

# 电絮凝耦合电催化预处理 高浓度表面活性剂废水的研究

陈顺权<sup>1,2</sup>, 戚广贤<sup>1,2\*</sup>, 易 岚<sup>3</sup>, 余 峰<sup>3</sup>

(1. 广州中国科学院先进技术研究所, 广东省膜材料膜分离重点实验室, 广东 广州 511458;  
2. 中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055; 3. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**采用电絮凝耦合电催化工艺对高浓度表面活性剂废水进行预处理,并探究了阳极材料、电压、电极板数量和电解质类型及浓度等因素对电絮凝耦合电催化工艺性能的影响。结果表明,在电解质为 5 000 mg/L Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、铝电极作阳极、电压为 4 V、4 组电极板最佳条件下电絮凝 4 h 后,再以 BDD 电极作阳极、电流密度控制为 10 mA/cm<sup>2</sup> 电催化 4 h, LAS 质量浓度由初始 10 000 mg/L 降至 1 350 mg/L, LAS 降解率为 86.24%, 整体能耗为 14.93 kW·h/kg LAS。

**关键词:**电絮凝;电催化;高浓度表面活性剂废水;预处理

中图分类号:X703.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)11-0154-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.11.032

## Pretreatment of high-concentration surfactant-containing wastewater via electrocoagulation coupled with electrocatalysis

CHEN Shun-quan<sup>1,2</sup>, QI Guang-xian<sup>1,2\*</sup>, YI Lan<sup>3</sup>, YU Feng<sup>3</sup>

(1. Guangdong Key Laboratory of Membrane Materials and Membrane Separation, Guangzhou Institute of Advanced Technology of Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 511458, China;  
2. Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China;  
3. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** A process coupled electrocoagulation with electrocatalysis is used to degrade high-concentration surfactant-containing wastewater. The influences of anode material, voltage, number of electrode plates, and the type and concentration of electrolyte on the process performance are investigated. The results show that LAS concentration decreases from 10 000 mg·L<sup>-1</sup> to 1 350 mg·L<sup>-1</sup>, the degradation rate of LAS reaches 86.24% and the overall energy consumption is 14.93 kW·h per kg of LAS when the wastewater has been firstly electro-coagulated for 4 hours under the optimal conditions that 5 000 mg·L<sup>-1</sup> Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> is used as electrolyte, aluminum electrode as anode, the voltage is 4 V and 4 groups of electrode plates are employed, and then it has been electrolyzed with BDD electrode as anode under a current density of 10 mA·cm<sup>-2</sup>.

**Key words:** electrocoagulation; electrocatalysis; high-concentration surfactant wastewater; pretreatment

表面活性剂废水是日化行业的特征废水。而珠三角地区是全国日化产品的主要生产地,每年产生大量高浓度表面活性剂废水。研究表明,过高浓度的直链烷基苯磺酸钠(LAS)不仅会抑制厌氧过程中微生物的生长,降低其降解效率<sup>[1-2]</sup>,还会对水生和陆生生物产生毒害作用<sup>[3-4]</sup>,LAS能通过损害膜结构、改变膜的通透性和抑制SOD酶活性导致细胞内过氧化物的增加来损害动物细胞<sup>[5-7]</sup>。并且LAS会对雄性小鼠生殖系统有毒害作用,且该作用在停止染毒后的短时期内不能恢复<sup>[8-9]</sup>。

目前国内外已研发多种方法去除表面活性剂,

练文标等<sup>[10]</sup>以聚合氯化铝(PAC)、聚合硫酸铁(PFS)为混凝剂对110 mg/L的LAS进行沉淀处理,以CaO为pH调节剂时,废水COD<sub>Cr</sub>和LAS去除率分别为74%~78%、83%~87%;周丽等<sup>[11]</sup>采用UV-TiO<sub>2</sub>催化氧化联用工艺去除1 mg/L的LAS,在紫外光强度为4 mW/cm<sup>2</sup>,3张玻璃纤维网膜分别涂敷3次条件下,反应100 min后LAS的去除率超过90%;肖昌松等<sup>[12]</sup>研究了LAS的生物降解,列举了可降解LAS的菌种及其降解能力,其中Corynebacterium jeikeium GZ6只需接种1%的菌量持续降解1 d后,400 mg/L的LAS去除率高达99%。

