

饮用水氯化消毒副产物对氯苯酚的 去除研究进展

周 超,高乃云,黎 雷,楚文海

(同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室,上海 200092)

摘 要 对氯苯酚是饮用水氯化消毒处理过程中产生的一种氯酚类消毒副产物,其强烈的毒性正引起人们的关注,但毒性机理至今仍未被掌握。介绍了应用于对氯苯酚去除的物理、生物和化学方法,重点突出了高级氧化技术,并针对现有技术去除对氯苯酚研究的一些不足之处,提出了对氯苯酚处理领域今后研究的主要方向和需解决的问题。

关键词 对氯苯酚;消毒副产物;去除;高级氧化技术

中图分类号 :TU991.2

文献标识码 :A

文章编号 :1000-3770(2011)09-0001-005

氯酚(chlorophenol)类污染物毒性大,具有“三致”(致癌、致畸、致突变)效应和遗传毒性,且具有良好的化学稳定性和热稳定性,不易被分解或生物降解。即使在 ppb 级浓度也能引起水体异味,人体长期摄入被氯酚污染的水会引起头昏、贫血等症状,甚至会造成中枢神经系统、肝等的损害,但毒性机理至今仍未完全掌握。美国环境保护局在 1977 年颁布的“清洁水法”修正案中明确规定了 65 类 129 种优先控制污染物,其中约 70 种为氯代酚类有机物。我国 1991 年调查表明,在给水源被污染的前提下,长期饮用加氯消毒水的人群,死于消化系统和泌尿系统癌症的危险大大增加^[1]。欧洲议会在 2001 年通过的欧洲决议,将氯酚类化合物列为优先控制有毒污染物。根据欧洲共同体规定,饮用水中酚类化合物的浓度不得超过 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

饮用水加氯消毒技术起源于 1908 年,至今已有近百年的历史。但随着水体中可溶性有机化合物含量的增加,氯化消毒在某些有机污染物存在的条件下很有可能产生氯代酚及其衍生物^[2]。因此,饮用水氯化消毒处理过程是氯酚类污染物的一个重要来源,此过程中产生的氯酚类有机物属于氯化消毒副产物。

氯酚由于其本身芳环结构和氯代原子的存在而具有很强的毒性和抗降解能力。在饮用水处理中,用

常规工艺和生物处理难以完全去除。在单氯酚中,尤以对氯苯酚(*p*-chlorophenol)更难于降解^[3]。这就亟需在传统饮用水处理工艺的基础上开发一些新的处理技术,从而更有效地去除饮用水中的对氯苯酚。

1 常规处理工艺

如何减轻饮用水中氯酚类消毒副产物对氯苯酚的污染日益受到人们重视。氯酚类消毒副产物对氯苯酚通常通过传统技术去除,比如活性炭吸附、生物降解等^[4]。

1.1 吸附作用

吸附作用被认为是饮用水中去除低浓度有机污染物的最有效技术。由于比表面积大、吸附力强和多微孔结构,活性炭吸附是有毒有机物去除的最有效方法。吸附动力学包括 3 个连续不断的步骤:被吸附物从本体溶液通过液体边界层扩散运输到吸附剂的外表面;被吸附物从外表面扩散进入吸附剂的气孔;被吸附物在气孔内表面活性部分的吸附作用。

Oualid 和 Emmanuel^[5]研究了高频超声波存在下颗粒活性炭对对氯苯酚的吸附动力学。研究表明,对氯苯酚的去除遵循伪 1 级反应动力学,吸附速率和吸附量在超声波存在的所有频率和功率下都显著提高。吸附作用随着超声波功率的增加而加强,而与

收稿日期 2010-12-29

基金项目 国家科技重大专项资助(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 周 超(1985—),男,博士研究生,研究方向为水处理理论与技术,E-mail:zhouchaolzxm@163.com

