

造纸废水的电离辐射预处理工艺研究

万建信^{1,2}, 何仕均^{1*}, 孙伟华³, 方继敏², 王建龙¹

(1. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084; 2. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070; 3. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要:造纸废水是我国污染最为严重的难降解工业废水之一, 研究了电离辐射处理造纸废水的可行性, 探讨了混凝-辐照以及混凝-辐照组合工艺对废纸造纸废水的 COD、BOD₅、吸光度、DOC 以及有机物相对分子质量分布的影响. 实验发现, 造纸废水的 COD 主要是由相对分子质量 < 3 000 的有机物构成, 相对分子质量为 1 000 ~ 3 000 的有机物对 COD 的贡献占 44.5%, 相对分子质量 < 1 000 的有机物对 COD 的贡献占 41.6%. 混凝能够有效去除造纸废水中相对分子质量 > 3 000 的有机物, 去除率达到 44.7%, 相对分子质量 < 3 000 的有机物去除率仅为 20.0%, 并且显著降低废水的吸光度, 提高了辐照对于相对分子质量 1 000 ~ 3 000 以及相对分子质量 1 000 以下有机物的降解效率. 混凝可以沉降部分的大分子有机物, 使得辐照后紫外吸收波降低; 而辐照降低了小波长 (< 250 nm) 范围内的吸收峰, 而在大波长 (> 250 nm) 处吸收峰增高. 辐照对造纸废水中的有机物可能同时具有降解和聚合作用, 对相对分子质量 > 3 000 的有机物聚合作用大于降解作用, 对相对分子质量 < 3 000 的有机物的降解作用占据主要优势. 混凝-辐照组合工艺不但有效去除造纸废水中相对分子质量 > 3 000 的有机物, 而且能够提高相对分子质量 1 000 ~ 3 000 和相对分子质量 1 000 以下有机物的可生化性. 混凝-辐照组合工艺对于造纸废水的处理具有很好的互补性.

关键词:造纸废水; 混凝; 电离辐射; 预处理; 相对分子质量分布

中图分类号: X793 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2011)06-1638-06

Pretreatment of Paper Mill Effluent by a Combined Process of Coagulation and Ionizing Radiation

WAN Jian-xin^{1,2}, HE Shi-jun¹, SUN Wei-hua³, FANG Ji-min², WANG Jian-long¹

(1. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Paper mill effluent is one of the most refractory industrial wastewater in China. The feasibility of treating paper mill effluent by ionizing radiation was studied experimentally. This article investigated the effect of coagulation, ionizing radiation, and the combined process of coagulation and ionizing radiation on COD, BOD₅, absorbance DOC and molecular weight distribution of soluble organic compounds in paper mill effluent. It was found that COD of wastewater consist of organic compounds ($M_r < 3\,000$). The organic compounds ($1\,000 < M_r < 3\,000$) made 44.5% contribution to COD and $M_r < 1\,000$ 41.6%. Coagulation technology can effectively remove the organic compounds ($M_r > 3\,000$) with its removal rate of 44.7%. But the organic compounds ($M_r < 3\,000$) was only removed by 20.0%. Coagulation can also reduce the absorbance of wastewater significantly and improve the efficiency of ionizing irradiation for the degradation efficiency of organic compounds ($M_r < 3\,000$). The macromolecule organic compounds were coagulated so as to make UV wavelength decreased after irradiation. The absorption peak (< 250 nm) was decreased by irradiation, meanwhile the absorption peak (> 250 nm) increased. However, there are both degradation and polymerization effects for organic compounds in paper mill effluent by radiation technology. The polymerization shows greater effect compared with the degradation for organic compounds ($M_r > 3\,000$), while the effect is opposite for organic compounds ($M_r < 3\,000$). Combined process of coagulation and ionizing radiation not only effectively remove organic compounds ($M_r > 3\,000$) in paper mill effluent, but also increases the biodegradability of organic compounds ($M_r < 3\,000$). Therefore, the combined process of coagulation and ionizing radiation possesses highly effective applicability for paper mill effluent.

