

页岩气田回注水中低浓度过氧化氢安全风险研究

倪海龙¹, 吴晓霞², 范良¹, 牛军帅¹, 宋英发¹, 张盼峰¹

¹中国石油浙江油田分公司, 四川 宜宾

²重庆科技学院安全工程学院(应急管理学院), 重庆

收稿日期: 2023年7月19日; 录用日期: 2023年8月31日; 发布日期: 2023年9月13日

摘要

过氧化氢作为“最清洁”的环保型氧化剂, 可以直接氧化气田水中的各种有机物质, 处理效果明显, 成本低。然而, 双氧水是一种热不稳定的物质, 与其他杂质接触后极易分解释放大量的热量、氧气和水蒸汽, 同时, 双氧水分解产生的氧气也可能会加速地面管柱和井下油管管腐蚀。本文开展了回注气田水中过氧化氢浓度现场检测, 根据过氧化氢浓度检测结果, 从回注气田水双氧水安全使用浓度、燃爆风险和腐蚀风险等三个方面, 分析了回注气田水中过氧化氢的安全风险。研究表明, 双氧水处理回注气田水的安全浓度为30%; 回注气田水池和气田水回注井筒中因过氧化氢分解产生氧气引起的燃爆风险低, 安全风险可控; 低浓度过氧化氢溶液分解时间长、产氧率低, 对接触过氧化氢溶液的地面设备和回注管道腐蚀可以忽略不计, 安全风险可控。

关键词

气田水, 双氧水, 回注, 安全风险评价

Study on Safety Risk of Low Concentration Hydrogen Peroxide in Reinjection Water of Shale Gas Field

Hailong Ni¹, Xiaoxia Wu², Liang Fan¹, Junshuai Niu¹, Yingfa Song¹, Panfeng Zhang¹

¹Petro China Zhejiang Oilfield Company, Yibin Sichuan

²School of Safety Engineering (School of Emergency Management), Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Jul. 19th, 2023; accepted: Aug. 31st, 2023; published: Sep. 13th, 2023

文章引用: 倪海龙, 吴晓霞, 范良, 牛军帅, 宋英发, 张盼峰. 页岩气田回注水中低浓度过氧化氢安全风险研究[J]. 石油天然气学报, 2023, 45(3): 272-279. DOI: 10.12677/jogt.2023.453033

Abstract

Hydrogen peroxide, as the cleanest' environmentally friendly oxidant, can directly oxidize various organic substances in gas field water, with obvious treatment effect and low cost. However, hydrogen peroxide is a thermally unstable substance, which can easily decompose and release a large amount of heat, oxygen and water vapor after contacting with other impurities. At the same time, the oxygen generated by the decomposition of hydrogen peroxide may also accelerate the corrosion of surface string and down hole tubing and casing. In this paper, the on-site detection of hydrogen peroxide concentration in reinjection gas field water was carried out. According to the detection results of hydrogen peroxide concentration, the safety risk of hydrogen peroxide in reinjection gas field water was analyzed from three aspects: Safe use concentration of hydrogen peroxide in reinjection gas field water, explosion risk and corrosion risk. The results show that the safe concentration of hydrogen peroxide treated reinjection gas field water is 30%. The deflagration risk caused by the decomposition of hydrogen peroxide to produce oxygen in the reinjection gas pool and gas field water reinjection wellbore is low, and the safety risk is controllable. Low concentration hydrogen peroxide solution has long decomposition time and low oxygen production rate. The corrosion of ground equipment and reinjection pipeline exposed to hydrogen oxide solution can be ignored, and the safety risk is controllable.

Keywords

Gas Field Water, Hydrogen Peroxide, Reinjection, Safety Risk Assessment

Copyright © 2023 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

过氧化氢作为“最清洁”的环保型氧化剂，可以直接氧化气田水中的各种有机物质。目前，使用双氧水处理气田水的主要方式是双氧水与其他氧化剂结合进行使用，主要有 Fenton 试剂处理气田水、双氧水与臭氧结合处理废水、双氧水与活性炭吸附联合作用处理气田水、双氧水与铜离子结合等。钱杉杉等人[1]使用臭氧和过氧化氢结合处理原钻井废水破胶处理后的废水，废水 COD 的去除率达到了 84.43%；彭娟华[2]用水解酸化和 Fenton 试剂处理钻井废水，改善了钻井废水的可生化性；朱成华[3]通过高级氧化技术投加双氧水进行废水处理，表明双氧水处理废水可以除铁、降低污水浊度、减少腐蚀及降低药剂成本。

