

阴极对电化学消毒效果及无机氯副产物生成的影响研究

庞锐,张峰*,崔建国

(太原理工大学环境科学与工程学院,山西晋中030600)

摘要:采用循环流反应器,以DSA(Ti/IrO₂-RuO₂)电极为阳极,考察了3种不同材质阴极(CuZn合金、Ti、Zn)对电化学消毒效果及无机消毒副产物生成的影响,同时探究了电流密度、初始Cl⁻浓度与初始pH对该过程的影响。结果表明,在相同的实验条件下,阴极材质的改变对电化学消毒效果无明显影响,但采用CuZn合金阴极较其余2种阴极生成的氯酸盐更少。电化学析氯消毒对大肠杆菌的灭活效果随着电流密度与初始Cl⁻浓度的升高而升高,随pH升高而降低。

关键词:电化学消毒;阴极材质;活性氯;大肠杆菌;消毒副产物

中图分类号:R123.6

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2023)02-0149-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.02.029

Study on effect of cathode on electrochemical disinfection and generation of inorganic chlorine by-products

PANG Rui, ZHANG Feng*, CUI Jian-guo

(College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China)

Abstract: The impacts of three different cathode materials (CuZn alloy, Ti and Zn) on the electrochemical disinfection performance and the generation of inorganic disinfection by-products are investigated in a recirculating flow reactor with DSA (Ti/IrO₂-RuO₂) as the anode. Meanwhile, the influences of current density, initial Cl⁻ concentration and initial pH value on the circulating flow reaction are explored. It is found that the impact of different cathode materials on disinfection performance is insignificant under the same experimental conditions. However, the production of chlorate by applying CuZn alloy as the cathode is less than that by using the other two materials as cathode. In addition, the inactivation effect of E-coli by electrochemical chlorine-evolution disinfection increases with the increases of current density and initial Cl⁻ concentration, and decreases with the increase of pH.

Key words: electrochemical disinfection; cathode material; active chlorine; E-coli; disinfection by-products

消毒是水处理工艺中的重要一环。在众多消毒方式中,电化学消毒由于其环境友好、灭菌广谱性、易与其他工艺联用等特点^[1-2],成为一种有前途的水处理方法。电化学消毒的原理主要包括电场消毒^[3]、电极表面分解水产生羟基自由基等活性物质消毒^[4-6]以及电解产生活性氯进行消毒^[7-8]。

为提升电化学消毒体系下的消毒效率,阳极材质的比选受到广泛的关注。众多阳极材质中,掺硼金刚石(BDD)电极是最近研究的热点^[9-10]。BDD阳极可以生成大量羟基自由基实现消毒目的,但这种依靠自由基强氧化剂的消毒方式不具备持续抑菌的能力,还会氧化水中普遍存在的氯化物,生成大量的高价态无机氯副产物^[11]。以钛为基体,表面涂敷铂族金属或其氧化物材料的DSA(Dimension stable

anode)电极同样备受关注。此类阳极对析氯反应有良好的电催化活性,电解过程中无机氯副产物生成量较少,产生活性氯的电流效率较高,具有机械稳定性和化学稳定性,还具有持续消毒效果,已得到广泛应用^[12-14]。

电化学体系内,阴极表面主要进行电子的释放,将其附近的氧化性物质进行还原去除^[15]。因此,提升阴极的还原性能可以达到控制去除高价态无机消毒副产物的效果。吕世奇^[16]研究发现,改变阴极材质可以在电解含溴化物溶液过程中对溴酸盐副产物的生成起到抑制作用。然而,在电化学消毒体系内,关于阴极材质对消毒效果以及无机氯副产物生成影响的研究鲜有报道。

笔者采用DSA(Ti/IrO₂-RuO₂)电极为阳极,在

收稿日期:2022-03-17;修回日期:2022-12-04

基金项目:山西省自然科学基金面上项目(20210302124110)

作者简介:庞锐(1997-),男,硕士研究生,研究方向为水处理与能源资源化,1605256671@qq.com;张峰(1981-),男,博士,副教授,研究方向为水和废水处理技术研究,通讯联系人,zhangfeng@tyut.edu.cn。