联系作者 高乃云,E-mail:gaonaiyun@sina.com

超声波频率成反比。

此外,生物膜对有毒有机污染物也有吸附作用。王文军等^[6]研究表明,生物膜及其不同组分均对对氯苯酚发生吸附,以细菌细胞更为显著。

1.2 共代谢降解

共代谢是一种特殊的生物降解方式。细菌培养能够利用氯酚化合物作为单一炭源和能量来源^[7]。有资料证明^[8]酚类有机物比传统生长所需化合物更适合作为生长辅底物。因此,一些常见的氯代有机物,如氯酚、氯苯等,可以通过共代谢将其生物降解^[9]。

朱凌和李济吾^[10]采用实验室分离的一株镰刀菌 HJ01,实验结果表明,该菌株能以对氯苯酚为惟一碳源和能源生长。在外加蔗糖为碳源,蔗糖质量浓度为 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、降解温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、初始 pH 为 8 的条件下, $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 对氯苯酚在 6 d 内完全降解。降解过程中对氯苯酚分子中的苯环结构被打破,对氯苯酚可被完全降解。

序批式间歇活性污泥法(SBR)作为一种潜在有效方法用来去除水中氯酚化合物。Monsalvo 等^[11]研究了不同温度下序批式间歇活性污泥反应器中对氯苯酚的共代谢降解。研究表明,SBR 能够在对氯苯酚大规模进水浓度和 $20\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围将对氯苯酚完全去除。在 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进水浓度高达 $2\ 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的对氯苯酚可以完全降解。4-氯邻苯二酚是好氧共代谢降解对氯苯酚的主要中间产物,其生物毒性远低于对氯苯酚。

1.3 联用技术

生物降解和吸附作用组合是一项有效去除有毒有机污染物的联用技术。Sofia 等^[12]研究了微藻团在不同光照强度下吸收降解对氯苯酚的能力,并检验了沸石对对氯苯酚的吸附效果。结果表明,24 h 黑暗条件,微藻团不会发生指数增长,而在光照条件,也只发生在对氯苯酚的生物降解后。24 h 光照培养基能够在 5 d 内降解 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的对氯苯酚。当 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 对氯苯酚加入到含有沸石的培养基中,微藻团生长速率增加。9 天内,无沸石的培养基完全降解对氯苯酚,而有沸石的培养基在同样的时间,只有 80% 的对氯苯酚被生物降解。吸附作用效果明显,却降低了生物降解的速率,被沸石吸附的对氯苯酚随后被生物降解利用。

然而,这些传统处理工艺在处理低浓度污染物存在效率低、成本高、二次污染等缺陷。尤其共代谢生物降解不易控制,在高浓度污染物条件,基质对细菌有较强的抑制作用。因此传统处理工艺难以获得

理想的处理效果。

2 高效新工艺

大量的有毒有机污染物已经对传统处理工艺有了一定抵抗力^[13]。针对氯酚类污染物的特点,开发高效、低成本的新处理方法和新技术迫在眉睫,其去毒和降解的关键步骤是还原脱氯或氧化降解。

2.1 还原脱氯

还原脱氯技术是一种绿色高效低耗处理技术,其原理是高活性物质在催化剂作用下使对氯苯酚中的 C—Cl 键断裂,实现脱氯降解从而降低毒性。该技术能在常温常压下实现污染水体的原位修复,具有不产生毒性更大的副产物和可回收利用原材料等优点^[14]。零价铁(Fe^0)还原脱氯是近几年发展起来的一种去除氯代有机污染物的新技术^[15]。但有资料证明^[16] Fe^0 对某些氯化物的反应活性较低,甚至会产生毒性更强的中间产物,而零价双金属镍/铁纳米粒子在氯代有机污染物的去除中比 Fe^0 表现出更高的活性。