然而，过氧化氢在高温或与重金属及其盐类、碱性物质、灰尘等一些不兼容物质作用下，可加速分解，激发其热危险性，进而引发发热失控反应，最终导致爆炸事故的发生[4]。2012 年 12 月 9 日，某油田公司采油厂在某井进行油层解堵作业，在关井压力扩散阶段，由于井筒内部压力降低，地层中的天然气进入油套环形空间，并逐步积聚到一定浓度；使用的解堵剂 DX-2 具有强碱性，DX-1 溶液中过氧化氢含量为 2%及以上，解堵作业过程中双氧水在地下遇强碱、高温铁杂质或硫化亚铁迅速分解，产生氧气并放出大量的热，天然气和氧气在油套环形空间混合形成了爆炸性气体，并达到了爆炸极限浓度范围，随着温度和压力骤然升高，引爆了爆炸性混合气体发生爆炸事故。

本文针对页岩气田双氧水处理后气田水中的残余过氧化氢浓度现场检测难度大, 研究分析了页岩气田双氧水处理后气田水中的残余过氧化氢浓度现场检测, 并利用双氧水处理气田水后的过氧化氢浓度检测数据, 分析了双氧水处理气田水的安全风险, 研究成果对页岩气田确保回注井生产安全和气田水经济高效处置具有重要意义。

2. 回注气田水中过氧化氢浓度检测

本次主要用化学滴定分析法中的碘量法, 由于碘量法能避免过氧化氢中稳定剂的干扰, 而使得测定结果在理论上应更准确。

2.1. 检测仪器设备

采样器: 过氧化氢性质不稳定, 具有强氧化性与腐蚀性, 能与大部分金属发生反应, 故选用有机玻璃材质的污水采样器, 具有较好的化学稳定性, 在采样过程中不会与水样发生物理化学反应。

样品容器: 选择碘量瓶作为样品容器, 具有较好的密封性, 在样品贮存期不会与周边环境发生物理化学反应。

使用仪器设备如表 1 所示, 其他设备有烧杯、移液管等。

Table 1. List of instruments and equipment

表 1. 仪器设备一览表

序号	设备名称	设备型号	数量(台)	仪器编号
1	有机玻璃采样器	/	3	/
2	具塞滴定管	25.00 mL	2	ZB2130930 ZB2130932
3	微量具塞滴定管	10.00 mL	1	ZB2130928

2.2. 现场检测

2.2.1. 点位确认

气田回注水处理系统工艺大致流程为: 气田水池→曝气沉降池→缓冲池→过滤系统→清水池。整个处理系统均为敞开式, 故选择气田水池、缓冲池和清水池三个点位进行过氧化氢的监测。

2.2.2. 样品采集

- 1) 现场测试按照现场废水处理状况, 结合监测对象和监测目的, 本次采样选择瞬时采样, 共计采集 4 次样品, 每次间隔不小于 3 小时的频次开展采样工作。
- 2) 采样时去除水面的杂物、垃圾等漂浮物, 不可搅动水底沉积物。
- 3) 采样前用水样荡涤采样容器和样品容器 2~3 次。
- 4) 正式样品采集时, 应避免剧烈振动, 保持样品原样。

2.2.3. 样品保存

样品采集到实验分析途中碘量瓶放置于样品箱中避光储存, 防止强光对样品的影响。样品呈黄色, 使用活性炭粉脱色处理后无法去除颜色, 通过现场空白对照样品扣除颜色干扰。

2.3. 测试分析

2.3.1. 分析方法

气田水中的强氧化物在稀硫酸中使碳化钾氧化, 产生定量的碘, 生成的碘以淀粉作指示剂, 用硫代硫酸钠标准溶液滴定得到强氧化物总量。加入过氧化氢酶分解去除试样中的过氧化氢, 用硫代硫酸钠标准溶液滴定去除过氧化氢后的其他氧化物含量, 两次滴定结果之差可计算得到样品中过氧化氢的含量。

