

詹琪琪, 阎杰, 周国豪. 臭氧在醋酸溶液中溶解及稳定性研究 [J]. 广东农业科学, 2019, 46(3): 124-129.

臭氧在醋酸溶液中溶解及稳定性研究

詹琪琪¹, 阎杰², 周国豪²

(1. 仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东 广州 510225;
2. 仲恺农业工程学院化学化工学院, 广东 广州 510225)

摘要:【目的】臭氧在水中的溶解度很小, 极不稳定, 易分解, 且寿命很短, 其半衰期仅 20~30 min。考察臭氧在醋酸溶液中的溶解特性, 以提高臭氧的溶解度与稳定性。【方法】在水中加入少量醋酸, 采用碘量法测定醋酸溶液中臭氧的浓度, 间接得出臭氧在醋酸溶液中的溶解度; 通过控制变量法, 改变单一变量, 探索醋酸浓度、温度、配制醋酸溶液的水质、通入臭氧后的放置时间、通入臭氧气体的时间等因素对臭氧在醋酸溶液中的溶解度的影响, 探讨臭氧在醋酸溶液中溶解度最高的最佳条件。【结果】当醋酸浓度为 0.6 mol/L、温度低于 5℃、通入臭氧处理 60 min 左右, 臭氧溶解度最高, 达 2.37 mg/L。试验还显示, 水质越纯时, 臭氧溶解度越大。【结论】在水中添加少量醋酸能够提高臭氧在水中的溶解度与稳定性。

关键词: 臭氧; 醋酸溶液; 浓度; 溶解度; 稳定性

中图分类号: TS201

文献标志码: A

文章编号: 1004-874X(2019)04-0124-06

Study on Dissolution and Stability of Ozone in Acetic Acid Solution

ZHAN Qiqi¹, YAN Jie², ZHOU Guohao²

(1. College of Light Industry and Food Engineering, Zhongkai University of Agriculture and Technology, Guangzhou 510550, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Zhongkai University of Agriculture and Technology, Guangzhou 510550, China)

Abstract: 【Objective】The solubility of ozone in water is low, extremely unstable and easy to decompose. Its life span is very short and the half-life is only about 20-30 min. The dissolution characteristics of ozone in acetic acid solution were investigated in order to improve the solubility and stability of ozone in water. 【Method】A small amount of acetic acid was added to the water, and the solubility of ozone in acetic acid water was indirectly obtained by measuring the concentration of ozone in acetic acid water with iodometric method. By adopting controlling variable method, the single variable was changed to explore the influence of the concentration of acetic acid, the temperature, the water quality of acetic acid solution, the standing time after entering ozone, and the time of entering ozone gas on the solubility of ozone in acetic acid water, and the best condition for the highest solubility of ozone in acetic acid water were analyzed. 【Result】When the concentration of acetic acid was 0.6 mol/L, the temperature was below 5℃, and ozone treatment was kept for about 60 min, the highest ozone solubility of 2.37 mg/L was obtained. The test result also showed that the higher ozone solubility could be obtained when the water quality was purer. 【Conclusion】The solubility and stability of ozone can be improved by adding a small amount of acetic acid to water.

Key words: ozone; acetic acid solution; concentration; solubility; stability

收稿日期: 2019-02-03

基金项目: 广州市科技计划项目(201604020074); 广东省科技计划项目(2015B020215012)

作者简介: 詹琪琪(1993—), 女, 硕士, 研究方向为食品加工与储藏, E-mail: 243252292@qq.com

通信作者: 阎杰(1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向为天然产物声化学技术, E-mail: 99023737@qq.com

