

试验研究

纳米 Fe-C 合金去除染料废水中酸性橙 的初步研究

甌小青, 倪建国, 祝力飞, 唐晓燕

(杭州市萧山区环境保护局, 浙江 杭州 311200)

摘要:本文研究了碳包纳米铁对酸性橙 II 的吸附。研究表明,在酸性橙 II 初始浓度 40 mg/L,碳包铁浓度 1.5 g/L,转速 240 r/min,pH 为 6.2,温度 30 °C 的优化条件下,吸附 120 min 后,酸性橙 II 的去除率达到 90.0 %,吸附量达到了 24.2 mg/g;吸附前后碳包纳米铁的 XRD 谱图未发生明显的变化,吸附后溶液中酸性 II 的 UV-vis 特征吸收峰几乎消失了;碳包纳米铁对酸性橙 II 的吸附过程符合 Langmuir 吸附等温线,吸附动力学符合伪二级动力学模型。

关键词:碳包纳米铁;酸性橙 II;吸附;吸附等温线;吸附动力学

中图分类号:X703

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2015)02-0008-06

A PRELIMINARY RESEARCH ON REMOVAL OF ACID ORANGE FROM DYE WASTEWATER BY CARBON-COATED IRON NANOPARTICLES

ZHEN Xiao-qing, NI Jian-guo, ZHU Li-fei, TANG Xiao-yan

(Xiao shan Environmental Protection Agency Hangzhou Zhejiang 311200)

Abstract:The removal of acid orange II from aqueous solution by carbon-coated iron nanoparticles was studied in this paper. The results showed that the removal percentage of acid orange II was 90.0% on the optimal conditions of 40mg/L acid orange II, 1.5g/L of carbon-coated iron nanoparticles, pH 6.2 and 240 r/min of rotary rate in 120mins; the XRD spectra of carbon-coated iron nanoparticles after reaction did not nearly change, but the characteristic adsorption of acid orange II disappear almost in the 200-700nm UV-vis range; the adsorption of acid orange II in solution by carbon-coated iron nanoparticles fits the Langmuir adsorption isotherm, and the adsorption dynamics is in line with the pseudo second dynamic model.

Key words:Carbon-Coated Iron Nanoparticles; Acid Orange II; Adsorption; Adsorption Isotherm; Adsorption Dynamics.

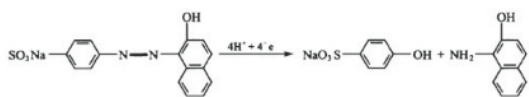
前言

纺织、印染等行业排放的工业废水中含有大量的人工合成染料、染色助剂、酸碱以及一些重金属,其中残余染料及助剂构成了染料废水中有机污染物的主要成分,并使废水带有特殊颜色。染料废水排放量大,具有色度高、成分复杂、有毒物质多等特点;并且化学需氧量(COD)高,而生化需氧量(BOD)相对较小,可生化性差。因此,如何处理印

染废水成为水污染治理的一项重要问题^[1,2]。

分子中含有偶氮基(-N=N-)的染料称为偶氮染料。偶氮染料作为最大的一类合成染料在工业上被广泛使用,包括酸性、媒染、活性、阳离子、中性染料、分散染料等约占染料产量的 50 % 以上,并且大多数偶氮染料危害性大,具有“三致”性,即致癌、致畸、致突变,所以广泛受到关注^[3,4]。

本文采用酸性橙 为目标污染物,它是一种应用较广的阴离子型酸性偶氮染料,水溶性好,难于生化降解^[5]。在水中,酸性橙 存在着如下平衡:



目前已有许多关于去除水中酸性橙 的研究。在半导体多相光催化方面,利用人造沸石负载二氧化钛薄膜光催化降解酸性橙^[6];在电化学技术方面,采用恒电位模式,在有阳离子交换膜分隔的两室电解槽中以 RuO₂/Ti 阳极对酸性橙 进行氧化脱色降解^[7];在以产生自由基为主的高级氧化工艺方面,如超临界水氧化法、超声声化法、辐射处理法、低温等离子体氧化法等多种方法被应用于染料废水的处理,例如采用滑动弧等离子体对酸性橙 进行降解,偶氮双键及其共轭结构被破坏,同时伴随着萘环开环,含苯环的新物质生成^[8]。此外采用吸附法去除水中酸性橙 ,如用 HDT-MA 改性累托石和改性泥炭-树脂颗粒来吸附酸性橙 也有一定的研究^[9,10]。

磁性碳包铁纳米粒是在金属铁的表面包覆了一层碳的磁性材料,由于其比表面积大,对小分子物质有良好吸附作用,又具有良好的磁响应性,磁性纳米粒在外加磁场作用下,可引导负载物在体内定向移动、定位浓集,从而达到降低污染物毒副作用的目的^[11]。在利用碳包纳米铁吸附污染物的领域,韩德艳等人用碳包铁对丝裂霉素溶液进行吸附,研究了其吸附动力学,并测定了药物微球不同温度下的缓释性能^[12]。由于在环境修复领域,采用碳包纳米铁吸附染料的研究不多,采用碳包纳米铁降解酸性橙 的研究在国内纳米材料处理水质方面尚处于前沿。

因此本文的研究目标是用碳包纳米铁吸附水中酸性橙 ,探讨影响碳包纳米铁吸附水中酸性橙 的影响因素,包括酸性橙 初始浓度、碳包纳米铁粉投加量、温度、初始 pH;并进一步探讨吸附的等温线和动力学;在此基础上采用 XRD 表征吸附前后的碳包纳米铁和酸性橙 ,及 UV-vis 表征吸附前后的含酸性橙 的实际废水。研究结果可为碳包纳米铁处理偶氮染料废水提供理论基础,并为纳米铁材料在环境修复领域的应用奠定一定的基础,其潜在的科学意义和社会效益巨大。

1 试剂与仪器

1.1 实验试剂

碳包纳米铁(Fe/C)粉末,平均粒径 25nm,含铁量 78.6%,深圳市尊业纳米材料有限公司。

酸性橙 ;氯化铵 NH₄Cl,0.1 mol/L,分析纯;盐酸 HCl,0.1 mol/L,分析纯;氢氧化钠 NaOH,0.1 mol/

L,分析纯;中国医药集团上海化学试剂有限公司。

1.2 实验仪器

721N 紫外-可见分光光度计、722N 可见分光光度计、PHS-3C 型精密 pH 计,上海精密科学仪器有限公司;BS224S 型电子分析天平,北京赛多利斯仪器系列有限公司;THZ-320 型恒温振荡培养箱,上海精宏实验设备有限公司;GL-12B 型离心机,上海安亭科学仪器厂;GZX-9070 MBE 鼓风干燥箱,上海博讯实业有限公司医疗设备厂;尼高力 360 智能型红外光谱仪,美国尼高力;X'Pert Pro MPD X 射线粉末衍射仪,荷兰飞利浦。

2 分析方法

2.1 酸性橙 浓度的测定—分光光度法

称取 0.0500 g 酸性橙 粉末,用蒸馏水溶解,配制成 100 mg/L 酸性橙 标准储备液。在一系列 50 mL 比色管中分别加入 0、0.50、1.00、2.00、4.00、6.00、8.00、10.00 mL 的 100 mg/L 酸性橙 标准储备液,加入蒸馏水至标线,摇匀。配制成浓度分别为 0、1、2、4、8、12、16、20 mg/L 的酸性橙 系列溶液,然后在 486 nm^[13]处分别吸光度,绘制工作曲线。

