



# 高铁酸盐联用技术在水处理领域的应用及进展研究

郑林昊<sup>1</sup>, 蒋 晖<sup>1,2</sup>, 阙思思<sup>1</sup>, 胡运兵<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 煤炭科学研究总院重庆研究院, 重庆 400014)

**[摘要]** 解决水污染问题时,绿色水处理剂高铁酸盐受到广泛关注。为全面、系统地归纳高铁酸盐在水处理领域的应用现状及最新研究进展,采用知识图谱分析工具 VOSviewer 对中国知网(CNKI)数据库和 Web of Science (WOS)数据库的 1 377 篇文献进行了可视化分析。结果显示,国内外关于高铁酸盐的研究热点相似,现阶段的研究主要集中在有机物去除、消毒副产物及高铁酸盐的协同技术方面,高铁酸盐单独作为氧化剂、混凝剂和消毒剂对部分有机/无机污染物的去除效果不佳。近年来,基于高铁酸盐联用技术的研究受到重视。总结了国内外研究中高铁酸盐与光催化、铝盐、臭氧、次氯酸盐和(亚)硫酸盐联用等技术在处理污染水质中的应用情况。研究结果表明,联用技术对污染物的处理效果均显著增强,其原理为通过提升高铁酸盐的絮凝沉降能力、促进中间价态铁[Fe(V)和 Fe(IV)]的生成、产生强氧化性自由基( $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ )和延长氧化时间,增强对各类污染物的氧化及去除效果,为高铁酸盐联用技术在水处理领域的应用与发展提供思路和理论借鉴。

**[关键词]** 高铁酸盐;联用技术;水处理;污染控制

**[中图分类号]** X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)08-0017-10

## Research on the application and progress of ferrate combined technology in water treatment

ZHENG Linhao<sup>1</sup>, JIANG Hui<sup>1,2</sup>, QUE Sisi<sup>1</sup>, HU Yunbing<sup>2</sup>

(1. College of Hohai, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Chongqing Research Institute, China Coal Research Institute, Chongqing 400014, China)

**Abstract:** Ferrate, a green water treatment agent, has received much attention in solving water pollution problems. The knowledge map analysis tool VOSviewer was used to visually analyze 1 377 documents in CNKI database and Web of Science(WOS) database in order to comprehensively and systematically summarize the current status and latest research progress of ferrate application in water treatment field. The results showed that the research hotspots on ferrate were similar at home and abroad. The current stage of research mainly focused on organic matter removal, disinfection by-products and synergistic technology of ferrate. The effect of ferrate alone as oxidant, coagulant and disinfectant on the removal of some organic pollutants or inorganic pollutants was poor. In recent years, the research based on ferrate combined technology has received attention. The application of ferrate in combination with photocatalysis, aluminum salts, ozone, hypochlorite and sulfite/sulfate technologies in the treatment of polluted water at home and abroad was summarized. The results showed that the combined technologies had significantly enhanced the treatment effect of pollutants. The basic enhancing principle included increasing the flocculation and sedimentation ability of ferrate, promoting the formation of intermediate valence iron (Fe(V) and Fe(IV)), generating strong oxidizing radicals ( $\cdot\text{OH}$ ,  $\text{SO}_4^{\cdot-}$ ) and prolonging the oxidation time to enhance the oxidation and removal effect of various pollutants. It provided ideas and theoretical references for the application and development of ferrate combined technology in the field of water treatment.

**Key words:** ferrate; combined technology; water treatment; pollution control

**[基金项目]** 重庆市中小学创新人才培养工程项目计划研究项目(CY210704);重庆市 2021 年度城市管理科研科普项目(CGKZ2021-04)

随着世界经济的快速增长,工业污染的范围急剧扩大。稳定性较强的有机污染物为水处理技术带来难题。传统水处理剂因氧化能力不足或产生消毒副产物等原因,难以使难降解污染物达标排放。近年来高铁酸盐以强氧化性在水处理领域获得广泛关注。作为一种多功能绿色环保水处理剂,高铁酸盐能够去除广泛的有机/无机污染物,如乙醇、羧酸化合物、含氮有机物、亚硝胺、色氨酸、苯酚化合物和抗生素等有机物,以及氰化物、氨、硫酸氧等无机物<sup>[1]</sup>。此外,高铁酸盐还具有杀菌消毒作用。高价铁可还原为三价铁离子,吸附水中的各种阴阳离子,起到净水作用。

笔者借助知识图谱分析工具 VOSviewer 对中国知网(CNKI)数据库和 Web of Science(WOS)数据库的文献进行可视化分析,探讨高铁酸盐在水处理领域的研究热点及研究进展,着重讨论了高铁酸盐在技术联用中的应用,以期为推动高铁酸盐联用技术的发展提供一定参考。

## 1 研究现状及文献分析

结合 WOS 和 CNKI 数据库中的 1 377 篇文献,用 VOSviewer 对高铁酸盐进行系统全面的可视化分析,如图 1、图 2 所示,图中关键词节点的大小代表该关键词的热度高,不同节点颜色表示关键词出现的年份不同。

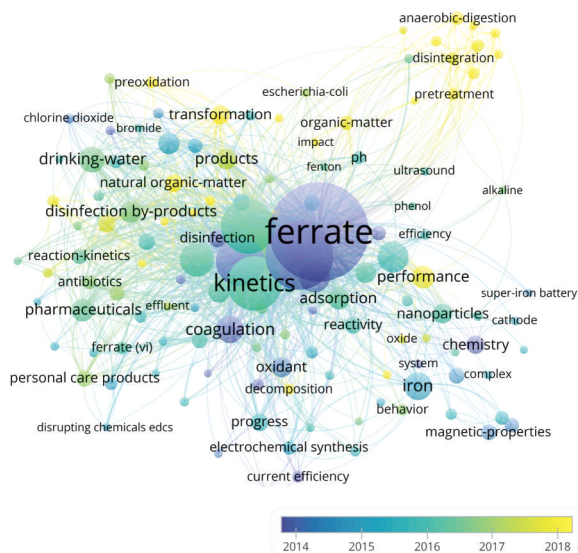


图 1 水处理领域中高铁酸盐研究文献关键词的共现网络图谱(基于 WOS 数据库)