【研究意义】臭氧是当前公认的强氧化剂，它具有高效的消毒灭菌能力^[1]，无二次污染，完全符合当今社会绿色环保无污染的发展潮流。因此，无论在国内还是国外，臭氧都被广泛地应用在水处理、食品加工、医疗、运输、储存、农业等各个领域。但是，臭氧不能贮存，极不稳定^[2]，在常温常压下会缓慢分解成氧气。研究臭氧的溶解特性，提高其溶解度具有非常重要的意义，能为更好地开发利用臭氧技术起到一定的铺垫作用。【前人研究进展】关于臭氧稳定性的相关报道，国外有 Tomiyasu 等^[3]、Taube 等^[4]，国内有王华然等^[5]研究了臭氧在水中的溶解特性及影响因素，发现水温升高导致臭氧溶解度下降，发生器的气体流量和水中色度会对臭氧在水中的溶解度产生影响。为了解决臭氧在水中的稳定性问题，许伟坚^[6]选择聚丙烯酰胺水溶胶来溶解臭氧，结果显示，2.0 g/L 聚丙烯酰胺臭氧水溶胶所得的初始臭氧浓度及半衰期数据最理想，但溶胶在使用中不方便，其残留物对环境带来不良影响，而聚丙烯酰胺分子量大，易被氧化和降解，且单体丙烯酰胺对人体不利。有文献认为 OH⁻ 是臭氧分解的催化剂^[7]，添加醋酸^[8]和柠檬酸可以降低溶液中 OH⁻ 的浓度，从而抑制臭氧分解，对比试验显示醋酸的效果优于柠檬酸。方敏等^[9]试验证实，醋酸、柠檬酸可以大大提高臭氧的稳定性，但酸性过强会加速臭氧分解。最近有研究发现，增强臭氧的碱性反而可以提高臭氧的稳定性，能有效地减少臭氧的分解^[10]。而王华然等^[5]的试验却表明，pH 值对臭氧在水中的溶解无显著影响。

【本研究切入点】那么，酸度对臭氧在水中的溶解度及稳定性到底有何影响，酸的类型、浓度、温度及水质对其是否会有影响，类似问题未见系统报道。【拟解决的关键问题】本研究针对醋酸浓度、温度、水质等对臭氧在醋酸溶液中的溶解度以及稳定性进行试验，探索醋酸浓度、温度、配制醋酸溶液的水质、通入臭氧后的放置时间、处理时间等因素对臭氧在醋酸溶液中的浓度的影响，找出影响臭氧在醋酸溶液中溶解度的因素，并得出臭氧在醋酸溶液中溶解度最高的最佳条件，以期臭氧技术在食品领域中深入开发利用奠定实践基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试剂：碘化钾、冰醋酸、浓硫酸、硫代硫酸钠、可溶性淀粉、重铬酸钾均为分析纯，去离子水、超纯水均为实验室自制（无特别说明，试验中用水均为去离子水）。

仪器：鼓风恒温干燥箱，上海迅能电热设备有限公司；臭氧发生器，臭氧产生量 5 g/h，广州佳环电器科技有限公司；傅里叶变换红外光谱仪，美国 PE 公司；电冰箱、电加热炉、电子天平、搅拌水浴锅。

1.2 试验方法

操作方法：（1）配制 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1 mol/L 共 10 个不同浓度的醋酸溶液，在 25℃ 条件下，分别通入臭氧处理 10 min，取样测定每个样品中的臭氧浓度。

（2）分别用自来水、去离子水和超纯水配制醋酸浓度为 0.6 mol/L 的醋酸溶液，在 25℃ 条件下，通入臭氧处理 10 min，取样测定每个样品中的臭氧浓度。

（3）配制浓度为 0.6 mol/L 的醋酸溶液，在 25℃ 条件下，通入臭氧处理 10 min，分别放置 30、60、90、120、150、180 min，在每个放置时间后取样测定样品中臭氧浓度。与此同时，让臭氧通入去离子水作对照，在同样的温度、臭氧处理时间以及通气之后放置相同时间段测定样品中的臭氧浓度。

（4）配制 4 份浓度为 0.6 mol/L 的醋酸溶液，在 25℃ 条件下，其中 1 份通入臭氧处理 10 min 之后放置 3 h，1 份通入臭氧 20 min 之后放置 3 h，1 份通入臭氧处理 10 min 未放置，1 份不做处理，分别用红外光谱分析醋酸的结构。

