

不同臭氧化方式对臭味物质 IBMP 去除效果研究

蒋 金¹, 安娜¹, 张 义², 李 珏³, 楚文海¹, 高乃云¹

(1. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092;

2. 镇江市自来水公司, 江苏 镇江 212001; 3. 镇江市给排水管理处, 江苏 镇江 212001)

摘 要: 研究了不同 O_3 投加方式情况下, O_3 - H_2O_2 及其联用工艺对臭味物质 2- 甲氧基 -3- 异丁基吡嗪 (IBMP) 的去除效果。结果表明, 在同一 O_3 投加方式条件下, O_3 - H_2O_2 联用工艺 (O_3 间歇流法 26.1%, O_3 连续流法 100%) 对 IBMP 的去除效果最好, 其次是单独 O_3 (O_3 间歇流法 23.17%, O_3 连续流法 96.9%), 单独 H_2O_2 (7.6%) 效果最差。 H_2O_2 可催化 O_3 加速产生 $\cdot OH$, 使 IBMP 氧化速率加快, 提高了去除率。 O_3 投加方式对 IBMP 的去除效果有着较大影响, 当采用间歇流法时, IBMP 的去除率仅为 25% 左右, 当采用连续流法时, IBMP 的去除率接近 100%, 可见 O_3 连续流法更易于去除水中的 IBMP。

关键词: 2- 甲氧基 -3- 异丁基吡嗪 (IBMP); 致臭物质; O_3 - H_2O_2 联用工艺; 投加方式

中图分类号: TU991.27; TQ031.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3770(2012)03-0034-004

造成饮用水中异嗅异味的物质有很多。迄今为止, 经查证的常见的异嗅有: 由浮游生物引起的芳香味)、青草味、泥土味、药品味、腐殖臭、霉味、鱼腥臭和臭鸡蛋味等, 由工业废水引起的酚臭、焦油臭、腐败臭和氯苯味等。其中最为普遍的是一些具有土霉味的化合物, 主要包括土臭素 (GSM)、2- 甲基异冰片 (2-MIB)、2- 甲氧基 -3- 异丙基吡嗪 (IPMP)、2- 甲氧基 -3- 异丁基吡嗪 (2-isobutyl-3-methoxypyrazine, IBMP)、2,4,6- 三氯代茴香醚 (TCA)。目前国内外对微生物代谢产物类致臭物质的去除研究主要集中在土臭素和 2-MIB 上, 而对其他微生物代谢产物类致臭物质 (如 IBMP) 的去除特性的研究鲜见报道。

水体中的臭味物质主要来源于微生物的代谢^[1-3]。据研究表明, IBMP 主要是放线菌和一些土壤细菌的代谢产物^[4]。Cudjoe 等人采用静态顶空进样技术结合气相色谱检测出异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 和 *Hippodamia convergens* 的分泌物中含有 IBMP^[5]。后来有研究者采用液相色谱 - 质谱联用仪 (LC-MS)/MS 检测到某些葡萄酒中也含有 IBMP^[6]。因此, 此类物质容易进入环境, 从而引发臭味问题。此外, 工业上, IBMP 为无色透明液体, 具有咖啡、格莲、绿铃胡

椒香气, 可赋予香精新鲜的嗅感, 透发性好, 香气易于飘逸, 被广泛用作日用化妆香精。IBMP 的分子式 $C_8H_{12}ON_2$, 物化性质见表 1^[7]。

表 1 IBMP 的物化性质

Tab.1 Physical and chemical character of IBMP

项目	数据	项目	数据
嗅阈 /ng·L ⁻¹	2	蒸气压 /Pa	29.6
沸点 /℃	244.7	$K_h^{(1)}/Pa \cdot m^3 \cdot mol^{-1}$	4.74
溶解度 /mg·L ⁻¹	1 034	$K_{ow}^{(2)}$	2.72

