有致基因突变的衍生

物,需要进一步的毒理分析实验来验证它们对人类的危害。Tomas等<sup>[16]</sup>研究了ClO<sub>2</sub>对水中蓝藻产生的微囊藻毒素的氧化特性研究。通过高效液相色谱和紫外光谱测定法对其反应机理等方面进行了分析。Darren等<sup>[17]</sup>采用诱导耦合等离子体质谱分析方法和X光衍射,研究饮用水配水系统中砷的积聚和去除工艺。

各种检测方法都在一定程度上满足了人们对于某一或者某些物质的检测,但又都存在一定的缺陷。气质联用和液质联用必须不断进行调整、改进以适应不同浓度、不同性质的污染物的检测,容易造成资金和时间的浪费;新兴方法针对性太强,很难得以广泛推广和运用,很多瓶颈问题需要解决以适应越来越复杂的水环境。

## 2 污染物质的处理工艺

传统饮用水处理工艺包括混凝、沉淀、过滤、消毒,能去除水中悬浮物、胶体颗粒,而对于受污染源中溶解性有机物的去除能力明显不足,特别是加氯消毒后形成的三致(致诱、致畸、致癌)物质及其前驱物(THMFP)、各种未知的物质等<sup>[18-19]</sup>。一些新的处理工艺正在逐步形成,包括改性活性炭及其与臭氧等工艺的结合、膜处理、树脂吸附等,这些处理工艺的出现极大改善了污染物质去除的状况。

### 2.1 活性炭吸附

水处理过程中使用的活性炭分为粉末炭和粒状炭2类:粉末炭采用混悬接触吸附方式,而粒状炭则采用过滤吸附方式。

Jiang等<sup>[11]</sup>研究了饮用水中的氯均三嗪等氯化消毒的副产物的产生和去除工艺,其去除精度可达到μg/L级。相对于不加活性炭的水样,活性炭的处理效果显著,且颗粒状活性炭(GAC)对于处理高浓度的合成有机化合物(SOCs)有明显优势。Nestor等<sup>[4]</sup>研究发现颗粒活性炭可以吸附99%的原水中的病毒微生物,但更高处理效率(99.99%以上)的处理工艺尚需进一步研究以确保现有的检测手段在100:1浓缩的已处理饮用水中检测不到人体腺病毒的存在。

活性炭一直是水处理领域的研究热点。活性炭成本不高,易于生产使用。近些年,各种活性炭改性研究不断开展,活性炭与其他工艺的结合成为研究热点,而各种新型材料的出现也给水处理科研人员带来了新的机遇。活性炭与多种处理工艺的结合,如超滤、臭氧氧化等正逐渐被人们研究和应用。

裴亮等<sup>[20]</sup>研究了超滤与活性炭组合工艺处理饮用水中污染物。研究发现,随着活性炭投入量的增加,膜稳定运行的时间增加,并有效地改善了膜通量。该工艺对 COD、TOC、UV 和浊度的平均去除率分别达到了 68%、75%、55% 和 96% 以上,粉末活性炭和超滤技术的联用对有机污染物的去除效果好于单独的超滤工艺。

臭氧氧化处理是利用臭氧的强氧化性对饮用水中的污染物进行氧化,从而有效去除水中的污染物。臭氧氧化处理是一种高效环保的处理方法,结合活性炭吸附,其处理的物质的种类和效率都大大得到提高。Thomasa 等<sup>[21]</sup>研究发现,活性炭吸附对各种药物残余有很好的吸附性能,臭氧对特定的药物也有很好的氧化去除效果。两种工艺的联合使得绝大部分药物的处理效率达到 97% 以上。臭氧氧化-生物活性炭联用技术是以去除难降解的微量有机污染物为主的新型给水深度处理技术,是对传统的臭氧氧化-活性炭联用技术的改进。陈言明等<sup>[22]</sup>在臭氧-生物活性炭工艺的基础上进行改进,通过对催化剂、臭氧投放量、温度等因素进行控制,优化了处理工艺。研究表明,该方法对饮用水中微量、难降解的有机物处理有明显的优势,大大提高了有机物的去除率,在对饮用水的处理效果、经济性和可行性方面远优于传统的工艺。