（5）配制浓度为 0.6 mol/L 的醋酸溶液，通入臭氧处理 10 min，分别在 5、20、30、40、50℃ 条件下取样测定样品中的臭氧浓度。

（6）配制浓度为 0.6 mol/L 的醋酸溶液，在温度 25℃ 的条件下，分别通入臭氧处理 10、20、30、40、50、60、70 min，在每个时间段取样测定样品中的臭氧浓度。

臭氧浓度测定参照文献^[11]，采用碘量法测定。如无特别说明，均在臭氧处理后立刻测定。

红外分析采用 KBr 压片, 用红外光谱分析醋酸的结构, 扫描波长 $450\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ 。

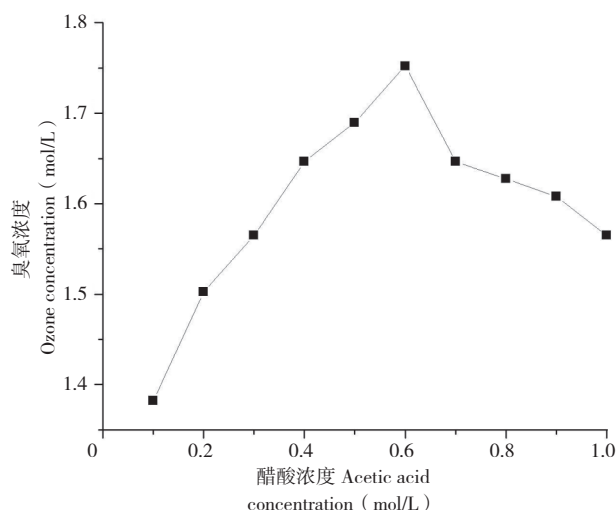
2 结果与分析

2.1 水中添加剂的选择

由于 O_2 的两个氧原子共用 1 对电子, 是直线型, 因此属于非极性分子。而臭氧结构中的中心氧原子供给的 2 个电子部分为两边的配位氧原子所有, 即发生了离域, 致使中心氧原子显得正一些, 两边氧原子显得负一些。因此臭氧分子中的键矩不等于零, 键有极性。而且其分子结构又不, 因此臭氧分子有偶极矩而显极性。水属于极性分子, 根据相似相溶原理, 臭氧应易溶于水, 但事实上臭氧在水中溶解度并不高, 且稳定性也不好。有文献报道了一种大幅度提高臭氧在水中溶解度和稳定性的方法^[12], 就是在水中加入含氧有机化合物, 这种方法简单、方便、成本低。臭氧氧化性很强, 电对 O_3/O_2 的标准电极电势为 1.24 V, 一些具有还原性的有机化合物在水溶液中易于被臭氧氧化, 基于这一点, 再结合溶解性考虑, 添加低分子有机酸应为优先选择。从偶极矩上看, 醋酸为 5.60, 甲酸为 6.07, 水为 6.17^[13-14], 臭氧为 0.53~0.55^[15], 醋酸与臭氧的差异比甲酸小, 而且醋酸无毒无害广泛用于食品领域。因此本研究选择醋酸作为溶剂。

2.2 醋酸浓度对臭氧稳定性的影响

从图 1 可以看出, 在相同的试验条件下, 醋酸浓度 0.1~0.6 mol/L 范围内, 随着醋酸浓度增大, 溶液中臭氧浓度增大; 当醋酸浓度大于 0.6 mol/L 时, 随着醋酸浓度增大, 溶液中的臭氧浓度逐渐减小。方敏等^[9]在研究臭氧在不同 pH 下的分解速率时发现, 臭氧分解速率与 pH 呈不规则的“U”型, pH 在 3~4 时, 分解速率最低, 当 pH 大于 4, 随着 pH 增大, 分解速率不断增加; 当 pH 小于 3, 随着 pH 减小, 分解速率也不断增加。代欣欣等^[16]在研究水中臭氧溶解特性时发现 OH^- 在臭氧分解反应中起着重要的催化作用。醋酸浓度增大时, 溶液中的 OH^- 减少, OH^- 的催化作用减弱, 因此臭氧的分解减慢, 稳定性提高, 溶解度增大^[17]。本试验获得高浓度臭氧的最适醋酸浓度为 0.6 mol/L。