1) 亨利常数; 2) 溶质在辛醇及水中的分配系数。

消费产品中的 IBMP 在使用后经过城市污水管网进入污水处理系统, 但城市污水处理厂缺乏对 IBMP 的有效去除措施, 使其随污水厂出水进入水体和生态系统, 而且现有水厂中多为混凝 - 沉淀 - 过滤常规工艺, 亦很难将其有效去除, 且其嗅阈值很低, 质量浓度为 $0.4 ng \cdot L^{-1}$ ^[6]。

以上 2 方面的原因, 使 IBMP 广泛出现于环境中, 诱发臭味问题的可能性增大。Peter 等人在湖泊水体中检测出了 IBMP^[8]。张锡辉等人采用 HS-SPME-GC 法对南方某市的各类水体进行测定, 在地表河水 I、地表河水 II (久旱)、地表河水 II (暴雨后) 和景观湖泊水中均检测出 IBMP, 其质量浓度分别为

收稿日期 2011-08-24

基金项目 国家科技重大专项资助 (2008ZX07421-002, 2008ZX07421-004), 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2008AA06A412); 住房和城乡建设部研究开发项目 (2009-K7-4)

作者简介 蒋 金 (1988-) 女, 硕士研究生, 研究方向为饮用水处理, E-mail: jiansheshui1988@163.com

联系作者 高乃云, E-mail: gaonaiyun@sina.com

2 357、7 832、187、206 ng·L⁻¹。

由于近几年不断频发的饮用水臭味问题,尤其是无锡蓝藻臭味事件之后,使得人们越来越关注饮用水中的臭味问题。而目前国内外关注较多的致嗅物质主要是 GSM 和 2-MIB,对 IBMP 的研究较少。本试验采用不同 O₃ 化方式氧化降解 IBMP,以期对 IBMP 的氧化降解提供一些数据和理论基础。

1 材料与方法

1.1 仪器和材料

GC-MS, 型号 QP2010S RTX-5 MS 毛细管柱 (30 m×0.25 mm 0.25 μm) AOC-20i 自动进样器; O₃ 发生器 DHX-I 多功能 O₃ 净化处理器; 电子天平 型号 GA2003。

IBMP 标准品为优级纯 (Sigma-Adrich 公司) 质量分数不低于 98%, 试验时将 IBMP 标准样品溶解于甲醇配制成质量浓度 500 mg·L⁻¹ 初级母液,再用去离子水稀释到试验所需含量。用水为 Millipore 超纯水机器制备。甲醇、一氯辛烷及正己烷为色谱纯 (Sigma-Adrich) 质量分数不低于 95% H₂O₂ 体积分数为 30% HCl、NaOH 和 Na₂S₂O₃ 为分析纯。

1.2 试验流程

试验在一拟平底烧瓶反应器中进行,采用去离子水配置原水。在反应瓶中装入 1 L 去离子水,采用不同的方式投加氧化剂和 IBMP 储备液。在不同时间间隔取样,同时用 0.1 mol·L⁻¹ 的硫代硫酸钠溶液终止氧化反应。

O₃ 作为主要氧化剂采用 2 种投加方式。一是采用间歇流法,即向装有 1 L 去离子水的反应瓶中通入 O₃,一段时间 (20、30 min) 后,停止通入 O₃,再加入 IBMP 储备液与水中的 O₃ 进行反应。此种投加方式可以将水中的其他气体排出,使反应器内保持一个纯净的反应环境。马军、齐飞等采用此种投加方式降解水中臭味物质获得了良好的效果^[10-11]。二是采用连续流法,即在 1 L 去离子水的反应瓶中加入 IBMP 储备液以后连续通入 O₃,其质量流量为 0.25 mg·min⁻¹。投加 O₃ 时其尾气采用 2 级碘化钾溶液吸收。