## 2.2 膜处理技术

常见的膜处理工艺主要有纳滤膜技术、超滤膜技术、反渗透过滤分离技术等。

纳滤技术最初被用来软化水体,由于其无污泥、不需再生、效率高和占地省等优点而受到关注和推广。付军凤<sup>[23]</sup>研究了纳滤技术对于饮用水中  $\text{SO}_4^{2-}$  的处理。这是一种很高效且节能的处理方法,符合国家的产业政策,有待进一步推广。由于纳滤技术能有效去除致癌物 THM 前驱物、TOC、细菌、 $\text{SO}_4^{2-}$  等,同时保留许多水中对人体有益的元素,采用纳滤技术对市政供水进行深度处理,提供高品质的饮用水,将成为 21 世纪饮用水净化的优选技术。

Lee 等<sup>[24]</sup>应用超过滤膜分离饮用水中  $\text{TiO}_2$  光催化剂的残留。腐殖酸和错流速度会影响到膜的性能。研究发现,腐殖酸和  $\text{TiO}_2$  共同存在会提高形成沉积层的抗性,加快错流速度可以使超滤膜表面的腐殖酸更稳定,从而提高处理效率,超过滤膜去除  $\text{UV}_{254}$  效率可达 97% ~ 99%。

田家宇等<sup>[25]</sup>采用超滤膜/混凝生物反应器 (UF-MCBR) 处理模拟微污染源水,对有机污染物

的去除效能与机理进行了深入研究。结果表明,当聚合氯化铝投加量为 10 mg/L 时,UF-MCBR 对 DOC、UV、TOC、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、BDOC 和 AOC 都有很好的处理效果。工艺之间的联合互补使得处理效果更好。此外,处理过程中滤膜截留的一些物质还可以进一步强化处理效率。

王晓伟等<sup>[26]</sup>结合国内外相关研究,深入分析了水的 pH、进水硼浓度、操作压力和进水温度等因素对反渗透膜脱除硼酸效率的影响。如果提高水的 pH,就可电离出  $\text{H}_2\text{BO}_3^-$ ,降低硼的透过系数  $P_B$ ,增大反射系数  $\sigma_B$ ,从而提高脱除率;高温不利于膜的活性和处理性能;进水硼浓度对处理没有影响。反渗透膜处理工艺应向着多级膜、多种工艺的结合,尤其是和硼螯合树脂的结合方向发展。

在科技的推动下,膜技术已经得到了长足的发展,广泛应用于生活和生产的各个领域。广泛的适用性、可重复使用的特性使得膜技术得以推广普及。

## 2.3 树脂吸附处理工艺

树脂吸附处理工艺是利用树脂的多孔立体结构来吸附物质,包括物理吸附和化学吸附。其特点是容易再生,可以反复使用。现在广泛使用的树脂吸附处理工艺包括离子交换树脂吸附、磁性树脂吸附工艺和其他经过改性的树脂吸附工艺等。

Humbert 等<sup>[27]</sup>研究了 4 种合成的离子交换树脂对于溶解性有机碳 (DOC) 含量较高水体的吸附处理。研究表明,离子交换树脂可以很好吸附水体中的大分子溶解性有机物 (DOM) 和传统工艺不易去除的小分子质量的 DOM,其中 IRA-938 和磁性离子交换树脂 2 种材料可以在很短时间内达到理想效果;磁性离子交换树脂还能去除大部分的饮用水消毒副产物及某些致癌物质的前驱物。

Mehmet 等<sup>[28]</sup>研究了磁性离子交换树脂对于水体中的有机质的吸附效果。他们通过进行反应动力学等方面的实验发现,磁性离子交换树脂由于可以在磁力的作用下聚集形成絮凝体而被有效地分离,极大地促进了处理效率,特别适用于水体中有机质的去除, $\text{UV}_{254}$  处理效率可达到 96%。本课题组也围绕磁性树脂处理水体中的氯仿开展了相关研究<sup>[29]</sup>,对不同表面性质、粒径、孔性的磁性树脂进行了比较,并给出了利用磁性树脂处理水中微量氯仿的工艺,得出采用粒径处于 1.5  $\mu\text{m}$  表面富含氨基的磁性树脂处理效果最好,对氯仿的处理效率可以达到 83%。