Key words: paper mill effluent; coagulation; ionizing radiation; pretreatment; relative molecular mass distribution

废纸造纸以废板纸、废报纸、废书刊纸等为主要原料, 废纸再生造纸工艺可分为制浆和抄纸两大部分. 在制浆部分的除渣、洗浆、漂洗等过程中, 产生大量的洗涤废水, 废水中主要含有半纤维素、木质素、无机酸盐、细小纤维、无机填料以及油墨、染料等污染物. 根据废纸来源和生产工艺的差别, 洗涤废水的

特性有所不同, 其污染物含量大致为: COD 500 ~

收稿日期: 2010-06-03; 修订日期: 2010-09-13

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2009AA063905); 国家自然科学基金项目 (10975085)

作者简介: 万建信 (1986 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: wanjianxin2000@163.com

* 通讯联系人, E-mail: heshj@tsinghua.edu.cn

2 000 mg/L, BOD₅ 75 ~ 500 mg/L^[1]. 目前, 废纸造纸废水的处理方法有混凝沉淀-生化法、化学处理-混凝沉淀法等技术, 但都存在许多不足之处, 难以满足日益严格的废水排放标准^[2]. 近年来, 电离辐射技术在水和废水处理领域的应用引起了人们越来越多的关注, 因为它不仅能去除难生物降解的有机物, 而且不会产生二次污染, 还可以起到杀菌作用^[3], 被国际原子能机构列为 21 世纪和平利用原子能的主要研究方向. 但是, 辐射技术应用于废水中有机污染物的降解, 存在的主要问题是有机污染物彻底分解所需的辐射剂量大、能耗高. 生物处理是一种在污水处理领域广泛应用的技术, 具有处理效率高、运行稳定、成本低等优势. 电离辐射可以作为生物处理一种预处理手段, 将有毒、难降解的有机污染物转化为无毒或低毒、易于降解的中间产物, 为采用常规的生物处理提供了良好的条件. 对于特定废水, 只要控制好合适的辐射剂量, 即可实现与生物处理工艺的良好组合^[4~6].

笔者曾经研究了 γ 辐射/生物处理以及纳米 TiO₂ 协同 γ 辐射处理造纸废水^[7,8], 本实验采用混凝和辐照作为造纸废水的预处理工艺, 研究了混凝、辐照及其混凝-辐照组合工艺对造纸废水的 COD、BOD₅、吸光度、DOC 以及有机物相对分子质量分布的影响, 探讨提高造纸废水可生化性的预处理方法.

1 材料与方法

1.1 电离辐射装置

γ 辐射采用由清华大学核能与新能源技术研究院设计建造的⁶⁰Co 辐射装置, 16 枚⁶⁰Co 放射源棒采用花篮式布置(即:筒心源架), 其放射性总活度为 1.3 × 10⁴ Ci. 实验中每次取 20 mL 的造纸废水放入 50 mL 的玻璃试管中密封, 然后置于 γ 辐射场中进行辐射处理. 电离辐射处理过程中不通入任何气体, 吸收剂量采用 Fricke 剂量计测定.

1.2 实验用水

实验用水采用武汉某造纸公司废水处理厂收集的废纸造纸废水. 其原水水质如表 1.

表 1 原水水质

Table 1 Quality of raw water

COD /mg·L ⁻¹	BOD ₅ /mg·L ⁻¹	DOC /mg·L ⁻¹	UV ₂₅₄	pH
722	427	173.6	1.6315	6.9

1.3 实验试剂

重铬酸钾 AR, 硫酸亚铁铵 AR, 98% 硫酸 AR,

氢氧化钠 AR, PAC 和 PAM 均为市售水处理药剂.