1.3 分析方法

O₃ 发生器的流量采用碘量法测定^[12],其含量采用固定 O₃ 通入的流量,调节不同的通气时间来控制。pH 采用雷磁 PHS-3C 精密 pH 计测定。

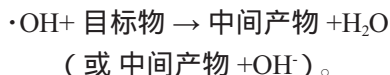
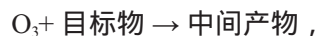
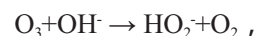
IBMP 用正己烷液液萃取,采用 GC-MS 测定其含量。内标物为一氯辛烷,高纯氮气作载气,载气流量

以速度控制,体积流量 40 mL·min⁻¹,进样量 1.0 μL,无分流进样,数据采集和处理用 GC-MS solution 软件工作站。进样口温度 250 °C,质谱检测器进样口温度 200 °C,质谱检测器离子源温度 250 °C。溶剂延迟 4 min。升温程序 初始温度为 40 °C,保持 1 min,然后以 80 °C·min⁻¹ 的速率升温至 210 °C,再以 25 °C·min⁻¹ 的速率升温至 250 °C,保持 3 min,IBMP 的特征离子 137、152,出峰时间 9.600 min。

2 结果与讨论

2.1 单独 O₃ 氧化 IBMP

据研究表明,O₃ 对有机物的氧化反应主要有以下历程^[13]:



由上述反应式可以看出,O₃ 与 IBMP 的反应机理可能分为 O₃ 分子与 IBMP 直接反应和 O₃ 分解产生·OH 间接氧化 IBMP。

2.1.1 O₃ 间歇流法

试验时,向反应瓶中加入 1 L 的去离子水,连接好管路,接通 O₃ 发生器,对去离子水进行曝气,一段时间 (20、30 min) 后,停止通气,立即向反应瓶中加入一定含量的 IBMP 储备液,每隔一定时间取样。O₃ 发生器质量流量为 0.25 mg·min⁻¹。图 1 为分别向反应瓶中通 O₃ 20 min 和 30 min 后,目标去除物 IBMP 的去除率。

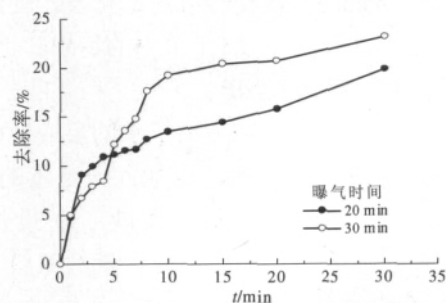


图 1 不同曝气时间对 IBMP 去除的影响

Fig.1 Effect of different ozone aeration time on the removal of IBMP

由图 1 可以看出,随着反应时间的增加,IBMP 的去除率提高。且在前 10 min 内 O₃ 与 IBMP 快速反应,之后反应速度变缓,IBMP 去除量降低,主要原因可能是 O₃ 自身分解很快,使氧化反应在前 10 min 之内快速完成,10 min 之后,水中 O₃ 含量降低,

反应减慢。比较而言,曝气时间增长,溶解在水中的 O_3 含量增加,IBMP 去除率提高。但综合起来,先通 O_3 ,再投加 IBMP 的氧化方式,对 IBMP 的去除效果并不佳,去除率仅为 20% 左右。其原因可能是 O_3 极易分解,很不稳定,在曝气的过程中,自身分解,再加上,一部分 O_3 在取样时从瓶口挥发进入空气中,使得水中仅有小部分溶解 O_3 。

2.1.2 O_3 连续流法

试验时,向装有 1 L 去离子水的反应瓶中加入一定含量的 IBMP 储备液,取空白样,测 IBMP 的初始含量,再连接好管路,接通 O_3 发生器,其质量流量为 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{min}^{-1}$,每隔一定时间取样。试验结果如图 2 所示。