Zhang 等^[17]研究了零价双金属 Ni/Fe 纳米粒子的合成并将其应用于水溶液中对氯苯酚脱氯。结果表明,双金属纳米镍/铁粒子由水溶液中硼氢化钠和 $\text{Ni}^{2+}/\text{Fe}^{2+}$ 发生还原反应合成,其在金属溶液比率 $0.4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、初始浓度 $0.625\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的对氯苯酚在室温和标准压力下处理 60 min 可完全脱氯。

魏红等^[18]采用零价双金属 Ni/Fe 纳米粒子对对氯苯酚原水进行脱氯处理,并研究了 Ni/Fe 配比、添加浓度、pH 和温度对 Ni/Fe 降解对氯苯酚的影响。结果表明,Ni/Fe 对对氯苯酚的脱氯效率在其配比为 2.95% 时达到最高,随 Ni/Fe 添加浓度的增加而升高,随 pH 的升高而降低,在温度 $\leq 43\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,Ni/Fe 的脱氯效率随温度升高而升高,反应为吸热反应。零价双金属 Ni/Fe 纳米粒子对对氯苯酚原水有非常有效的催化降解效果。

2.2 高级氧化技术

高级氧化技术(Advanced oxidation technologies, AOT)是 20 世纪 80 年代形成的降解有毒有机污染物新技术。这项技术的最大特点是能够产生大量非常活泼的羟基自由基·OH,直接与水中的有机污染物反应生成 CO_2 、 H_2O 和无害物,不会产生二次污染。反应速度快,既可作单独使用,又可与其它处理过程相匹配,如作为生化处理前的预处理。高级氧化技术主要包括化学氧化技术、催化氧化技术、超临界水氧化技术、电化学氧化技术、光催化氧化技术和超声波氧化技术等。

2.2.1 化学氧化技术

化合物(无机物和有机物)在氧化剂的作用下经过化学氧化反应转变成微毒、无毒或易分离形态的物质。其特点是几乎可处理所有的污染物,特别是生物难降解有机物。根据选择的氧化剂不同,化学氧化技术又可分为臭氧氧化、过氧化氢氧化和高铁酸钾等。

皮运正和王建龙^[19]研究了臭氧氧化工艺去除对氯苯酚效果,探讨了臭氧氧化对氯苯酚的反应机理和反应特性。实验结果表明,臭氧氧化涉及两种强氧化剂,臭氧分子和羟基自由基。当溶液中没有清除剂清除羟基自由基时,臭氧氧化对氯苯酚产生过氧化氢,在中性条件下过氧化氢和臭氧分子联合作用生成较多的羟基自由基,113 mg·L⁻¹的臭氧投加量能完全去除浓度为20 mg·L⁻¹的对氯苯酚以及39%的TOC。而溶液中完全清除羟基自由基后,臭氧分子也可以高效去除对氯苯酚,对氯苯酚先被氧化成黄色的对苯醌,进而转化成甲酸和乙酸。

邓子峰和陈琦^[20]研究表明,pH在pKa(9.2)附近,高锰酸钾对对氯苯酚的氧化去除率可高达93%。

2.2.2 电化学氧化技术

电化学氧化法处理难生物降解有毒有机物,具有清洁性、可控性、高效性、反应条件温和和经济性等优点,是近几年研究的热点^[21]。电化学氧化技术分为直接电解和间接电解,直接电解是污染物在电极上直接氧化被去除,而间接电解是利用电化学产生的氧化还原物质作为反应剂或催化剂,从而最终去除或者降解有害物质。

李春荣等^[22]采用电化学反应器对对氯苯酚进行了电化学氧化降解试验,考察了电解质浓度、外加电压和对氯苯酚初始浓度对对氯苯酚降解的影响。结果表明,对氯苯酚的电化学氧化降解是符合准一级反应动力学模型,且反应速率常数主要受外加电压的影响,与外加电压的2.6次方成线性关系。初始浓度影响较小,速率常数与初始浓度的-0.24次方成线性关系。其动力学方程如下:

$$\frac{dc}{dt} = -k_{abc} U^{2.6} C_0^{-0.24} c \quad (1)$$

Yin等^[23]研究了脉冲高压放电耦合内部电解系统(PHVDCIE系统)对对氯苯酚的降解效果。结果表明,放电形成的过氧化氢在单独放电系统中不会被对氯苯酚降解利用,而羟基自由基形成速率在PHVDCIE系统中增加,随着羟基自由基增多,对氯苯酚去除加速。在PHVDCIE系统中处理36 min,对氯苯酚的去除率增加到90%以上。