模拟含菌溶液中,通过使用 CuZn、Zn、Ti 等 3 种还原性差异明显的电极作为阴极,探究了不同阴极材质对大肠杆菌灭活效果及无机氯副产物生成的影响。

1 材料与方法

1.1 实验药品

氯化钠 (NaCl, 优级纯)、硫酸钠 (Na₂SO₄, 分析纯)、硫代硫酸钠 (Na₂S₂O₃, 分析纯), 天津科密欧试剂生产。所用溶液均由超纯水配置 (电阻率 $\geq 18.25 \text{ M}\Omega/\text{cm}$)。

实验所用菌株为大肠杆菌 [E. coli CMCC (B) 44102], 北京生物保藏中心生产。LB 液体培养基 (胰蛋白胨 10 g/L、酵母提取物 5 g/L、氯化钠 10 g/L) 在恒温培养箱 (苏州培英实验设备有限公司生产) 内于 37℃、160 r/min 条件下培养 24 h, 完成扩增后在 10 000 r/min 下离心 10 min, 将浓缩后的菌种进行固液分离备用。

1.2 消毒装置

实验消毒装置如图 1 所示。

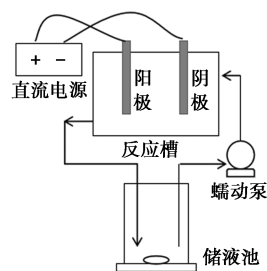


图 1 实验消毒装置

采用精密直流稳压电源 (PS-302D-II 型, 电压 0~30 V, 电流 0~5 A) 恒流供电进行循环消毒。电解槽为 14 cm×5 cm×10 cm 的敞口有机玻璃槽, 阴、阳极板平行置于槽中, 极板间距 1 cm。实验中采用蠕动泵使反应液在电解槽和容积为 1 L 的储液池之间以 100 mL/min 流速循环流动。反应全程在储液池施以恒温磁力搅拌, 以保证反应液温度恒定和浓度均匀。实验中选用的阳极为 Ti/IrO₂-RuO₂ 电极, 阴极分别选用 Ti 板、Zn 板和 Cu/Zn 合金板 (Cu、Zn 的质量分数分别为 62%、38%), 均购自合肥正影豪金属材料商行, 尺寸均为 50 mm×25 mm, 实验中实际浸润面积为 10 cm²。

1.3 实验方法

取纯化后的大肠杆菌悬浮于 1 L 不同浓度的 NaCl 溶液中, 使反应液中大肠杆菌的浓度约为 10⁶ CFU/mL, 并投加 0.5 g/L 的 Na₂SO₄ 作为基础电

解质。反应前用 1 mol/L 的 NaOH 或 H₂SO₄ 调节溶液 pH 至设定值。每次电解消毒时长均为 30 min, 每间隔一定时间从储液池取样 20 mL, 其中 10 mL 立即用于活性氯浓度检测, 5 mL 用于水样中离子浓度的测定, 另外 5 mL 需加入 0.1 g Na₂S₂O₃ 还原水样中的氧化剂后用于大肠杆菌计数。实验中采用对数杀菌率 (消毒后微生物存活率倒数的对数值) 表示大肠杆菌的灭活效果, 即对数杀菌率 2 代表 99% 的百分比杀菌率。

在循环流模式下, 分别对相同实验条件下 3 种不同阴极的杀菌率以及无机氯副产物产量进行比较, 以探究阴极材质对电化学消毒效果及副产物生成的影响。分别设定不同的电流密度 (15、30 mA/cm² 和 60 mA/cm²)、初始 Cl⁻ 质量浓度 (100、200 mg/L 和 300 mg/L) 以及初始 pH (4、7 和 10), 考察操作条件与水质条件对电化学消毒效果及副产物生成的影响。

1.4 分析方法

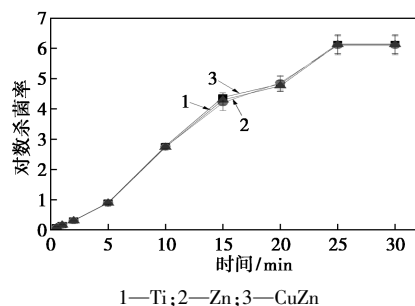
氯离子 (Cl⁻)、亚氯酸根 (ClO₂⁻)、氯酸根 (ClO₃⁻) 和高氯酸根 (ClO₄⁻) 的含量由 Aquion 离子色谱仪 (赛默飞世尔科技有限公司生产) 测定。活性氯 (包括 HClO、ClO⁻ 与溶于水的 Cl₂) 含量采用 DPD 分光光度法测定^[17]。pH 采用 FE20pH 计 (上海梅特勒-托利多公司生产) 测定。