Fig. 1 Co-occurrence network map of key words of ferrate in water treatment field based on WOS database

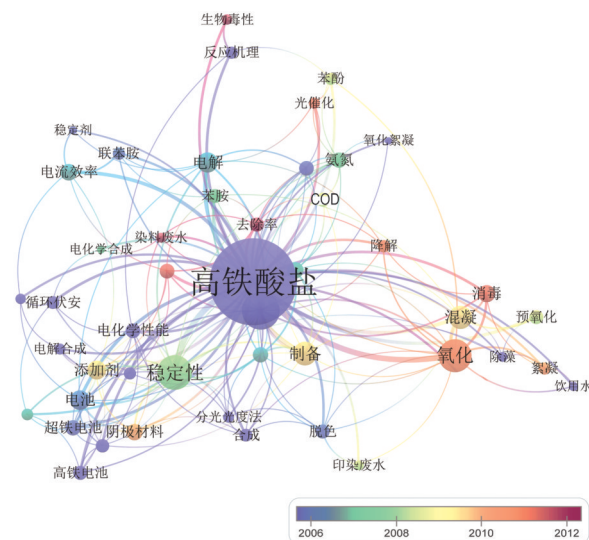


图 2 水处理领域中高铁酸盐研究文献关键词的共现网络图谱(基于 CNKI 数据库)

Fig.2 Co-existing network map of literature keywords of ferrate in water treatment field based on CNKI database

由图 1 可见,国外高铁酸盐相关研究的热点集中于氧化、去除、沉降和水处理等,这些关键词为高铁酸盐的性质及其在水处理中的应用。从时间顺序可知近期的热点为有机化合物、厌氧消化、预处理和毒性等,说明国外研究者目前聚焦于高铁酸盐对有机物的去除、降解和毒性控制等。

由图 2 看出,国内研究主要的关注点为高铁酸盐的稳定性、氧化、混凝和水处理剂等,与国外研究热点相似。最近的研究集中在稳定性、氧化、各有机物、协同作用、生物毒性和光催化等领域,由此可得出国内研究者处理水中有机污染物后关注消毒副产物的生成情况、生物毒性高低,以及高铁酸盐的协同作用。

文献作者地区分析如图 3 所示,可见我国在高铁酸盐方面的研究有所领先,其次为美国、加拿大、德国、韩国和捷克共和国。

## 2 高铁酸盐联用技术在水处理领域中的应用情况

高铁酸盐在碱性和酸性条件下的氧化还原电位分别为 0.72、2.20 V<sup>[2]</sup>,与传统氧化剂相比,氧化还原电位排序为  $K_2FeO_4$  (酸性)  $> O_3 > H_2O_2 > KMnO_4$  (酸性)  $> ClO_2 > HClO$ 。高铁酸盐在水处理领域主要通过其强氧化性解决有机污染问题。高铁酸盐对水中污染物的去除效果好,主要归因于高铁酸盐分解形成的中间价态产物  $Fe(V)/Fe(IV)$  具有更

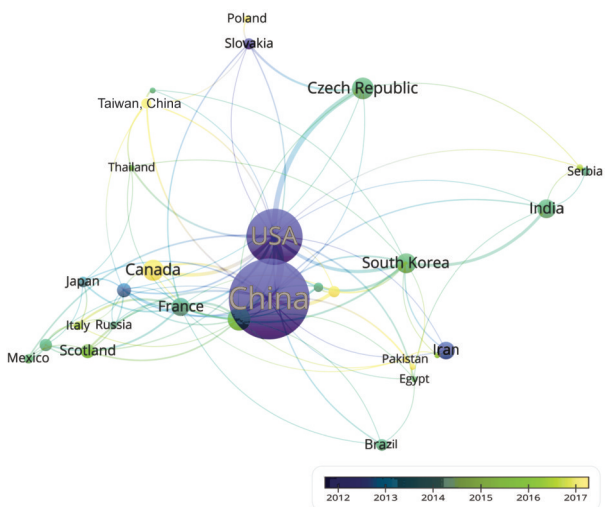


图3 基于WOS数据库的高铁酸盐研究文献作者归属网络图谱

Fig.3 The author attribution network map of ferrate research literature based on WOS database

强的氧化性和反应活性,约为2~6个数量级<sup>[3-4]</sup>。高铁酸盐主要通过电子转移亲电氧化夺氢攻击目标化合物(酚类、胺类、烯烃类等)的富电子部分<sup>[5]</sup>,且最终生成的Fe(OH)<sub>3</sub>絮凝沉淀,对去除污染物有一定程度的贡献<sup>[6]</sup>。高铁酸盐集多种功能(氧化、吸附、絮凝、沉淀、灭菌、消毒和脱色等)于一体<sup>[7]</sup>,通常无二次污染<sup>[8]</sup>,不生成三氯甲烷、氯酚等有害人体健康的消毒副产物,或与Fe(IV)氧化相关的有害副产物的浓度相对较低<sup>[9]</sup>。一般情况下,单独使用高铁酸盐去除某些有机物、重金属、微生物的效果低于高铁酸盐与其他物质联用的效果(见表1)。