2.3.2. 分析步骤

分别吸取滤液 25.0 mL 置于 A、B 两个 250 mL 碘量瓶中, A 瓶中加入 0.1% 过氧化氢酶溶液 0.5 mL, 加盖混匀, 放置 10 min (放置过程中摇动数次)。在 A、B 两瓶中各加入 10% 硫酸溶液 5.0 mL、10% 碘化钾溶液 5.0 mL、3% 钼酸铵溶液 3 滴, 混匀, 置暗处放置 10 min, 各加水 50 mL, 分别用硫代硫酸钠标准溶液滴定, 待滴至微黄色时, 加淀粉指示剂 0.5 mL, 继续滴至蓝色消失, 分别记录 A、B 两瓶消耗硫代硫酸钠标准溶液的毫升数。

$$\text{样品结果计算公式[5]: } \rho = \frac{(V_B - V_A) \times C \times 17.01}{V} \times 1000$$

式中: ρ : 样品中过氧化氢的浓度, 单位为 mg/L;

V_A : A 瓶中消耗硫代硫酸钠标准滴定溶液的体积, 单位为 mL;

V_B : B 瓶中消耗硫代硫酸钠标准滴定溶液的体积, 单位为 mL;

C: 硫代硫酸钠标准滴定溶液的浓度, 单位为 mol/L;

V: 测定用样液体积, 单位为 mL;

17.01: 与 1.00 mL 硫代硫酸钠标准溶液 [$c(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3) = 1.000 \text{ mol/L}$] 相当的过氧化氢的质量, 单位为 g/mol。

2.3.3. 准确度控制

准确度常用于度量分析结果与真实值的符合程度, 决定分析结果的可靠性, 本次用测量标准物质的方法评价分析方法和测量系统的准确度。

通过测定平行双样结果的相对偏差以评价监测结果的精密度。

相对偏差计算公式如公式(1.1)所示[6]:

$$\text{相对偏差(\%)} = \frac{x_A - \bar{x}}{\bar{x}} \times 100 = \frac{x_A - \bar{x}}{x_A + x_B} \times 100 \quad (1.1)$$

式中: x_A 、 x_B - 平行双样的测量值;

\bar{x} - 测量的平均值。

通过测定加标回收样品的加标回收率以评价监测结果的准确度。加标回收率计算公式如式(1.2)所示[7]:

$$\text{加标回收率(P,\%)} = \frac{\text{加标试样的测定值} - \text{试样测量值}}{\text{加标量}} \times 100 \quad (1.2)$$

通过使用 30% 过氧化氢溶液配制为过氧化氢储备液, 标定后配制为质控溶液, 作为分析测试自控样品, 以评价监测结果的准确度。相对误差计算公式如公式(1.3)所示[8]:

$$\text{相对误差\%} = \frac{\text{测试值} - \text{真实值}}{\text{真实值}} \times 100\% \quad (1.3)$$

准确度测量数量统计如表 2 所示。

Table 2. Statistical table of accuracy test quantity

表 2. 准确度测试数量统计表

分析次数	样品数量(个)	加标回收(80%~110%)			自控样测定($\pm 10\%$)			准确度完成比例%
		数量(个)	回收率范围%	合格率%	数量(个)	标准偏差范围%	合格率%	
第一次	3	3	85.6~93.4	100	3	-5.5~1.0	100	100
第二次	3	3	90.5~110	100	3	-3.8~1.0	100	100
第三次	3	3	97.3~118	66.6	3	-6.2~3.9	100	100
第四次	3	3	89.5~107	100	3	-5.8~6.6	100	100

由表 2 所示, 本次准确度完成率为 100%, 符合真实情况, 分析结果可靠。

2.4. 检测结果

黄金坝作业区 YS108H6 双氧水处理气田水后过氧化氢浓度检测结果, 如表 3 所示。

Table 3. Detection results of hydrogen peroxide concentration after hydrogen peroxide treatment of gas field water in Huangjinba operation area YS108H6

