

# 乙二胺改性双氰胺甲醛脱色絮凝剂的合成及脱色性能研究

卢素敏\*, 宋美华, 王汉昌, 尹良珂, 李献朋  
(天津工业大学化学工程与技术学院, 天津 300387)

**摘要:**以乙二胺为改性剂、双氰胺和甲醛为原料,制备了改性脱色絮凝剂(EDA-DCDF),利用FT-IR、XRD和SEM对絮凝剂结构及形貌特性进行表征。考察了原料配比、絮凝剂投加量、废水初始pH、无机盐和表面活性剂等对染料脱色性能的影响。结果表明,改性双氰胺甲醛颗粒属无定形结构,相对于未改性双氰胺甲醛DCDF,改性后的EDA-DCDF获得了更好的脱色性能,对活性红195的最大脱色率可达98.7%,明显高于DCDF。EDA-DCDF在酸性至微碱性条件下使用可获得良好的脱色性能,无机盐、表面活性剂对絮凝剂脱色性能产生了不同影响,在实验浓度范围内,EDA-DCDF展示了较好的抗盐性,而表面活性剂SDBS对脱色性能产生明显的负面影响。

**关键词:**双氰胺甲醛;改性絮凝剂;脱色;脱色机理

**中图分类号:**X703

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2021)12-0193-05

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.12.039

## Preparation of ethylenediamine modified dicyandiamide-formaldehyde decolorizing flocculant and study on its decolorization performance

LU Su-min\*, SONG Mei-hua, WANG Han-chang, YIN Liang-ke, LI Xian-peng  
(School of Chemical Engineering and Technology, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:**EDA-DCDF, a modified decolorizing flocculant is synthesized by using dicyandiamide and formaldehyde as raw materials, and ethylenediamine as the modifying agent. The structure and morphological characteristics of EDA-DCDF are characterized by means of SEM, XRD and FT-IR. The influences of the molar ratio between raw materials, flocculant dosage, pH of initial wastewater, inorganic salts and surfactant on the decolorating ability of EDA-DCDF to dyestuffs are systematically investigated. According to experimental results, EDA-DCDF shows an amorphous structure, and exhibits higher decolorization efficiency compared to the unmodified DCDF. The decolorization rate of EDA-DCDF to reactive red 195 can reach 98.7%, apparently higher than that of DCDF. Under acidic to weak alkaline condition, EDA-DCDF can bring about high decolorization efficiency. Different impacts of inorganic salts and surfactant on the decolorization efficiency of EDA-DCDF are found. In the experimental concentration range, EDA-DCDF exhibits good resistance to inorganic salts, while surfactant SDBS affects adversely the decolorization performance of EDA-DCDF.

**Key words:** dicyanodiamide-formaldehyde; modified flocculant; decolorize; decolorization mechanism

印染废水是棉、麻等加工过程中所排放的有色废水,排放量大且有机物含量高、色度深、pH变化大、难以生物降解<sup>[1-3]</sup>。在对印染废水的各种处理方法中,混凝絮凝法因工艺简单、操作方便、能耗低等优点,成为一种常用的废水脱色方法<sup>[4-5]</sup>,而高效絮凝剂的开发研究也引起了人们的广泛关注<sup>[6-8]</sup>。

双氰胺甲醛缩聚物是一种阳离子型缩聚物,其所携带的正电荷能与带负电的染料分子发生电中和,使染料分子沉降下来<sup>[9-11]</sup>。但双氰胺甲醛分子质量较低,所生成的矾花较小,沉淀速度慢,因此,为提高脱色性能,人们尝试对双氰胺甲醛进行各种改性研究<sup>[12-15]</sup>。耿仁勇等<sup>[13]</sup>采用尿素、三聚氰胺为交联剂,对双氰胺甲醛进行改性,脱色能力有很大提

升,脱色率可达94.6%。尽管人们进行了各种改性研究,双氰胺甲醛类絮凝剂沉淀速度慢的问题仍然存在,对其进行性能改进具有很好的实用价值。

笔者选用乙二胺为改性剂合成出一种新的脱色絮凝剂(EDA-DCDF)。采用活性染料配制模拟染料废水,考察了原料配比、废液pH、无机盐、表面活性剂等对脱色的影响,并对EDA-DCDF的结构及表观形貌进行了分析。