活性炭吸附的主要优点是处理程度高,效果稳

定,缺点是处理费用高昂。臭氧氧化过程中可能会产生一些目前无法检测的有毒有害物质。膜处理技术是近几年新兴的处理技术,具有效率高、适用性好的优点,但膜污染给处理过程带来了许多不便和危险。和活性炭相比,多孔树脂的吸附容量大,再生能力强,对 DOM 的去除有着独特的优势,其中磁性树脂由于工艺简单和易操作性使其优势更加明显。

## 2.4 其他处理工艺

饮用水中污染物质的不断出现促使各种处理工艺的产生。除了以上常见的3种处理工艺外,还有许多其他的饮用水处理工艺和处理材料,例如矿物吸附、膨润土吸附等。

Darren 等<sup>[17]</sup>研究了饮用水配水系统中砷的积聚和去除工艺。他们采用诱导耦合等离子体质谱分析方法和 X 光衍射检测水体,发现饮用水配水系统中存在砷的积聚物质。由于铁离子固态表面对砷有很强的吸附力,饮用水中砷的去除一般采用以三价铁为基础的处理过程,如铁盐的化学凝聚、氧化和过滤过程中含铁的去砷工艺和以铁为基础的吸附媒介等。

田丽娟等<sup>[30]</sup>研究开发了一种国产的铜锌合金水处理材料 SPM 用于处理饮用水。试验结果表明,这种材料能很好地去除水中的余氯,去除率可达到 90% 以上,能较好地去除水中的 Cr、Cd、Hg、Pb 等有毒有害金属离子,去除率可达 66% ~ 99%,并且具有较好的杀菌除藻效果。徐振华等<sup>[31]</sup>介绍了一种将钠基累托石改性制成聚羟基铝铁改性累托石的方法,并利用不同性能的聚羟基铝铁改性累托石对低氟饮用水进行吸附研究。该方法制备的聚羟基铝铁改性累托石可以将含氟 5 mg/L 的饮用水的处理到 0.1 mg/L,去除率达 98%。

科技的发展不断催生新的处理工艺,然而传统工艺由于使用广泛且有很大的改进空间,相关的工作也是饮用水处理工作者研究的热点,例如吸附法的改进,各种吸附剂包括矿物吸附、金属离子吸附等的研究,新型氧化剂和氧化技术的发明等。

## 3 展望

饮用水安全是关系国计民生的大事。我们需要在加强对水资源保护的同时,增加受污染水处理的研究力度,提高饮用水水质。由于饮用水污染成分日益复杂,为了更加精确地检测有毒有害物质,对样品的分离预处理变得尤为重要;在实验室研究中很多检测方法和处理工艺能够满足的需求,但由于很

多条件限制而得不到转化与推广,因此更实用的、能够普遍应用的、准确高效的饮用水水质检测及处理工艺仍需继续开发。随着学科之间的交叉融合和新的科学技术的发展,未来的饮用水检测处理将有很大的发展前景,也将是未来科学研究领域的热点。