对氯苯酚的去除率随着废铁屑剂量的增加而提高,但当超过15 g后会有小幅度降低。PHVDCIE系统中对氯苯酚在pH为3时去除效果最好,因为电解反应在酸性溶液中更剧烈,生成更多的亚铁离子引起芬顿反应形成羟基自由基。此外,一些简单的有机酸如甲酸、醋酸和草酸会在对氯苯酚降解过程中产生。

2.2.3 光催化氧化技术

二十多年来,由于对有机污染物降解的有效性、专一性和良性产物,光催化氧化技术逐渐被推到了研究的最前端。光催化氧化技术是利用光敏化半导体来降解水体中低浓度的污染物。二氧化钛是主要的半导体,由于它化学和生物稳定性、有效性、成本效率和即用性^[24]。但近来研究表明,二氧化钛的广泛使用对于大规模水处理工程是不经济的,而氧化锌表现出与二氧化钛相类似的属性和多用性,有着跟二氧化钛一样的带隙能,遵循同样的光降解机制。因此,氧化锌被认定为二氧化钛最合适的替代物^[25]。

Umar等^[26]研究了水体中氧化锌对对氯苯酚的光学催化动力降解效果,调查了转化率对诸如原始浓度和光催化剂剂量等运行变量的动力学依赖性。结果表明,最佳降解条件是50 mg·L⁻¹对氯苯酚和2 g氧化锌,降解在温和碱性范围更有利,在pH=9时降解速率最大。在自然初始pH环境下降解过程期间被确认的稳定产品是邻苯二酚、酚、4-氯邻苯二酚和对位氯化苯醌。对氯苯酚的降解过程符合零级动力学,其降解规律可由式(2)表示,零级动力学反应规律可由式(3)表示。式中[4CP]_t和[4CP]₀表示对氯苯酚在t时刻以及初始时刻的浓度,单位为mmol·L⁻¹,k表示伪零级系数,通常表示成mol·L⁻¹·s⁻¹。

$$\frac{d[4CP]}{dt} = -k \quad (2)$$

$$[4CP]_t = -kt + [4CP]_0 \quad (3)$$

2.2.4 超声波氧化技术

20世纪90年代以来,国内外开始研究将超声波应用于水污染控制,尤其是水中有毒有机污染物的去除^[27]。超声波降解的原理是液体在超声辐射下产生空化气泡,吸收声场能量并在极短的时间内崩溃释能。空化气泡相当于一个具有高能量的微反应器。空化气泡崩溃的瞬间,在其周围极小空间产生高温高压(温度1900~2500 K、压力50 MPa),并伴有强烈的冲击波和微射流等现象。这些极端环境足以将泡内气体和液体交界面的介质加热分解产生强氧化性的自由基,如·O、·OH、·O₂H等,从而促进有机物的“水相燃烧反应”^[28]。

肖磊^[29]研究了超声降解对氯苯酚的规律和超声波对其降解效果的影响因素。实验结果说明,超声降解对氯苯酚有较好的效果,实验的最佳方案:溶液的初始浓度 $50.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、超声辐射时间为 360 min、作用频率为 59 kHz 和作用功率为 90W。

赵德明等^[30]研究了 Fenton 试剂强化双低频超声波氧化对氯苯酚的降解效果、降解机理和动力学。结果表明,双频超声波降解对氯苯酚速率比单独 22 和 40 kHz 超声波处理时提高了 1.4 倍,而 Fenton 试剂强化双频超声波技术处理对氯苯酚降解速率比单独双频超声波提高了 1.3 倍,并且降解过程符合一级反应动力学。双频超声氧化技术和 Fenton 试剂强化双频超声氧化技术都具有明显的协同效应。