1.4 分析方法

COD 采用重铬酸钾法测定, BOD₅ 采用 5 d 培养法测定, DOC 采用岛津 DOC-V_{CPH} 分析仪, pH 采用 METTLER-TOLEDO FE20 pH 计测定, UV₂₅₄ 采用 PerkinElmer 公司 Lambda 25 型紫外-可见分光光度计测定.

废水中有机物的相对分子质量分布采用超滤膜截留法^[9]. 超滤膜采用上海摩速科学器材有限公司生产的聚醚砜超滤膜. 过滤装置采用搅拌超滤杯 (Model 8400, Amicon Corp, USA), 压力驱动力为氮气, 压力在 0.4 ~ 0.5 MPa 之间, 将一定体积的待过滤液体置于超滤杯中, 搅拌速度为 170 r/min, 防止浓差极化. 膜过滤采用平行法, 见图 1.

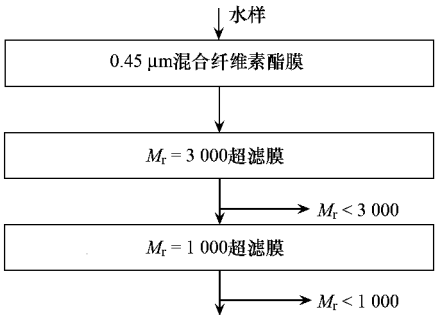


图 1 溶解性有机物分离过程示意

Fig. 1 Schematic of separation of dissolved organic compounds

2 结果与讨论

2.1 电离辐射对造纸废水 COD、BOD₅ 的影响

将原水在不同剂量下进行电离辐射处理, 电离辐射后的废水分别经过 0.45 μm、Mr = 3 000 和 Mr = 1 000 的超滤膜过滤后, 废水的 COD、BOD₅ 变化情况如图 2、图 3.

结合图 2 和图 3 可知, 造纸废水的 COD 主要由相对分子质量 < 3 000 的有机物构成, 相对分子质量为 1 000 ~ 3 000 的有机物对 COD 的贡献占 44.5%, 相对分子质量 < 1 000 的有机物对 COD 的贡献占 41.6%. 研究表明, γ 射线或电子束辐射使水反应产生 $\cdot\text{OH}$ 、 e_{aq}^- 、 $\cdot\text{H}$ 、 H_2O_2 等活性自由基及粒子, 可有效降解废水中的有机污染物^[10,11]. 本实验发现, 电离辐射对造纸废水中的有机物可能同时具有降解和聚合作用. 随着辐射剂量的增加, 相对分子质量 > 3 000 的 COD 和 BOD₅ 分别呈现上升和下降趋势, 说明电离辐射可能形成了一些可生化性差的超大分