试验条件: 臭氧处理 10 min, 温度 25℃

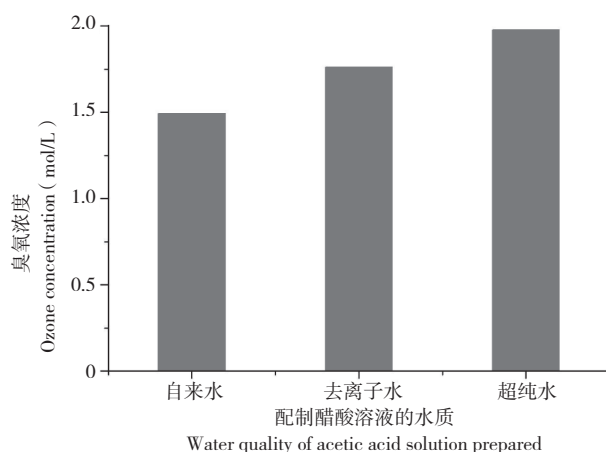
Test condition: ozone treatment for 10 min, temperature of 25℃

图 1 不同醋酸浓度下臭氧浓度的变化

Fig. 1 Change of ozone concentrations under different acetic acid concentration

2.3 水质对臭氧稳定性的影响

从图 2 可以看出, 在相同的试验条件下, 不同水质配制的醋酸溶液中, 臭氧的溶解度依次为超纯水 > 去离子水 > 自来水。许荣年等^[18]在研究臭氧对水质的影响时, 发现良好的过滤装置能使饮用水通过滤膜阻止细菌、霉菌、藻类的通过, 还可去除杂质及部分有机物而变得澄清, 使后期臭氧处理消耗更少的臭氧量, 说明水越纯净, 其含有的离子、杂质和矿物质等物质越少, 臭氧在水中的分解速率则越慢, 稳定性就越强, 溶解度越大。方敏等^[9]在研究臭氧水稳定性时, 也证实



试验条件: 臭氧处理 10 min, 温度 25℃, 醋酸浓度 0.6 mol/L

Test conditions: ozone treatment for 10 min, temperature of 25℃, acetic acid concentration of 0.6 mol/L

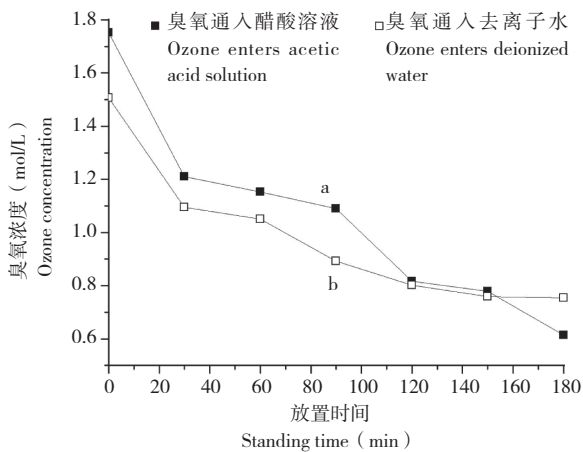
图 2 不同水质下臭氧浓度的变化

Fig. 2 Changes of ozone concentrations under different water quality

了臭氧在水溶液中的稳定性与水质有关。孙广明等^[19]在研究臭氧特性及对水质的净化作用时,通过实验证明了臭氧在不同类型水中的分解速度有所不同,即水的纯度高,臭氧分解慢,臭氧水稳定性就好;反之,水质差,臭氧分解快,臭氧水就不稳定。