从表1可见,在各物质浓度及pH相同的情况下,采用高铁酸盐联用技术可在较短时间或相同时间内达到更高的去除率,效果显著。

表1 高铁酸盐及联用技术对污染物的去除效果

| Table 1 Comparison of pollutant treatment of ferrate under combined and noncombined conditions |             |                  |          |                       |                              |          |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------------|----------|-----------------------|------------------------------|----------|------|
| pH                                                                                             | 高铁酸盐        | 污染物              | 反应时间/min | 单独使用高铁酸盐时<br>污染物去除率/% | 联用技术                         |          | 文献   |
|                                                                                                |             |                  |          |                       | 联用物质                         | 污染物去除率/% |      |
| 9                                                                                              | 31.7 mg/L   | 5 mg/L 邻苯二甲酸二甲酯  | 120      | 5                     | 40 mg/L TiO <sub>2</sub> -UV | 75       | [10] |
| 7                                                                                              | 3 mg/L      | 0.7 μg/L 铊       | 1        | 87                    | 2 mg/L PAC                   | 92       | [11] |
| 7                                                                                              | 0.51 μmol/L | 1.84 μmol/L 四溴双酚 | 10       | 52                    | 10.42 μmol/L 臭氧              | 91.3     | [12] |
| 5                                                                                              | 1.5 g/L     | 50 mg/L 苯酚       | 30       | 93                    | 1.5g/L NaClO                 | 98       | [13] |
| 7                                                                                              | 100 μmol/L  | 5 μmol/L 阿特拉津    | 0.17     | 4                     | 400 μmol/L 亚硫酸盐              | 95       | [14] |
| 8                                                                                              | 50 μmol/L   | 10 μmol/L 卡马西平   | 20       | 70                    | 10 mg/L 生物炭                  | 测限以下     | [15] |
| 9                                                                                              | 300 μmol/L  | 5.0 mg/L 草甘膦     | 60       | 28.94                 | 紫外光 UV                       | 82.05    | [16] |

基于高铁酸盐联用技术在水处理中的突出优势,有关联用技术的研究取得显著进展。这些研究大多集中于高铁酸盐联合光催化、臭氧、铝盐、硫酸盐和氯盐等高效处理各类污水,并对水资源短缺问题提供解决方案。

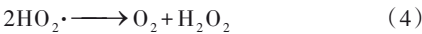
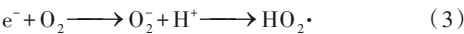
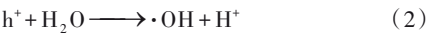
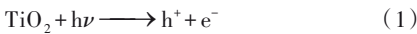
2.1 高铁酸盐-光催化联用

光催化过程会产生光生电子空穴对和含氧自由基,有效氧化水环境中的大部分有机污染物,还能间接去除污水中的CN<sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>等<sup>[17]</sup>。光催化技术以太阳光为光源,成本低且无二次污染。TiO<sub>2</sub>、ZnO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ZnS、CdS等半导体材料均可用作光催化剂,由于多数材料具有一定毒性,因此研究者普遍采用无毒的TiO<sub>2</sub>作为光催化剂。

有研究证明Fe(VI)的氧化能力低于中间态Fe(IV)/Fe(V)<sup>[18-19]</sup>。在紫外光的作用下TiO<sub>2</sub>价带上的电子跃迁到导带形成空穴电子对,而高价铁可

作为电子捕获剂阻止电子与空穴的复合,并由正六价还原到更具氧化性的正五价<sup>[20]</sup>。高铁酸盐结合光催化的技术原理主要是利用光能使Fe(VI)处于激发态的分子发生变化形成Fe(V),增强其氧化性。

高铁酸盐与TiO<sub>2</sub>光催化联用的反应过程主要包括:TiO<sub>2</sub>在一定波长光的照射下形成电子-空穴,如式(1)~式(6)所示;体系中的高铁酸盐被导带电子还原,生成氧化能力更强的中间价态铁氧化物;高铁酸盐吸收导带电子后,TiO<sub>2</sub>形成的空穴未与电子复合,与中间价态铁氧化物一起参与氧化过程。





单独使用  $\text{K}_2\text{FeO}_4$  或光催化对难降解污染物邻苯二甲酸二甲酯(DMP)的去除效果均低于  $\text{Fe}(\text{VI})-\text{TiO}_2$ -UV 体系对 DMP 的去除率<sup>[10]</sup>。Yan MA 等<sup>[21]</sup>以高铁酸钾为氧化剂、 $\text{TiO}_2$  为光催化剂,研究发现磺酰胺的降解速度加快,有无光照条件下的降解率分别为 89.2%、71.3%。栗杰文<sup>[22]</sup>采用高铁酸盐联用光催化工艺处理垃圾渗滤液,COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$  和总磷的去除率分别达到 55.3%、60.3%、100%。杜林<sup>[23]</sup>研究表明,投加 17.84 mmol/L 高铁酸盐、光照 1 h 对总磷的去除率可达 80%。Yiqun CHEN 等<sup>[24]</sup>对比了  $\text{Fe}(\text{VI})/\text{UV}$ 、 $\text{Fe}(\text{VI})/\text{TiO}_2/\text{UV}$ 、 $\text{Fe}(\text{III})/\text{UV}$ 、 $\text{TiO}_2/\text{UV}$  和 UV 体系对市政垃圾渗滤液的除磷效果,发现单独使用 0.16 mmol/L 高铁酸盐处理 500 mL 垃圾渗滤液(pH 为 5)时总磷去除率为 78%,而  $\text{Fe}(\text{VI})/\text{TiO}_2/\text{UV}$  体系的最有效总磷去除率几乎可达 100%。Xing HE 等<sup>[25]</sup>采用高铁酸盐联用  $\text{TiO}_2$  技术对水中的微囊藻毒素进行降解,高铁酸盐氧化用作预处理工艺时不仅能去除有机污染物,还可提高光催化效率。在  $\text{TiO}_2$  用量为 2 g/L、pH 为 3 的条件下,高铁酸盐最佳投加量为 20 mg/L;pH 对联用技术的处理效率有较大影响,pH 由 7 降至 3,微囊藻毒素的降解率增加。