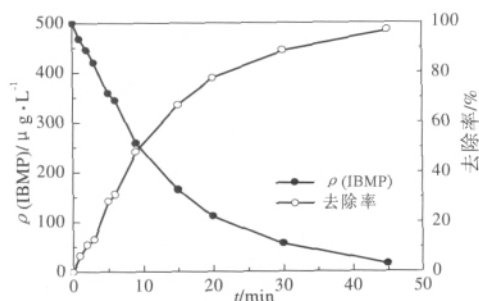


图 2 IBMP 含量和去除率随反应时间的变化

Fig.2 Variation of concentration and removal efficiency of IBMP with reaction time

由图 2 可见,随着反应时间的增加,IBMP 的去除率逐渐升高,而且 O_3 氧化 IBMP 的反应主要发生在前 20 min,其降解速率非常快,此后,反应速率减缓。显然,连续通入 O_3 的方式可以有效降解 IBMP,其氧化效果比 2.1.1 节中采用的氧化方式好很多,其主要原因是 O_3 极易分解,在还没有来得及与 IBMP 发生氧化反应的时候就已经分解或挥发,使水中溶解的 O_3 很少,也证实了 2.1.1 节中的猜想。

2.2 单独 H_2O_2 氧化 IBMP

试验中,向装有 1 L 去离子水的反应瓶中加入一定含量的 IBMP 储备液,再加入一定量的 H_2O_2 ,在不同时间间隔取样。图 3 反映了在投加相同 IBMP 含量的条件下,投加不同含量的 H_2O_2 ,IBMP 去除率的变化曲线。

由图 3 可知,随着反应时间的增加,IBMP 的去除率提高,而且 H_2O_2 对 IBMP 的氧化反应主要发生在前 20 min 之内。随着 H_2O_2 投加量的增加, H_2O_2 氧化 IBMP 的速率提高,主要是因为 H_2O_2 含量的提高增加了和 IBMP 接触反应的机会,但 IBMP 的最终去除率却相差不大,分析其原因可能是因为 H_2O_2 自

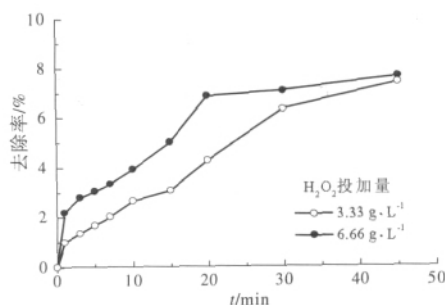


图 3 H_2O_2 投加量对 IBMP 去除的影响

Fig.3 Effect of different dosage of peroxide on the removal of IBMP

身会分解,而且分解反应会因为 H_2O_2 含量的增加而加快,虽然 H_2O_2 投加量增加 1 倍,但分解速度也会加快,这就使溶液中能够和 IBMP 反应的有效 H_2O_2 含量相差不大,致使最终去除率变化很小。无论 H_2O_2 的投加量为 $6.66 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 还是 $3.33 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,反应 45 min 后的去除率仅在 7% 左右,由此可见, H_2O_2 对 IBMP 的氧化能力有限。

2.3 O_3 - H_2O_2 联用氧化 IBMP

H_2O_2 作为一种具有较强氧化性的氧化剂,在水处理中有广泛的应用,在 O_3 - H_2O_2 体系中, H_2O_2 对 O_3 的氧化具有催化作用,它们的协同作用可以产生具有极强氧化能力的羟基自由基。

HO_2^{\cdot} 分解 O_3 的过程不仅速度更快,而且分解产生 $\cdot OH$ 的效率更高。在常见的氧化剂中,羟基自由基具有除氟以外最高的氧化电极电位,且其不具选择性,可以无选择地和有机物发生氧化反应,氧化效率更高、速率更快。