## 1 实验部分

### 1.1 絮凝剂制备

按一定的摩尔比称取原料双氰胺、甲醛和氯化铵,并将双氰胺、甲醛和1/2的氯化铵依次放入装有

收稿日期:2021-01-25;修回日期:2021-09-29

作者简介:卢素敏(1967-),女,博士,副教授,研究方向为化学反应工程与工艺,通讯联系人,lusunin0720@163.com。

回流冷凝管和温度计的三口烧瓶中,通冷凝水,搅拌下逐渐升温到 45℃。加入剩余氯化铵,反应 20 min 后,逐滴滴加一定量的乙二胺,升高到设定温度,继续反应 2.5 h,产物冷却得到黄色透明并带有黏性的液体,即 EDA-DCDF 絮凝剂。

### 1.2 絮凝剂表征

(1)利用 Nicolet is10 型傅里叶变换红外光谱仪(美国 ThermoFisher 公司生产)对所制备絮凝剂的结构特征进行分析,波长范围 4 000~400  $\text{cm}^{-1}$ ,分辨率为 0.4  $\text{cm}^{-1}$ 。

(2)将反应产物用丙酮沉洗提取,离心,所得沉淀在 40~50℃ 下真空干燥,利用 ADVANCE X 射线衍射仪(德国 Bruker 公司生产)对所得固体产物的晶体形态进行分析。测试条件:CuK $\alpha$  射线( $\lambda = 0.15418 \text{ nm}$ ),测试电压为 40 kV,测试电流为 40 mA,扫描速度为 2°/min,步长为 0.02°。

(3)利用扫描电子显微镜(Gemini SEM500 型,德国生产)对所得脱色絮凝剂的形貌特性进行观察。

### 1.3 脱色性能测试

#### 1.3.1 染料废水的性质

选择活性红 195 染料分析絮凝剂的脱色性能。将染料配成质量浓度为 300 mg/L 的模拟染料废水,所得废水的 pH 为 7.92,初始 Zeta 电位为 -21.5 mV,电导率为 379  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。利用 malvern Zetasizer 3000(英国马尔文仪器公司生产)对染料废水原液的粒度分布进行测试,结果如图 1 所示。由图 1 可见,染料废水粒径很小,粒径分布在 1~10 nm 范围(平均粒径为 4 nm),远小于常规的悬浮废水,增加了脱色难度。

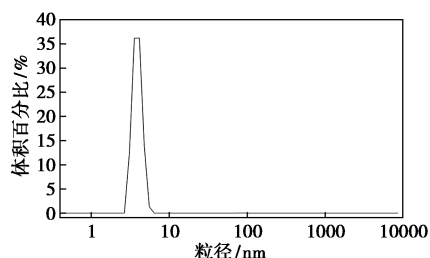


图 1 染料废水颗粒分布图

#### 1.3.2 脱色性能测试

取一定量稀释后脱色絮凝剂投加到染料废水中,在 300 r/min 下快速搅拌 2 min,而后将转速降为 100 r/min 搅拌 1 min,静置 10 min,取上层清液测定脱色后水样吸光度。

利用紫外-可见分光光度计(UV-2202PC 型,上海析谱仪器有限公司生产)测定脱色前后最大吸收波长处的吸光度值,依此计算脱色率。

为了分析脱色机理,利用 malvern Zetasizer 3000 型 Zeta 电位分析仪测定染料废水的 Zeta 电位,溶液 pH 用 HCl(1 mol/L)和 NaOH(1 mol/L)溶液进行调节。