高铁酸盐氧化去除污染物时产生的中间价态氧化性离子 [ $\text{Fe}(\text{V})$ 、 $\text{Fe}(\text{IV})$ 、 $\text{Fe}(\text{III})$ ] 在光催化条件下起到捕获电子的作用,减少电子与空穴的复合,提高了光催化反应效率,从而增强对污染物的氧化降解效果。高铁酸盐-光催化的氧化增强效果,受 pH<sup>[25]</sup>、污染物类型<sup>[10,21,23]</sup>、高铁酸盐纯度<sup>[23]</sup> 和体系内各物质浓度<sup>[22-24]</sup> 等的影响,但从不同污染物的去除效果来看,联用技术均可大幅提高去除率,说明高铁酸盐与光催化的联合体系较单一高铁酸盐体系的效果更好,有研究表明对某类污染物的去除率几乎可达 100%<sup>[24]</sup>。由此可见,高铁酸盐与光催化联用技术在提高污染物去除率方面效果显著,有较好的应用前景。

## 2.2 高铁酸盐与铝盐联用

吸附沉降是物理法去除污染物的手段之一,通过吸附剂的表面孔位吸附污染物达到去除目的。一些污染物(如有机磷化合物、有机砷化合物和一些重金属)难以直接去除,但它们的氧化产物易被凝结或吸附作用去除<sup>[26]</sup>。在水处理过程中,高铁酸盐生成

的三价铁沉淀物有吸附沉淀作用,可增加对污染物的去除效果,但需要外加物质进行辅助,而铝盐可起到增强混凝效果的作用。高铁酸盐与铝盐联用技术先利用高铁酸盐的强氧化性破坏水中难降解有机污染物的结构,再通过生成的  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  和铝盐的絮凝作用形成尺寸较大的絮凝体,增强絮凝效果。

胡淳良等<sup>[27]</sup>考察了高铁酸盐与硫酸铝对微污染原水的处理效果,结果显示,投加 2.5 mg/L 高铁酸盐、50 mg/L 硫酸铝时对水中  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{UV}_{254}$  的去除率分别为 40%、62%,而仅投加 2.5 mg/L 高铁酸盐时对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{UV}_{254}$  的去除率为 34%、50%;氨氮和浊度的去除效果均优于单独使用高铁酸盐或硫酸铝的去除效果。马军等<sup>[28]</sup>采用高铁酸钾复合硫酸铝对多种地表水进行处理,混凝效果得到强化。刘立明等<sup>[29]</sup>用高铁酸盐/聚合氯化铝(PAC)处理水中的铜绿微囊藻,在自然水体 pH 为 8、8 mg/L 高铁酸钾与 8 mg/L PAC 的联合作用下,铜绿微囊藻的叶绿素含量下降 59.3%;铜绿微囊藻毒素(MC-LR)在氧化作用下细胞被破坏;联合体系中混凝剂的用量有所减少,原因在于高铁酸盐使得藻类细胞膜破裂,流出的黏性物质有利于沉降絮体的形成,且水中颗粒的 Zeta 电位因高铁酸盐而降低,因此混凝剂用量减少。徐闻欣等<sup>[30]</sup>采用高铁酸盐(10.0~13.0 mg/L)和 PAC(13.0~15.0 mg/L)处理垃圾渗滤液,COD 去除率可达 74%,比仅用高铁酸盐时的去除率高出约 36%。Yulei LIU 等<sup>[11]</sup>采用 3 mg/L 高铁酸钾诱导预氧化,与 2 mg/L PAC 联合处理污染源水中的少量铊,92% 以上的铊被去除。M. AMANO 等<sup>[31]</sup>向未经过滤的天然水中同时添加高铁酸盐和 PAC,可有效去除  $\text{UVA}_{254}$ ,酸性条件下高铁酸盐预氧化后的 PAC 混凝作用可有效降低浊度和色度。

一般情况下,高铁酸盐还原形成的颗粒很小(平均尺寸 <100 nm),很难沉淀或过滤,而高铁酸盐与聚合氯化铝结合使用时,聚合氯化铝的絮凝物可捕获细小的氧化铁颗粒<sup>[11]</sup>。高铁酸盐的投加量需控制在适宜范围内,投加量过大时会增加水的浊度,其原因在于高铁酸盐的氧化作用使胶体粒径产生改变<sup>[27]</sup>。研究表明,与单独投加高铁酸盐相比,高铁酸盐与 PAC 联合可更好地去除水中的氨氮、COD、细菌、浊度、藻细胞等,且达到同样处理效果所需的药剂量少<sup>[32]</sup>。

### 2.3 高铁酸盐与臭氧联用

臭氧可与水中的溴化物反应形成具有强致癌性的溴酸盐,而高铁酸盐能避免氯化化和臭氧化过程中生成氯化二溴苯酚和溴酸盐,从而备受关注<sup>[33]</sup>。YanJun JIANG等<sup>[34]</sup>对比了臭氧和高铁酸盐对氯化化和氯胺化后产生的消毒副产物(DBPs)的影响:对于同等剂量的高铁酸盐和臭氧,高铁酸盐减少DBPs的潜力更大,说明高铁酸盐作为绿色水处理剂具有显著优势。作为最高价态的铁系物,高铁酸盐在水溶液中的还原产物为水合铁离子、水合铁氧化物和羟基氧化铁等,均对臭氧有催化作用,可生成具有强氧化性的羟基自由基,起到联合氧化作用,提升污染物的去除率<sup>[4]</sup>。