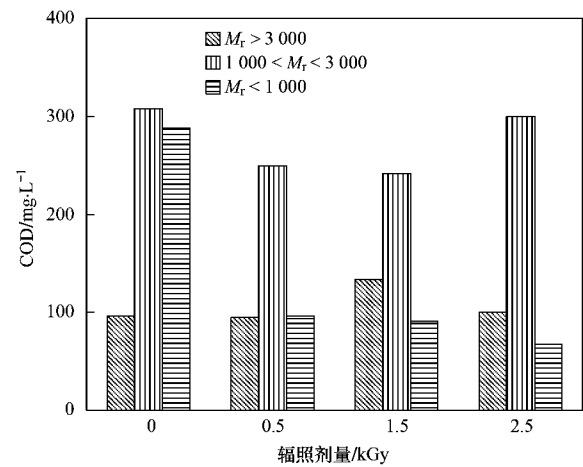


图2 辐射剂量对原水 COD 的影响

Fig.2 Influence of irradiation doses on COD of raw water

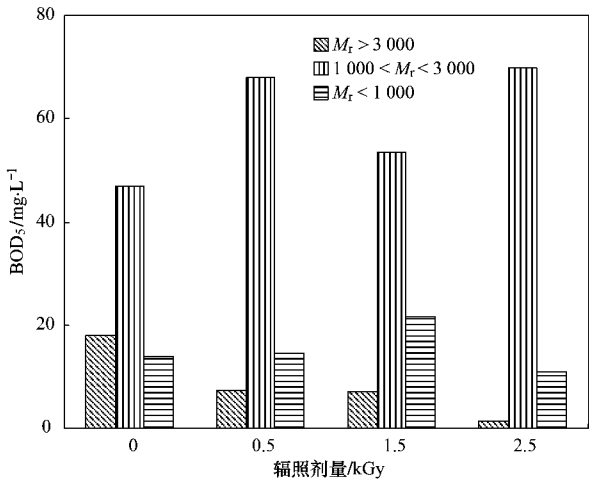


图3 辐射剂量对原水 BOD₅ 的影响

Fig.3 Influence of irradiation doses on BOD₅ of raw water

子量有机物;相对分子质量为1 000 ~ 3 000 的 COD 先降低后增大,BOD₅ 持续增加,说明该区段有机物的可生化性能得到提高;相对分子质量 < 1 000 的 COD 随着辐射剂量的增加持续下降,BOD₅ 先增加后降低.当辐射剂量 2.5 kGy 时,相对分子质量 < 1 000 的 COD 去除率达到 76.8%,这说明电离辐射对于废水中的有机物没有选择性,可生化性能较好的有机物也可以被辐射降解^[12].综上所述,电离辐射对于相对分子质量 > 3 000 有机物分子聚合作用大于降解作用,对于相对分子质量在1 000 ~ 3 000 以及1 000 以下的小分子有机物的降解作用更加明显.

2.2 混凝-辐照组合工艺对造纸废水 COD、BOD₅ 的影响

2.2.1 混凝的最佳条件

考虑实际条件,本研究做了最佳 pH 和最佳投药量的单因素实验.取 6 份 50 mL 的造纸废水于烧杯中,分别改变 pH 值和混凝剂的投加量,均搅拌 5 min,静置 30 min 后,取其上清液测定 COD,结果见表 2、表 3.

表 2 pH 对 COD 去除的影响

Table 2 Influence of pH on COD removal

项目	1	2	3	4	5	6
pH	6.0	6.5	6.9	7.5	8.0	8.5
处理后废水 COD/ mg·L ⁻¹	591.2	563.2	524.5	529.4	524.5	543.8

由表 2 可知,在投药量不变的情况下,随着 pH 的增大,COD 的去除率逐渐增大,在 pH 为 6.9 和 8.0 时达到最大去除率,考虑到经济性的影响,因此最佳 pH 值为 6.9.

表 3 混凝剂投加量对 COD 去除的影响

Table 3 Influence of coagulant dosage on COD removal

项目	1	2	3	4	5	6
PAC 投加量 /mg·L ⁻¹	150	200	250	300	350	400
处理后废水 COD/mg·L ⁻¹	556.5	552.4	535.1	521.5	525.6	551.5

由表 3 可知,在 pH 为 6.9 的条件下,随着投药量的增大,COD 的去除率逐渐增大,在 PAC 投加量为 300 mg/L 时 COD 的去除率最高,达到 27.7%,之后 COD 去除率逐渐降低.因此 PAC 最佳投药量为 300 mg/L.

2.2.2 混凝-辐照组合工艺对造纸废水 COD、BOD₅ 的影响

将混凝后的废水在不同剂量下进行电离辐射处理,辐照后的废水分别经过 0.45 μm、M_r = 3 000 和 M_r = 1 000 的超滤膜过滤后,废水的 COD、BOD₅ 变化情况如图 4、图 5.