2.3.1 O_3 间歇流法 + H_2O_2

试验时,向反应瓶中加入 1 L 的去离子水,连接好管路,接通 O_3 发生器,对去离子水进行曝气,一段时间后,停止通气,立即向反应瓶中加入 5 mL H_2O_2 溶液和 IBMP 储备液,每隔一定时间取样。图 4 反映了在采用 O_3 间歇流法的投加方式下,单独 O_3 和 O_3 - H_2O_2 联用工艺对 IBMP 的去除效果。

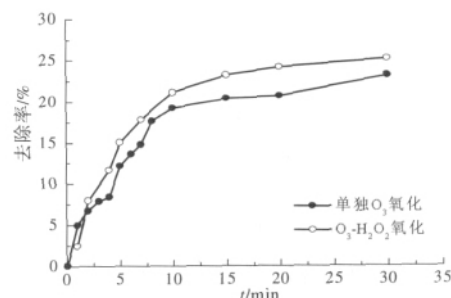


图 4 不同氧化剂对 IBMP 去除的影响

Fig.4 Effect of different oxidants on the removal of IBMP

由图 4 可见,随着反应时间的延长,IBMP 的去除率增加,反应速率在前 10 min 之内很快,10 min 之后趋于平缓,可见 $O_3-H_2O_2$ 对 IBMP 的氧化反应主要发生在前 10 min。 $O_3-H_2O_2$ 联用氧化 IBMP 的效果要略优于单独 O_3 氧化 IBMP,而且 $O_3-H_2O_2$ 联用氧化 IBMP 的速率要比单独 O_3 的快,主要是因为 H_2O_2 对 O_3 的催化作用,使 O_3 更快分解产生 $\cdot OH$,加快了反应速率。与图 3 相比,这种氧化方式对 IBMP 的去除率又远远低于 O_3 连续流的氧化方式,主要原因是在曝气的过程中, O_3 自身分解或挥发,使得溶液中可以有效氧化 IBMP 的 O_3 很少。

2.3.2 O_3 连续流法 + H_2O_2

试验时,向装有 1 L 去离子水的反应瓶中加入一定含量的 IBMP 储备液,取空白样,测 IBMP 的初始含量,再加入 5 mL H_2O_2 溶液,然后连接好管路,接通 O_3 发生器,其质量流量为 $0.25\text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$,每隔一定时间取样。图 5 反映了连续通入 O_3 时, $O_3-H_2O_2$ 联用和 O_3 单独氧化 IBMP 的效果。

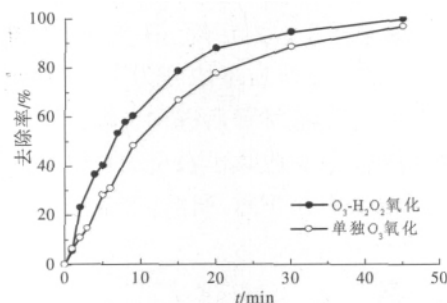


图 5 不同氧化剂对 IBMP 去除的影响

Fig.5 Effect of different oxidants on the removal of IBMP

由图 5 可知, $O_3-H_2O_2$ 联用氧化 IBMP 的速率快于 O_3 单独氧化,可见, H_2O_2 确实对 O_3 氧化有着催化作用,能催化 O_3 更快分解产生 $\cdot OH$ 。 $O_3-H_2O_2$ 联用工艺对 IBMP 的去除效果要略优于 O_3 单独作用,反应至 20 min 时,单独 O_3 对 IBMP 的去除率为 77.83%,而联用工艺高达 88.11%,反应进行 45 min 之后,单独 O_3 对 IBMP 的去除率为 96.9%,联用工艺对 IBMP 的去除率达到 100%。相对于其他氧化方式,在对 IBMP 的氧化过程中, O_3 的作用是最主要的,而且 O_3 投加的方式对 IBMP 去除起着重要的作用,连续通入 O_3 对 IBMP 的去除效果最好。