采用菌落总数测试片测定水样中大肠杆菌的浓度^[18]。用无菌水以 10 倍梯度稀释水样, 取 1 mL 不同梯度的稀释液均匀涂布在菌落计数片上, 在 37℃ 恒温培养箱 (上海一恒科学仪器有限公司生产) 中培养 48 h 后, 对所生成的所有菌落数进行计数。每次测定 2 个平行样。

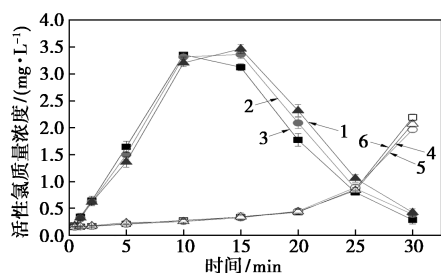
2 结果与讨论

2.1 阴极的影响

不同阴极材质对大肠杆菌灭活效果及活性氯质量浓度的影响如图 2 所示。从图 2(a) 中可以看出,



(a) 对大肠杆菌灭活效果的影响



1—无菌 Ti;2—无菌 Zn;3—无菌 CuZn;4—含菌 Ti;
5—含菌 Zn;6—含菌 CuZn
(b)对活性氯质量浓度的影响

图2 不同阴极材质对大肠杆菌灭活效果及活性氯质量浓度的影响

注:电流密度为 30 mA/cm^2 , 初始 Cl^- 质量浓度为 200 mg/L , 初始 $\text{pH}=7$ 。

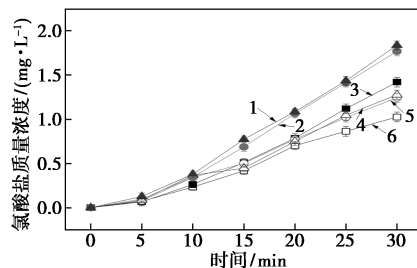
在相同的实验条件下,改变阴极材质并未对大肠杆菌的灭活效果产生明显的影响。采用不同阴极时的对数杀菌率均在 $5 \sim 10 \text{ min}$ 内达到 2-log , 即实现 99.0% 的杀菌率,并且在 25 min 左右均达到最高的 6-log , 基本实现体系内大肠杆菌的完全灭活。

在含氯溶液中, $\text{Ti}/\text{IrO}_2\text{-RuO}_2$ 阳极电消毒体系下微生物的灭活主要是活性氯发挥作用^[7]。从图 2 (b)中可以看出,在含菌和无菌 2 种条件下,活性氯浓度的变化趋势与杀菌率的变化规律呈现明显的相关性。无菌情况下,活性氯质量浓度在 10 min 内线性升高并且达到峰值。在加入大肠杆菌后,由于阳极氧化生成的活性氯在灭菌过程中不断消耗,故前 10 min 活性氯质量浓度一直处于较低的状态。反应进行到 20 min , 杀菌率已经达到 99.99% , 溶液体系内细菌降低至一定浓度,体系内由灭菌带来的活性氯消耗明显减弱,活性氯的质量浓度才显著升高。同时,活性氯在完成氧化消毒功能后,被还原成为的 Cl^- 可以继续阳极被氧化,实现了持续的消毒效能。

根据文献[13]研究结果以及前期实验结果, $\text{Ti}/\text{IrO}_2\text{-RuO}_2$ 阳极电消毒体系下, $+3$ 价态的 ClO_2^- 由于自身结构不稳定性以及高反应性,其质量浓度低于检出限。同时,包括羟基自由基在内的高氧化性活性基团可以将 ClO_3^- 进一步氧化成更高价态的 ClO_4^- , 而以 $\text{Ti}/\text{IrO}_2\text{-RuO}_2$ 为代表的高析氯阳极 $\cdot\text{OH}$ 生成能力较弱,而体系中电化学反应生成的活性氯的氧化能力难以使 ClO_4^- 生成。故 $+5$ 价的 ClO_3^- 由于其结构的稳定性成为电化学体系下最典型的含氧酸盐,浓度持续升高。