## 2 实验结果与讨论

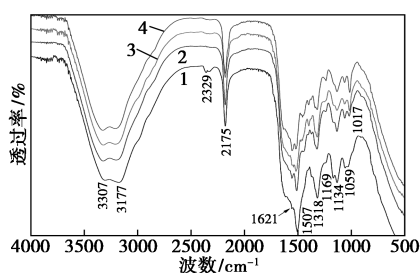
### 2.1 絮凝剂结构及形貌分析

#### 2.1.1 红外光谱分析

甲醛和乙二胺均会与双氰胺中的胺基进行加成反应生成不同的羟甲基基团,不同羟甲基产物之间以及羟甲基和双氰胺、乙二胺之间可以进行缩合反应,形成复杂的分子结构。

不同双氰胺(DCD)和乙二胺(EDA)摩尔比 [ $n(\text{DCD}) : n(\text{EDA})$ ] 的改性双氰胺甲醛的红外光谱图如图 2 所示[其余原料摩尔比为  $n(\text{DCD}) : n(\text{HCHO}) : n(\text{NH}_4\text{Cl}) = 1 : 2.25 : 1$ ]。由图 2 可见,在波数 3 307~3 177  $\text{cm}^{-1}$  处存在 1 个强而宽吸收峰,对应于 N—H 键的对称和反对称伸缩振动峰<sup>[11]</sup>。在 2 174  $\text{cm}^{-1}$  处有 1 个尖锐的吸收峰,对应

于胍基结构  $\text{—HN—}\overset{\text{NH}}{\parallel}{\text{C}}\text{—NH—}$ <sup>[16]</sup>,加入乙二胺后,此峰的峰面积几乎未受影响。在 2 329  $\text{cm}^{-1}$  处双氰胺甲醛的红外谱图上出现强度较小的宽峰,应属于  $\text{—CN}$  的伸缩振动<sup>[17]</sup>,此峰在改性后的 EDA-DCDF 红外谱图上消失,表明乙二胺替代了部分双氰胺进行反应,进入链状结构中。1 621  $\text{cm}^{-1}$  处的肩峰和 1 506  $\text{cm}^{-1}$  处尖锐的强峰分别为伯胺  $\text{NH}_2$  和仲胺  $\text{—NH—}$  的弯曲振动峰,乙二胺加入后,随着乙二胺摩尔分数增加,1 621  $\text{cm}^{-1}$  处的肩峰变得清晰。1 318、1 169  $\text{cm}^{-1}$  及 1 134  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰分别对应于  $\text{—C—N}$  的弯曲振动、 $\text{C—O—C}$  及  $\text{—OH}$  的伸缩振动,随着乙二胺摩尔分数增加,几个峰强度逐渐减弱,在双氰胺与乙二胺摩尔比 [ $n(\text{DCD}) : n(\text{EDA})$ ] 为 1:0.15 时,1 169  $\text{cm}^{-1}$  处的峰消失,加入乙二胺后,带负电荷的羟基及醚键减少,正电荷数量增加。1 059  $\text{cm}^{-1}$  处小的宽峰为羟基  $\text{CH}_2\text{—OH}$  的伸缩振动峰<sup>[11]</sup>,乙二胺加入后,由于分子内氢键作用,羟基的伸缩振动向低频位移,偏移至 1 017  $\text{cm}^{-1}$  处。

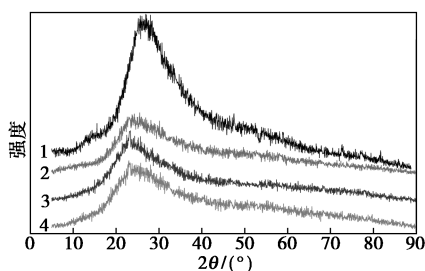


1—DCDF; 2— $n(\text{DCD}) : n(\text{EDA}) = 1 : 0, 05$ ;  
3— $n(\text{DCD}) : n(\text{EDA}) = 1 : 0, 10$ ; 4— $n(\text{DCD}) : n(\text{EDA}) = 1 : 0, 15$

图2 双氰胺甲醛及不同双氰胺和乙二胺摩尔比的 EDA-DCDF 红外光谱图

### 2.1.2 XRD 及 SEM 分析

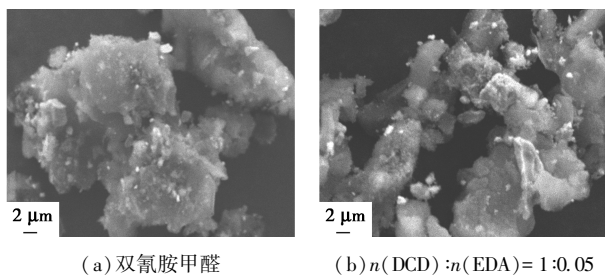
DCDF 及不同乙二胺摩尔分数的 EDA-DCDF 的 XRD 图如图 3 所示。



