

# 微电解耦合 Fenton 氧化处理煤层气产出水实验研究

郑威城<sup>1</sup>, 汪清清<sup>2</sup>, 王忠泉<sup>1</sup>, 秦树林<sup>1</sup>

(1. 中煤科工集团杭州研究院有限公司, 浙江杭州 311201; 2. 德清县生态环境监测站, 浙江德清 313200)

**[摘要]** 探究了破乳混凝沉淀预处理结合微电解耦合 Fenton 氧化工艺对煤层气产出水的降解效果。结果表明, 微电解耦合 Fenton 氧化工艺, 在微电解 pH 为 3.0, 曝气强度为 150 L/h, Fenton 氧化反应 pH 为 3.5, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 投加量为 800 mg/L 的条件下, 微电解 COD 去除率为 66.85%, Fenton 氧化反应 COD 去除率为 60.30%, 综合 COD 去除率达 86.84%, 整体工艺最终出水 COD 为 174.21 mg/L, 悬浮物质量浓度为 2.64 mg/L, 石油类质量浓度为 1.21 mg/L, 整体工艺的悬浮物去除率为 99.01%, 石油类去除率为 97.40%, COD 去除率为 93.14%, 实现了煤层气产出废水的高效处理。

**[关键词]** 煤层气产出水; 微电解; Fenton 氧化; 协同微曝气

**[中图分类号]** X703.1; TE37 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)01-0131-06

## Experimental study of microelectrolysis coupled with Fenton oxidation for treatment of coalbed methane produced water

ZHENG Weicheng<sup>1</sup>, WANG Qingqing<sup>2</sup>, WANG Zhongquan<sup>1</sup>, QIN Shulin<sup>1</sup>

(1. Hangzhou Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group, Hangzhou 311201, China;  
2. Deqing County Ecological Environment Monitoring Station, Deqing 313200, China)

**Abstract:** The degradation effect of emulsion-breaking coagulation and precipitation pretreatment combined with micro-electrolysis coupled with Fenton oxidation process on coalbed methane produced water were investigated. The results showed that the micro-electrolysis coupled with Fenton oxidation process, under the conditions of micro-electrolysis pH 3.0, aeration intensity 150 L/h, Fenton oxidation pH 3.5 and hydrogen peroxide dosage 800 mg/L, the removal rate of micro-electrolysis COD was 66.85%, the removal rate of Fenton COD was 60.30% and the overall COD removal rate reached 86.84%, the final effluent COD of the overall process was 174.21 mg/L. The suspended solids were 2.64 mg/L and the petroleum concentration was 1.21 mg/L. The overall process achieved 99.01% removal of suspended solids, 97.40% removal of petroleum and 93.14% removal of COD, which realized the efficient treatment of coalbed methane output wastewater.

**Key words:** coalbed methane produced water; micro-electrolysis; Fenton oxidation; collaborative micro-aeration

煤层气又称煤层甲烷(Coal bed methane, CBM), 是自生自储于煤层中的以甲烷为主要成分的气体能源, 是一种绿色清洁的非常规油气资源。经国际能源机构(IEA)估算, 全球的煤层气资源储量高达  $2.6 \times 10^{14} \text{ m}^3$ , 而我国拥有大约  $3 \times 10^{13} \sim 3.5 \times 10^{13} \text{ m}^3$  的煤层气资源<sup>[1]</sup>, 合理地开采和利用对缓解我国能源危机具有重要意义。但是在煤层气的开采过程中会产生高硬度、高盐、高石油类的开采废水, 对该废水进行安全有效的处理对矿区环境保护以及煤层气资源的绿色开发至关重要。目前针对煤层气产出水常用的处理技术有混凝沉淀法、地面蒸发、储层回注、离

子交换、生物法等, 混凝沉淀法的污染物去除率较低, 难以满足排放要求; 地面蒸发需要很大的占地面积而且存在渗漏和硫化氢蒸发污染环境的问题; 储层回注对目标地层的构造稳定性、隔水性、容纳能力等性质有较高要求, 常常难以找到合适的回注地层; 离子交换法在树脂再生过程中需要添加盐酸或硫酸, 再生成本高, 并且会有浓水处理问题; 生物法对进水有一定的要求, 通常需要对进水进行一定的预处理<sup>[2-4]</sup>。本实验对煤层气产出水采用破乳混凝-微电解耦合 Fenton 氧化技术进行处理, 对产出水中的悬浮物、COD、石油类等污染物进行高效降解。