2.4 放置时间对臭氧稳定性的影响

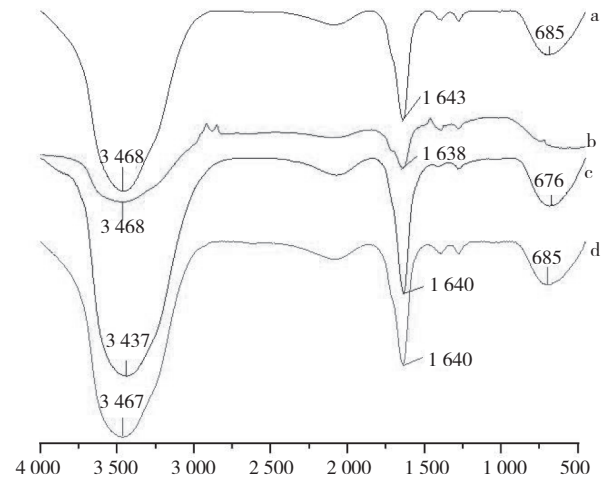
从图3可以看出,在相同的试验条件下,随着放置时间的增加,醋酸溶液中的臭氧浓度急剧下降,当放置时间延长时,溶解的臭氧会有一部分挥发到空气中,还有部分分解成氧气,导致溶解度下降;在相同时间下,醋酸溶液中的臭氧浓度比去离子水中高,这表明臭氧在醋酸溶液溶液中比在水中更稳定,加入少量醋酸利于臭氧贮存。从图4可以看出,臭氧处理后放置3h的醋酸有较为尖锐的吸收峰,其谱峰 3468 cm^{-1} 、 3437 cm^{-1} 、 3467 cm^{-1} 归属于O-H引起的伸缩振动,谱峰 1643 cm^{-1} 、 1638 cm^{-1} 、 1640 cm^{-1} 归属于C=C引起的伸缩振动,谱峰 685 cm^{-1} 、 676 cm^{-1} 归属于C-O引起的伸缩振动。而臭氧刚处理完的醋酸以及未处理的醋酸的峰值不同,说明生成的O-H键和C-O导致吸收峰移动,从而造成它们的峰值有所偏移。



试验条件: 臭氧处理 10 min, 温度 25°C , 醋酸浓度 0.6 mol/L

Test conditions: ozone treatment for 10 min, temperature of 25°C , acetic acid concentration of 0.6 mol/L

图3 不同放置时间下臭氧浓度的变化
Fig. 3 Changes of ozone concentrations at different standing time



试验条件: 温度 25°C , 醋酸浓度 0.6 mol/L

a: 处理 10 min 放置 3 h; b: 处理 20 min 放置 3 h;

c: 处理 10 min 未放置; d: 未处理溶液

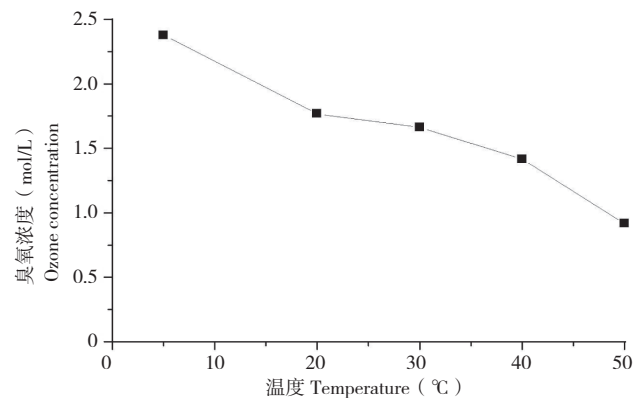
Test conditions: temperature of 25°C , acetic acid concentration of 0.6 mol/L
a: Treatment time: 10 min, standing time: 3 h; b: Treatment time: 20 min, standing time: 3 h; c: Treatment time: 10 min (not placed); d: Untreated solution