1—DCDF; 2— $n(\text{DCD}) : n(\text{EDA}) = 1 : 0, 05$ ;  
3— $n(\text{DCD}) : n(\text{EDA}) = 1 : 0, 10$ ; 4— $n(\text{DCD}) : n(\text{EDA}) = 1 : 0, 15$

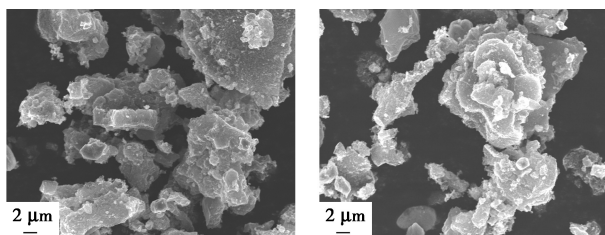
图3 DCDF 和不同乙二胺含量的 EDA-DCDF 的 XRD 图

从图 3 中可见,各絮凝剂均呈现漫射峰,表现出非晶体结构,相对于 DCDF,乙二胺改性后的 EDA-



(a) 双氰胺甲醛

(b)  $n(\text{DCD}) : n(\text{EDA}) = 1 : 0.05$



(c)  $n(\text{DCD}) : n(\text{EDA}) = 1 : 0.1$

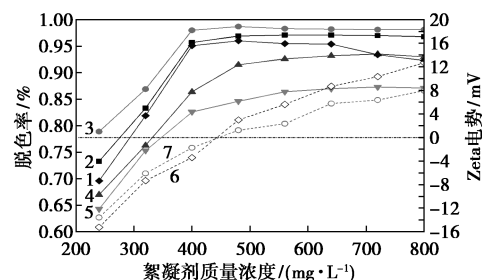
(d)  $n(\text{DCD}) : n(\text{EDA}) = 1 : 0.15$

图4 DCDF 和不同乙二胺摩尔分数的 EDA-DCDF 的电镜图

DCDF 峰面积更小,无定型化更为明显,乙二胺的加入比例对于峰面积的影响不明显。同时从图 3 中还可以发现,乙二胺改性后,衍射峰向低衍射角方向偏移,表明无定型结构上发生了变化。DCDF 和不同乙二胺摩尔分数的 EDA-DCDF 的扫描电镜图如图 4 所示。从图 4 中可以看出,DCDF 和不同乙二胺摩尔分数的改性 EDA-DCDF 均呈现不规则的块状结构,随着乙二胺摩尔分数的增加,EDA-DCDF 逐渐变得致密,并相互粘结堆积在一起,加入乙二胺后,不同的羟甲基产物之间以及羟甲基和双氰胺甲醛、乙二胺之间的反应更为复杂,形成了复杂的分子链状结构。

### 2.2 不同双氰胺及乙二胺摩尔比及絮凝剂质量浓度对产物脱色性能的影响

乙二胺引入反应体系后,反应变得复杂,缩聚产物在黏度、脱色效果上发生了变化。在优化双氰胺甲醛制备条件的基础上,探索了双氰胺与乙二胺的原料摩尔比对脱色效果的影响,结果如图 5 所示。



1—DCDF 脱色率; 2— $n(\text{DCD}) : n(\text{EDA}) = 1 : 0, 05$  脱色率;  
3— $n(\text{DCD}) : n(\text{EDA}) = 1 : 0, 10$  脱色率;  
4— $n(\text{DCD}) : n(\text{EDA}) = 1 : 0, 125$  脱色率;  
5— $n(\text{DCD}) : n(\text{EDA}) = 1 : 0, 15$  脱色率;  
6—DCDF Zeta 电势; 7— $n(\text{DCD}) : n(\text{EDA}) = 1 : 0, 10$  Zeta 电势