收稿日期:2020-12-28;修回日期:2021-09-14

基金项目:中国科学院科技服务网络计划(STS计划)区域重点项目(KFJ-STQ-QYZX-043);国家重点研发计划“中医药现代化研究”重点专项项目(2019YFC1711300)

作者简介:陈顺权(1983-),男,博士,正高级工程师,研究方向为基于膜过程的环境污染治理研究,sq.chen@giat.ac.cn;戚广贤(1990-),男,本科,工程师,研究方向为膜分离与水处理,通讯联系人,gx.qi@giat.ac.cn。

笔者在与广州某日化企业合作过程中发现,其生产过程磺化工序产生高浓度废水的主要成分为表面活性剂(LAS),质量浓度高达8 000~15 000 mg/L,间歇排放对生化处理系统冲击大,需要进行预处理后方可进入现有污水处理站。但一直没有合适的处理方案。电催化氧化是一种较为常用的提高难生化有机废水可生化性的手段,但实际应用过程中,因为其能耗高,在高浓度有机废水中应用并不是特别广泛。笔者采用“电絮凝耦合电催化”工艺对高浓度表面活性剂废水进行预处理,通过研究各工艺参数对去除率的影响,筛选出较优参数,实现对表面活性剂的高效降解。

## 1 实验部分

### 1.1 主要药品和仪器

试剂:十二烷基苯磺酸钠 LAS、无水硫酸钠、氯化钠、氯化节苏喻、酸性蓝-1、溴化底米鎊、三氯甲烷,均为分析纯;1 mol/L 氢氧化钠溶液;1 mol/L 的硫酸;0.004 mol/L 的海明 1622 溶液;混合指示剂;酚酞溶液;哈希预制 COD 试剂。

仪器:烧杯;滴定管;锥形瓶;COD 消解仪(哈希 DRB200)、COD 测定仪(哈希 DR1010);磁力搅拌器;掺硼金刚石 BDD(50 mm×25 mm)、Ti/RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub> 电极(10 cm×10 cm);铝电极(10 cm×10 cm);铁电极(10 cm×10 cm);电絮凝装置;电催化氧化装置。

### 1.2 电絮凝实验

分别以铝电极和铁电极作为阳极,向自制反应池中加入 3.5 L 废水样品,控制电流密度、板间距离、pH 等条件相同,分别于 0、30、60、120 min 等时间取样并测定 COD 和表面活性剂含量,记录电流、电压。

### 1.3 电催化氧化实验

电催化极板分别采用掺硼金刚石(BDD)电极和 Ti/RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub> 电极作为阳极,控制电流密度、板间距离、pH 等条件相同,在自制反应池中测定不同反应时间的表面活性剂含量及 COD。电催化与电絮凝耦合时,取电絮凝清液作为电催化进水。

## 2 实验的测量和计算方法

### 2.1 测量方法

按《直接两相滴定法测量表面活性剂的含量》GB 5173—2018 中所述的方法测定阴离子表面活性剂质量浓度;利用哈希水质快速检测消解法测量

COD;利用雷磁 pH 计测定 pH。

### 2.2 计算方法

阴离子表面活性剂质量浓度  $C(\text{LAS})$  的计算式为:

$$C(\text{LAS}) = (M \times C \times V) / V_m$$

式中: $C(\text{LAS})$  为 LAS 的质量浓度,mg/L; $M$  为海明 1622 的平均分子质量,346; $C$  为海明 1266 的浓度, mol/L; $V$  为滴定消耗的海明 1622 标准溶液的体积, mL; $V_m$  为取用试样的体积, mL。