## 参考文献

- [1] Howard S Weinberg, Carrie A Delcomyn, Vasu Unnam. Bromate in chlorinated drinking waters: occurrence and implications for future regulation[J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37: 3104 - 3110.
- [2] Holger M Kuch, Karlheinz Ballschmiter. Determination of endocrine-disrupting phenolic compounds and estrogens in surface and drinking water by HRGC (NCI) MS in the picogram per liter range [J]. *Environ Sci Technol*, 2001, 35: 3201 - 3206.
- [3] Sunny C. Jiang. Human adenoviruses in water: occurrence and health implications: a critical review [J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40: 7132 - 7140.
- [4] Nestor Albinana-Gimenez, Pilar Clemente-Casares, Silvia Bofill-Mas, et al. Distribution of human polyoma-viruses, adenoviruses, and hepatitis E virus in the environment and in a drinking-water treatment plant [J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40: 7416 - 7422.
- [5] Danielle P Oliveira, Patricia A Carneiro, Celia M Rech, et al. Mutagenic compounds generated from the chlorination of disperse azo-dyes and their presence in drinking water [J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40: 6682 - 6689.
- [6] Zhao Yuanyuan, Jessica Boyd, Steve E Hrudey, et al. Characterization of new nitrosamines in drinking water using liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40: 7636 - 7641.
- [7] Yu Changping, Sara K Farrell, Bruce Robinson, et al. Development and application of real-time PCR assays for quantifying total and aerolysin gene-containing aeromonas in source, intermediate, and finished drinking water [J]. *Environ Sci Technol*, 2008, 42: 1191 - 1200.
- [8] 李云松. 大孔树脂吸附处理水中氯仿的研究[D]. 四川: 四川大学, 2005.
- [9] 黄传伟, 于峰, 谢勇军, 等. 饮用水生物反硝化脱氮的研究[J]. *水科学与工程学报*, 2009, (1): 28 - 30.
- [10] 杜斌, 郑鹏武. 实用现代色谱技术[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2009: 288 - 294.
- [11] Jiang H, Adam C, Graziano N. Occurrence and removal of chloro-triazines in water treatment plants [J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40: 3609 - 3616.
- [12] Carsten K Schmidt, Heinz-Jürgen Brauch. N, N-dimethylsulfamide as precursor for N-nitrosodimethylamine (NDMA) formation upon ozonation and its fate during drinking water treatment [J]. *Environ Sci Technol*, 2008, 42: 6340 - 6346.
- [13] Zhao Yuli, Qin Feng, Jessica M Boyd, et al. Characterization and determination of chloro- and bromo-benzoquinones as new chlorination disinfection byproducts in drinking water [J]. *Anal Chem*, 2010, 82: 4599 - 4605.

- [14] Sebastian Zuehlke, Uwe Duennbier, Thomas Heberer. Determination of polar drug residues in sewage and surface water applying liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. *Anal Chem*, 2004, 76: 6548 - 6554.
- [15] Mira Petrovic, Alfredo Diaz, Francesc Ventura, *et al.* Occurrence and removal of estrogenic short-chain ethoxy nonylphenolic compounds and their halogenated derivatives during drinking water production [J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37: 4442 - 4448.
- [16] Tomas P J Kull, Peter H. Backlund, Krister M. Karlsson, *et al.* Oxidation of the cyanobacterial hepatotoxin microcystin-LR by chlorine dioxide: reaction kinetics, characterization, and toxicity of reaction products [J]. *Environ Sci Technol*, 2004, 38: 6025 - 6031.
- [17] Darrena A. Lytle, Thomas J. Sorg, Christy Frietch. Accumulation of arsenic in drinking water distribution systems [J]. *Environ Sci Technol*, 2004, 38: 5365 - 5372.
- [18] 陈卫, 韩志刚, 刘成, 等. MIEX 技术控制饮用水消毒副产物的研究进展 [J]. *中国给水排水*, 2009, 25(6): 14 - 18.
- [19] Niina M Vieno, Heli Harkki, Tuula Tuhkanen, *et al.* Occurrence of pharmaceuticals in river water and their elimination in a pilot-scale drinking water treatment plant [J]. *Environ Sci Technol*, 2007, 41: 5077 - 5084.
- [20] 裴亮, 董波, 姚秉华, 等. 超滤与粉末活性炭组合工艺处理饮用水 [J]. *工业用水与废水*, 2007, 38: 24 - 27.
- [21] Thomas A Ternes, Martin Meisenheimer, Derek Mccowell, *et al.* Removal of pharmaceuticals during drinking water treatment [J]. *Environ Sci Technol*, 2002, 36: 3855 - 3863.
- [22] 陈言明, 沈倩青, 朱易春, 等. 催化臭氧氧化-生物活性炭饮用水深度处理技术介绍 [J]. *给水排水*, 2010, 36(S1): 57 - 62.
- [23] 付军凤. 纳滤膜法除硫酸根技术进展 [J]. *氯碱工业*, 2009, 45(1): 7 - 10.
- [24] Soo-Ah Lee, Kwang-Ho Choo, Chung-Hak Lee, *et al.* Use of Ultra-filtration Membranes for the Separation of TiO<sub>2</sub> Photocatalysts in Drinking Water Treatment [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2001, 40: 1712 - 1719.
- [25] 田家宇, 张宇. 超滤膜/混凝生物反应器去除饮用水中有机物的效能 [J]. *中国给水排水*, 2009, 25(5): 20 - 23.
- [26] 王晓伟, 杨开. 反渗透技术脱除水中硼酸的研究与应用进展 [J]. *水处理技术*, 2010, 36(8): 6 - 9.
- [27] Hugues Humbert, Herve Gallard, Herve Suty, *et al.* Performance of selected anion exchange resins for the treatment of a high DOC content surface water [J]. *Water Research*, 2005, 39: 1699 - 1708.
- [28] Mehmet Kitis, Ilker B Harman, Nevzat O Yigit, *et al.* The removal of natural organic matter from selected turkish source waters using magnetic ion exchange resin (MIEX) [J]. *Reactive & Functional Polymers*, 2007, 67: 1495 - 1504.
- [29] 张宝亮, 张秋禹, 张和鹏, 等. 磁性复合微球处理水中氯仿的应用研究 [J]. *化学工程*, 2010, 38(10): 60 - 64.
- [30] 田丽娟, 刘捷涛, 陆柱. 金属粉体合金材料 SPM 在饮用水处理中的应用研究 [J]. *净水技术*, 2007, 26: 62 - 64.
- [31] 徐振华, 左莉娜, 汤甜玉, 等. 聚羟基铝铁改性累托石处理低氟饮用水的应用研究 [J]. *非金属矿*, 2009, 32(1): 77 - 83. ■

