

臭氧技术对露天煤矿再生水中粪链球菌的杀灭效果研究

雷志勇¹, 石开慧¹, 郭旭颖²

¹陕西神延煤炭有限责任公司, 陕西 榆林

²辽宁工程技术大学理学院, 辽宁 阜新

收稿日期: 2021年11月28日; 录用日期: 2021年12月28日; 发布日期: 2022年1月6日

摘要

目前对露天煤矿再生水循环利用技术有大量的研究, 但针对其再生水的微生物安全性研究却很少, 本文考察了臭氧消毒技术对某露天煤矿再生水中粪链球菌的灭菌效果。研究表明: 臭氧消毒反应时间为1 min时, 即可实现100%的粪链球菌杀灭率。在水温为5℃、18℃和28℃和pH为6、7、8、9条件下, 臭氧消毒对粪链球菌的杀灭率均可保持在100%, 实现了煤矿再生水的高效灭菌。

关键词

煤矿再生水, 粪链球菌, 臭氧, 消毒

Study on the Sterilization Effect of Ozone Technology on *Streptococcus faecalis* in the Reclaimed Water of Opencast Mines

Zhiyong Lei¹, Kaihui Shi¹, Xuying Guo²

¹Shaanxi Shenyang Coal, Co., Ltd., Yulin Shaanxi

²School of Sciences, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning

Received: Nov. 28th, 2021; accepted: Dec. 28th, 2021; published: Jan. 6th, 2022

Abstract

There have been numerous studies on the recycling of reclaimed water from opencast mines. However, there are few studies on its microbiological safety. This paper investigated the steriliza-

tion effect of ozone technology on *Streptococcus faecalis* in the drainage water of an opencast mine. The results showed that the sterilization rate of *Streptococcus faecalis* can achieve 100% under the condition of 1 min of reaction time. The sterilization rate of *Streptococcus faecalis* by ozone technology can be kept at 100% at the water temperature of 5°C, 18°C and 28°C and pH of 6, 7, 8, 9 conditions. The high efficiency sterilization of neutral drainage water is realized.

Keywords

Reclaimed Water of Opencast Mines, *Streptococcus faecalis*, Ozone, Sterilization

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

露天煤矿再生水循环利用是国家政策倡导并鼓励发展的技术，并且能够降低企业的用水成本[1]。露天煤矿再生水的来源包括疏干水和矿坑水等[2]，目前煤矿疏干水和矿坑水通常经过处理后达标排放，如能转变思路，视再生水为一种稳定的、具有潜在利用价值的可再生资源[3]，引入“污水精炼技术”这一先进理念，转变现有基于污染物分解和去除的污水处理模式，通过精细化筛分和高效增值转化，能实现污水资源的安全和高效利用[4] [5]。疏干水和矿坑水经过深度处理后可以回用于企业的生产、道路车辆清洗、降尘和绿化、畜牧业养殖等各方面。国家相关标准中对再生水的微生物指标也做出了限值要求，其中粪链球菌是一种水体病原微生物污染指标[6]。因此露天煤矿再生水的消毒是硬性需求，以保障再生水的卫生、安全。

目前国内广泛使用的氯消毒效果好、成本低，但氯消毒会产生卤代消毒副产物，给生态系统带来负面影响[7] [8]。因此需要一种副产物少且生态友好的消毒工艺。臭氧消毒是一种高效、环境友好的消毒工艺[9]。臭氧是一种强氧化剂，其消毒灭菌效果优于氯化消毒，其灭菌速度比氯消毒快 1000 倍左右[10]，能够杀灭细菌和病毒，副产物少，还能有效去除水中有机污染物、色度、嗅和味[11] [12]。张永清[13]等对臭氧对矿泉水中致病菌的杀灭效果进行了研究，表明流动杀菌试验中，臭氧浓度为 0.2~0.6 mg/L，作用时间为 3 min 时，粪链球菌的杀灭率在 99.99% 以上。顾平[14]等对污水厂二级出水的臭氧消毒进行了研究，表明臭氧投量为 15 mg/L 左右、接触时间为 15 min 时，粪链球菌可以降低 2~3 个数量级。以上研究的对象为矿泉水和生活污水二级出水，煤矿再生水作为典型工业再生水，其独特的理化性质是否会对臭氧消毒产生负面影响？由于目前针对煤矿再生水利用的微生物指标超标，臭氧消毒技术方面的应用研究较少，因此本研究针对此问题，考察了某露天矿经过混凝过滤处理工艺后的再生水及臭氧消毒对粪链球菌的去除效果，为矿区再生水臭氧消毒技术的应用奠定基础。

2. 实验材料与方法

2.1. 实验方法

实验水样取自某露天矿污水处理厂的二级出水，此污水厂进水为露天矿疏干水，矿坑水和厂区生活污水。实验采用序批式运行模式，每一批次水样体积为 2 L，选用 SY-100 型臭氧消毒装置，臭氧发生量为 8 g/h，原水样和经过消毒后的水样直接进行粪链球菌检测。