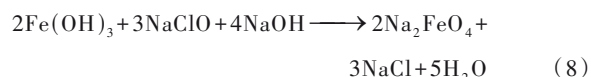
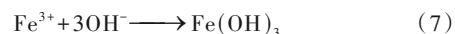
臭氧化具有选择性,对苯酚中间产物的降解效果差。高铁酸盐的中间产物可诱导臭氧产生羟基自由基,借助超重力旋转床的旋转条件使得苯酚降解率达到99.35%<sup>[35]</sup>。高铁酸盐和臭氧的投加量分别为5.0、1.20 mg/L时,高铁酸盐对双酚A的降解能力更强,去除率可达91.6%,而臭氧的去除率仅为80.9%<sup>[36]</sup>。Han QI等<sup>[12]</sup>研究发现高铁酸盐-臭氧组合工艺对四溴双酚A的降解和矿化有协同作用。经高铁酸盐预氧化3 min后,高铁酸盐-臭氧组合工艺的脱溴率和矿化率分别达到91.3%、80.5%,无形成溴酸盐副产物的风险<sup>[37]</sup>。Jing LIU等<sup>[38]</sup>报道了高铁酸盐预处理与原位臭氧氧化/陶瓷膜过滤相结合的处理方法,极大抑制了N-二甲基亚硝胺(NDMA)的生成,且不产生溴酸盐,同时对低分子质量有机物、腐殖质和生物聚合物的去除效果好。经臭氧(10 mg/L)和高铁酸盐(0.15 mmol/L)联合预处理后,再生水中的DOC、UV<sub>254</sub>、蛋白质、多聚糖的去除率最高分别为70.5%、80.5%、25.6%、65.5%<sup>[39]</sup>。机理分析表明,高铁酸盐-臭氧组合工艺的协同效应可能是氧化作用的叠加。

高铁酸盐与臭氧联用不改变主要的臭氧氧化工艺,可在低剂量下提高对污染物的降解率<sup>[12]</sup>,从而提高氧化效率,降低成本。此外,高铁酸盐的还原产物[Fe(Ⅱ)、Fe(Ⅲ)和羟基氧化铁等]对臭氧有催化作用,在生成羟基自由基方面相互协同<sup>[39]</sup>。反应体系内的O<sub>2</sub><sup>·-</sup>可将Fe(Ⅱ)、Fe(Ⅲ)氧化为氧化能力更强的Fe(V),提高体系的氧化能力。综上,高铁酸盐与臭氧联用可弥补选择性氧化的不足,增强去除

污染物的效果,因此在水处理领域应用广泛,具有较好的应用前景。

### 2.4 高铁酸盐与次氯酸盐联用

次氯酸盐氧化法被认为是制备高铁酸盐最好的方法<sup>[40]</sup>,如式(7)~式(8)所示,且改进方法的反应速率明显加快、产率提高,产品浓度较高<sup>[41]</sup>。同时,有研究表明在高铁酸盐的制备与存放过程中,ClO<sup>-</sup>既可作为氧化剂,又可作为稳定剂<sup>[42]</sup>。二者联用可增强对污染物的去除效果。



许仕荣等<sup>[43]</sup>对比了高铁酸钾、次氯酸钠单独使用及两者联用对污水的处理效果:高铁酸钾与次氯酸钠联用时对锰、氨氮的去除率达到98.0%、45.5%,较单独使用时的去除率提高约6%、28%,出水中的锰<0.1 mg/L、氨氮<0.5 mg/L。周建红等<sup>[13]</sup>考察了高铁酸钾、次氯酸钠联用对苯酚废水的处理情况,发现二者存在明显的协同作用,苯酚、COD去除率分别高达98%、68%;与单独使用高铁酸钾相比,苯酚和COD的去除率分别增加约5%、25%,其降解过程遵循一级反应动力学模型。周俊等<sup>[44]</sup>采用高铁酸钾和次氯酸钠降解聚乙烯醇,在最佳投加量下降解50 min,聚乙烯醇去除率>98%,COD去除率>40%,经检测聚乙烯醇断链形成小分子物质,最终的降解产物主要为羧基化合物。Guoting LI等<sup>[33]</sup>考察了高锰酸钾、高铁酸钾和高铁酸盐-次氯酸盐体系对偶氮染料橙Ⅱ的脱色作用,结果表明反应时间为30 min时,高锰酸钾、高铁酸钾、高铁酸盐-次氯酸盐混合液对染料的脱色率分别为17.7%、62.0%、95.2%,脱色率大幅提升。

次氯酸盐的加入能够增加高铁酸钾在酸性条件下的稳定性,且ClO<sup>-</sup>浓度越高,FeO<sub>4</sub><sup>2-</sup>溶液就越稳定。而污染物被高铁酸盐氧化后产生的一些难降解中间产物<sup>[13]</sup>会在次氯酸钠的作用下进一步分解,使得污染物降解程度提升,废水COD去除率显著增加。

### 2.5 高铁酸盐与(亚)硫酸盐联用

基于硫酸根自由基(SO<sub>4</sub><sup>·-</sup>)的高级氧化工艺被广泛用于修复地下水和降解废水中的有机物<sup>[45]</sup>。其中过硫酸盐、过硫酸氢盐和亚硫酸盐可生成SO<sub>4</sub><sup>·-</sup>。而高铁酸盐通过电子转移攻击亚硫酸根,可形成亚

硫酸盐自由基( $\text{SO}_3^{\cdot-}$ )和 $\text{Fe(V)}$ <sup>[46]</sup>,  $\text{SO}_3^{\cdot-}$ 与氧快速反应形成活性更高的 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ ,  $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 进一步与 $\text{OH}^-$ 反应生成 $\cdot\text{OH}$ 。高铁酸盐与(亚)硫酸盐联用可选择性去除有机污染物。

苗宗成等<sup>[47]</sup>采用高铁酸钾联合聚合硫酸铁对制革废水进行处理,在高铁酸钾投加量为15 mg/L、聚合硫酸铁投加量为50 mg/L的条件下,对废水中的COD去除率为96.12%、硫化物去除率为94.25%、 $\text{Cr}^{3+}$ 去除率为95.15%、浊度去除率为99.15%、色度去除率为92.36%。Huanzhou ZHANG等<sup>[48]</sup>的研究表明,向硫酸铁中添加少量高铁酸钾可显著提高除磷率( $\geq 60\%$ ),出水符合城市污水排放标准的A标准要求。