$\text{Ti}/\text{IrO}_2\text{-RuO}_2$ 阳极电解体系下, 无菌与含菌条

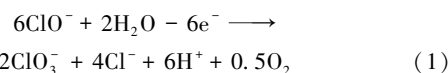
件下 ClO_3^- 浓度的变化情况如图 3 所示。从图 3 中可以看出,含菌时,由于阳极氧化生成的活性氯不断被消耗, ClO_3^- 生成反应[见式(1)]的底物质量浓度下降,同时阳极表面直接电物理消毒与氧化生成 ClO_3^- 的反应形成竞争关系,故含菌条件下,无机消毒副产物 ClO_3^- 的生成量整体降低。



1—无菌 Ti;2—无菌 Zn;3—无菌 CuZn;4—含菌 Ti;
5—含菌 Zn;6—含菌 CuZn

图3 不同阴极材质对氯酸盐质量浓度的影响

注:电流密度为 30 mA/cm^2 , 初始 Cl^- 质量浓度为 200 mg/L , 初始 $\text{pH}=7$ 。

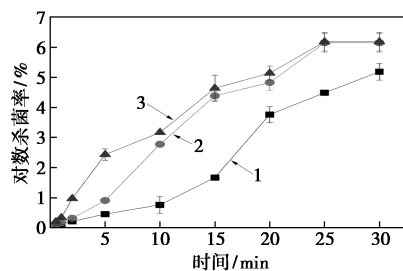


使用不同阴极时, 2 种实验环境下呈现出相似的变化规律: 相同时刻, CuZn 电极作阴极时, ClO_3^- 的生成量最低, 并随着反应的进行, 与其余 2 种单质电极体系内 ClO_3^- 生成量的差异逐渐明显。就材质本身属性而言, CuZn 合金电极较其余 2 种单质阴极具有更强的还原性与导电性, 同时, 合金内的 Cu 与 Zn 2 种成分能够各自在在多步反应的不同阶段分别提供催化作用^[15]。因此, 在电化学体系下, 双金属阴极展现出更突出的催化还原能力, 从而一定程度抑制了溶液中 ClO_3^- 的生成。

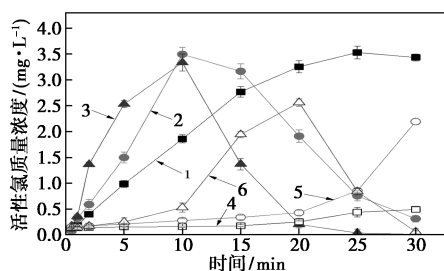
综上所述, 3 种不同电极中, CuZn 电极在保证消毒效果的同时, 能够最有效降低无机副产物 ClO_3^- 的生成。

2.2 电流密度的影响

电流密度对大肠杆菌灭活效果及活性氯质量浓度的影响如图 4 所示。从图 4(a)中可以看出, 反应



1— 15 mA/cm^2 ; 2— 30 mA/cm^2 ; 3— 60 mA/cm^2
(a)对大肠杆菌灭活效果的影响



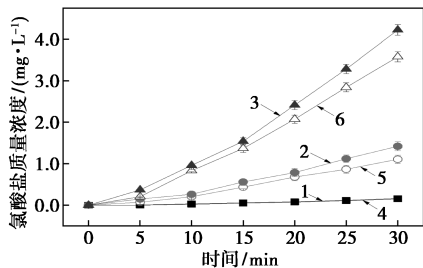
1—无菌 15 mA/cm²; 2—无菌 30 mA/cm²; 3—无菌 60 mA/cm²;
4—含菌 15 mA/cm²; 5—含菌 30 mA/cm²; 6—含菌 60 mA/cm²
(b) 对活性氯质量浓度的影响