图4 经臭氧处理醋酸的红外图谱

Fig. 4 Infrared map of acetic acid treated by ozone

2.5 温度对臭氧稳定性的影响

图5显示,随着温度上升,醋酸溶液中的臭氧浓度迅速减少。张晖等^[20]在研究水中臭氧分解动力学时,发现温度的升高必然加速臭氧的自分解,臭氧在水中的分解实质上是通过一系列的中间过程,最后生成氧气的化学反应,水温升高,该化学反应就加快。方敏等^[9]也同样证实了水温越低,臭氧分解越慢,反之,水温升高,臭氧分解加快。这些报道与本试验结果一致,因此适当降低温度,有利于获得高浓度的臭氧溶液。



试验条件: 醋酸浓度 0.6 mol/L , 臭氧处理 10 min

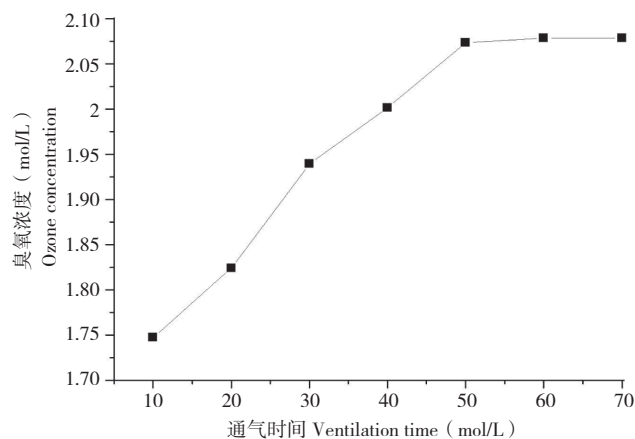
Test conditions: acetic acid concentration of 0.6 mol/L , ozone treatment for 10 min

图5 不同反应温度下臭氧浓度的变化

Fig. 5 Changes of ozone concentrations at different reaction temperatures

2.6 通入臭氧气体时间对臭氧稳定性的影响

从臭氧处理后未放置立刻测定的结果(图6)可以看出,在相同的试验条件下,随着通入臭氧时间延长,醋酸溶液中的臭氧浓度增加,但是当通气时间达到一定程度时,溶液中的臭氧浓度就慢慢地饱和,渐渐趋于平衡。通气时间长,臭氧慢慢溶解在水中,水中溶解臭氧容量不断增大,因此水中臭氧浓度也逐渐增大;当臭氧的溶解度达到平衡,则不再继续溶解于水中,呈现平稳的状态。醋酸溶液经臭氧处理20 min且放置3 h之后,取样测定,结果溶液中醋酸浓度仍为0.6 mol/L。且该样品的红外图谱(图4)与未处理的醋酸溶液无明显差异,这说明本试验条件下,醋酸没有分解,结构无明显变化。



试验条件: 醋酸浓度 0.6 mol/L, 温度 25°C

Test conditions: acetic acid concentration of 0.6 mol/L, temperature of 25°C

图6 不同通气时间臭氧浓度的变化

Fig. 6 Changes of ozone concentrations at different ventilation time

3 讨论

方敏等^[9]与单于^[10]、王华然等^[5]对臭氧稳定性的试验结论不同。方敏等^[9]做了pH对臭氧分解速率的影响,根据他们的试验结果进行分析,可以看出当溶液pH在3~4时,臭氧分解速率最低。他们的试验同时显示,在水中加入少量的醋酸或柠檬酸可以提高臭氧的稳定性,当醋酸浓度为100 mg/kg时,臭氧的半衰期为299 min。经笔者理论计算,此时溶液的pH值为4.38。本论文的试验显示,醋酸浓度0.6 mol/L对提高臭氧浓度最佳,过高、过低均不好,经理论计算,此时醋酸溶液的pH值为2.49。可见,本试验结果与方敏等的试验结论类似。综合方敏等^[9]及本试