近年来,由于微电解技术具有简单高效的特点,已经被广泛应用于制药废水、印染废水、焦化废水等难降解的工业废水处理中<sup>[5-7]</sup>,而其在煤层气产出水处理中的应用却鲜有报道。在微电解后端耦合 Fenton 氧化工艺,可以利用微电解工艺产生的  $\text{Fe}^{2+}$  作为催化剂,降解微电解无法去除的剩余有机物,还能够大幅减少 Fenton 工艺中催化剂和  $\text{H}_2\text{O}_2$  的投加量。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验用水水质

煤层气开采位置与地质环境的不同都会对产出水水质产生较大的影响,通常煤层气产出水具有高悬浮物、高硬度、高 COD 的特点,有些地区煤层气产出水还含有较高浓度的石油类污染物。本实验用水取自临兴-神府地区煤系地层多气合采气田产出水,水质: pH 为 6.35,浊度为 459 NTU,悬浮物质量浓度为 267 mg/L,硬度(以  $\text{CaCO}_3$  计)为  $1.16 \times 10^4$  mg/L, COD 为  $2.54 \times 10^3$  mg/L,石油类质量浓度为 46.5 mg/L。

### 1.2 实验材料

#### 1.2.1 微电解填料

本实验使用的微电解填料是以铁、活性炭为原料,通过粉末冶金技术将材料固相烧结成具有合金结构的椭球型颗粒。填料粒径约为 3 cm,相对密度为 1.0~1.2,铁碳比约为 2:1,堆积空隙率大于 65%。使用前用水冲洗浸泡备用。

#### 1.2.2 主要试剂及分析方法

主要试剂: 98% 硫酸、氢氧化钠、碳酸钠、27.75%  $\text{H}_2\text{O}_2$ , 西陇科学,以上试剂均为分析纯;破乳剂,主要成分为氯代聚醚的阳离子型反相破乳剂,工业级,森清环保;聚合氯化铝(三氧化铝质量分数  $\geq 28\%$ ),阳离子型 PAM,杨帆水处理材料有限公司,以上均为工业级。

分析方法:悬浮物采用 GB 11901—1989 重量法分析;COD 采用 GB 11914—1989 中的重铬酸盐法测定;pH 采用雷磁 pHB-3 型酸度计测定;石油类采用 HJ 970—2018 中的紫外分光光度法测定。

#### 1.2.3 实验方法

临兴-神府地区煤层气产出水中石油类质量浓度较高,由于活性炭对油类物质有极高的吸附性,会导致废水中的油类物质吸附于微电解填料表面,形成包裹,阻断水相与填料的接触进而影响微电解处理效果,因此首先对煤层气产出水进行破乳混凝

预处理。破乳沉淀出水进入微电解反应器中,微电解过程中会产生一定量的  $\text{Fe}^{2+}$ ,能够作为下一步 Fenton 氧化工艺的均相催化剂。Fenton 氧化反应出水 pH 较低且可能会携带一定的悬浮物,因此对 Fenton 出水进行中和混凝沉淀,以满足废水排放要求。破乳混凝沉淀实验在烧杯中完成,处理后的水样进入微电解耦合 Fenton 氧化反应器中,最后出水在烧杯中进行中和混凝沉淀,实验装置见图 1。微电解以及 Fenton 反应器的容积均为 20 L,微电解反应器有效容积约为 12 L, Fenton 反应器有效容积为 18 L。

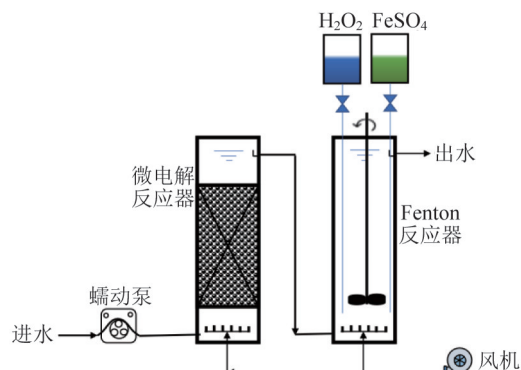


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental unit

## 2 结果与讨论

### 2.1 破乳混凝对煤层气产出水的处理效果

#### 2.1.1 初始 pH 对破乳效果的影响

该地区煤层气产出水呈弱酸性,可能会对破乳剂以及 PAM 的混凝效果有不利影响<sup>[8]</sup>,因此首先探究初始 pH 对破乳混凝效果的影响。选择碳酸钠作为 pH 调节药剂,在调节 pH 的同时还能够去除水中的硬度。在破乳剂投加量为 1 000 mg/L,破乳反应时间为 2 h, PAM 投加量为 5 mg/L,沉淀时间为 2 h 的条件下,考察不同初始 pH 对破乳效果的影响,结果见图 2。