2.2 pH 的测定

采用 PHS-3C 型精密 pH 计测定。

3 碳包纳米铁对酸性橙 的吸附实验

3.1 吸附时间与酸性橙 初始浓度的影响

取一系列 50 mL 离心管,均加入 0.0750 g 碳包纳米铁粉,再加入 20 mg/L 酸性橙 溶液 25.00 mL(原始 pH 为 6.2),摇匀,在 25 °C 以 240 r/min 的转速振荡,当反应进行到 10、15、20、40、60、75 min 时各取出三份,以 6 000 r/min 的转速离心 5 min,取上清液 2 mL 于 25 mL 比色管中,加蒸馏水稀释至标线,摇匀,用分光光度法在 486 nm 处测溶液中酸性橙 的浓度。

相同操作步骤与方法进行碳包纳米铁与酸性橙 初始浓度分别为 40、60、80、100 mg/L 时的吸附实验。

3.2 碳包纳米铁投加量的影响

取一系列 50 mL 离心管均加入 40 mg/L 酸性橙 溶液 25 mL(原始 pH 为 6.2),然后加入一定量的碳包纳米铁,使碳包纳米铁的浓度分别为 1.5、2、2.5、3、3.5 g/L,然后将这些离心管置于摇床中(25 °C 240 r/min)混合,当反应分别进行到 10、15、20、40、60、75 min 时各取出三只离心管,以 6 000 r/min 的转速离心 5 min,取上清液 2 mL 于 25 mL 比色管中,加蒸馏水稀释至标线,摇匀,在

486 nm 处测溶液中酸性橙 的浓度。

3.3 初始 pH 的影响

取一系列 50 mL 离心管,均加入 0.0375 g 碳包铁粉末,再分别加入不同 pH 的 40 mg/L 酸性橙 溶液 25 mL (初始 pH 用 0.1 mol/L 盐酸和氢氧化钠溶液分别调至 2.2、3.1、4.1、6.2、7.8、10.0),然后将这些离心管置于摇床中(25 °C 240 r/min)混合振荡 75 min,取出三只离心管,以 6 000 r/min 的转速离心 5 min,取上清液 2 mL 于 25 mL 比色管中,加蒸馏水稀释至标线,摇匀,在 486 nm 处测溶液中酸性橙 的浓度。

3.4 温度的影响

取一系列 50 mL 离心管,均加入 0.0375 g 碳包铁粉末,分别加入 25 mL 40 mg/L 酸性橙 溶液 (pH 为 6.2),后将这些离心管置于 240 r/min 的摇床中,在 20、25、30、35、45 °C 下振荡 75 min,取出三只离心管,以 6 000 r/min 的转速离心 5 min,取上清液 2 mL 于 25 mL 比色管中,加蒸馏水稀释至标线,摇匀,在 486 nm 处测溶液中酸性橙 的浓度。

3.5 实际废水的处理

本实验所用实际废水采自福州某纺织印染有限公司。实验分两组进行:一组实验,称取 0.1500 g 碳包纳米铁吸附剂于 250 mL 锥形瓶中,直接加入 100 mL 实际废水,在 30 °C 下以 240 r/min 的转速振荡,2 h 后用紫外-可见分光光度计在 200–700 nm 范围内扫描测定在此波长范围内溶液的吸光度和原始废水的吸光度,比较反应前后的变化;另一组实验,加标酸性橙 ,使其浓度为 40 mg/L,相同实验条件下,2 h 后用紫外-可见分光光度计在 200–700 nm 范围内扫描溶液在此波长范围内的吸光度和原始废水的吸光度,比较反应前后其变化,评估碳包纳米铁实际废水中酸性橙 的去除能力。实验均重复 3 次。