2.2.5 等离子体技术

20 世纪 80 年代 Masuda S 首次提出了脉冲放电等离子体法脱硫脱硝技术,开辟了等离子体技术处理“三废”的新纪元^[31]。目前等离子体技术主要用来处理废气,而在运用该技术处理含有难降解有毒有机污染物水体方向的研究却很少,因此等离子体技术是一种很有前景的水污染控制技术,又是一种环境友好技术。在高压放电过程中发生的高温热解、光化学氧化、液电空化降解、超临界水氧化以及自由基等综合作用能够迅速而无选择性地将水中有机污染物降解为分子量小、毒性低的有机物甚至将其完全无机物,其效率比传统氧化剂高得多^[32]。

陈银生等^[31]利用水溶液中高压放电产生的低温等离子体降解对氯苯酚,测定了对氯苯酚降解速率与脉冲峰压、放电频率和放电距离等的关系。研究表明,在水中高压放电产生的非平衡等离子体可以有效地氧化降解水溶液中的有毒有机污染物。在不同放电条件,对氯苯酚的降解过程均符合 1 级反应,即 $C=C_0e^{-kt}$ 。提高脉冲峰压和放电频率可以提高对氯苯酚的降解速率,而增大放电电极与接地电极间的距离将严重降低对氯苯酚的降解速率。

2.2.6 联用技术

光催化氧化技术研究主要集中在改良光催化剂和联合其它水处理技术来提高降解有机污染物的能力^[33],仅仅通过提高光催化剂的活性无法满足大量水处理的成本需要,而与其它水处理工艺的联合使用可以弥补单一水处理技术的缺陷,显示出了很好的应用前景^[34]。

陈国宁等^[35]研究了超声波协同紫外光催化 (US-UV) 处理对氯苯酚的去除效果,探讨了反应中自由基的作用机理。结果表明,超声波在紫外光催化

反应中的协同效果明显, $\cdot\text{OH}$ 的生成速率和对氯苯酚的降解速率分别遵从 0 级和 1 级动力学方程。向溶液中投加羟基自由基清除剂可以大大抑制对氯苯酚的降解,而向溶液中投加氧化剂和金属离子可以清除溶液中的光生电子,提升对氯苯酚的降解率。通过 UV-Vis 漫反射光谱发现 TiO_2 和氯酚形成化合物,自由基首先与这些表面化合物发生反应。

3 结语与展望

对氯苯酚是饮用水氯化消毒处理过程中产生的一种氯酚类消毒副产物,毒性大,具有“三致”(致癌、致畸、致突变)效应和遗传毒性,但毒性机理至今仍未被掌握。关于饮用水中氯化消毒副产物对氯苯酚的去除已经开展了一些研究,然而对其毒性机理的认识还很不充分,去除研究也还存在很多空白,需要做更深入的研究。尤其是:(1) 如何降低对氯苯酚降解过程中间产物的危害,甚至避免其产生;(2) 如何识别提取对氯苯酚,正确利用化废为宝。有资料表明^[36],对氯苯酚主要应用于煤炭中硫磺和氮的提取、染料和毒品合成的中介介质、作为甲醇变性剂或者油类精炼的溶剂;(3) 考察应用于去除其它氯酚的技术是否对对氯苯酚的去除有普遍适用性,其它高级氧化技术是否有应用于去除对氯苯酚的前景;(4) 确定几种准确高效的普遍检测饮用水中对氯苯酚含量的方法;(5) 对氯苯酚对人体的具体毒性机理还需要作进一步研究;(6) 虽然高级氧化技术能够高效去除对氯苯酚,但反应条件要求苛刻,反应器材选用及制造困难,运行费用较高,所以还需要更进一步的研究,将现有氧化技术与工艺的不断改进,开发多种高级氧化技术的联合运用。