3 结论

不同氧化剂对 IBMP 的氧化效果不同,当 O_3 投

加方式相同时, $O_3-H_2O_2$ 联用工艺对 IBMP 的去除效果最好,其次是单独 O_3 ,单独 H_2O_2 效果最差。同一氧化剂不同投加方式对 IBMP 的氧化效果也不同,在同等条件下, O_3 连续流法对水中 IBMP 的去除效果远优于间歇流法。

当 O_3 投加方式相同时,单独 O_3 和 $O_3-H_2O_2$ 联用工艺对 IBMP 的去除率相差不大,但在 H_2O_2 的催化作用下, O_3 能更快分解产生 $\cdot OH$,使得联用工艺的氧化速率比单独 O_3 有一定提高。

参考文献:

- [1] Suffet I H, Corado A, Chou D, et al. AWWA taste and odor survey [J]. Am Water Works Assoc., 1996, 88(4): 168-180.
- [2] Young W F, Horth H, Crane R, et al. Taste and odor threshold concentrations of potential potable water contaminants [J]. Wat Res., 1996, 30(2): 331-340.
- [3] Jensen S E, Anders C L, Coatcher L J, et al. Actinomycetes as a factor in odor problems affecting drinking water from the north Saskatchewan River [J]. Water Research, 1994, 28(6): 1393-1401.
- [4] Amir Salemi, Silvia Lacorte, Habib Bagheri, et al. Automated trace determination of earthy-musty odorous compounds in water samples by on-line purge-and-trap-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Chromatography A, 2006, 1136: 170-175.
- [5] Erasmus Cudjoe, Tara B Wiederkehr, Ian D Brindle. Headspace gas chromatography-mass spectrometry: a fast approach to the identification and determination of 2-alkyl-3-methoxypyrazine pheromones in ladybugs [J]. Analyst, 2005, 130: 152-155.
- [6] Philippus Alberts, Maria A Stander, Sylvia O Paul, et al. Survey of 3-Alkyl-2-methoxypyrazine Content of South African Sauvignon Blanc Wines Using a Novel LC-APCI-MS/MS Method [J]. J Agric Food Chem., 2009, 57: 9347-9355.
- [7] 赵艳梅. 国内水源水典型嗅味物质调查及控制技术研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2008.
- [8] Andreas Peter, Oliver Köster, Andrea Schildknecht, et al. Occurrence of dissolved and particle-bound taste and odor compounds in Swiss lake waters [J]. Water Research, 2009, 43: 2191-2200.
- [9] 张锡辉, 伍婧娉, 王治军, 等. HS-SPME-GC 法测定水中典型嗅味物质 [J]. 中国给水排水, 2007, 23(2): 78-82.
- [10] 马军, 李学艳, 陈忠林, 等. 臭氧氧化分解饮用水中嗅味物质 2-甲基异莰醇 [J]. 环境科学, 2006, 27(12): 2483-2487.
- [11] 齐飞, 陈忠林, 李学艳, 等. O_3 氧化去除饮用水中嗅味物质 MIB 的研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(10): 1583-1586.
- [12] CJ/T 3028.2-1994 臭氧发生器臭氧浓度、产量、电耗的测量 碘量法 [S].
- [13] Gunten U. Ozonation of drinking water: part I. oxidation kinetics and product formation [J]. Water Research, 2003, 37(7): 1443-1447.

(下转第 44 页)

characterization of PVDF/TiO₂ organic-inorganic composite membranes for fouling resistance improvement [J]. Journal of Membrane Science, 2009, 345: 13-20.

技, 2009, 17(5): 34-39.

[12] 邱恒, 王永辉, 薛罡, 等. PES/PAN 膜在 MBR 中膜污染机理及抗污染性能[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(9): 159-163.