图5 絮凝剂质量浓度对不同乙二胺摩尔分数的 EDA-DCDF 脱色率及 Zeta 电势的影响

由图 5 可见,随着乙二胺摩尔分数的增加,EDA-DCDF 的脱色率呈先上升后下降的变化,当双氰胺与乙二胺的摩尔比为 1:0.1 时,脱色效果最好,可达 98.68%;继续增加乙二胺摩尔分数,脱色效果下降,当  $n(\text{DCD}) : n(\text{EDA}) = 1 : 0.15$  时,EDA-DCDF 的脱色率甚至比 DCDF 还低,但絮凝沉淀速度始终比 DCDF 快。双氰胺及乙二胺均可以与甲醛发生羟甲基化反应,乙二胺的加入使得羟甲基含量进一步增多,促进了羟甲基之间或羟甲基与胺基之间的脱水缩聚反应,使得阳离子电荷密度增加;另外,由于乙二胺和甲醛也会发生反应,随着乙二胺摩尔分数的

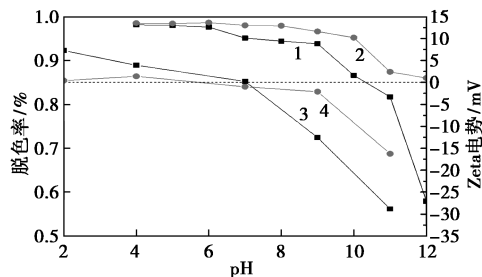
增加,会产生较多的小分子产物,产物黏度降低,絮凝性能反而会下降。

根据图 5,随着絮凝剂质量浓度的增加,DCDF 及不同摩尔分数的 EDA-DCDF 絮凝剂脱色率均呈现上升趋势,当絮凝剂质量浓度达到 400 mg/L 后,各絮凝剂脱色性能均趋于平缓。当质量浓度大于 650 mg/L 后,DCDF 的脱色率开始逐渐下降,而各种摩尔分数乙二胺改性的 EDA-DCDF 脱色率仍维持基本不变。

DCDF 及  $n(\text{DCD}) : n(\text{EDA}) = 0.1$  的 EDA-DCDF 所处理染料废水的 Zeta 电势如图 5 所示。由图 5 中可以看出,染料初始 Zeta 电势为  $-21.5 \text{ mV}$ ,随着絮凝剂质量浓度的提高,废水 Zeta 电势逐渐升高。在絮凝剂质量浓度为  $400 \sim 650 \text{ mg/L}$  之间时,Zeta 电势接近于零,废水体系最不稳定,脱色效果最好;继续加入絮凝剂,正电荷数量增加,压缩胶体颗粒表面双电层,胶体颗粒间相互排斥会重新使颗粒分散不易团聚。从 Zeta 电势和脱色率的结果来看,EDA-DCDF 对质量浓度的适用范围要大于 DCDF。

### 2.3 废水 pH 对脱色效果影响

废水 pH 对絮凝剂脱色的影响很大,以 NaOH 溶液或 HCl 溶液改变废水初始 pH,观察脱色率的变化情况,结果如图 6 所示(絮凝剂投加质量浓度为  $400 \text{ mg/L}$ )。从图 6 中可以看出,EDA-DCDF [ $n(\text{DCD}) : n(\text{EDA}) = 0.1$ ] 在酸性至微碱性条件下脱色率均非常良好,脱色率可达到 96.6% ( $\text{pH} = 9$ ) 以上,DCDF 的脱色率也在 93.8% ( $\text{pH} = 9$ ) 以上; $\text{pH}$  大于 9 以后,脱色率开始迅速下降,DCDF 随着 pH 的增加脱色率下降更快;至  $\text{pH} = 12$  时,DCDF 的脱色率仅为 58%,而改性后的 EDA-DCDF 的脱色率则为 86%。改性后的絮凝剂对于废水 pH 的适应性性能更好。



1—DCDF 处理的废水脱色率;2—EDA-DCDF 处理的废水脱色率;3—DCDF 处理的废水 Zeta 电势;4—EDA-DCDF 处理的废水 Zeta 电势