去除单位 LAS 能耗  $E$  的计算式为:

$$E = (I \times U \times t) / [V \times (C_0 - C_t)]$$

式中: $E$  为去除单位 LAS 能耗, kW·h/kg; $I$  为电流, A; $U$  为电压, V; $t$  为时间, h; $C_t$  为反应后质量浓度, g/L; $C_0$  为初始质量浓度, g/L; $V$  为溶液体积, L。

LAS 去除率  $R$  的计算式为:

$$R = [(C_t - C_0) / C_0] \times 100\%$$

式中: $R$  为 LAS 去除率, %; $C_t$  为反应后质量浓度, g/L; $C_0$  为初始质量浓度, g/L。

## 3 结果与讨论

### 3.1 电催化与电絮凝的能耗效率对比

在 LAS 初始质量浓度为 5 000 mg/L、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 质量浓度为 5 000 mg/L、电流密度为 10 mA/cm<sup>2</sup>、板间距离为 2 cm 的条件下,电絮凝采用铝作为阳极,电催化采用 BDD 电极作为阳极,考察 2 h 电催化和电絮凝分别降解 LAS 的效率与所需单位能耗,结果分别如表 1 和图 1 所示。

表 1 电催化和电絮凝 LAS 去除率和单位能耗对比

处理方法	去除率/%	能耗/[kW·h·(kg LAS) <sup>-1</sup> ]
电催化	27.49	11.58
电絮凝	29.73	1.18

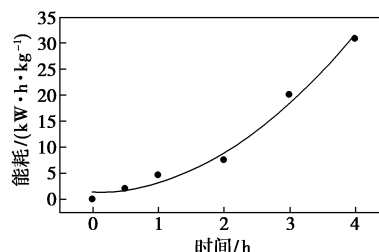


图 1 电絮凝能耗随反应时间变化趋势

从表 1 中可以看出,反应 2 h,电絮凝去除 LAS 的效率略高于电催化,能耗远低于电催化。因此在初始阶段,电絮凝作为去除 LAS 的手段具有能耗低的优点。但从图 1 中可以看出,随着反应的进行,电

絮凝的单位能耗呈指数增长,此时继续用电絮凝降解 LAS 则能耗较高。综合考虑,采用电絮凝与电催化相结合有可能降低整体能耗,实现表面活性剂 LAS 的高效率去除。

### 3.2 电絮凝降解 LAS 的影响因素

#### 3.2.1 极板种类的影响

为考察不同阳极对电絮凝降解 LAS 效率的影响,分别以铁电极、铝电极作阳极,在 LAS 初始质量浓度为 10 000 mg/L、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  质量浓度为 5 000 mg/L、极板间距为 2 cm、电流密度为 10 mA/cm<sup>2</sup> 条件下,电絮凝 2 h,结果如表 2 所示。

表 2 铝阳极和铁阳极电絮凝 2 h 后 LAS 去除率和能耗对比

电絮凝阳极材料	2 h 去除率/%	能耗/[kW·h·(kg LAS) <sup>-1</sup> ]
铝阳极	25.00	0.48
铁阳极	17.68	1.00

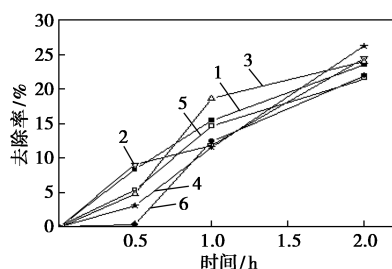
实验发现,以铁电极作为阳极时,废水颜色发生了变化。电絮凝实验开始 5 min 后,水体颜色由初始的淡黄色变为黄绿色,后变为草绿色,最后变为深绿色。对此颜色的变化,主要是铁电极被大量溶蚀,形成的  $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Fe}^{2+}$  游离在溶液中。