[11] 邱恒, 闵浩. 改性 PVDF 膜在 MBR 中膜污染的研究[J]. 化工科

STUDY ON ANTI-FOULING PERFORMANCE OF PVDF-TiO₂ NANO BLENDING MEMBRANE SUPPORTED BY NYLON FABRIC IN MBR

Sheng Xia, Liu Zhenhong, Yang Qi, Zhang Xin

(School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: As a support layer of polyester fabric, Polyvinylidene fluoride (PVDF) membrane was prepared with PVDF and dimethylacetamide (DMAc). And two kinds of different concentrations of TiO₂ Nano was added into the system to prepare PVDF-TiO₂ blending membrane under the operational conditions of 25 °C and 50 kPa. The water flux of these membranes were about 4 892, 3 752, 2 437 L·m⁻²·h⁻¹ respectively. According to results of membrane resistance determination in a membrane bioreactor, it was found that membrane fouling was mainly attributed to concentration polarization layer and gel layer. In MBR the decay rates of membrane flux of PVDF membrane, PVDF-TiO₂ blending membrane were about 0.112 3, 0.089 0, 0.0759 respectively, the PVDF-TiO₂ blending membrane contains the higher concentration of TiO₂ performs best for it owns slowest membrane flux decrease rate, best anti-fouling performance and highest membrane rejection effect.

Keywords: supported by nylon fabric; PVDF-TiO₂ blending membrane; membrane bioreactor; anti-fouling performance

(上接第 37 页)

THE RESEARCH ON THE EFFICIENCY OF DIFFERENT OXIDIZED FORMS TO THE REMOVAL OF IBMP

Jiang Jin¹, An Na¹, Zhang Yi², Li Yu³, Chu Wenhai¹, Gao Naiyun¹

(1.State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2.Zhenjiang Municipal Waterworks Company, Zhenjiang 212001, China;

3.Zhenjiang Water Supply and Drainage Management Office, Zhenjiang 212001, China)

Abstract: The effect of different oxidants (and H₂O₂) and different O₃ dosing methods on the removal of Taste and Odor compound 2-isobutyl-3-methoxypyrazine (IBMP) was investigated. The results showed that the degradation efficiency of IBMP by the combination process of O₃ and H₂O₂ (periodical flow of ozone: 26.1%; continuous flow of ozone: 100%) were superior to that by ozonation (periodical flow of ozone: 23.17%; continuous flow of ozone: 96.9%) or H₂O₂ (7.6%) only, at the same O₃ dosing method. Hydrogen peroxide will accelerate the decomposition of ozone to form more hydroxyl radical. This process could speed up the oxidation of the IBMP and improve its removal efficiency. The dosing methods of the ozone had the important effect on the removal of IBMP. When using the way of periodical flow of ozone, the degradation rate of IBMP was only about 25%. When using the way of continuous flow of ozone, the degradation rate of IBMP up to 100%, so the continuous flow of ozone had the better efficiency to the removal of IBMP.

Keywords: 2-isobutyl-3-methoxypyrazine (IBMP); ozone; the combination of ozone and hydrogen peroxide; dosing methods

(上接第 40 页)

STUDY ON ADSORPTION OF URANIUM IN AQUEOUS SOLUTION BY PEANUT SHELLS

Li Xiaoyan^{1,2}, Liu Yibao², Hua Ming², Gao bo²

(1.China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2.State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Uranium in aqueous solution was adsorbed using waste peanut shells, the paper studied the adsorption effect of the dosage of adsorbent, pH value, initial concentration of uranium and adsorption time on uranium. The results showed that: the peanut shells had better adsorption effect on uranium, When pH was 4.0, the initial concentration of uranium was 30 mg·L⁻¹, the dosage of adsorbent was 4 g·L⁻¹ and the adsorption time was 2.0 h, the removal reached 97.8%. The isothermal adsorption study showed that the adsorption behavior of uranium by peanut shells was more accord with Langmuir isothermal adsorption equation. It was said that adsorption of uranium by peanut shells was single molecule layer absorption (chemical adsorption) primarily, the most adsorption capacity was 5.05 mg·g⁻¹ by fit.

Keywords: peanut shells; uranium; adsorption; removal rate