由图 2 可知, pH 在 6.35~8.5 范围内变化对于 SS 的去除效果影响较小, SS 的去除率均达到 98% 以上,当 pH=7.5 时,达到最佳 SS 去除率 98.7%;当 pH 低于 8.0 时,石油类的去除率随着 pH 的升高而增大,当 pH=8.0 时,石油类去除率达到最大值 93.29%,当 pH 进一步提高至 8.5 时,石油类去除率反而下降至 87.40%;COD 的去除率变化趋势与石油类污染物的

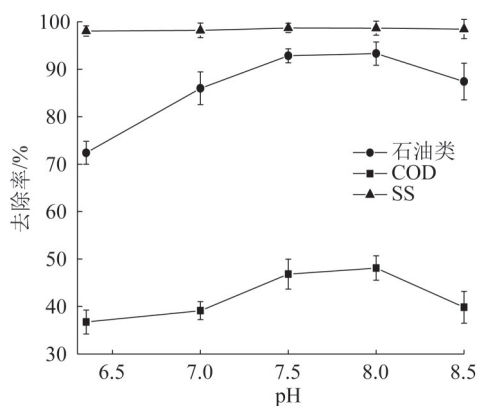


图2 不同初始pH对破乳效果的影响

Fig. 2 Effect of different initial pH on emulsion breaking effect

类似,当pH=8.0时,COD的去除率达到最大值48.11%。因此,根据实验结果综合考虑处理效果与药剂成本,破乳反应的最适pH为7.5。

### 2.1.2 破乳剂投加量对破乳效果的影响

破乳剂投加量直接影响着废水处理成本以及破乳效果,在初始pH为7.5,破乳反应时间为2 h,PAM投加量为5 mg/L,沉淀时间为2 h的条件下,考察不同破乳剂投加量对破乳效果的影响,结果见图3。

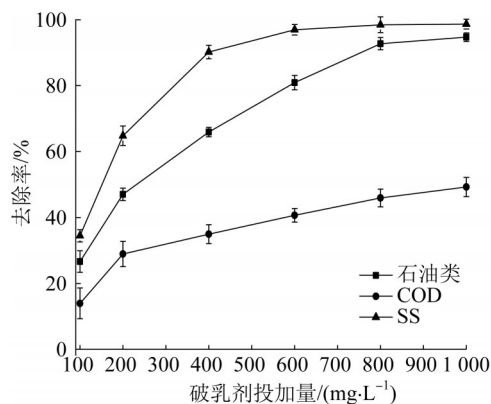


图3 破乳剂投加量对破乳效果的影响

Fig. 3 The effect of emulsifier dosage on emulsion breaking effect

由图3可知,在破乳剂投加量为100~1 000 mg/L时,石油类、COD、SS的去除率均与破乳剂的投加量呈正相关。当破乳剂投加量达到600 mg/L以上时,进一步增加破乳剂投加量对于SS去除率的提升效果并不明显,将破乳剂投加量由600 mg/L提高至1 000 mg/L,SS的去除率由96.95%增加至98.7%;对于石油类的去除,在破乳剂投加量达到800 mg/L时,再增加投加量也无法进一步提高石油类的去除率,破乳剂投加量为1 000 mg/L时,石油类的去除率为

98.82%,仅比破乳剂投加量为800 mg/L时高了0.09%;由于破乳混凝沉淀去除的COD来源主要是废水中的悬浮物以及石油类污染物,因此,COD去除率的变化趋势与石油类污染物去除率的变化趋势类似,当破乳剂投加量达到800 mg/L后,进一步增加破乳剂投加量并不能继续提高COD的去除率,破乳剂投加量为1 000 mg/L时的COD去除率为46.5%,比破乳剂投加量为800 mg/L时高了0.61%。因此,综合考虑破乳效果与药剂消耗,取最佳破乳剂投加量为800 mg/L。