由表 2 可知,反应 2 h,铝电极作为阳极(简称铝阳极)LAS 的去除效率明显高于铁阳极,且单位能耗也低于铁阳极。铁阳极电解后的溶液为深绿色,而铝阳极的溶液是无色的,铁作为阳极会带来后续废水色度超标的风险。相比之下,铝阳极的电絮凝性能明显优于铁阳极。

#### 3.2.2 电解质质量浓度与种类的影响

电絮凝的性能与电解质类型和浓度密切相关,当电压一定时,增加电解质的质量浓度能提高电导率,从而节约能耗<sup>[13-14]</sup>。为考察电解质类型和质量浓度对电絮凝降解 LAS 的性能的影响,以铝电极为阳极,在电流密度为 10 mA/cm<sup>2</sup>、极板间距为 2 cm 的条件下电絮凝 6 种废水 2 h,结果如图 2 所示,所需能耗对比结果如表 3 所示。

由图 2 可知,不同电解质体系下,电絮凝处理 2 h 的 LAS 去除率在 20%~28% 之间,差别不大。 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  体系下的单位 LAS 去除能耗比氯化钠体系低。原因是 NaCl 在电解作用下部分电解成次氯酸钠,次氯酸钠对表面活性剂的降解主要依靠氧化,效率较低。而硫酸钠体系阳极主要进行铝溶解反应。因此,硫酸钠体系电絮凝能耗更低一些。综合比较,反应 2 h、5 000 mg/L NaCl+5 000 mg/L  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  的



1—电解质为 5 000 mg/L  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ; 2—电解质为 5 000 mg/L NaCl;  
3—电解质为 2 500 mg/L NaCl+2 500 mg/L  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ;  
4—电解质为 5 000 mg/L NaCl+5 000 mg/L  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ;  
5—电解质为 10 000 mg/L NaCl;  
6—电解质为 10 000 mg/L  $\text{Na}_2\text{SO}_4$

图 2 不同溶解质体系电絮凝 2 h LAS 的降解率随时间的变化

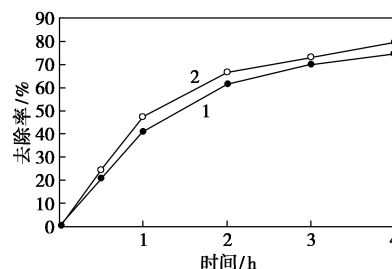
表 3 不同溶解质体系电絮凝 2 h 能耗对比

电解质体系	1	2	3	4	5	6
能耗/[kW·h·(kg LAS) <sup>-1</sup> ]	0.54	0.79	0.54	0.36	0.82	0.59

LAS 去除效果最好,且能耗较低,其次是 5 000 mg/L  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 。但实际废水的盐成分主要为硫酸钠,虽然加入少量 NaCl 有助于提高去除率,但会引入盐分,影响后续生化,因此尽可能不添加其他盐分。

#### 3.2.3 极板对数对电絮凝效果的影响

在 LAS 初始质量浓度为 10 000 mg/L、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  质量浓度为 5 000 mg/L、电压为 4 V、极板间距为 2 cm 的条件下,考察 3 组和 4 组电极板对电絮凝降解 LAS 效率。分别于 0、30、60、120、180、240 min 取样测定 LAS 的浓度,结果如图 3 所示,其能耗对比如表 4 所示。



1—3 对极板; 2—4 对极板

图 3 3 对和 4 对极板 LAS 去除率随时间变化

表 4 3 对和 4 对极板 LAS 去除能耗对比

序号	1	2
能耗/(kW·h·kg <sup>-1</sup> )	3.17	3.38

由图 3 可知,相同电压下,电极对数由 3 对增加到 4 对,相同反应时间的 LAS 去除率有所提高。随

着反应的进行,LAS 的去除速率均在下降。在电压不变的情况下,单位能耗随时间呈指数增长。说明延长电絮凝时间可以提高 LAS 去除率,但后续能耗较高。由表 4 中可以看出,4 对极板的单位能耗只略高于 3 对极板,综合考虑下,最佳极板数为 4 对极板。