图 4 电流密度对大肠杆菌灭活效果及活性氯质量浓度的影响

注: CuZn 电极为阴极, 初始 Cl⁻ 浓度 200 mg/L, 初始 pH=7。

进行 10 min 时, 30 mA/cm² 电流密度下, 大肠杆菌对数灭活率已经超过 2-log; 而电流密度为 15 mA/cm² 时仅有 82.64% 的杀菌率, 并且电流密度为 30 mA/cm² 的实验组比 15 mA/cm² 的实验组提前 10 min 达到 4-log 的对数杀菌率。可见电流密度的大小对消毒效果有着十分显著的影响。而当电流密度增加到 60 mA/cm² 时, 灭活效果的提升不再明显。

从图 4(b) 中可以看出, 在无菌条件下, 电流密度从 15 mA/cm² 升高至 30 mA/cm², 活性氯的生成速率大幅提升, 10 min 时前者活性氯质量浓度仅为后者的 1/2。活性氯质量浓度越高, 杀菌能力越强。同时, 随着电流密度的升高, 电场直接灭菌作用的能力也得到提升, 故综合消毒效果显著提升。随着电流密度的进一步增大, 活性氯的生成速率的增加程度明显放缓, 这是因为溶液内单位时间内可以参与反应的 Cl⁻ 的量有限, 从而限制反应速率的进一步增大; 同时电流增大伴随着槽电压的不断升高, 大量副反应发生, 不断生成副产物, 导致电流效率下降, 消毒效果下降。不同电流密度下 ClO₃⁻ 生成量变化趋势(如图 5 所示)也证明了这一点。含菌条件下,



1—无菌 15 mA/cm²; 2—无菌 30 mA/cm²; 3—无菌 60 mA/cm²;
4—含菌 15 mA/cm²; 5—含菌 30 mA/cm²; 6—含菌 60 mA/cm²

图 5 不同电流密度对氯酸盐浓度变化的影响

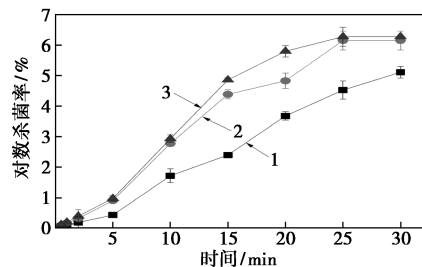
注: CuZn 电极为阴极, 初始 Cl⁻ 质量浓度为 200 mg/L, 初始 pH=7。

电流密度为 60 mA/cm², 30 min 时 ClO₃⁻ 的生成量分别是电流密度为 15 mA/cm² 与 30 mA/cm² 时的 23.92 倍与 3.23 倍。

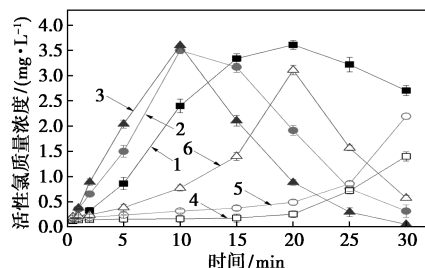
在电化学消毒体系下, 电流密度作为一个核心要素, 对杀菌效果以及无机副产物 ClO₃⁻ 的生成都有显著的影响。当水体中 Cl⁻ 质量浓度为 200 mg/L 时, 为保证消毒效果, 降低能耗, 同时有效抑制无机副产物的生成, 可将电流密度保持在 30 mA/cm² 左右。

2.3 水质条件的影响

溶液中初始 Cl⁻ 质量浓度升高, 阳极表面单位面积氧化生成活性氯的速率加快, 杀菌效果会随之提升。3 种不同氯化物质量浓度下, 大肠杆菌的灭活以及活性氯质量浓度的变化情况如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 当初始 Cl⁻ 质量浓度从 200 mg/L 升高至 300 mg/L 时, 无论是含菌体系内大肠杆菌的灭活效果还是无菌体系下活性氯的质量浓度都无显著的变化。原因在于电化学消毒体系内, 电极面积与反应液体积之比确定后, 电极表面单位面积氧化 Cl⁻ 的反应点位有限, 之后继续升高 Cl⁻ 质量浓度对活性氯生成速率的提升无明显促进。在含菌条件下, 消毒 10 min 后, 2 种质量浓度水平下大肠杆菌的对数灭活率均接近 3-log, 在消耗相似浓度的活性氯后, 初始质量浓度更高的一组展示出更强的活性氯