对比图 2 和图 4 可知,混凝可以有效去除造纸废水中相对分子质量 > 3 000 的有机物,去除率达到 44.7%,这与混凝主要通过压缩双电层和矾花吸附的作用机制一致^[13].由图 4 可知,废水经过混凝预处理后,随着辐射剂量的增大,相对分子质量 > 3 000 的有机物 COD 先增加后降低,与图 2 出现的规律基本一致.但是,在图 4 和图 5 中发现相对分子质量 < 1 000 的 COD 和 BOD₅ 随着辐射剂量的增加持续增大,与图 2 出现的趋势相反.这很可能是因为废水经过混凝处理后相对分子质量 > 3 000 的有机物被有效去除,往往这部分有机物的可生化性很

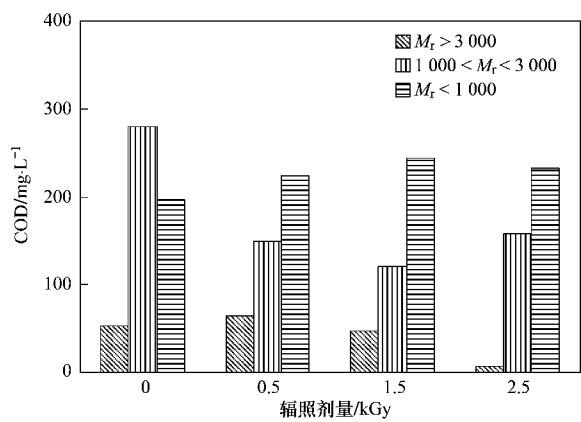


图 4 辐射剂量对混凝后废水 COD 的影响

Fig. 4 Influence of irradiation doses on COD of wastewater after coagulation

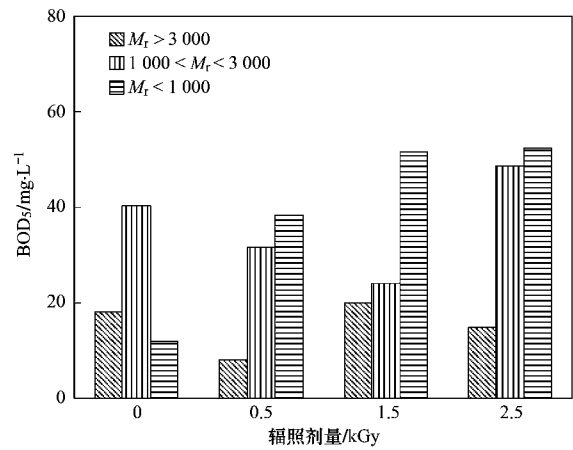


图 5 辐射剂量对混凝后废水 BOD₅ 的影响

Fig. 5 Influence of different irradiation doses on BOD₅ of wastewater after coagulation

差. 在相同的剂量下, 电离辐射可以使更多的相对分子质量1 000 ~ 3 000的有机物转化为1 000以下的有机物, 由于小分子物质更容易被生物降解, 所以这部分有机物的 COD 和 BOD₅ 浓度持续上升. Bijan 等^[14] 研究发现, 大分子量物质转化为小分子量物质是造纸废水可生化性提高的重要原因. 本次实验也证实, 混凝可以有效降低废水中相对分子质量 > 3 000的有机物, 从而提高了相对分子质量1 000 ~ 3 000以及1 000以下有机物的辐射降解效率, 混凝-辐照组合工艺更加有利于造纸废水的预处理.

2.3 混凝、辐照及其组合工艺对造纸废水吸光度的影响

混凝对造纸废水的吸光度有显著的降低(图6). 据研究, 相对分子质量 > 3 000的有机物是水中

紫外线吸收的主体, 而相对分子质量 < 500 的有机物紫外吸收很弱^[15]. 从前面的实验可知, 经过混凝处理可以有效去除废水中相对分子质量 > 3 000的有机物. 相比之下, 单独电离辐射对造纸废水的吸光度的变化影响很小, 甚至还略有上升, 这与 Shin 等^[16] 的研究结果基本一致. 这是因为, 电离辐射对造纸废水中的有机物可能同时具有降解和聚合作用. 相对分子质量 > 3 000的有机物分子聚合作用大于降解作用, 相对分子质量为1 000 ~ 3 000以及 < 1 000的小分子有机物的降解作用占据主要优势. 因此, 单独经过静态电离辐射处理也可能造成造纸废水的吸光度上升. 但是, 经过混凝处理后, 不同剂量的电离辐射使得造纸废水的吸光度进一步降低. 因此, 混凝-辐照组合工艺可以发挥各自工艺的优势, 具有很好的互补性.