参考文献:

- [1] 王业俊,许保玖,严煦世.水和废水技术研究[M].北京:中国建筑工业出版社,1991.
- [2] Rodriguez J D, Llompарт M P, Cela. Solid-phase extraction of phenols[J]. J Chromatogr A, 2000, 885(14): 291-304.
- [3] 陈伟,范瑾初,陈玲.超声-过氧化氢技术降解水中 4-氯酚[J].中国给水排水,2000,16(2): 1-4.
- [4] Ra J S, Oh S Y, Lee B C, et al. The effect of suspended particles coated by humic acid on the toxicity of pharmaceuticals, estrogens and phenolic compounds [J]. Environment International, 2008, 34: 184-192.
- [5] Oualid Hamdaoui, Emmanuel Naffrechoux. Adsorption kinetics of 4-chlorophenol onto granular activated carbon in the presence of high frequency ultrasound [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2009, 16: 15-22.

- [6] 王文军,张学林,王文华,等.生物膜及其组分对对氯苯酚的吸附速率研究[J].环境化学,2001,20(4):338-346.
- [7] Sahinkaya E, Dilek F. Effect of feeding time on the performance of a sequencing batch reactor treating a mixture of 4-CP and 2,4-DCP [J].Journal of Environmental Management,2007,83:427-436.
- [8] Calvo L, Mohedano A F, Casas J A, et al. Treatment of chlorophenols-bearing wastewaters through hydrodechlorination using Pd/activated carbon catalysts[J].Carbon,2004,42:1377-1381.
- [9] Liu W, Howell J A, Arnot T C.A novel extractive membrane bioreactor for treating biorefractory organic pollutant in the presence of high concentrations of inorganic application to a synthetic acidic effluent containing high concentrations of chlorophenol and salt[J].Journal of Membrane Science,2001,181:127-140.
- [10] 朱凌,李济吾,镰刀菌 HJ01 对对氯苯酚的降解特性[J].化工环保,2009,29(5):402-406.
- [11] V M Monsalvo, A F Mohedano, J A Casas, et al. Cometabolic biodegradation of 4-chlorophenol by sequencing batch reactors at different temperatures [J].Bioresource Technology,2009,100:4572-4578.
- [12] Sofia A C Lima, M Filomena J, Raposo, et al. Biodegradation of p-chlorophenol by a microalgae consortium [J].Water Research, 2004,38:97-102.
- [13] B F Abramovi'c, V B Anderluh, A S Topalov, et al. Kinetics of photocatalytic removal of 2-amino-5-chloropyridine from water[J].APTEFF,2004,35:280.
- [14] 杨波,余刚.氢解还原法进行环境污染控制的研究进展[J].化学进展,2009,21(1):218-226.
- [15] Johnson T L, Seherer M M, Tramyck P G. Kinetics of halogenated organic compound degradation by iron metal [J].Environ Sci Technol.,1996,20(8):2634-2640.
- [16] Arnold WA,Roberts A L.Pathways and kinetics of chlorinated ethylene and chlorinated acetylene reaction with Fe⁰ particles[J].Environ Sci Technol.,2000,34(10):1794-1805.
- [17] Zhang Wei-hua, Quan Xie, Zhang Zhuo-yong. Catalytic reductive dechlorination of p-chlorophenol in water using Ni/Fe nanoscale particles[J].Journal of Environmental Sciences,2007,19:362-366.
- [18] 魏红,李克斌,徐志嫒.Ni/Fe 二元金属对对氯苯酚废水的催化降解作用[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(10):112-119.