为了控制煤矿再生水臭氧消毒的成本, 要找到最优反应时间, 即在最短的时间内实现最好的消毒效果。对水样进行臭氧消毒处理, 反应时间分别为 1 min、2 min、3 min、4 min 和 5 min。对消毒之后的水样进行滤膜过滤, 将滤膜转移至固体培养基上进行培养, 通过粪链球菌杀灭率来探究最优消毒反应时间。

本研究中的某露天矿所在地区季节温差较大, 为了保证不同季节臭氧消毒效果, 研究不同水温条件下的臭氧粪链球菌杀灭率是必须的。在最优反应时间条件下, 通过恒温水浴控制实验水样温度为 5℃、18℃和 28℃, 以此模拟冬夏季水温对消毒效果的影响。

本研究涉及的某露天煤矿疏干水和中水的 pH 在 6.9~7.2 范围内, 为了研究水样不同 pH 值是否对臭氧消毒效果产生负面效应, 在最优反应时间条件下, 通过投加 H_2SO_4 和 NaOH 调节水样 pH 值为 6、7、8 和 9, 对水样进行消毒以此探究 pH 对消毒效果的影响。

粪链球菌检测[15]: 采用滤膜法。

将培养基各 200 ml 加热溶解, 进行高压灭菌处理, 并对实验中所用到的滤膜、镊子、培养皿、过滤器等实验器材进行灭菌处理。对灭菌后的培养基进行冷却, 在 50℃时分别加入配套试剂并倒入培养皿中让其凝固备用。

将 250 mL 水样用孔径为 0.45 μm 的滤膜过滤, 并将滤膜移至 KF 链球菌琼脂培养基上, 于 36℃ \pm 1℃ 恒温箱中培养 48 h, 如果有红色或粉红色菌落生长, 需将菌落接种于脑 - 心浸萃琼脂培养基上做进一步的确认试验, 如过氧化氢酶反应为阴性, 并能在脑 - 心浸萃琼脂培养基上于 45℃培养后生成菌落, 则证实粪链球菌的存在, 其检测结果为阳性。

2.2. 实验仪器

SY-100 型臭氧消毒装置, FA2104N 型电子分析天平, GZX-9140MBE 型手提式压力蒸汽灭菌锅, 100 级超净工作台, DL-1 型万用电炉, 雷磁 PHSJ-5 型 pH 计, 细菌恒温培养箱。

2.3. 药品

KF 链球菌琼脂培养基, 脑 - 心浸萃琼脂培养基。

3. 结果与讨论

3.1. 不同反应时间对粪链球菌臭氧杀灭率的影响

研究了臭氧消毒不同反应时间对实验水体中粪链球菌杀灭情况。保持实验系统臭氧发生量为 8 g/h, 分别在保持反应时间为 1 min、2 min、3 min、4 min 和 5 min, 所得实验结果如图 1 和表 1 所示:



Figure 1. Experimental results of *Streptococcus faecalis* culture medium (reaction time: 1 min, raw water on the left)

图 1. 粪链球菌培养基实验结果(反应时间 1 min, 左侧为原水)

Table 1. Experimental results of different reaction time**表 1.** 不同反应时间实验结果

反应时间(min)	粪链球菌含量(CFU/mL)
0	116
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0

由实验结果(表 1)可以看出,露天矿再生水虽然经过了混凝和过滤工艺处理,但是粪链球菌含量仍然为 116 CFU/mL。再生水在臭氧消毒过程中,粪链球菌含量瞬时下降,在反应时间 1 min 内即将到 0,说明在此期间为氧自由基与细菌反应的活跃期。活性氧自由基能与粪链球菌在短时间内反应,在反应时间为 1 min 时,粪链球菌杀灭率即达到 100%。由于活性氧自由基具有极强的氧化性和杀菌能力,因此可以在极短的时间内与水中的粪链球菌发生反应,极大的缩短了反应时间。

3.2. 不同 pH 对粪链球菌臭氧杀灭率的影响

煤矿再生水 pH 值与煤含硫量、涌水量和涌水流经岩层等因素密切相关,本研究中的某露天煤矿疏干水和再生水的 pH 在 6.9~7.2 范围内,属于中性范围,因此本研究在中性 pH 范围内展开实验水体灭菌实验,考察水体 pH 对灭菌效果的影响。保持实验系统臭氧发生量为 8 g/h,反应时间为 4 min,所得实验结果如图 2 和表 2 所示:

**Figure 2.** Experimental results of *Streptococcus faecalis* culture medium under different pH conditions (pH is 6, 7, 8, 9 respectively from left to right)**图 2.** 不同 pH 条件下粪链球菌培养基实验结果(从左至右 pH 分别为 6、7、8、9)**Table 2.** Experimental results of different pH**表 2.** 不同 pH 实验结果

pH	粪链球菌含量(CFU/mL)	杀灭率%
6	0	100
7	0	100
8	0	100
9	0	100

从实验结果(表 2)来看, 在实验水体 pH 分别为 6、7、8、9 时, 保持反应时间为 4 min, 粪链球菌的杀灭率均达到 100%。即在 pH 为 6~9 的中性范围内, 臭氧消毒在对某煤矿再生水的灭菌效果不受 pH 变化的影响, 高效实现粪链球菌灭活。