### 2.2 微电解耦合Fenton氧化工艺处理效果

微电解耦合Fenton催化氧化工艺在图1所示反应器中进行,将经过破乳混凝沉淀处理的水样通过蠕动泵泵入反应器中,以自流的方式通过反应器反应后排出。大量研究结果表明,微电解以及Fenton反应需要在酸性条件下才能取得理想的效果<sup>[9]</sup>,但是在微电解耦合Fenton催化氧化工艺中,还需要考虑pH的分步调控。另外,在反应时曝气能够在一定程度上促进氧化还原反应的进行,但是曝气又会将微电解产生的 $\text{Fe}^{2+}$ 氧化为 $\text{Fe}^{3+}$ ,不利于后续Fenton催化氧化反应的进行,因此,对于耦合工艺的曝气调控也尤为重要。

#### 2.2.1 微电解耦合Fenton催化氧化工艺的pH调控

微电解技术是通过铁和碳之间发生的无数个微小的电极反应<sup>[10]</sup>,释放出大量的还原性氢,在不同的pH条件下会发生不同的电极反应。在中性和偏酸性的条件下,铁碳电极本身及电极反应产生的新生态 $[\text{H}]$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 等均能够与废水中的有机物污染物发生氧化还原反应,将大分子有机物分解为小分子有机物,以此降低废水的COD。微电解电极反应过程会产生 $\text{OH}^-$ ,因此在微电解反应过程中pH会上升,这会影响后一步Fenton反应的效果。

在实验中对微电解和Fenton反应的pH均进行调控。首先仅调节微电解反应的pH,探究微电解反应的最佳pH,确定微电解反应的最适pH后,再调节Fenton反应的pH,最终确定微电解耦合Fenton催化氧化工艺的最佳pH。进水采用经破乳混凝沉淀处理后的出水,COD为1 374 mg/L。进水流量为5 L/h,设置进水pH分别为2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0、5.5、6.0、6.5,每隔30 min检测微电解反应器出水COD,结果见图4。



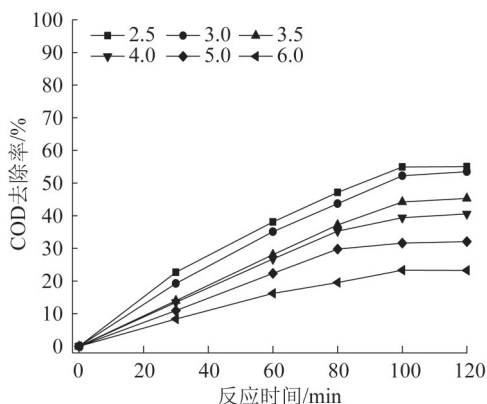


图4 不同进水pH对微电解处理效果的影响

Fig. 4 Effect of different feedwater pH on the effectiveness of microelectrolysis treatment

由图4可知,反应的pH对微电解反应会有显著影响,pH越低,相应的氧化电极电位就越高,微电解的反应电位差随之变大,电极反应越剧烈。不同反应pH条件下,随着反应的进行,废水的COD去除率均逐渐增加。pH越低,相同反应时间下COD的去除率越高,在pH为2.5的条件下,反应120 min后COD的去除率达55.05%,pH为3.0的条件下,反应120 min后COD去除率达到了52.49%,比最高COD去除率低2.56%,相同反应时间下pH为6.0时COD去除率仅有23.25%。综合考虑药剂投加量与COD去除效果,后续实验将微电解进水pH设定为3.0。

以上述条件进行微电解反应后,出水的COD降低至617.61 mg/L,pH提高到了5.8,因此对进入Fenton反应器的进水再调节其pH,以确保Fenton反应高效进行。Fenton反应的机理是 $H_2O_2$ 在 $Fe^{2+}$ 的催化下,产生具有强氧化性的羟基自由基( $\cdot OH$ ),有研究者研究了不同pH条件下 $\cdot OH$ 的生成情况,结果表明,pH为3.0时产生的 $\cdot OH$ 更多<sup>[11]</sup>。在 $H_2O_2$ 投加量为800 mg/L的条件下,考察不同pH对Fenton氧化处理效果的影响,结果见图5。