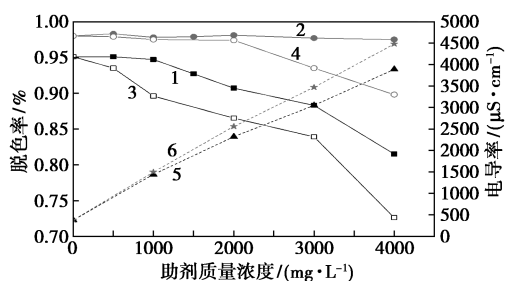
图 6 废水初始 pH 对脱色率及 Zeta 电位的影响

为便于分析,Zeta 电势随 pH 的变化情况也如图 6 所示。由图 6 中可以看出,酸性范围内,DCDF 和 EDA-DCDF 处理的染料废水 Zeta 电势为正值,绝对值较小,染料废水胶体颗粒稳定性差,极易团聚沉降; $\text{pH} > 9$  后,碱性条件下 Zeta 电势开始迅速下降,这和脱色率的变化趋势一致。酸性条件下, $\text{H}^+$  对表面带负电荷的染料胶体粒子的聚沉起促进作用;而在碱性条件下,废水中较多的  $\text{OH}^-$  与染料负离子同絮凝剂正电荷产生了静电作用力,减弱了絮凝脱色效果。

### 2.4 无机盐及表面活性剂对脱色的影响

工业染料在印染过程中往往会加入各种助剂,如无机盐及表面活性剂等,使得染料废水电导率很高( $2\,000 \sim 3\,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ )<sup>[18]</sup>,对染料废水的脱色效果产生很大影响。为了研究这些助剂所带来的影响,向染料废水中分别加入  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、十二烷基苯磺酸钠(SDBS),改变废水电导率,以观察脱色率的变化。

废水中加入  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  和 SDBS 对脱色率及电导率的影响如图 7 所示。由图 7 中可以看出,尽管  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  和 SDBS 所引起的电导率增加相差不多,但  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  对脱色率的影响较 SDBS 的影响小。在所采用的质量浓度范围内( $0 \sim 4\,000 \text{ mg/L}$ ),加入  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  后,DCDF 的脱色率由 0.951 下降至 0.815,而改性 EDA-DCDF 的脱色率几乎不受影响,下降很小;而 SDBS 加入后,在同样的浓度范围内,DCDF 和 EDA-DCDF 的脱色率都发生了较明显的下降,DCDF 的脱色率由 0.915 将至 0.726,EDA-DCDF 絮凝剂的脱色率由 0.979 将至 0.898。



1—加入  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  后 DCDF 对废水的脱色率;2—加入  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  后 EDA-DCDF 对废水的脱色率;3—加入 SDBS 后 DCDF 对废水的脱色率;4—加入 SDBS 后 EDA-DCDF 对废水的脱色率;5—加入  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  后染料废水的电导率;6—加入 SDBS 后染料废水的电导率

图 7  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  及 SDBS 质量浓度对絮凝剂脱色性能及电导率的影响

对于  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,其  $\text{SO}_4^{2-}$  负离子会与染料负电荷

争夺阳离子絮凝剂的吸附位<sup>[18]</sup>, SDBS 为阴离子表面活性剂,其烷基磺酸根负离子相较于  $\text{SO}_4^{2-}$  离子与絮凝剂阳离子的作用力更强,影响更大。由图 7 还可以发现,无机盐和阴离子表面活性剂对 DCDF 的影响明显大于 EDA-DCDF,表明 EDA-DCDF 对高电导率的废水适应性更强。

### 3 结论

以乙二胺为改性剂,制备了改性双氰胺甲醛脱色絮凝剂 EDA-DCDF,利用 FT-IR、XRD 及 SEM 对所合成絮凝剂进行了结构及形貌分析,测试了不同因素对脱色性能的影响,结果表明:

(1)乙二胺改性的 EDA-DCDF 是一种高效的脱色絮凝剂,其最佳原料摩尔比为  $n(\text{双氰胺}):n(\text{甲醛}):n(\text{氯化铵}):n(\text{乙二胺})=1:2.25:1:0.1$ ,在投加质量浓度为 400 mg/L 时,染料脱色率达到 98.68%。