1—100 mg/L; 2—200 mg/L; 3—300 mg/L
(a) 对大肠杆菌灭活效果的影响



1—无菌 100 mg/L; 2—无菌 200 mg/L; 3—无菌 60 mA/cm²;
4—含菌 100 mg/L; 5—含菌 200 mg/L; 6—300 mg/L
(b) 对活性氯质量浓度的影响

图 6 不同初始 Cl⁻ 质量浓度对大肠杆菌灭活及活性氯质量浓度的影响

注: CuZn 电极为阴极, 电流密度为 30 mA/cm², 初始 pH=7。

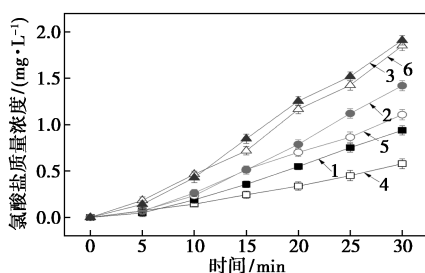
生成潜力,20 min 时初始质量浓度为 300 mg/L 的实验组活性氯质量浓度达到 3.11 mg/L,而 200 mg/L 的实验组 30 min 时只达到 2.19 mg/L。而初始 Cl^- 质量浓度在 100~200 mg/L 范围内时,电极表面 Cl^- 的反应点位充足,随着初始 Cl^- 质量浓度的升高,电化学反应生成的氯能力升高,灭菌效果便越好。这样的差异在表 1 中进一步得到验证,当反应液中不含氯时,仅仅依靠电场作用 30 min 时杀菌率仅有 22.67%;而当 Cl^- 质量浓度为 200 mg/L 的时,10 min 时杀菌率已达 99.83%。说明当水体中含有 Cl^- 时,电化学消毒主要通过活性氯杀菌实现。

表 1 含氯与不含氯溶液中大肠杆菌杀菌率对比

Cl^- 质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	时间/min					
	5	10	15	20	25	30
0	12.00%	14.00%	16.00%	18.67%	21.33%	22.67%
200	87.50%	99.83%	99.99%	99.99%	99.99%	99.99%

注:CuZn 电极为阴极,电流密度 30 mA/cm^2 ,初始 pH=7。

在无机副产物生成方面, ClO_3^- 的生成量随着初始 Cl^- 质量浓度的升高而升高(如图 7 所示)。初始 Cl^- 质量浓度从 200 mg/L 升高至 300 mg/L,30 min 时 ClO_3^- 的生成量增加了 67.09%,而消毒效果却无明显提升。所以初始 Cl^- 质量浓度不宜过高,在确保良好消毒效果的同时有效降低副产物的生成。



1—无菌 100 mg/L;2—无菌 200 mg/L;3—无菌 300 mg/L ;
4—含菌 100 mg/L ;5—含菌 200 mg/L ;6—300 mg/L

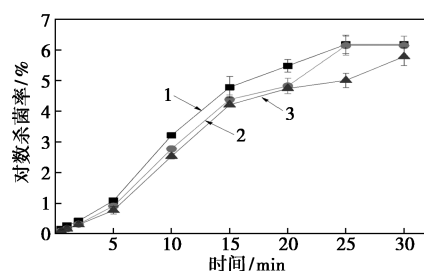
图 7 不同初始 Cl^- 浓度对氯酸盐质量浓度变化的影响

注:CuZn 电极为阴极,电流密度为 30 mA/cm^2 ,初始 pH=7。

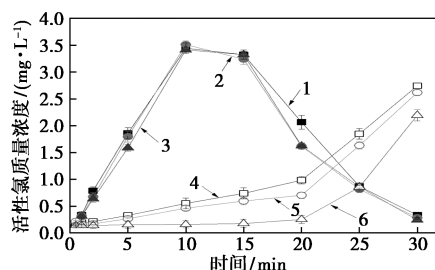
同时,与化学法加氯消毒相比,电化学消毒法能够通过电场作用实现细胞膜分解以及电穿孔等现象,加速活性氯进入细胞。由于电场直接作用与活性氯作用二者同时作用,在相同氯(以 Cl_2 计)投加量情况下,电化学消毒法可能更具优势^[19]。