含氯农药用于防治植物病和虫害问题,但其药性消散缓慢,对人体神经损伤严重。以应用最广的滴滴涕(DDTs)和六六六(HCHs)<sup>[49]</sup>为例,在最佳投加量的高铁酸盐(5 g/L)与过硫酸钠(1 g/L)联合作用下降解率分别约为97%及75%。Jing ZHANG等<sup>[46]</sup>在高铁酸盐中加入亚硫酸盐,考察其对苯并三唑、苯酚、环丙沙星、甲基蓝、罗丹明B、甲基橙和磺胺甲噁唑的去除效果,结果表明,pH为9.0、反应30 s时几乎完全去除上述污染物,而单独使用高铁酸盐时的去除率 $< 6\%$ 。袁光明等<sup>[14]</sup>的研究表明,高铁酸盐-亚硫酸盐体系可在短时间内去除95%的阿特拉津(ATZ)。氯霉素(CAP)在水中非常稳定,很难处理,而高铁酸盐-硫代硫酸盐体系可在120 min内降解69%的CAP,降解率较单一高铁酸盐体系的提升37%<sup>[50]</sup>。Yating ZHU等<sup>[51]</sup>报道了pH为7.0~9.0条件下 $\text{Fe(VI)}-\text{CaSO}_3$ 工艺对四溴双酚A(TBBPA)的降解效果;毒性风险分析结果表明,pH为8.0时, $\text{Fe(VI)}-\text{CaSO}_3$ 预氧化TBBPA可降低合成水及天然水中二溴苯酚的毒性风险。Mingbao FENG等<sup>[52]</sup>研究了 $\text{Fe(VI)}-\text{S(IV)}$ 体系对顽固抗生素甲氧苄啶(TMP)和氟甲喹(FLU)的去除效果,该体系可在15 s内实现抗生素的瞬时氧化,较单独使用 $\text{Fe(VI)}$ 所需时间短得多。此外,当去除率相同时, $\text{Fe(VI)}-\text{S(IV)}$ 体系的 $\text{Fe(VI)}$ 用量要低于 $\text{Fe(VI)}$ 单独使用时的剂量;pH为7.0、9.0、11.0时, $\text{S(IV)}$ 与 $\text{Fe(VI)}$ 的最佳物质的量比为0.5、1.5、2.0。

有研究报道 $\text{SO}_3^{2-}/\text{Fe(VI)}$ 体系能高效降解各类污染物,如抗生素、药物和农药等<sup>[14, 46, 50]</sup>,自由基猝灭实

验结果表明主要起氧化作用的是 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 。但高铁酸盐和亚硫酸盐浓度过高时,参与降解的活性自由基浓度反而降低,原因可能在于高浓度的 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 会发生自身猝灭而被大量消耗<sup>[14]</sup>。改变亚硫酸盐的投加方式可有效避免 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 猝灭消耗,大大提高对目标污染物的去除率,为高铁酸盐-亚硫酸盐体系的优化提供一定思路。Binbin SHAO等<sup>[53]</sup>研究认为高铁酸盐-亚硫酸盐的物质的量比会影响活性氧化剂:处理恩诺沙星(ENR)和苯酚时, $n(\text{SO}_3^{2-}):n[\text{Fe(VI)}]$ 为0.1~0.3时,主要活性氧化剂为 $\text{Fe(VI)}$ , $n(\text{SO}_3^{2-}):n[\text{Fe(VI)}]>0.4$ 时,两者的贡献程度取决于污染物的性质。

## 2.6 高铁酸盐与其他物质联用

除上述联用技术外,高铁酸盐与其他物质联用技术也在水处理领域有所应用。高铁酸盐的氧化作用结合粉末活性炭<sup>[54]</sup>、蒙脱石<sup>[55]</sup>的吸附作用可去除69.55%的苯酚,对抗生素磺胺嘧啶(SDZ)的降解率达到76.2%,表明该联用技术具有氧化/吸附协同效应。高铁酸盐与辐射技术结合可促进卡马西平的降解与矿化<sup>[56]</sup>,其中总有机碳去除率提高可能是由于辐射结束时pH降低,导致高铁酸盐氧化能力增强,以及辐射过程的中间产物被高铁酸盐进一步氧化。沈希裴等<sup>[57]</sup>采用高铁酸盐与 $\text{H}_2\text{O}_2$ 处理酸性红B废水,色度去除率可达99%以上,COD去除率在75%左右,可能是高铁酸钾的还原产物、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 形成的Fenton试剂及铁离子的絮凝综合作用。Xun'an NING等<sup>[58]</sup>联用高铁酸盐与超声波对纺织印染污泥进行处理,污泥表面变得不规则且疏松,带有大量通道或空隙,提高了污泥的溶解度。

高铁酸盐联用技术优势突出,在水处理领域中得到应用,但仍具有一定局限性,如高铁酸盐剂量须严格控制,否则会导致微生物细胞裂解、毒素释放<sup>[59]</sup>。

## 3 结论与展望

随着水处理技术的发展,高铁酸盐作为绿色水处理剂迅速发展,但对某些污染物的去除效果不佳,采用高铁酸盐联用技术可有效弥补不足。将高铁酸盐与光催化技术、铝盐、臭氧、次氯酸盐和(亚)硫酸盐进行联用,能克服高铁酸盐在水中稳定性差和氧化选择性的缺点,通过提升絮凝效果和氧化性、生成氧化性强的自由基、延长氧化时间等,增强了对污染物的氧化和去除效果;对于单独使用高铁酸盐时处理效果不佳的污染

物,采用联用技术可显著提高对此类污染物的去除率。此外,高铁酸盐与活性炭、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、辐射、超声波等技术的联用也表现出较好的效果,作用机理主要为氧化/吸附协同效应、氧化能力增强、Fenton反应、絮凝及污染物中间产物进一步被氧化。

现阶段高铁酸盐联用的研究多处于实验室阶段,未广泛用于实际水体。原因在于实际水体中污染物成分复杂,各技术的最佳处理条件不同,导致污染物去除不完全。今后的研究方向可从以下方面展开:

(1)高铁酸盐和中间价态铁离子的氧化能力强,但自分解速率较快,影响了处理效果,实际使用率低。探索高铁酸盐的最优制备方法,寻求最佳储存和使用条件,使高铁酸盐在大量生产的同时保持主要性质不变,为处理原位水体提供保障。

(2)继续发展高铁酸盐联用技术,针对含不同污染物的污水,探索更多组合工艺及工艺条件,在达到最佳处理效果的同时减少水处理成本。

(3)现阶段关于高铁酸盐与污染物的反应动力学的研究多集中在碱性条件,建议进一步研究高铁酸盐与污染物的反应动力学和反应机理,为新兴污染物的控制提供思路。

#### 参考文献

- [1] 阙乙森,蒋晖.绿色水处理剂高铁酸盐在水处理领域中的应用进展[J].安全与环境工程,2021,28(1):209-218.  
KAN Yisen, JIANG Hui. Advances in the application of green water treatment agent-ferrate in water treatment[J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(1): 209-218.
- [2] JIANG J Q. Research progress in the use of ferrate(VI) for the environmental remediation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 146(3): 617-623.
- [3] SHARMA V K. Ferrate(V) oxidation of pollutants: A premix pulse radiolysis study[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2002, 65(4/5): 349-355.
- [4] ZHANG Tao, LU Jinfeng, MA Jun, et al. Comparative study of ozonation and synthetic goethite-catalyzed ozonation of individual NOM fractions isolated and fractionated from a filtered river water[J]. Water Research, 2008, 42(6/7): 1563-1570.
- [5] SHARMA V K, ZBORIL R, VARMA R S. Ferrates: greener oxidants with multimodal action in water treatment technologies[J]. Accounts of Chemical Research, 2015, 48(2): 182-191.
- [6] LUO Cong, FENG Mingbao, SHARMA V K, et al. Oxidation of pharmaceuticals by ferrate(VI) in hydrolyzed urine: Effects of major inorganic constituents[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(9): 5272-5281.
- [7] 王楠楠,王洪波,王宁.高铁酸盐在工业废水中的应用[J].应用化工,2019,48(11):2724-2728,2738.  
WANG Nannan, WANG Hongbo, WANG Ning. Application of ferrate in industrial wastewater[J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(11): 2724-2728, 2738.
- [8] VON G U. Oxidation processes in water treatment: Are we on track? [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(9): 5062-5075.
- [9] JIANG Wenjun, CHEN Long, BATCHU S R, et al. Oxidation of microcystin-LR by ferrate(VI): Kinetics, degradation pathways, and toxicity assessments[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(20): 12164-12172.
- [10] 朱丽婷,张运浩,陈舒展,等.  $\text{K}_2\text{FeO}_4$  协同  $\text{TiO}_2$  光催化降解水中邻苯二甲酸二甲酯[J]. 环境工程学报, 2019, 13(10): 2369-2376.  
ZHU Liting, ZHANG Yunhao, CHEN Shuzhan, et al. Dimethyl phthalate degradation by  $\text{TiO}_2$ -UV photo-catalysis process combined with  $\text{K}_2\text{FeO}_4$  [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(10): 2369-2376.
- [11] LIU Yulei, ZHANG Jing, HUANG Haiming, et al. Treatment of trace thallium in contaminated source waters by ferrate pre-oxidation and poly aluminium chloride coagulation[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 227: 115663.
- [12] HAN Qi, WANG Hongjie, DONG Wenyi, et al. Formation and inhibition of bromate during ferrate(VI)-ozone oxidation process [J]. Separation and Purification Technology, 2013, 118: 653-658.
- [13] 周建红,李军,令玉林,等.高铁酸钾和次氯酸钠联用处理苯酚废水研究[J].工业水处理,2013,33(10):27-29.  
ZHOU Jianhong, LI Jun, LING Yulin, et al. Study on the treatment of phenol wastewater by using potassium ferrate combined with sodium hypochlorite[J]. Industrial Water Treatment, 2013, 33(10): 27-29.
- [14] 袁光明,皮若冰,吴钊成,等.高铁酸盐-亚硫酸盐体系氧化降解水中污染物阿特拉津[J].化工进展,2020,39(9):3794-3800.  
YUAN Guangming, PI Ruobing, WU Zhaocheng, et al. Oxidative degradation of atrazine in water by ferrate-sulfite system [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(9): 3794-3800.
- [15] TIAN Shi-Qi, WANG Lu, LIU Yulei, et al. Degradation of organic pollutants by ferrate/biochar: Enhanced formation of strong intermediate oxidative iron species [J]. Water Research, 2020, 183: 116054.
- [16] 陈国猛.紫外/高铁酸盐处理有机磷农药废水的实验研究[D].武汉:华中科技大学,2012.  
CHEN Guomeng. Study on the treatment of organophosphorus pesticide wastewater by UV/ferrate[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.