验结果可以看出,不同pH值对臭氧在水中的稳定性影响很大,最佳的pH值在2.5~4.4范围的可能性最大,这有待于进一步试验。

孙广明等^[19]试验显示水纯度高对臭氧在水中的稳定性有利,而本文的试验却显示水中加入醋酸,这尽管降低了水的纯度,但却可以大大提高臭氧稳定性,但是,用于配制醋酸溶液的水纯度越高,越利于臭氧在溶液中稳定存在。由于试验条件限制,本试验选择了超纯水、去离子水与自来水进行比较,结果显示水纯度高好,但该结论仅限于水中已有的污染物,这种代表性并不强,完全可能存在某种物质(尤其是其他有机酸),加入水中之后,更能提高臭氧的稳定性,这方面的工作也有待进一步开展。

本试验表明,水中加入不超过0.6 mol/L醋酸,可以大大提高臭氧的稳定性,且温度低一点好。这对于食品、医药等需要用臭氧进行杂菌消毒的领域有很好的指导作用。在实际需要用到臭氧水时,只要环境许可,在溶液中加入少量醋酸,预期可以提高臭氧的杂菌消毒效果或者延长其作用时间。

4 结论

通过醋酸浓度、臭氧处理时间、温度、放置时间、水质等因素对臭氧溶解度的影响试验,得出以下结论:醋酸浓度、通气时间、温度、放置时间、水质这5个因素都对臭氧在醋酸溶液中的溶解度具有显著影响。试验表明,当醋酸浓度为0.6 mol/L、温度低于5°C、臭氧处理60 min左右时,臭氧的溶解度最好,可以达到2.37 mg/L;且水质越纯时,臭氧溶解度越大。因此选用高纯水配制浓度为0.6 mol/L的醋酸溶液,在低温环境下通入臭氧,对获得高浓度臭氧水溶液更有利。

参考文献 (References):

- [1] HILL D G, RICE R G. Handbook of ozone technology and applications [J]. *Ann Arbor Science*, 1982(1):1-37.
- [2] 刘华庆. 浅议臭氧氧化脱硝原理及对臭氧污染的影响[J]. *资源节约与环保*, 2017(10): 74-75,78. doi:10.16317/j.cnki.12-1377/x.2017.10.041.
- LIU H Q. Brief discussion on the principle of ozone oxidation denitrification and its impact on ozone pollution [J]. *Resource saving and environmental protection*, 2017(10): 74-75,78. doi:10.16317/j.cnki.12-1377/x.2017.10.041.