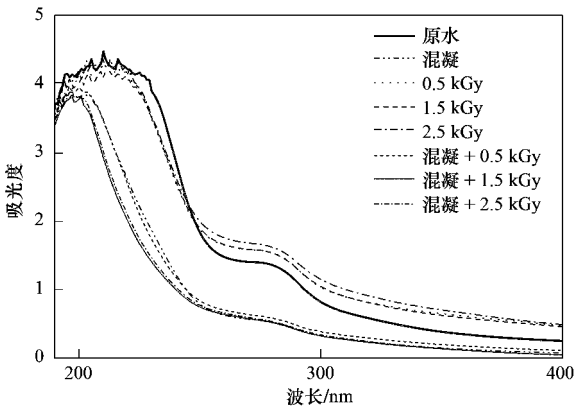


图 6 不同处理方法对废水吸光度的影响

Fig. 6 Influence of different treatment methods on the absorbance of wastewater

此外, 物质对光的吸收具有选择性, 其特征吸收波长与分子组成、结构有关. 常见的溶解性有机物, 特别是其中一大类芳香族有机物和带双键或羟基的共轭体系, 在紫外光区具有吸收, UV₂₅₄ 反映紫外光范围内容易被吸收的一些含共轭双键或苯环难生物降解的有机物^[17], 如木质素碎片、单宁、腐殖质及各种芳香族有机化合物在紫外区 254 nm 附近均有强烈吸收^[18]. 有的国家已将 UV₂₅₄ 列为水厂去除有机物效果的检测指标之一^[19]. 国内外大量的研究也表明^[20,21], 水中 UV₂₅₄ 值的大小与水中的 DOC、COD 等指标具有一定程度的相关性, 可间接反映水中有机物污染的程度. 测定各相对分子质量区间 UV₂₅₄, 可反映处理工艺对各相对分子质量区间难降解有机物的去除效果^[22]. 原水及不同处理方法处理之后的废水 UV₂₅₄ 见表 4.

表 4 原水及处理后的废水在不同相对分子质量区间的 UV₂₅₄

Table 4 UV₂₅₄ of raw water and treated wastewater in different molecular weight

不同处理方法	$M_r > 3\,000$	$1\,000 < M_r < 3\,000$	$M_r < 1\,000$
原水	0.608 5	0.528	0.104
混凝后	0.205 3	0.319 2	0.043 7
0.5 kGy	0.687 1	0.583 9	0.056 8
1.5 kGy	0.828 0	0.519 2	0.110 2
2.5 kGy	0.986 1	0.437 4	0.105 9
混凝+0.5 kGy	0.170 9	0.317 7	0.083 7
混凝+1.5 kGy	0.154 9	0.471 3	0.065 1
混凝+2.5 kGy	0.267 2	0.451 8	0.040 7

由表 4 可知,混凝对 UV₂₅₄ 具有较好的处理效果,尤其对相对分子质量 > 3 000 的 UV₂₅₄ 去除效果显著.但是,辐射并不能完全去除含共轭双键或苯环难生物降解的有机物,这是由于辐射降解过程中的中间产物大多仍然具有芳香化合物的结构特征^[23].通过以上对吸光度的分析说明,混凝和电离辐射对造纸废水中的有机物都有一定的去除作用.混凝可以沉降部分的大分子有机物,使得电离辐射后紫外吸收降低;电离辐射降低了小波长(<250 nm)范围内的吸收峰,即大分子有机物质浓度降低,而在大波长处吸收峰增高,说明该波长范围内物质浓度增大.根据前面的实验,可以推测出是大分子物质降解为小分子物质所致.