(2)脱色絮凝剂在 pH 为 2~9 条件下脱色效果良好,相对于未改性双氰胺甲醛,改性后的 EDA-DCDF 对染料废水酸碱性有更强的适应性。

(3)探讨了无机盐、表面活性剂对脱色性能的影响。在实验浓度范围内,EDA-DCDF 表现出对无机盐很强的耐盐性;SDBS 对脱色率影响较大,随着 SDBS 质量浓度的增加,脱色率明显下降,相对于小分子无机盐,溶液中 SDBS 长链阴离子对电中和作用产生了更强的影响。

### 参考文献

- [1] Huang X, Wan Y, Shi B Y, *et al.* Characterization and application of poly-ferric-titanium-silicate-sulfate in disperse and reactive dye wastewaters treatment[J]. *Chemosphere*, 2020, 249:126129.
- [2] Talaiekhazani A, Mosayebi M R, Fulazzaky M A, *et al.* Combination of  $\text{TiO}_2$  microreactor and electroflotation for organic pollutant removal from textile dyeing industry wastewater[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2020, 59(2):549-563.
- [3] Zhang G W, Okajimab I, Sako T. Decomposition and decoloration of dyeing wastewater by hydrothermal oxidation[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2016, 112:136-142.
- [4] Verma A K, Dash R R, Bhunia P. A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 93(1):154-168.
- [5] Joo D J, Shin W S, Choi J H, Choi S J, *et al.* Decolorization of reactive dyes using inorganic coagulants and synthetic polymer[J]. *Dyes and Pigments*, 2007, 73(1):59-64.
- [6] Lal K, Garg A. Effectiveness of synthesized aluminum and iron based inorganic polymer coagulants for pulping wastewater treatment[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2019, 7(5):103204.
- [7] Yang S, Li W, Zhang H J, Wen Y B, *et al.* Treatment of paper mill wastewater using a composite inorganic coagulant prepared from steel mill waste pickling liquor[J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 209:238-245.
- [8] Cao B, Gao B, Wang M, *et al.* Flocculation properties of polyaluminum ferric chloride in water treatment; the effect of Al/Fe molar ratio and basicity[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2015, 458:247-254.
- [9] 张文艺, 刘明元, 罗鑫, 等. 双氰胺甲醛聚合物阳离子印染废水脱色剂的合成及其应用[J]. *过程工程学报*, 2010, 10(6):1217-1221.
- [10] Chai S L, John R, Mei F C. A review on application of flocculants in wastewater treatment[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2014, 92(6):489-508.
- [11] 耿仁勇, 吕雪川, 李国轲, 等. 双氰胺甲醛改性脱色剂的合成及在模拟染料废水中的应用[J]. *化工进展*, 2016, 35(1):308-313.
- [12] 陆雪良. 阳离子淀粉改性双氰胺-甲醛絮凝剂的合成及其应用研究[D]. 苏州:苏州大学, 2004.
- [13] 耿仁勇, 吕雪川, 李国轲, 等. 双氰胺甲醛型改性脱色絮凝剂的合成、表征及脱色性能[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(10):3752-3758.
- [14] 田习菲. 醚化改性双氰胺-甲醛脱色絮凝剂的合成及应用[D]. 苏州:苏州大学, 2014.
- [15] 钱玲, 吕功焯. 不同方法改性的双氰胺-甲醛絮凝剂脱色性能研究[J]. *工业水处理*, 2008, 28(7):64-66.
- [16] 张恒, 王晓平, 胡振华. 双氰胺甲醛缩聚反应机理和强放热现象研究[J]. *能源化工*, 2014, 35(6):48-52.
- [17] 黎载波. 双氰胺-甲醛絮凝脱色剂的合成与应用研究[D]. 广州:广东工业大学, 2014.
- [18] Zhou L, Zhou H J, Yang X Y. Preparation and performance of a novel starch-based inorganic/organic composite coagulant for textile wastewater treatment[J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 210:93-99. ■

欢迎订阅《现代化工》杂志, 邮发代号 82—67。