(上接第 87 页)

指标,并保证了安全、稳定生产。原来设想检测时滞 在 2 min 以内,而实际检测结果经常在 5 s 以内,即使存在较大干扰,控制误差也在 0.05 之内。图 3、图 4 的波形所显示的是开始生产 1 h 内的检测记录曲线,从该记录曲线图中可以看出,系统有效地解决了氧含量监测控制的时滞问题。

### 参考文献

- [1] 王庭富. 21 世纪合成氨的展望 [J]. *化工进展*, 2001, (8): 6 - 8.
- [2] 蒋德军. 合成氨工艺技术的现状及其发展趋势 [J]. *现代化工*, 2005, (8): 9 - 14.
- [4] 冯元琦. 实现“十一五”合成氨节能指标构建节能型企业 [J]. *大氮肥*, 2005, (5): 73.
- [5] 沈之宇, 张庆武, 阎镜予, 等. 合成氨生产系统的两步逐级正交优化 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2005, (2): 277 - 283.
- [6] 张增亮, 蔡康旭. 可燃气体(液体蒸气)的爆炸极限与最大允许氧含量的对比研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2005, (12): 64 - 68.
- [7] 裴志波. 合成氨生产过程中氧含量的自动控制 [J]. *石油化工自动化*, 1991, (6): 63 - 65.
- [8] 章仪. 新型氧浓度传感器及测定仪问世 [J]. *自动化仪表*, 1997, (11): 37.
- [9] 仪表工应知应会问答(磁导式氧分析仪应用技术部分) [J]. *化工自动化及仪表*, 1984, (6): 73 - 71.
- [10] 张建海, 唐廖强. 外置式氧化锆检测 FCCU 烟气氧含量方法的改进 [J]. *自动化与仪表*, 2003, (5): 22 - 23.
- [11] 翁学敏. 谈谈气柜的惰性气体置换 [J]. *化工设计通讯*, 1982, (1): 51 - 54.
- [12] 李长明. 气柜置换终止点探讨 [J]. *煤气与热力*, 1988, (6): 39 - 41.
- [13] 全尚仁, 王大光, 王玲伟, 等. 气柜采用综合防护措施调查报告 [J]. *石油化工腐蚀与防护*, 2005, (2): 60 - 62.
- [14] 陈沛智, 杨倬, 吴明慧. 国产 DZF-1 型碳、氢、氮及氧元素自动分析仪的使用 [J]. *湖北大学学报(自然科学版)*, 1983, (2): 121 - 126.
- [15] 沈之宇. 小氮肥氨合成装置先进控制与优化研究与应用 [D]. 中国优秀博士学位论文全文数据库(博士), 2006.
- [16] 尹忠海, 刘剑, 胡继华. 合成塔氢氮比调节 [J]. *化工自动化及仪表*, 1989, (5): 33 - 35.
- [17] 鲁照权. 大时滞不确定过程稳定性及自适应时滞补偿 H-∞ 鲁棒控制研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2002.
- [18] 鲁照权, 韩江洪. 一类大时滞过程的内模预测控制 [J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2001, (1): 1 - 5. ■