4 结果与讨论

4.1 碳包纳米铁吸附酸性橙 的优化

4.1.1 吸附平衡时间

实验结果如图 1 所示。

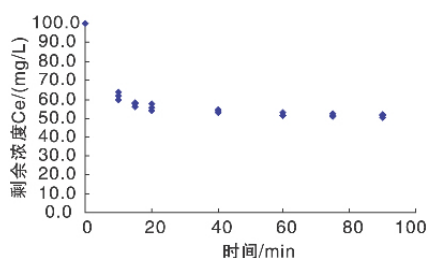


图1 时间对碳包纳米铁吸附酸性橙 的影响

由图 1 可知,随着反应的进行,酸性橙 的浓度在 40 min 以后变化很小,60 min 时,剩余浓度为 52.1 mg/L,75 min 时,剩余浓度为 51.7 mg/L,浓度基本不变,即已达到吸附平衡。本研究吸附平衡时间拟确定为 75 min。

4.1.2 酸性橙 初始浓度

实验结果见图 2 所示。

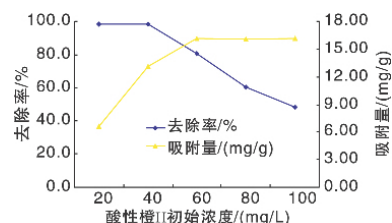


图2 酸性橙 初始浓度对去除率和吸附量的影响

由图2可知,随着初始浓度的增大,酸性橙 的去除率逐渐变小,但平衡时的吸附量增大。初始浓度为 20、40 mg/L 时 脱色率较高,达到 90% 以上,但是 40 mg/L 的吸附量更大,达到 13.10 mg/g,为了更充分利用材料,故选择 40 mg/L 的初始浓度,做进一步研究。

4.1.3 碳包纳米铁浓度

碳包纳米铁浓度对酸性橙 的去除率和吸附量的影响如图 3 和图 4 所示。

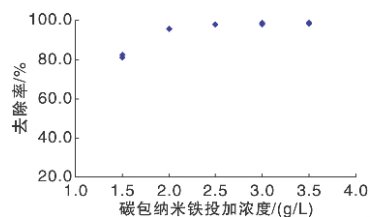


图3 碳包纳米铁浓度对酸性橙 去除率的影响

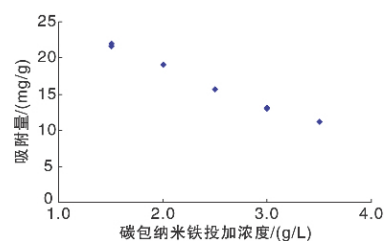


图4 碳包纳米铁浓度对吸附量的影响

由图 3 可知,随着碳包铁浓度的增大,酸性橙 去除率增大,在浓度为 2、2.5、3、3.5 g/L 时,去除率均接近 100%;由图 4 可知,随着碳包铁浓度的增大,吸附量减小,1.5 g/L 浓度的碳包纳米铁吸附量最大,达到 21.8 mg/g,材料的利用率最大,故选择 1.5 g/L 碳包铁投加量,做进一步研究。

4.1.4 初始 pH

不同初始 pH 的影响,研究结果如图 5 所示。

由图 5 可知,初始 pH 对碳包纳米铁吸附水中

酸性橙 有一定影响。在酸性条件下,酸性橙 的去除率较高、吸附效果较好,但是在中性条件下,去除率也能达到 80%,并且酸度太高时,也不宜在实际废水的处理中应用,因此初始 pH 在 4~8 是比较适宜的。在此范围内,去除率的变化很小,而酸性橙 的初始 pH 约为 6.2,即可以不用调节 pH。

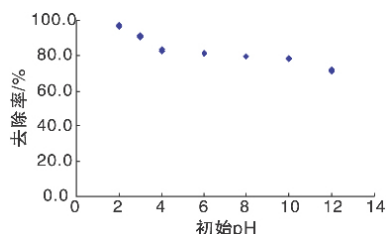


图 5 初始 pH 对酸性橙 去除率的影响

4.1.5 温度的影响

不同温度对碳包纳米铁吸附水中酸性橙 的影响如图 6 所示:

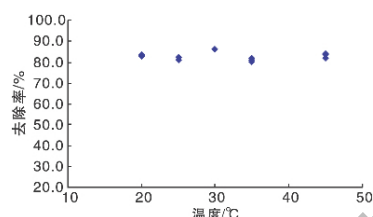


图 6 温度对酸性橙 去除率的影响

由图 6 可知,温度对碳包纳米铁吸附水中酸性橙 的影响不大。30 °C 时去除率相对高一些,故选择 30 °C 作为优化后的温度。

4.1.6 优化条件

通过上述实验,碳包纳米铁吸附水中酸性橙 的优化条件为:酸性橙 初始浓度 40 mg/L,碳包铁浓度 1.5 g/L,转速 240 r/min,pH 为 6.2,温度 30 °C。

取一系列 50 mL 离心管,均加入 0.0375 g 碳包铁粉末,再加入 40 mg/L 酸性橙 溶液 25 mL (pH 为 6.2),摇匀,在 30 °C 下以 240 r/min 的转速振荡,当反应时间分别为 10、15、20、30、40、60、75、90、120 min 时取出,平行三份,以 6 000 r/min 的转速离心 5 min,取上清液 2 mL 于 25 mL 比色管中,加蒸馏水稀释至标线,摇匀,在 486 nm 处测吸光度,然后转化为酸性橙 的浓度。实验结果如图 7 所示。

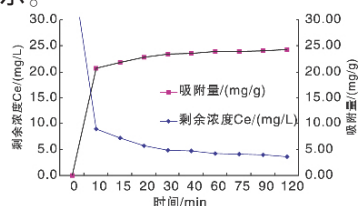


图 7 优化条件下酸性橙 的剩余浓度和吸附量随时间的变化
在优化条件下,经过 120 min 的反应,吸附已

到达平衡,酸性橙 的浓度已降到 3.64 mg/L,去除率达到 90%,而吸附量达到了 24.2 mg/g。

4.2 吸附前后碳包纳米铁的 XRD 谱图

对碳包纳米铁和优化条件(酸性橙 II 初始浓度 40 mg/L,碳包铁浓度 1.5 g/L,转速 240 r/min,pH 为 6.2,温度 30 °C。)下反应后的碳包纳米铁分别进行 X-射线粉末衍射实验,其结果如图 8 所示:

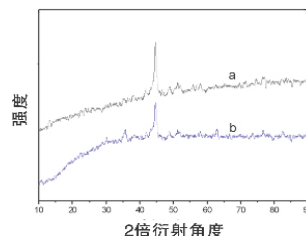


图 8 碳包纳米铁的 X 射线粉末衍射谱图

在图 8 中 a 线为碳包纳米铁的 X 射线粉末衍射谱图,其中 2θ 在 45° 的衍射峰对应于 Fe^0 [14,15]。反应后碳包纳米铁的 X 射线粉末衍射谱图 b 线所示,对比 a 线,b 线几乎未发生变化,说明了纳米零价铁的铁的价态未发生变化,没有铁的氧化物或氢氧化物生成。因此碳包纳米铁对酸性橙 的去除可能只是碳包纳米铁对溶液中的酸性橙 的吸附。

4.3 吸附等温线

Langmuir 吸附等温方程:

$$q_e = \frac{q_{max} b C_e}{1 + b C_e} \quad (1)$$

式中, q_e 为平衡吸附量; q_{max} 为最大吸附量; b 为常数; C_e 为平衡浓度。

Freundlich 吸附等温方程:

$$q_e = K C_e^{1/n} \quad (2)$$

两边取自然对数得:

$$\ln q_e = \frac{1}{n} \ln C_e + \ln K \quad (3)$$

式中, q_e 为平衡吸附量; K 为常数; $1/n$ 为常数; C_e 为平衡浓度[9,15]。

将 3.1 中不同初始浓度的酸性橙 在同一时间的吸附实验获得的实验数据分别用 Langmuir 吸附等温方程和 Freundlich 吸附等温方程进行拟合,结果见表 1。