### 3.2.4 电压对电絮凝效果的影响

在 LAS 初始质量浓度为 10 000 mg/L、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  质量浓度为 5 000 mg/L、极板间距为 2 cm、3 组电极板的条件下,考察电压 4 V 和 5 V 对电絮凝降解 LAS 的效率的影响,结果如图 4 所示,其能耗对比如表 5 所示。

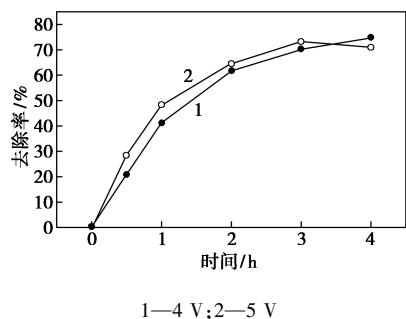


图 4 电压分别为 4 V 和 5 V LAS 去除率随时间变化

表 5 电压分别为 4 V 和 5 V LAS 去除能耗

序号	1	2
能耗/( $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	1.59	2.68

由图 4 可以看出,电压升高,电絮凝降解 LAS 的效率提高。因为随着电压升高,电流升高, $\text{Al}^{3+}$  的溶出量增加, $\text{Al}^{3+}$  水解成  $\text{Al}(\text{OH})_3$  絮凝剂,所以电压越高,LAS 的降解效率也越高<sup>[15]</sup>。而电压升高,电荷增多,过多的正电荷会使原有稳定的絮体胶粒脱稳<sup>[16]</sup>,导致去除率降低。5 V 电压时 4 h 的去除率低于 3 h,原因是 4 V 时絮体失稳,LAS 溶出。由表 5 中可以看出,5 V 电压单位能耗高于 4 V 电压,原因是此时电压已经远高于析氢、析氧电位,电压为 5 V 时,析氢、析氧副反应更加明显,因此单位能耗增加较为明显。综合考虑,电絮凝电压为 4 V 更为合适。

## 3.3 电催化降解 LAS 的影响因素

### 3.3.1 不同电催化极板的去除效果

大量研究表明,电极是电催化氧化的重要影响因素。本研究中采用较为常用的  $\text{Ti}/\text{RuO}_2-\text{IrO}_2$  和 BDD 作阳极,考察电流密度为  $10 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 、极板间距为 2 cm 时表面活性剂的去除率,结果如表 6

所示。

表 6  $\text{Ti}/\text{RuO}_2-\text{IrO}_2$  和 BDD 电催化极板表面活性剂去除效果

电解质体系	去除效果					
	1	2	3	4	5	6
BDD 阳极	27.49	32.36	17.50	19.17	22.77	19.60
$\text{Ti}/\text{RuO}_2-\text{IrO}_2$ 阳极	5.75	13.92	8.80	7.11	14.71	20.80

由表 6 可知,在不同的电解质体系中,BDD 电极去除 LAS 的效果均优于  $\text{Ti}/\text{RuO}_2-\text{IrO}_2$  电极。而  $\text{Ti}/\text{RuO}_2-\text{IrO}_2$  电极在含 NaCl 的溶解质体系中效果优于不含 NaCl 体系,原因是 NaCl 存在时产生活性氯,如氯气或次氯酸根等去间接氧化污染物,加强了氧化效果。对于不含 NaCl 的体系, $\text{Ti}/\text{RuO}_2-\text{IrO}_2$  电极的 LAS 降解效果很差。事实上,日化企业产生的 LAS 废水盐分主要为  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,NaCl 含量极低,在这种情况下, $\text{Ti}/\text{RuO}_2-\text{IrO}_2$  电极则不太适用。