2.4 混凝、辐照及其组合工艺对废水 DOC 的影响

利用超滤膜截留法分析了废纸造纸废水的有机物相对分子质量分布,以及经过混凝、辐照、混凝-辐照联合处理后相对分子质量分布的变化,结果见表 5. 原水中相对分子质量 > 3 000 的有机物占 12.5%,相对分子质量在 1 000 ~ 3 000 的有机物占 56.9%,相对分子质量 < 1 000 的有机物约占 30.6%.经过混凝处理后,相对分子质量 > 3 000 的有机物减少到 5.2%,相对分子质量在 1 000 ~ 3 000 的有机物占 58.7%,相对分子质量 < 1 000 的有机物占 36.1%.将原水经过电离辐射之后,发现相对分子质量 > 3 000 的有机物略微增加,其他各相对分子质量段的有机物均减小,说明在大分子范围内以辐射聚合作用为主,在小分子范围内则以降解为主.而将混凝后的废水进行电离辐射,发现相对分子质量 1 000 ~ 3 000 的有机物明显减少,相对分子质量 < 1 000 的有机物增加显著,这是因为电离辐射产生的·OH、e_{aq}⁻、H₂O₂、·H 等活性自由基具有很高的氧化或还原能力,可以将大分子转化为小分子,甚至彻底矿化.

表 5 原水及不同方法处理后对废水 DOC 的影响/mg·L⁻¹

Table 5 Influence of raw water and treated with different methods of wastewater on DOC/mg·L⁻¹

不同处理方法	$M_r > 3\,000$	$1\,000 < M_r < 3\,000$	$M_r < 1\,000$
原水	21.7	98.7	53.2
混凝后	8.8	99.2	61.1
0.5 kGy	34.1	81.6	31.3
1.5 kGy	37.1	64.9	33.8
2.5 kGy	23.1	61.9	25.7
混凝+0.5 kGy	15.2	41.1	89.1
混凝+1.5 kGy	10.0	59.9	62.0
混凝+2.5 kGy	11.1	52.4	74.6

但是比较发现,不同的辐射剂量对造纸废水总体的 DOC 变化影响很小.这是因为单独的电离辐射处理只是将一些大分子有机物转化为小分子物质,或者将一些有毒有害或难降解有机物转化为低毒或易降解的有机物,提高废水的可生化降解性,而对指示矿化程度的 DOC 去除则较缓慢.因此,当造纸废水中污染物浓度较高时,要彻底降解电离辐射过程中形成的中间产物,需要结合混凝、生物处理等普遍使用的废水处理工艺^[24].

3 结论

- (1) 混凝和电离辐射对于造纸废水中的有机物都有一定的去除作用,但作用机制不同.混凝可以沉降废水中相对分子质量 > 3 000 的有机物,电离辐射对于废水中相对分子质量 > 3 000 的有机物以聚合作用为主,在小分子范围内则以降解为主.
- (2) 混凝对于造纸废水的吸光度、UV₂₅₄ 和 DOC 都具有较好的处理效果,尤其对相对分子质量 > 3 000 的有机物去除效果显著.另一方面,单独的电离辐射对造纸废水的吸光度、UV₂₅₄ 变化影响较小,DOC 略有降低.但是,电离辐射可以使造纸废水中的一些大分子有机物转化为小分子物质,这是造纸废水提高可生化性提高的重要原因.
- (3) 混凝后造纸废水中相对分子质量 > 3 000 的有机物被有效去除,在相同剂量下电离辐射可以提高相对分子质量 1 000 ~ 3 000 的有机物转化为相对分子质量 1 000 以下有机物的辐射降解效率.因此,混凝-电离辐射组合工艺完全可以发挥各自工艺的优势,具有很好的互补性.
- 参考文献:
- [1] 郭茂新.利用废纸造纸行业废水的处理技术[J].中国给水排水,2000,16(11):23-25.
- [2] 马晓鸥,刘艳飞,李绍全.废纸再生造纸废水的特性和处理工艺[J].工业水处理,1999,19(4):8-10.