表 1 吸附等温线拟合结果

吸附等温模型	方程式	R ²
Freundlich 型吸附等温方程	$\ln q_e = 0.1389 \ln C_e + 2.2895$	0.5704
Langmuir 型吸附等温方程	$C_e/q_e = 0.063 C_e + 0.028$	0.9983

由表 1 可见,碳包纳米铁对酸性橙 的吸附更符合 Langmuir 吸附等温方程,这说明在实验范围内碳包铁对酸性橙 的吸附可用 Langmuir 吸

附等温方程式来描述。

4.4 吸附动力学

4.4.1 模拟一级动力学方程

吸附动力学一级模型可用 Lagergren 方程描述:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t$$

式中, q_e (mg/g) 为平衡吸附量; q_t (mg/g) 是某一时间的吸附量; K_1 是吸附动力学速率常数^[15]。

吸附动力学速率常数 K_1 的拟合计算结果见表 2。

4.4.2 模拟二级动力学方程

吸附动力学二级模型可以用 Mc Kay 方程描述:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

式中 q_e (mg/g) 为平衡吸附量; q_t (mg/g) 是某一时间的吸附量; K_2 是吸附动力学速率常数^[15]。

吸附动力学速率常数 K_2 的拟合计算结果见表 2。

表 2 吸附动力学拟合结果

温度/°C	K_1/min^{-1}	R^2	$K_2/(\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1})$	R^2
20	0.0543	0.8852	0.0127	0.9988
25	0.0520	0.7980	0.0048	0.9856
30	0.9856	0.8706	0.0172	0.9996
35	0.0269	0.7601	0.0134	0.9985
45	0.0356	0.9238	0.0125	0.9994

由表 2 可知, 相对于模拟一级模型, 二级模型所得结果的相关性更好, 更能真实地反映碳包纳米铁吸附酸性橙的吸附动力学。

4.5 实际废水的处理

4.5.1 第一组实验

利用碳包纳米铁作为吸附剂处理实际印染废水的结果如图 9 所示。

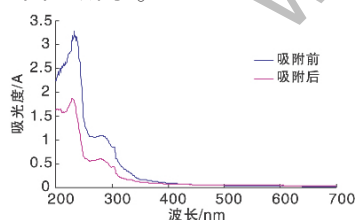


图 9 碳包纳米铁对实际印染废水处理前与处理后吸光度比较

从图 9 中可以看出, 所检测的波长范围为 200~700 nm, 其中在 200~400 nm 的波长范围内, 碳包铁对染料废水均有一定程度的脱色作用。已知酸性橙的最大吸收峰在 486 nm 处, 而图中显示, 在 400~500 nm 的范围内, 几乎没有吸收, 因此认为, 在此实际废水中, 不含酸性橙。即使含有酸性橙, 其浓度也可以忽略不计。

4.5.2 第二组实验

利用碳包铁作为吸附剂处理加标酸性橙的

实际印染废水的结果如图 10 所示。

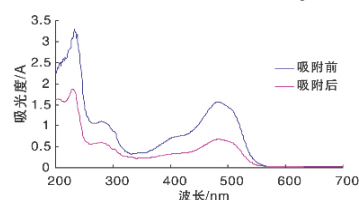


图 10 碳包纳米铁对加标后的实际印染废水处理前与处理后吸光度比较

从图 10 中可以看出, 在 200~700 nm 波长范围内, 其中在 486 nm 处有酸性橙 II, 反应后该处的峰强明显减小, 即溶液中酸性橙的浓度减小了, 说明了碳包纳米铁对实际废水中的酸性橙 II 也有去除能力, 并且得出碳包纳米铁对加标的实际废水中酸性橙的去除率为 70.3%。