由图5可知,Fenton反应器中前30 min COD的去除率迅速上升,而后反应进入慢反应阶段,COD的去除率缓慢增加。从最终的COD去除率来看,pH分别为3.0和3.5的条件下,最终COD去除率均达到了60%以上,相比于pH为5.8条件下的最低COD去除率(37.49%)提高了20%以上,后续实验将Fenton氧化进水pH设定为3.5。在微电解和Fenton反应均调节至最佳pH条件下,微电解耦合Fenton氧化处理

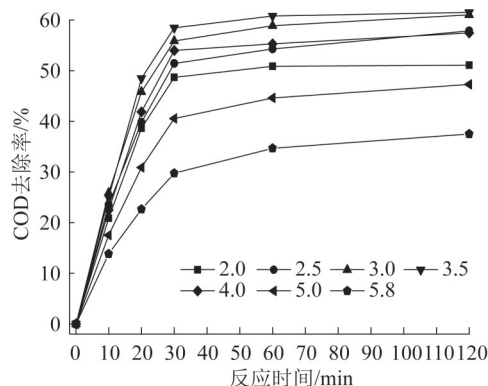


图5 不同pH对Fenton氧化处理效果的影响

Fig. 5 Effect of different pH on the effect of Fenton oxidation treatment

的出水COD为237.70 mg/L,综合COD去除率达到了82.70%。

## 2.2.2 微电解耦合Fenton催化氧化工艺的协同微曝气调控

在曝气条件下,微电解的阴极会发生不一样的化学反应,分别见式(1)、式(2)<sup>[12]</sup>。



由式(1)、式(2)可知,在曝气充氧的环境下,阴极反应电势相较于缺氧条件下有较大的提升。并且在酸性条件下曝气,阴极会生成 $H_2O_2$ , $H_2O_2$ 在阳极产生的 $Fe^{2+}$ 催化下,能够分解产生 $\cdot OH$ , $\cdot OH$ 具有高达2.8 V的氧化电位,进一步提高了微电解的污染物降解能力。但是过高的曝气量会使微电解电极反应产生的 $Fe^{2+}$ 转化为 $Fe^{3+}$ ,进而影响后续Fenton反应效率,因此,在对微电解反应的曝气量进行调控的同时,也要考察其同时对Fenton反应产生的影响。

首先探究了微电解反应器中不同的曝气量对微电解以及Fenton氧化的COD去除率的影响,考察曝气量分别为0、50、100、150、200、250 L/h条件下,反应2 h后2个反应器中COD去除率的变化趋势,结果见图6。

由图6可知,随着曝气量从0增加到250 L/h,微电解反应器的COD去除率呈现先增加再趋于稳定的趋势,而Fenton反应器中的COD去除率反而随曝气量的增加不断下降,总COD去除率由于受2个反应器综合影响而呈现先升高后降低的规律。增加曝气时,一方面能通过气泡扰动来增强体系的传质效果,另一方面还能除去填料表面的钝化膜,并且如

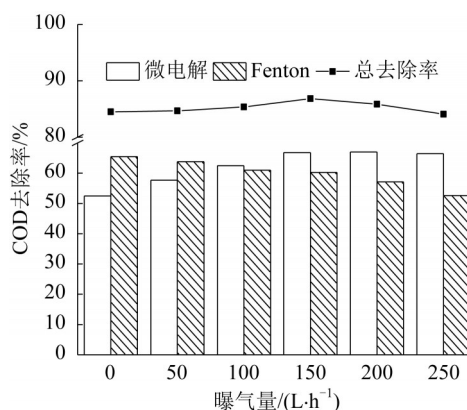


图6 曝气量对废水COD去除率的影响

Fig. 6 Effect of aeration on COD removal rate of wastewater

式(1)、式(2)所述,曝气带来的氧气增强了电极反应,但是这些影响都是有限的,当曝气量达到150 L/h后,继续增强曝气也无法进一步提升微电解的COD去除效果。而对于微电解后端的Fenton反应,2 h的曝气会将废水体系中的 $\text{Fe}^{2+}$ 氧化为 $\text{Fe}^{3+}$ ,因此会减弱催化效果,从而导致COD去除率的下降。在最佳曝气条件即曝气量为150 L/h的条件下,最终Fenton氧化出水COD为180.82 mg/L,2个反应器的综合COD去除率达到了86.84%,此时微电解反应器的COD去除率为66.85%,Fenton反应器的COD去除率为60.30%。