- [3] Barrera-Diaz C, Urena-Nunez F, Campos E, *et al.* A combined electrochemical-irradiation treatment of highly colored and polluted industrial wastewater [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2003, **67**(5): 657-663.
- [4] Wang T Z, Waite T D, Kurucz C, *et al.* Oxidant reduction and biodegradability improvement of paper mill effluent by irradiation [J]. *Water Research*, 1994, **28**(1): 237-241.
- [5] Zhao J S, Ward O P, Lubicki P, *et al.* Process for degradation of nitrobenzene: combining electron beam irradiation with biotransformation[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2001, **73**(4): 306-312.
- [6] Han B, Ko J, Kim J, *et al.* Combined electron-beam and biological treatment of dyeing complex wastewater, Pilot plant experiments[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2002, **64**: 53-59.
- [7] 何仕均,李坤豪,谢雷,等. γ 辐射/生物处理工艺处理草浆中段废水的研究[J]. *中国给水排水*, 2009, **25**(7): 69-72.
- [8] 何仕均,谢雷,王建龙,等. 纳米 TiO_2 协同 γ 辐射处理造纸废水[J]. *清华大学学报*, 2008, **48**(12): 2100-2102.
- [9] Park N, Yoon Y, Moon S H, *et al.* Evaluation of the performance of tight-UF membranes with respect to NOM removal using effective MWC0, molecular weight, and apparent diffusivity of NOM[J]. *Desalination*, 2004, **164**(1): 53-62.
- [10] Pikaev A K. New data on electron-beam purification of wastewater[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2002, **65**(4-5): 515-526.
- [11] Getoff N. Radiation chemistry and the environment [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 1999, **54**(4): 377-384.
- [12] Bae B U, Jung E S, Kim Y R, *et al.* Treatment of landfill leachate using activated sludge process and electron beam radiation[J]. *Water Research*, 1999, **33**(11): 2669-2673.
- [13] 董秉直,李伟英,陈艳,等. 用有机物分子量变化评价不同处理方法去除有机物的效果[J]. *水处理技术*, 2003, **29**(3): 155-158.
- [14] Bijan L, Mohseni M. Integrated ozone and biotreatment of pulp mill effluent and changes in biodegradability and molecular weight distribution of organic compounds[J]. *Water Research*, 2005, **39**(16): 3763-3772.
- [15] 王占生,刘文君. 微污染源饮用水处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [16] Shin H S, Kim Y R, Han B S, *et al.* Application of electron beam to treatment of wastewater from papermill[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2002, **65**(4-5): 539-547.
- [17] 何品晶,付强,邵立明,等. 渗滤液与城市污水合并处理过程的有机物去除特征[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(7): 954-958.
- [18] 蒋绍阶,刘宗源. UV_{254} 作为水处理中有机物控制指标的意义[J]. *重庆建筑大学学报*, 2002, **24**(2): 61-65.
- [19] Eaton A D. Measuring UV-absorbing Organics: A Standard Method[J]. *Journal of the American Water Works Association*, 1995, **87**(2): 86-89.
- [20] Miano T M, Sposito G, Martin J P. Fluorescence spectroscopy of humic substances[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, **52**: 1016-1019.
- [21] 林星杰,杨慧芬,宋存义. UV_{254} 在水质监测中应用的研究[J]. *能源与环境*, 2006, **1**: 22-24.
- [22] 李爽,张晓健,范晓军,等. 水源水中不同分子量区间有机物的分布及控制对策[J]. *环境科学学报*, 2003, **23**(3): 327-331.
- [23] Zona R, Schimid S, Solar S. Detoxification of aqueous chlorophenol solutions by ionizing radiation[J]. *Water Research*, 1999, **33**(5): 1314-1319.
- [24] 薛军. 辐射分解处理氯酚类有机污染物的研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.