初始 pH 对大肠杆菌灭活及活性氯质量浓度的影响如图 8 所示。从图 8(a)中可以看出,随着 pH

的增加,电化学法对大肠杆菌的灭活效果逐渐下降。酸性条件更有利于大肠杆菌的灭活。



1—pH=4;2—pH=7;3—pH=10
(a) 对大肠杆菌灭活效果的影响

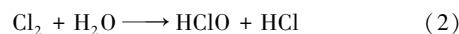


1—无菌 pH=4;2—无菌 pH=7;3—无菌 pH=10;
4—含菌 pH=4;5—含菌 pH=7;6—含菌 pH=10
(b) 对活性氯质量浓度的影响

图 8 初始 pH 对大肠杆菌灭活及活性氯质量浓度的影响

注:CuZn 电极为阴极,电流密度为 30 mA/cm^2 ,初始 Cl^- 质量浓度为 200 mg/L 。

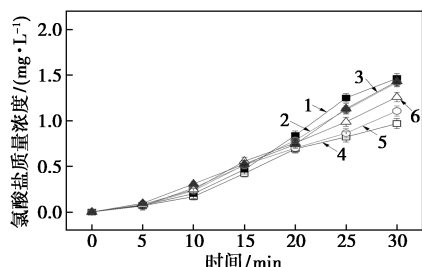
电化学体系下,电解产生的 Cl_2 迅速与水分子反应生成 HClO 和 HCl [见式(2)],当电解液的 pH 高于 4 时此反应接近完全反应。因此,溶液的 pH 会成为影响 HClO/ClO^- 分布形态的最主要因素。在 pH 为 4~6 的范围内, HClO 是活性氯中的主要成分,而当 pH 大于 8 后, ClO^- 成为最主要的成分^[20]。



由于细菌本身带负电,所以中性分子 HClO 对微生物细胞的氧化能力要强于带负电的 ClO^- 。故随着 pH 的升高,活性氯中 ClO^- 质量浓度逐渐上升, HClO 质量浓度逐渐下降,大肠杆菌的灭活效果会随之下降。

活性氯作为一个综合指标,DPD 法检测的对象包含 HClO 、 ClO^- 以及溶于水的 Cl_2 。pH 的改变主要影响活性氯中不同化学形式组分的相对含量,对总量的影响不大。从图 8(b)中可以看出,无菌条件下,不同的 pH,活性氯质量浓度变化趋势接近;而在含菌条件下,不同 pH 的灭菌能力不同,活性氯消耗能力也不同,使得最终活性氯质量浓度的变化趋势随之出现差异。 ClO_3^- 的变化趋势同样具有这一差

异。初始 pH 对氯酸盐质量浓度的影响如图 9 所示。由图 9 中可以看出, 无菌条件下, 不同 pH 时, ClO_3^- 的质量浓度变化趋势基本重合; 含菌条件下, 由于酸性条件下灭菌能力强, 活性氯消耗更快, 同一时刻 ClO_3^- 的生成量就相对较低。



1—无菌 pH=4; 2—无菌 pH=7; 3—无菌 pH=7;
4—含菌 pH=4; 5—含菌 pH=7; 6—含菌 pH=10

图 9 初始 pH 对氯酸盐质量浓度的影响

注: 电流密度为 30 mA/cm^2 , 初始 Cl^- 质量浓度为 200 mg/L , 初始 pH=7。

3 结论

(1) 在循环流电化学消毒体系下, 阴极材质的改变未对阳极生成活性氯的能力产生明显影响。相同实验条件下, 采用 3 种不同阴极时大肠杆菌的灭活效果没有明显变化, 均在 10 min 时达到 3-log 的对数杀菌率。但是由于 CuZn 合金电极较 Zn 与 Ti 电极更好的电催化还原性能, 能够有效抑制无机氯副产物 ClO_3^- 的生成。

(2) 电流密度在 $15 \sim 60 \text{ mA/cm}^2$ 内, 电流密度越高, 大肠杆菌的灭活效果越好。但是电流密度大于 30 mA/cm^2 后, 由于电流效率下降, 大肠杆菌灭活效果的提升不再明显, 同时 ClO_3^- 的生成也显著加快。

(3) 大肠杆菌的灭活效果随初始 Cl^- 质量浓度的升高而升高。初始 Cl^- 质量浓度越高, 活性氯生成速率越快。当 pH 处于 4~6 时, 活性氯主要以中性分子 HClO 存在, 更容易实现大肠杆菌的灭活, 因此酸性条件更有利于杀菌。