### 2.2.3 $\text{H}_2\text{O}_2$ 投加量对Fenton氧化反应的影响

经前期实验最佳条件下处理后,Fenton反应的进水COD为455.48 mg/L,考察不同 $\text{H}_2\text{O}_2$ 投加量对Fenton氧化反应COD去除效果的影响,结果见图7。

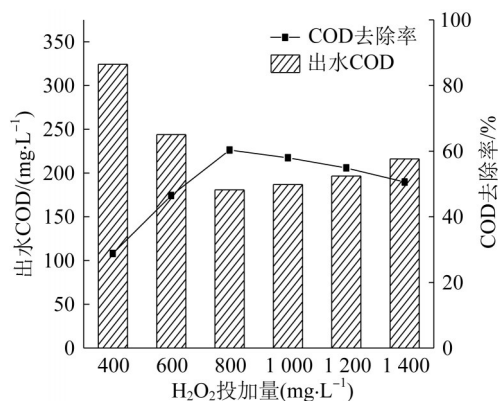
图7  $\text{H}_2\text{O}_2$ 投加量对Fenton氧化反应COD去除效果的影响

Fig. 7 Effect of hydrogen peroxide dosing on the COD removal effect of Fenton oxygen reaction

由图7可知,当 $\text{H}_2\text{O}_2$ 投加量从400 mg/L增加至800 mg/L时,Fenton反应的COD去除率从28.79%提高至60.30%,当进一步增加 $\text{H}_2\text{O}_2$ 投加量时,其COD

去除率反而下降了。这是因为当体系中的 $\text{H}_2\text{O}_2$ 达到一定浓度后,会发生反应( $\text{H}_2\text{O}_2 + 2\cdot\text{OH} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ ), $\text{H}_2\text{O}_2$ 和 $\cdot\text{OH}$ 转化为 $\text{O}_2$ <sup>[13]</sup>,使 $\text{H}_2\text{O}_2$ 的利用率显著降低,所以导致其COD去除率反而下降。

通过上述实验,确定Fenton氧化反应的最佳 $\text{H}_2\text{O}_2$ 投加量为800 mg/L,此时的出水COD为180.82 mg/L,COD去除率为60.30%。

### 2.3 最终出水水质

微电解耦合Fenton氧化处理后的出水呈酸性,且还会有一定的悬浮物,因此最后对出水进行了中和混凝沉淀处理,最终的出水pH为7.68、浊度为5.82 NTU、悬浮物质量浓度为2.64 mg/L、硬度(以 $\text{CaCO}_3$ 计)为 $4.93 \times 10^3$  mg/L、COD为174.21 mg/L、石油类质量浓度为1.21 mg/L。

实验通过整体工艺实现了对煤层气产出水中的悬浮物、COD和石油类污染物的高效去除,出水水质的悬浮物、COD以及石油类各项指标均满足《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)中旱地作物类的排放标准,出水的硬度依旧处于较高水平,后续根据实际情况可以选择纳滤、反渗透等膜过滤工艺或者MVR等蒸发工艺除盐。

## 3 结论

(1)煤层气产出的破乳混凝沉淀预处理实验结果表明:在最适实验条件,即破乳反应的初始pH调节至7.5,破乳剂投加量为800 mg/L的条件下,石油类去除率为92.73%,COD去除率为45.91%,悬浮物去除率为98.47%。

(2)对预处理后的煤层气产出水进行微电解耦合Fenton氧化工艺处理实验研究,结果表明:微电解反应阶段的最适pH为3.0,Fenton氧化阶段的最适pH为3.5;并且在微电解阶段进行150 L/h的微曝气增强,能够提高微电解阶段的COD去除效果;Fenton氧化阶段的最佳 $\text{H}_2\text{O}_2$ 投加量为800 mg/L;在上述最佳反应条件下,最终Fenton氧化出水COD为180.82 mg/L,2个反应器的综合COD去除率达到了86.84%,此时微电解反应器的COD去除率为66.85%,Fenton反应器的COD去除率为60.30%。

(3)通过破乳混凝沉淀预处理结合微电解耦合Fenton氧化处理工艺,对COD为2 540 mg/L,悬浮物质量浓度为267 mg/L,石油类质量浓度为46.5 mg/L

的临兴-神府地区煤系地层多气合采气田产出水进行处理后,出水COD为174.21 mg/L,悬浮物质量浓度为2.64 mg/L,石油类质量浓度为1.21 mg/L,整体工艺的悬浮物去除率为99.01%,石油类去除率为97.40%,COD去除率为93.14%,实现了煤层气产出废水的高效处理。