- [3] TOMIYAS H H, FUKUTOMI G G. Kinetics and mechanism of ozone decomposition in basic aqueous solution [J]. *Inorg Chem*, 1985, 24: 2962–2966.
- [4] TAUBE H, Bray W C. Chain reactions in aqueous solutions containing ozone, hydrogen peroxide and acid [J]. *J Am. Chem*, 1940(2):3357–3373.
- [5] 王华然, 王尚, 李昀桥, 王福玉, 李迎凯, 尹静. 臭氧在水中的溶解特性及其影响因素研究 [J]. 中国消毒学杂志, 2009, 26(5):481–483. WANG H R, WANG S, LI Y Q, WANG F Y, LI Y K, YIN J. Study on the dissolution characteristics of ozone in water and its influencing factors [J]. *Chinese Journal of Disinfection*, 2009, 26(5): 481–483.
- [6] 许伟坚. 臭氧缓释水溶胶的制备及条件研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2017. XU W J. Study on preparation and conditions of ozone sustained–release hydrosol [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.
- [7] WALTER R H, SHERMAN R M. Duration of ozone in water in the upper solubility range [J]. *Journal of food science*, 1976,41:993–995.
- [8] SEHESTED K. Ozone decomposition in aqueous acetate solutions [J]. *Phys Chem*, 1987,91:23–59.
- [9] 方敏, 沈月新, 方竞, 王鸿. 臭氧水稳定性的研究 [J]. 食品科学, 2002 (9) : 39–43. FANG M, SHEN Y X, FANG J, WANG H. Study on the stability of ozone water [J]. *Food Science*, 2002 (9): 39–43.
- [10] 单于. 提高臭氧稳定性的方法 [J]. 化学世界, 1965 (4) : 157–158. doi:10.19500/j.cnki.0367–6358.1965.04.006. SHAN Y. Methods to improve ozone stability [J]. *Chemical World*, 1965 (4): 157–158. doi:10.19500/j.cnki.0367–6358.1965.04.006.
- [11] 赵利会. 臭氧—生物活性碳净水工艺运行条件优化研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011. ZHAO L H. Operating conditions optimization of ozone–biologically activated carbon water purification process [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011.
- [12] 杨栋梁. 一种大幅提高臭氧在水中的溶解度和稳定性的方法 [P]. 中国专利: CN101380552, 2009–03–11. YANG D L. A method to improve the solubility and stability of ozone in water [P]. China Patent: CN101380552, 2009–03–11.
- [13] 刘伟成, 任艳群, 许桂顺. 几种常见有机溶剂的主要性质 [J]. 化工设计通讯, 2016, 42 (7) : 12–13. LIU W C, REN Y Q, XU G S. Main properties of several common organic solvents [J]. *Chemical Design Communication*, 2016, 42 (7): 12–13.
- [14] 李熙, 徐琴堂, 蒋富明, 刘效疆. 甲酸、乙酸或水单一溶剂的偶极矩与盐浓度的关系 [J]. 高等学校化学学报, 1992 (9) : 1260–1262. LI X, XU Q T, JIANG F M, LIU X J. The relationship between dipole moments of formic acid, acetic acid or water solvents and salt concentration [J]. *Journal of Chemistry of Colleges and Universities*, 1992 (9): 1260–1262.
- [15] 戴金福, 赵东汉. 臭氧是极性分子吗? [J]. 化学教学, 1987 (3) : 27–28. DAI J F, ZHAO D H. Is ozone a polar molecule? [J]. *Chemistry Teaching*, 1987 (3): 27–28.
- [16] 代欣欣, 李沛生. 水中臭氧溶解特性的研究 [J]. 食品科技, 2008(8): 84–87. doi:10.13684/j.cnki.spkj.2008.08.065. DAI X X, LI B S. Study on ozone dissolution in water [J]. *Food Science and Technology*, 2008(8): 84–87. doi:10.13684/j.cnki.spkj.2008.08.065.
- [17] 谭桂霞, 陈焯璞, 徐晓萍. 臭氧在气态和水溶液中的分解规律 [J]. 上海大学学报 (自然科学版), 2005(5):510–512. TANG X, CHEN Y P, XU X P. Decomposition of ozone in gaseous and aqueous solutions [J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2005 (5): 510–512.
- [18] 许荣年, 鲍忠定. 臭氧对水质的影响 [J]. 食品工业科技, 1999 (1) : 61–62. doi:10.13386/j.issn1002–0306.1999.01.030. XU R N, BAO Z D. Effects of ozone on water quality [J]. *Food Industry Science and Technology*, 1999(1):61–62. doi:10.13386/j.issn1002–0306.1999.01.030.
- [19] 孙广明, 李宝华, 李汉忠. 臭氧特性及对水质的净化作用 [J]. 渔业现代化, 2000 (4) : 23–26,31. SUN G M, LI B H, LI H Z. Ozone characteristics and water purification [J]. *Fisheries Modernization*, 2000(4): 23–26,31.
- [20] 张晖, 杨卓如, 陈焕钦. 水中臭氧分解动力学研究 [J]. 环境科学研究, 1999 (1) : 20–22. doi:10.13198/j.res.1999.01.20.zhhangh.005. ZHANG H, YANG Z R, CHEN H Q. Kinetics of ozone decomposition in water [J]. *Environmental Science Research*, 1999 (1): 20–22. doi:10.13198/j.res.1999.01.20.zhhangh.005.

(责任编辑 邹移光)