- [19] 皮运正,王建龙.臭氧氧化水中对氯苯酚的机理和反应途径[J].中国科学,2006,36(1):87-92.
- [20] 邓子峰,陈琦,汪德家.高铁酸钾氧化降解氯酚的研究[J].环境科学与技术,2006,9(6):30-32.
- [21] Pera-Titusm, Garca-Molinav, Banosma, et al. Degradation of chlorophenols by advanced oxidation processes [J].Applied Catalysis B: Environmental,2004,47(4):219-256.
- [22] 李春荣,徐志荣,胡俊生,等.高浓度电化学氧化降解对氯苯酚动力学及其影响因素的研究[J].辽宁化工,2008,37(2):92-97.
- [23] Xiangli Yin, Wenjuan Bian, Junwen Shi. 4-chlorophenol degradation by pulsed high voltage discharge coupling internal electrolysis [J].Journal of Hazardous Materials,2009,166:1474-1479.
- [24] Z Zainal, L K Hui, M Z Hussein, et al. Removal of dyes using immobilized titanium dioxide illuminated by fluorescent lamps [J].J Hazard Mater B,2005,125:113-120.
- [25] A Akyol, H C Yatmaz, M Bayramoglu. Photocatalytic decolorization of remazol red RR in aqueous ZnO suspensions [J].Appl Catal B Environ.,2004,54:19-24.
- [26] Umar Ibrahim Gaya, Abdul Halim Abdullah,Zulkarnain Zainal, et al. Photocatalytic treatment of 4-chlorophenol in aqueous ZnO suspensions: Intermediates, influence of dosage and inorganic anions [J].Journal of Hazardous Materials,2009,168:57-63.
- [27] PETRIER C, JIANG Y,LAMY M F. Ultrasound and environment: Sonochemical destruction of chloromatic derivatives [J].Environmental Science & Technology,1998,32(9):1316-1318.
- [28] 赵德明,史惠祥,雷乐成,等.US/UV 协同催化氧化降解对氯苯酚的研究[J].环境科学学报,2003,23(5):588-592.
- [29] 肖磊,邹华生,钟艳玉,等.超声技术降解对氯苯酚的研究[J].环境科学与技术,2005,28(6):72-77.
- [30] 赵德明,史惠祥,雷乐成,等.Fenton 试剂强化双低频超声降解对氯苯酚的研究[J].浙江大学学报:工学版,2004,38(1):112-120.
- [31] 陈银生,张新胜,戴迎春,等.脉冲电晕放电等离子体降解对氯苯酚废水的研究[J].高校化学工程学报,2003,17(1):71-77.
- [32] 郑光明,朱承驻,候惠奇.低温等离子体对水体中对氯苯酚的脱氯[J].复旦学报:自然科学版,2004,43(6):1118-1124.
- [33] 赵清华,全学军,谭怀琴,等.La 掺杂 TiO₂ 光催化剂的制备与表征[J].催化学报,2008,29(3):269-274.
- [34] 李晓菁,乔冠军,陈杰榕.等离子体引发自由基增强光催化降解医用 PVC 的研究[J].环境科学,2007,28(5):963-968.
- [35] 陈国宁,王双飞,邓超冰,等.超声波协同紫外光催化处理对氯苯酚自由基作用机理[J].水处理技术,2009,35(10):47-51.
- [36] 陈芳艳,肖洁,唐玉斌.微波-改性活性炭-Fenton 试剂氧化法降解水中 2,4-二氯酚[J].化工环保,2008,28(2):106-110.

REMOVAL OF DISINFECTION BY-PRODUCTS P-CHLOROPHENOL IN DRINKING WATER

Zhou Chao, Gao Naiyun, Li Lei, Chu Wenhai

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

Abstract: p-chlorophenol is a kind of disinfection by-products produced during the process of drinking chlorinated processing, which has caused the attention of people because of its strong toxicity, but toxicity mechanism hasn't been mastered. The physical, chemical and biological methods applied to remove p-chlorophenol are introduced, and advanced oxidation technology is emphasized. In the light of some shortcomings existd, the main research fields in the future and the problems to be solved are proposed.

Keywords: p-chlorophenol; disinfection by-products; removal; advanced oxidation processes