#### 参考文献

- [1] 穆福元,贾承造,穆龙新,等.我国煤层气的开发模式研究[J].非常规油气,2014,1(1):41-46.  
MU Fuyuan, JIA Chengzao, MU Longxin, et al. Study on the development mode of coal-bed methane in China[J]. Unconventional Oil & Gas, 2014, 1(1): 41-46.
- [2] 温彩哨,余志晟,刘新春,等.煤层气产出水水质特征及处理技术研究进展[J].工业水处理,2014,34(10):1-6.  
WEN Caishao, YU Zhisheng, LIU Xinchun, et al. Progress in the research on the water quality characteristics and treatment technologies of coal bed methane produced effluent[J]. Industrial Water Treatment, 2014, 34(10): 1-6.
- [3] 孙悦,冯启言,李向东,等.煤层气产出水处理与资源化技术研究进展[J].能源环境保护,2010,24(6):1-4.  
SUN Yue, FENG Qiyang, LI Xiangdong, et al. Research progress of treatment and resource in produced water associated with cbm operations[J]. Energy Environmental Protection, 2010, 24(6): 1-4.
- [4] 张继卫,范奇,李俊旗,等.阳离子交换树脂对煤层气产出水除盐的研究[J].应用化工,2021,50(4):874-877.  
ZHANG Jiwei, FAN Qi, LI Junqi, et al. Study on desalination of coal-bed methane produced water by cation exchange resin[J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(4): 874-877.
- [5] 王坤,王忠泉,于洪峰,等.新型微电解联合催化氧化处理高浓度制药废水[J].工业水处理,2017,37(5):76-79.  
WANG Kun, WANG Zhongquan, YU Hongfeng, et al. New type of micro-electrolysis combined with catalytic oxidation for the treatment of highly concentration pharmaceutical wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2017, 37(5): 76-79.
- [6] 周伟,王长智,钱臻,等.印染废水膜浓缩液微电解处理工艺研究[J].工业水处理,2020,40(6):40-43.  
ZHOU Wei, WANG Changzhi, QIAN Can, et al. Study on micro-electrolytic treatment of membrane concentrate of printing and dyeing wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(6): 40-43.
- [7] XIE Ruosong, WU Miaomiao, QU Guangfei, et al. Treatment of coking wastewater by a novel electric assisted micro-electrolysis filter[J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, 66: 165-172.
- [8] 陶梅,孙璐,梁尚文.絮凝剂破乳及pH对破乳效果影响实验研究[J].环境工程,2015,33(S1):108-110.  
TAO Mei, SUN Lu, LIANG Shangwen. The study on flocculation demulsification and the effect of pH on the demulsification efficiency[J]. Environmental Engineering, 2015, 33(S1): 108-110.
- [9] 苏建文,时永辉,许尚营,等.pH过程控制对铁炭微电解-Fenton影响中试研究[J].环境工程,2013,31(S1):131-134.  
SU Jianwen, SHI Yonghui, XU Shangying, et al. A pilot study on effects of pH process control on ferric-carbon micro-electrolysis-Fenton process[J]. Environmental Engineering, 2013, 31(S1): 131-134.
- [10] JIN Yizhong, ZHANG Yuefeng, LI Wei. Micro-electrolysis technology for industrial wastewater treatment[J]. Journal of Environmental Sciences, 2003, 15(3): 334-338.
- [11] LUNAR L. Degradation of photographic developers by Fenton's reagent: Condition optimization and kinetics for metal oxidation[J]. Water Research, 2000, 34(6): 1791-1802.
- [12] BRILLAS E, SIRÉS I, OTURAN M A. Electro-Fenton process and related electrochemical technologies based on Fenton's reaction chemistry[J]. Chemical Reviews, 2009, 109(12): 6570-6631.
- [13] 陈胜兵,何少华,娄金生,等.Fenton试剂的氧化作用机理及其应用[J].环境科学与技术,2004,27(3):105-107.  
CHEN Shengbing, HE Shaohua, LOU Jinsheng, et al. Oxidation mechanism and application of Fenton reagent[J]. Environmental Science and Technology, 2004, 27(3): 105-107.

[作者简介] 郑威城(1995—), 硕士, 助理工程师。电话: 0571-82728709, E-mail: 1398872103@qq.com。

[收稿日期] 2022-11-10(修改稿)