3.3. 不同水温对粪链球菌臭氧杀灭率的影响

某露天煤矿所在地区四季冷热多变, 昼夜温差悬殊。年平均气温 9.1℃, 最热月份平均气温 23.9℃, 最冷月份平均气温-8.4℃。露天矿再生水水温受季节影响变化较大, 因此本部分研究考察不同水温对细菌杀灭率的影响。保持实验系统臭氧发生量为 8 g/h, 反应时间为 4 min, 分别考察水温分别为 5℃、18℃和 28℃条件下粪链球菌杀灭率的变化, 研究结果如下:

Table 3. Experimental results of different water temperatures

表 3. 不同水温下的实验结果

水温/℃	粪链球菌含量(CFU/mL)	杀灭率/%
5	0	100
18	0	100
28	0	100

分析实验结果(表 3), 在水温分别是 5℃、18℃和 28℃条件下, 保持反应时间为 4 min, 粪链球菌杀灭率均达到 100%。实验表明臭氧消毒设备在对露天矿中水的灭菌效果不受水温变化的影响, 能够适应露天矿所在地区的季节变化。

4. 结论

某露天煤矿的再生水虽然经过混凝和过滤工艺处理, 但是粪链球菌含量仍然为 116 CFU/mL。再生水经过臭氧消毒后, 粪链球菌杀灭率可达 100%, 最佳实验条件为: 臭氧发生量为 8 g/h, 反应时间 1 min。在水温 5℃、18℃和 28℃的条件, 和 pH 为 6、7、8、9 的条件下, 臭氧消毒对粪链球菌的杀灭率均可保持在 100%; 说明臭氧消毒能够高效实现露天矿再生水的消毒, 保证其微生物安全性。

参考文献

- [1] 毛维东, 周如禄, 郭中权. 煤矿矿井水零排放处理技术与应用[J]. 煤炭科学技术, 2017(11): 210-215.
- [2] 马树升, 赵星明. 煤矿疏干水处理利用[J]. 中国给水排水, 1998, 14(5): 37-38.
- [3] Masindi, V., Osman, M.S. and Shingwenyana, R. (2019) Valorization of Acid Mine Drainage (AMD): A Simplified Approach to Reclaim Drinking Water and Synthesize Valuable Minerals—Pilot Study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7, Article ID: 103082. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103082>
- [4] 胡洪营, 吴光学, 吴乾元, 等. 面向污水资源极尽利用的污水精炼技术与模式探讨[J]. 环境工程技术学报, 2015, 5(1): 1-6.
- [5] 胡洪营, 石磊, 许春华, 等. 区域水资源介循环利用模式: 概念·结构·特征[J]. 环境科学研究, 2015(6): 4-12.
- [6] 孙群, 吴蕾, 夏文香, 等. 人工湿地中指示和病原微生物分布与衰减研究[J]. 安全与环境学报, 2009, 9(5): 63-66.
- [7] 蒋以元, 柯真山, 张昱, 等. 城市污水再生利用中的消毒问题研究[J]. 环境工程学报, 2008, 2(1): 16-18.
- [8] 朱晓燕, 叶婷, 夏彭斌, 等. 臭氧与氯联合消毒对钱塘江水源水 DBPs 形成及溴取代的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(4): 216-223.
- [9] 胡珊, 毛澍洲, 邱光宇, 等. 应用于臭氧消毒系统的新型静态混合器结构设计[J]. 环境工程学报, 2020, 14(11): 3201-3207.
- [10] 侯为国. 臭氧技术应用研究[J]. 医药工程设计杂志, 2000, 21(6): 255-257.

- [11] Facile, N., Barbeau, B., *et al.* (2000) Evaluating Bacterial Aerobic Spores as a Surrogate for Giardia and Cryptosporidium Inactivation by Ozone. *Water Research*, **34**, 3238-3246. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00086-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00086-5)
- [12] Ferguson, D.W., McGuire, M.J., Koch, B., *et al.* (1990) Comparing PEROXONE and Ozone for Controlling Taste and Odor Compounds, Disinfection By-Products, and Microorganisms. *Journal American Water Works Association*, **82**, 181-191. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1990.tb06950.x>
- [13] 张永清, 吴清平, 张菊梅, 等. 臭氧对矿泉水中致病菌的杀灭效果[J]. 湖北农业科学, 2014(7): 1543-1545.
- [14] 顾平. 二级出水臭氧消毒的研究[J]. 中国给水排水, 1991(6): 3-4+18-20.
- [15] 崔伟佳, 郭庆龙, 王宇, 等. 饮用天然矿泉水中疑似粪链球菌的鉴定与分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(24): 9430-9433.