参考文献

- [1] Diao H, Li X, Gu J, *et al.* Electron microscopic investigation of the bactericidal action of electrochemical disinfection in comparison with chlorination, ozonation and Fenton reaction [J]. *Process Biochemistry*, 2004, 39(11): 1421-1426.
- [2] Cai M, Liu W, Sun W. Formation and speciation of disinfection by-products in desalinated seawater blended with treated drinking water during chlorination [J]. *Desalination*, 2018, 437(1): 7-14.
- [3] Niven C, Parker C B, Wolter S D, *et al.* Deactivation of *Ascaris suum* eggs using electroporation and sequential inactivation with chemical disinfection [J]. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 2020, 10(3): 558-568.
- [4] Jeong J, Kim J Y, Cho M, *et al.* Inactivation of *Escherichia coli* in the electrochemical disinfection process using a Pt anode [J]. *Chemosphere*, 2007, 67(4): 652-659.
- [5] Saloumeh G, Sasha O, Nathalie T. Electrochemical disinfection of bacteria-Laden water using antimony-doped tin-tungsten-oxide electrodes [J]. *Water Research*, 2017, 126(1): 299-307.
- [6] Rajab M, Heim C, Letzel T, *et al.* Electrochemical disinfection using boron-doped diamond electrode-The synergistic effects of in situ ozone and free chlorine generation [J]. *Chemosphere*, 2015, 121: 47-53.
- [7] Liang W, Qu J, Chen L, *et al.* Inactivation of *Microcystis aeruginosa* by continuous electrochemical cycling process in tube using Ti/RuO₂ electrodes [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39(12): 4633-4639.
- [8] Kerwick M I, Reddy S M, Chamberlain A H L, *et al.* Electrochemical disinfection, an environmentally acceptable method of drinking water disinfection? (Conference Paper) [J]. *Electrochimica Acta*, 2005, 50(25-26): 5270-5277.
- [9] Polcaro A M, Vacca A, Mascia M, *et al.* Electrochemical treatment of waters with BDD anodes: Kinetics of the reactions involving chlorides [J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2009, 39(11): 2083-2092.
- [10] Palmas S, Polcaro A M, *et al.* Influence of the operating conditions on the electrochemical disinfection process of natural waters at BDD electrodes [J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2007, 37(11): 1357-1365.
- [11] Bergmann M E H, Rollin J, Iourtchouk T. The occurrence of perchlorate during drinking water electrolysis using BDD anodes [J]. *Electrochimica Acta*, 2009, 54(7): 2102-2107.
- [12] Bidoia E D, Moraes P B, Caires Pereira Gusmao I C. Studies on the electrochemical disinfection of water containing *Escherichia coli* using a Dimensionally Stable Anode [J]. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2010, 53(5): 1235-1244.
- [13] Bergmann M, Koparal A. Studies on electrochemical disinfectant production using anodes containing RuO₂ [J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2006, 35(12): 1321-1329.
- [14] 柯跃华, 龚泰石, 杨敏, 等. 再生水电化学消毒电极材料的选择与评价 [J]. *给水排水*, 2006, 32(A1): 137-140.
- [15] Liu F, Li M, Wang H, *et al.* Fabrication and characterization of a Cu-Zn-TiO₂ nanotube array polymetallic nanoelectrode for electrochemically removing nitrate from groundwater [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2016, 163(14): 421-427.
- [16] 吕世奇. 饮用水电化学消毒过程中阴极材质对抑制溴酸盐副产物生成的影响 [D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [17] 赵剑超, 潘献辉, 刘昱, 等. DPD 分光光度法测定水中余氯的标准方法的对比 [J]. *中国给水排水*, 2016, 32(20): 106-110.
- [18] 陆荣荣, 毛炎, 黄瑶, 等. 快速测试片在食品微生物检测中的应用分析 [J]. *食品安全导刊*, 2021, (15): 129.
- [19] 赵树理, 庞宇辰, 席劲瑛, 等. 电化学消毒法对水中大肠杆菌的灭活特性 [J]. *环境科学学报*, 2016, (2): 544-549.
- [20] 宋琳. 中水的电化学安全消毒技术研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012. ■