表 3. 黄金坝作业区 YS108H6 双氧水处理气田水后过氧化氢浓度检测结果

采样频次	采样点位	检测时间	样品编号	样品表现	过氧化氢
					mg/L
第一次	气田水池进口	4月24日 8:30	WS5-1-5	淡黄、微浊、明显异味	20.4
	缓冲池进口	4月24日 8:30	WS6-1-5	无色、透明、明显异味	0.38
	清水池进口	4月24日 8:30	WS7-1-5	无色、透明、明显异味	0.19
第二次	气田水池进口	4月24日 11:30	WS5-1-6	无色、微浊、明显异味	23.2
	缓冲池进口	4月24日 11:30	WS6-1-6	无色、透明、明显异味	0.38
	清水池进口	4月24日 11:30	WS7-1-6	无色、透明、明显异味	0.17
第三次	气田水池池内	4月24日 14:30	WS5-1-7	无色、微浊、明显异味	1.49
	缓冲池进口	4月24日 14:30	WS6-1-7	无色、透明、明显异味	0.42
	清水池进口	4月24日 14:30	WS7-1-7	无色、透明、明显异味	0.19
第四次	气田水池池内	4月24日 17:30	WS5-1-8	无色、透明、明显异味	0.47
	缓冲池进口	4月24日 17:30	WS6-1-8	无色、透明、明显异味	0.36
	清水池进口	4月24日 17:30	WS7-1-8	无色、透明、明显异味	0.17
检出限	/	/	/	/	0.05
备注	气田水池第一次、第二次有进水, 在管道出口采样; 第三次、第四次无水进入, 在池内采样。				

3. 含过氧化氢气田回注水安全风险分析

3.1. 回注气田水中双氧水安全使用浓度

影响双氧水安全使用浓度的因素主要有温度、压力和双氧水浓度, 朱丕凯[9]表明低温低压状态下环

境对甲烷爆炸极限的影响几乎可以忽略不计,刘中兴等人[10]表明温度比较低以及双氧水浓度比较低的环境下,双氧水的分解会比较小,分解出来的氧气也比较少。而本次双氧水处理气田水的环境为低温低压,则可以忽略环境因素对甲烷爆炸极限的影响,主要考虑双氧水分解出来的氧气以及不同含量的双氧水对甲烷的影响。

过氧化氢的在现场危险性主要是其分解氧气,提高氧气含量扩宽甲烷爆炸极限和其本身分解所引起的超压现象。在现场环境中,甲烷含量极低且本身所处在大环境下,根据表3黄金坝作业区YS108H6双氧水处理气田水后过氧化氢浓度检测结果显示,现场剩余的过氧化氢含量最高值为23.2 mg/L,完全分解产生的氧气含量极低,对甲烷本身爆炸极限变化的影响微乎其微。因此,黄金坝作业区YS108H6双氧水处理气田水后残存过氧化氢分解的氧气不会达到甲烷的爆炸极限。

石宁等人表明[11]过氧化氢溶液的分解速率随着溶液浓度的增加而增加,当过氧化氢浓度在65%时,其就具有极快的分解速率。浓度过低的过氧化氢溶液其清洁能力难以满足使用需要,廖美铃[12]将不同浓度过氧化氢溶液加入实验水样中,观察4.9 h内容器压力变化确定安全上限,使用30%浓度过氧化氢时,过氧化氢在4.9 h内分解放出气体量约为13 mg,对管道内压力影响微乎其微。在反应4.9 h内,随着反应时间的增长,水样的pH值变化幅度较小,整个反应进程都处于酸性条件。随着反应进行,单位时间内累计OH⁻的增长量大于H⁺的增长量,说明水样中存在H⁺被消耗或OH⁻产生。当所使用过氧化氢溶液高于30%时,在4.9 h的实验时间中,随着过氧化氢与污水的反应,水体由酸性转为碱性,在碱性环境下,过氧化氢分解产生的气体约为酸性环境下的45倍,容易导致安全风险。而高于30%浓度的过氧化氢溶液会随着时间改变污水水体的酸碱性,提升污水中剩余过氧化氢的分解速度和分解量,另外高于30%浓度的过氧化氢溶液其分解速度过快容易导致管道压力突增,从而造成管道破裂等风险,因此现场最高可使用30%浓度的过氧化氢,即使用双氧水处理气田水时注入的过氧化氢浓度不能超过333,370 mg/L。

于洪敏等人[13]得出产气(甲烷)的爆炸体积分数极限为4.76%~16.95%,最低临界氧含量为12.35%,由双氧水分解反应方程式: $2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \uparrow + 200\text{kJ}$,可得2 mol的双氧水可以分解得到1 mol的氧,根据表3黄金坝作业区YS108H6双氧水处理气田水后过氧化氢浓度检测结果显示,地面回注水中残留的过氧化氢浓度最高为23.2 mg/L,其完全分解能产生11.6 mg/L的氧气。