从碳包纳米铁对单一酸性橙 II 水溶液的吸附实验及对实际印染废水的处理, 可知, 碳包纳米铁对染料酸性橙 II 废水具有很好的去除效果。

5 总结

(1) 通过以上研究可得出: 碳包纳米铁对酸性橙的吸附效果受酸性橙初始浓度、碳包铁浓度、初始 pH、温度的影响。随着酸性橙初始浓度的增大, 最终的去除率变小, 但平衡时的吸附量变大; 随着碳包铁浓度的增大, 酸性橙去除率增大, 吸附量减小; 当酸性橙初始浓度为 40 mg/L, 碳包纳米铁浓度为 1.5 g/L 时, 去除率达到 82%; 当 pH 酸性时吸附效果较好, 当 pH 为 2 时, 去除率达到 97%; 温度对吸附效果影响不大; 在优化条件下, 酸性橙的去除率达到 90%。

(2) 吸附等温线的拟合结果说明, 碳包铁对酸性橙的吸附过程符合 Langmuir 吸附等温方程。吸附动力学更符合二级动力学模型, 更能真实地反映碳包纳米铁对酸性橙的反应过程。

(3) 对反应前后碳包纳米铁的 X-射线粉末衍射实验表征的结果, 说明了纳米零价铁的价态未发生变化, 没有铁的氧化物或氢氧化物生成, 可能只是碳包纳米铁对溶液中的酸性橙的吸附。

(4) 在成分复杂的实际废水中, 碳包纳米铁仍然能够有效的去除其中的酸性橙, 脱色率高达 70.3%。

因此, 碳包纳米铁在修复染料废水中的应用具有一定的前景。

参考文献

- [1] 傅平青, 程鸿德. 印染废水治理研究现状[J]. 地质地球化学, 2001, 29(4): 86-91.
- [2] 刘春萍, 刘军深, 孙琳, 等. 胺修饰酚醛树脂对酸性橙 II 的吸附

- 性能研究[J].离子交换与吸附,2006,22(2):161-16.
- [3]黄玉.偶氮染料废水的处理方法及研究进展[J].宜宾学院学报,2007,(6):54-57.
- [4]刘士,汪世龙,孙晓宇,等.酸性橙 7 降解的微观反应机理及动力学研究[J].光谱学与光谱分析,2005,25(5):776-779.
- [5]刘海宁,曲久辉,李国亭,等.转鼓式内电解装置处理水中酸性橙染料[J].环境科学学报,2007,27(9):1425-1430.
- [6]叶映雪.人造沸石负载二氧化钛薄膜光催化降解酸性湖兰 A 和酸性橙 的研究[J].光谱实验室,2003,20(1):62-66.
- [7]樊瑞,毕会锋,杨卫身,等.恒电位下电氧化脱色降解酸性橙[J].化学工程,2007,35(1):60-63.
- [8]刘亚纳,严建华,李晓东,等.滑动弧等离子体处理酸性橙 废水[J].化工学报,2008,59(1):221-227.
- [9]唐玉斌,吕锡武,陈芳艳,等. HDTMA 改性累托石对水中酸性橙的吸附热力学及动力学 [J]. 环境污染治理技术与设备,2006,7(11):77-80.
- [10]孙庆业,杨林章.改性泥炭.树脂颗粒对水溶液中酸性橙 的吸附[J].环境科学,2007,28(6):1300-1304.
- [11]韩德艳,谢长生.纳米碳包铁的吸附性能研究[J].黄石理工学院学报,2006,22(3):11-13.
- [12]韩德艳,谢长生.碳包铁对丝裂霉素 C 的吸附与缓释性能研究[J].化学与生物工程,2006,23(4):32-34.
- [13]Xiaoying Jin, Ming-qin Jiang, Xaio-quan Shan, et al. Adsorption of methylene blue and orange II onto unmodified and surfactant-modified zeolite [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2008,328: 243-247.
- [14]Kanel S.R., Manning B, Charlet L, et al. Removal of arsenic-(III) from groundwater by nanoscale zero-valent iron[J]. Environ.Sci.Tech-nol.,2005, 39:1291-1298.
- [15]郭卓,袁悦.介孔碳 CMK23 对苯酚的吸附动力学和热力学研究[J].高等学校化学学报,2007,28:289-292.