### 3.3.2 不同电解时间及电解质对 BDD 电催化效果的影响

以 BDD 作阳极,在 LAS 初始质量浓度为 7 000 mg/L、电流密度为  $10 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 、极板间距 2 cm 条件下,考察电解质 10 000 mg/L  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、10 000 mg/L NaCl 和 5 000 mg/L  $\text{Na}_2\text{SO}_4+5 000 \text{ mg/L}$  NaCl 的不同反应时间电催化效果,结果如图 5 所示。

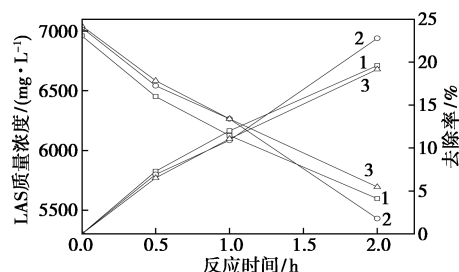


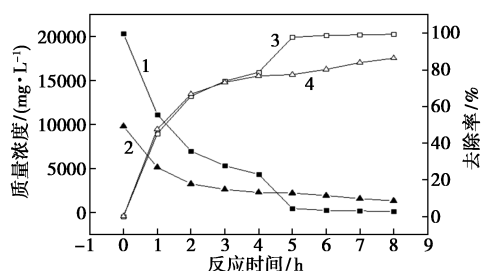
图 5 不同反应时间的 BDD 电催化氧化 LAS 效果

由图 5 可知,不同电解质体系下 BDD 电极的催化降解 LAS 效率相近,2 h 的去除率在 19%~23% 之间,说明电解质种类的变化对 BDD 电极电催化氧化 LAS 效率影响不大,同时也说明了 BDD 电极的催化效果稳定性,能够保证去除效果。随着反应时间增加,去除率呈线性增长趋势。

### 3.4 电絮凝耦合电催化的处理效果

随着反应的进行,电絮凝单位能耗随反应时间呈指数增长,2 h 时,单位能耗约为  $7 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$  LAS,4 h 为  $30 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$  LAS,反应时间延长,能耗将急剧

增加。结合前面实验并考虑实际废水情况,确定电絮凝耦合电催化体系如下:电解质为 5 000 mg/L  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,电絮凝铝电极作为阳极,电压为 4 V,采用 4 对极板,极板间距为 2 cm。电催化以 BDD 电极作阳极,极板间距为 2 cm,电流密度为 10 mA/cm<sup>2</sup>,各反应 4 h。考察电絮凝耦合电催化工艺处理初始质量浓度为 10 000 mg/L 的高浓度表面活性剂废水后的 LAS 去除率、COD 去除率和所需单位能耗,结果分别如图 6、表 7 所示。



1—COD;2—LAS 质量浓度;3—COD 去除率;4—LAS 去除率

图 6 电絮凝耦合电催化 8 h LAS 去除率、COD 随时间的变化情况

表 7 电絮凝耦合电催化的 LAS、COD 去除效果及能耗

项目	$c(\text{LAS})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	LAS 去除率/%	COD/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	COD 去除率/%	能耗/ $(\text{kW}\cdot\text{h}\cdot(\text{kg LAS})^{-1})$
起始	9813.6	0	20340	0	—
电絮凝 4 h	2300	76.56	4360	78.56	3.38
电催化 4 h	1350	41.30	140	96.79	40.91
整体	—	86.24	—	99.31	14.93

由图 6 和表 7 可知,经电絮凝耦合电催化工艺处理 8 h 后,LAS 的去除率达到了 86.24%,而 COD 的去除率更是高达 99.13%。降解后 LAS 的质量浓度为 1 350 mg/L,降解后 COD 较低,原因是反应过程中还原产物增加,导致末端 COD 测量误差。综合能耗为 14.93 kW·h/kg LAS,其中电絮凝段单耗为 3.38 kW·h/kg LAS,电催化段能耗为 40.91 kW·h/kg LAS,折算成吨水能耗 126 kW·h。