选取黄金坝作业区YS108H6双氧水处理气田水后残留过氧化氢浓度检测结果的最高值进行评价分析,若现场双氧水处理气田水后残留的最高浓度的过氧化氢不会造成燃爆和腐蚀风险,则回注水中残留的过氧化氢对整个回注工艺是安全的。由表3得知,现场监测回注水中的过氧化氢浓度最高为23.2 mg/L,根据计算,23.2 mg/L的过氧化氢相当于 $2.37 \times 10^{-5}\%$ 的过氧化氢溶液,而 $2.37 \times 10^{-5}\%$ 的过氧化氢溶液分解产生的氧浓度为11.6 mg/L相当于0.00087 L氧气,低于大气中的氧气含量21%,不会达到甲烷的爆炸极限,因此安全风险可控。

3.2. 回注气田水中双氧水的燃爆风险分析

回注气田水中双氧水的燃爆风险主要是过氧化氢分解产生的氧与回注气田水中的甲烷混合达到甲烷的爆炸极限,从而产生燃爆事故。

根据表3黄金坝作业区YS108H6双氧水处理气田水后过氧化氢浓度检测结果显示,地面回注水中残留的过氧化氢浓度最高为 $2.342 \times 10^{-3}\%$ (低于30%的安全浓度),分解产生的氧浓度仅为11.6 mg/L。同时,含过氧化氢的气田水没有直接接触木质材料等可燃物质的机会,因此,地面回注水中过氧化氢的燃爆风险极低。

同时,气田水池属于开放空间,杨巍[14]对四川某气田水进行甲烷监测,结果表明在气田水上方及气田区域采集的四个空气背景样品中检测出的甲烷浓度低至0.005%~0.0052%,而甲烷的爆炸极限为

5.2%~15%，达不到甲烷的爆炸极限，因此，气田水排放甲烷燃爆风险极低。

回注井筒中的注入水虽然溶解了少量的甲烷气体，但由于泵注压力较高、井筒压力和温度较高，很容易达到甲烷的饱和压力，回注井井筒中基本无甲烷气体存在，因此，井筒中因甲烷气体引起的燃爆风险极低。

根据表 3 所示，现场监测回注水中的过氧化氢浓度仅为 23.2 mg/L，即 $2.37 \times 10^{-5}\%$ ，过氧化氢溶液浓度低于 10% 时，在管道等密封环境中的蒸发会受到反应气体的抑制，在管道中因过氧化氢反应产生的氧气量有限，不会导致产生燃爆危险，因此，回注管线及井筒中低浓度过氧化氢溶液燃爆危险性极低，安全风险可控。

3.3. 回注气田水中双氧水的腐蚀风险分析

过氧化氢作为强氧化剂，是一种二元弱酸，具有一定的腐蚀性。过氧化氢溶液浓度越高，氧化性越强，金属腐蚀越强，相同体积条件下产氧量更高[15]。

高浓度过氧化氢溶液对金属具有腐蚀性，且根据金属种类不同，腐蚀速率存在区别。王冰姝等人[16]用浓度超过 90% 的过氧化氢溶液(含过氧化氢 29.15 g/L)浸泡铝、铜、碳钢、不锈钢制成表面积相同的金属片 72 h，表明气田水回注管线高浓度腐蚀速率 0.0064 mm/a。根据表 3 所示，现场检测的回注水中过氧化氢浓度低至 $2.342 \times 10^{-3}\%$ ，因此，回注气田水中过氧化氢对所接触管道和设备造成的腐蚀可以忽略不计，安全风险可控。

同时，回注水中低浓度过氧化氢可能会造成磨损腐蚀现象，余丽等人[17]表明过氧化氢的浓度为 1% 时加速了金属材料滑移表面二氧化硅的生成，双氧水环境与摩擦副接触表层材料相互作用，产生一系列物理化学变化，形成一层表面膜，双氧水的浓度影响表面膜的形成及组织构成，表面膜在一定程度上会对管道腐蚀起保护作用。相比于高浓度过氧化氢的强氧化性和产氧量，低浓度过氧化氢溶液具有分解时间长、产氧率低等特点，根据表 3 所示，现场检测的回注水中过氧化氢浓度低至 $2.342 \times 10^{-3}\%$ ，因此，对接触过氧化氢溶液的设备 and 管道磨损腐蚀可以忽略不计，安全风险可控。