(上接第 45 页)

(1) 钻孔高度的布置: 钻孔应该布置在裂隙带的中下部即在 12~32 m 之间, 该处裂隙发育比较完全, 能更好的抽采瓦斯。

(2) 合理的钻孔数量: 考虑到瓦斯涌出不均衡性和异常性, 以及钻孔可能出现的切孔、垮孔等成孔不好的情况, 每个钻场设计布置 9 个抽采钻孔。

(3) 合理的钻孔角度。角度布置在仰角 16° 较为合适, 与巷道夹角布置在 1~14° 合适。

(4) 合理的封孔深度和钻孔有效长度。钻孔封孔长度为 8 m, 钻孔的有效效率为 0.74, 有效长度为 63 m。

(5) 合理的钻场间距。通过理论计算和现场跟踪考察分析, 为了更有效的抽采瓦斯, 保证抽采效果, 钻场间距以 60 m 较为合理。

4.3 现场验证

通过现场验证可以看出, 钻孔抽采瓦斯浓度和纯量的效果比较明显, 钻孔设计比较合理, 说明此次布孔比较成功, 达到了预期的效果, 为进一步

做好采空区瓦斯治理提供了一定的参考依据。

参考文献

- [1] 殿明, 林柏泉. 煤层瓦斯赋存规律及防治技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006.
- [2] 王兆丰. 我国煤矿抽放存在的问题及对策探讨, 煤矿安全 [J], 2005, 36(3): 29-44.
- [3] 施龙青, 韩进. 开采煤层底板“四带”划分理论与实践 [J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(1): 16-23.
- [4] 刘泽功, 戴广龙等. 影响采空区顶板抽放瓦斯效果的主要因素分析 [J]. 安徽理工大学学报 (自然科学版), 2003.
- [5] 卢平, 范维澄, 廖光焯. 高瓦斯煤层综放开采瓦斯与煤自燃综合治理研究 [J]. 中国安全科学学报, 2004.
- [6] 张铁钢. 矿井瓦斯综合治理示范工程 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [7] 李晓泉. 淮南煤矿新区采空区瓦斯抽放方法分析 [J]. 广西大学, 2007.
- [8] 姚春雨. 黄陵二矿综采工作面采空区瓦斯流动规律数值模拟研究 [J]. 河南理工大学, 2010.
- [9] 方前程. 下石节煤矿穿层钻孔抽放采空区瓦斯合理布孔参数的研究 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2008.
- [10] 杨天鸿, 唐春安, 徐涛, 芮勇勤. 岩石破裂过程的渗流特性-理论、模型与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.

(上接第 29 页)

- [1] 煤矿环境保护, 2000, 14(1): 10-12.
- [2] 高亮, 周如禄, 徐楚良, 等. 煤种与煤矿矿井水水质特征之间的相关性 [J]. 煤矿环境保护, 2004, 18(6): 46-48.
- [3] 曹祖民, 高亮, 崔岗, 等. 矿井水净化及资源化成套技术与装备 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2003: 1-5.
- [4] 郭中权, 王守龙, 朱留生. 煤矿矿井水处理利用实用技术 [J]. 煤炭

科学技术, 2008, 36(7): 3-5.

- [5] 郭中权, 冯曦, 李金合, 等. 反渗透技术在高硫酸盐硬度矿井水处理中的应用研究 [J]. 能源环境保护, 2006, 20(3): 25-26.
- [6] 何绪文, 宋志伟, 王殿芳, 等. 反渗透技术在煤矿苦咸水处理中的应用研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(6): 618-621.
- [7] 何绪文, 胡滇建, 胡振玉, 等. 煤矿高矿化度矿井水处理技术研究 [J]. 煤炭科学技术, 2002, 30(8): 38-41.