## 4 结论

采用电絮凝耦合电催化工艺对模拟日化企业高浓度废水进行了小试研究,结果表明,该工艺能高效降解高浓度表面活性剂废水,表面活性剂质量浓度由 10 000 mg/L 降解到 1 350 mg/L,较好地实现了项目指标,可作为高浓度表面活性剂废水的预处理工序,降低生化系统表面活性剂处理负荷,减少表面

活性剂对生化处理系统的冲击。同时,该组合工艺受电解质体系影响小,实际应用时可避免因为电解质变动影响处理效果。

电絮凝技术对表面活性剂具有良好去除效果,但随着反应进行,能耗会急剧增加,与电催化耦合使用可降低整体能耗,LAS 质量浓度从 10 000 mg/L 降至 1 350 mg/L 时,能耗为 14.93 kW·h/kg LAS。

## 参考文献

- [1] Garcia M T, Campos E, Dalmau M, *et al.* Inhibition of biogas production by alkyl benzene sulfonates (LAS) in a screening test for anaerobic biodegradability [J]. *Biodegradation*, 2006, 17 (1): 39-46.
- [2] Angelidaki I, Tornig L, Waul C, *et al.* Anaerobic bioprocessing of sewage sludge, focusing on degradation of linear alkylbenzene sulfonates (LAS) [J]. *Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2004, 49 (10): 115-22.
- [3] Zhou Jianan, Wu Zhonghua, Yu Dan, *et al.* Toxicity of linear alkylbenzene sulfonate to aquatic plant *Potamogeton perfoliatus* L [J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2018, 25 (32): 32303-32311.
- [4] Liu N, Wu Z. Toxic effects of linear alkylbenzene sulfonate on *Chara vulgaris* L [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2018, 25 (5): 4934-4941.
- [5] 雷鸣,廖柏寒,娄敏,等. LAS 对澎泽鲫鳃及肝脏 ATPase 和 SOD 活性的影响 [J]. *湖南农业大学学报 (自然科学版)*, 2004, 30 (3): 272-274.
- [6] 张云飞,王茗,刘华倩,等. LAS 对草金鱼毒性效应研究 [J]. *科技创新与应用*, 2017, (15): 64-65.
- [7] 赵文红,赵红,王开磊,等. 直链烷基苯磺酸钠致人张氏肝细胞损伤的毒性作用 [J]. *卫生研究*, 2016, 45 (2): 263-267.
- [8] 韩海艳,任春娥,乔鹏云,等. LAS 对雄性小鼠及其子代生殖功能毒性作用的研究 [J]. *现代妇产科进展*, 2013, 22 (8): 622-625.
- [9] 窦晓卫,任春娥,韩海艳,等. LAS 对雄性小鼠生殖功能毒性作用的研究 [J]. *潍坊医学院学报*, 2013, 35 (4): 241-243, 279.
- [10] 练文标,潘凤开. 化学混凝沉淀处理阴离子表面活性剂废水的研究 [J]. *广东化工*, 2017, 44 (19): 128-129.
- [11] 周丽,邓慧萍,单志俊. UV-TiO<sub>2</sub> 联用去除饮用水中阴离子表面活性剂的研究 [J]. *供水技术*, 2008, 2 (1): 30-32.
- [12] 应启锋,肖昌松,纪树兰,等. 直链烷基苯磺酸盐 (LAS) 的生物降解性 [J]. *微生物学通报*, 2002, 29 (5): 85-89.
- [13] 李慧. 电絮凝气浮法处理偶氮染料废水的实验研究 [D]. 西安: 西北师范大学, 2011.
- [14] Aoudj S, Khelifa A, Drouiche N, *et al.* Simultaneous removal of chromium (VI) and fluoride by electrocoagulation-electroflotation: Application of a hybrid Fe-Al anode [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 267 (5): 153-162.
- [15] 姚悦. 电絮凝法对制革废水的深度处理研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2018.
- [16] 杨天天,刘梅,周颖,等. 电絮凝-催化氧化联合处理酱油废水 [J]. *现代化工*, 2019, 39 (11): 132-136. ■