4. 结论

1) 黄金坝作业区 YS108H6 使用双氧水处理气田水时，最高可使用 30% 浓度的过氧化氢，即使用双氧水处理气田水时注入的过氧化氢浓度不能超过 333,370 mg/L。

2) 黄金坝作业区 YS108H6 双氧水处理气田水后残留的过氧化氢浓度最高为 23.2 mg/L，分解产生的氧浓度为 11.6 mg/L，相当于 0.00087 L 氧气，低于大气中的氧气含量 21%，达不到甲烷的爆炸极限，回注气田水池和气田水回注井筒中因过氧化氢分解产生氧气引起的燃爆风险低，安全风险可控。

3) 气田水池进口处 WS5-1-6 测得的过氧化氢浓度为 23.2 mg/L，即 $2.37 \times 10^{-5}\%$ ，浓度为 $2.37 \times 10^{-5}\%$ 的过氧化氢溶液分解时间长、产氧率低，对接触过氧化氢溶液的设备 and 管道磨损腐蚀可以忽略不计，安全风险可控。

参考文献

- [1] 钱杉杉, 王兵, 张太亮, 等. O_3/H_2O_2 氧化技术处理钻井废水的研究[J]. 石油与天然气化工, 2007, 36(5): 12, 427-428, 437.
- [2] 彭娟华. 钻井废水可生化性研究及处理技术探索[D]: [硕士学位论文]. 成都: 中国科学院研究生院(成都生物研究所), 2007.
- [3] 朱成华. 宝浪油田污水系统高氧化除铁室内实验[J]. 油气田地面工程, 2011, 30(8): 27-29.
- [4] 毛义田. 蒽醌法生产过氧化氢的安全事故分析及防范措施[J]. 中国氯碱, 2007(7): 34-37.

- [5] 秦飞. 工业过氧化氢含量测定方法的研究[J]. 化工管理, 2016(35): 45-46.
- [6] 孙松, 董葵娜. 生活饮用水标准检验方法中相对偏差计算公式讨论[J]. 化学分析计量, 2023, 32(2): 79-81.
- [7] 张聪, 周翊, 罗锭宏, 等. 浅析环境监测实验室内加标回收和质控样的适用情况[J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(2): 153-155. <https://doi.org/10.20025/j.cnki.CN10-1679.2023-02-52>
- [8] 徐立岗, 费平. 用示值相对误差计算公式作为测量模型的不确定度评定探讨[J]. 中国计量, 2022(6): 104-106.
- [9] 朱丕凯. 环境因素对甲烷爆炸极限浓度的影响研究[J]. 煤炭技术, 2019, 38(6): 108-111.
- [10] 刘中兴, 谢传欣, 石宁, 徐伟. 过氧化氢溶液分解特性研究[J]. 齐鲁石油化工, 2009, 37(2): 99-102, 105.
- [11] 石宁, 谢传欣, 于丽明, 等. 双氧水分解危险特性的定量研究[J]. 大氮肥, 2010, 33(1): 53-55.
- [12] 廖美铃, 张羽丰, 郑子健. UV/H₂O₂ 高级氧化反应器在石化废水中的应用研究[J]. 山东化工, 2022, 51(15): 221-224.
- [13] 于洪敏, 左景栾, 任韶然, 等. 注空气采油油井产出气体燃爆特性[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(6): 99-103.
- [14] 杨巍. 四川盆地蜀南气矿气田水中甲烷排放实验研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [15] 孙燕明. 双氧水微量残留是否危害人体健康[N]. 中国消费者报, 2004-12-13(C02).
- [16] 王冰姝, 王雅静, 陈惠珍, 钟昱文, 郑小凌, 张里君, 韩春华, 邹钦. 一种过氧化氢消毒剂的杀菌效果及金属腐蚀性试验观察[J]. 中国消毒学杂志, 2013, 30(12): 1114-1115, 1118.
- [17] 余丽, 袁成清. 双氧水环境下金属腐蚀磨损机制研究进展[J]. 润滑与密封, 2008, 33(10): 95-99.