- [17] 蒋梦婷, 张贝妮, 何刘洁, 等. 改性  $\text{TiO}_2$  对高盐染料废水的光催化降解研究进展[J]. 广州化工, 2021, 49(1): 7-9.
- JIANG Mengting, ZHANG Beini, HE Liujie, et al. Research progress on photocatalytic degradation of high-salt dye wastewater by modified  $\text{TiO}_2$  [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2021, 49(1): 7-9.
- [18] ZHANG Xianbing, FENG Mingbao, LUO Cong, et al. Effect of metal ions on oxidation of micropollutants by ferrate(VI): Enhancing role of Fe(IV) species[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(1): 623-633.
- [19] 邵彬彬, 乔俊莲, 赵志伟, 等. 基于高铁酸盐的水污染控制技术研究进展[J]. 科学通报, 2019, 64(33): 3401-3411.
- SHAO Binbin, QIAO Junlian, ZHAO Zhiwei, et al. Advances in contaminants abatement by ferrate(VI) [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(33): 3401-3411.
- [20] 李华北. 高铁与纳米二氧化钛光催化协同氧化作用的研究[J]. 甘肃科技, 2009, 25(6): 39-41.
- LI Huabei. Study on the synergistic photocatalytic oxidation of ferrate and nano- $\text{TiO}_2$  [J]. Gansu Science and Technology, 2009, 25(6): 39-41.
- [21] MA Yan, ZHANG Kejia, LI Cong, et al. Oxidation of sulfonamides in aqueous solution by UV- $\text{TiO}_2$ -Fe(VI) [J]. BioMed Research International, 2015, 2015: 973942.
- [22] 栗杰文. 高铁酸盐预氧化结合光催化降解垃圾渗滤液研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- SU Jiewen. Treatment of municipal landfill leachate by photochemical oxidation combined with ferrate pre-treatment [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [23] 杜林. 高铁酸盐预氧化结合光催化处理含有机磷废水[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- DU Lin. Treatment of organic phosphorus wastewater by photochemical oxidation combined with ferrate pre-treatment [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [24] CHEN Yiqun, XIAO Mengying, WANG Zongping, et al. Oxidation of amitriptyline and nortriptyline by ferrate(VI): Efficiency and reaction pathways[J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(27): 12882-12890.
- [25] XING He, YUAN Baoling, WANG Yizhong, et al. Photocatalytic detoxification of microcystins combined with ferrate pretreatment[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2002, 37(4): 641-649.
- [26] SHAO Binbin, DONG Hongyu, SUN Bo, et al. Role of ferrate(IV) and ferrate(V) in activating ferrate(VI) by calcium sulfite for enhanced oxidation of organic contaminants[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(2): 894-902.
- [27] 胡淳良, 张硕, 王国华, 等. 高铁酸盐预氧化强化混凝技术处理微污染原水[J]. 中国给水排水, 2011, 27(17): 85-87.
- HU Chunliang, ZHANG Shuo, WANG Guohua, et al. Pre-oxidation and enhanced coagulation with ferrate for treatment of micro-polluted raw water[J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(17): 85-87.
- [28] 马军, 刘伟, 李圭白. 高铁酸盐复合药剂强化混凝处理低温低浊水的试验研究[J]. 给水排水, 1997, 23(11): 9-11.
- MA Jun, LIU Wei, LI Guibai. Enhanced coagulation of low temperature and low turbidity water by ferrate composite chemicals[J]. Water & Wastewater Engineering, 1997, 23(11): 9-11.
- [29] 刘立明, 李丽萍, 黄应平. 高铁酸钾/PAC氧化-混凝去除水体中铜绿微囊藻[J]. 生态科学, 2013, 32(6): 686-691.
- LIU Liming, LI Liping, HUANG Yingping. Study on removal of *Microcystis aeruginosa* by potassium ferrate/polyaluminum chloride oxidation-flocculation [J]. Ecological Science, 2013, 32(6): 686-691.
- [30] 徐闻欣, 余洋, 沈尚荣, 等. 垃圾渗滤液浓缩液高铁酸钾联合PAC处理技术研究[J]. 环境科学学报, 2019, 39(10): 3442-3448.
- XU Wenxin, YU Yang, SHEN Shangrong, et al. Treatment of landfill leachate concentrate by potassium ferrate combined with PAC [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(10): 3442-3448.
- [31] AMANO M, LOHWACHARIN J, DUBECHOT A, et al. Performance of integrated ferrate-polyaluminum chloride coagulation as a treatment technology for removing freshwater humic substances[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 212: 323-331.
- [32] 张洁, 邱慧琴, 喻艳菁, 等. 稳定性复合高铁酸盐的制备及其在水质净化中的应用[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(7): 34-38.
- ZHANG Jie, QIU Huiqin, YU Yanjing, et al. Preparation of stable composite ferrate and its application in water purification [J]. Environmental Pollution & Control, 2009, 31(7): 34-38.
- [33] LI Guoting, WANG Ninggai, LIU Bingtao, et al. Decolorization of azo dye Orange II by ferrate(VI)-hypochlorite liquid mixture, potassium ferrate(VI) and potassium permanganate [J]. Desalination, 2009, 249(3): 936-941.
- [34] JIANG Yanjun, GOODWILL J E, TOBIASON J E, et al. Comparison of ferrate and ozone pre-oxidation on disinfection byproduct formation from chlorination and chloramination [J]. Water Research, 2019, 156: 110-124.
- [35] 冯杰. 超重力强化高铁酸盐与臭氧协同处理有机废水[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
- FENG Jie. Treatment of organic wastewater by Fe(VI) and ozone with the process intensified by high gravity technology [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [36] 韩琦, 王宏杰, 董文艺, 等. 高铁酸盐和臭氧氧化法降解水中双酚A的研究[J]. 工业用水与废水, 2014, 45(5): 14-18.
- HAN Qi, WANG Hongjie, DONG Wenyi, et al. Degradation of bisphenol A in water through oxidation by ferrate and ozone [J]. Industrial Water & Wastewater, 2014, 45(5): 14-18.
- [37] HAN Qi, DONG Wenyi, WANG Hongjie, et al. Degradation of tetrabromobisphenol A by a ferrate(VI)-ozone combination process: Advantages, optimization, and mechanistic analysis [J]. RSC Ad-

- vances, 2019, 9(71): 41783-41793.
- [38] LIU Jing, HE Keyou, ZHANG Jiaxing, et al. Coupling ferrate pretreatment and in situ ozonation/ceramic membrane filtration for wastewater reclamation: Water quality and membrane fouling[J]. Journal of Membrane Science, 2019, 590: 117310.
- [39] LIU Jing, ZHANG Zhenghua, CHEN Qianhua, et al. Synergistic effect of ferrate (VI)-ozone integrated pretreatment on the improvement of water quality and fouling alleviation of ceramic UF membrane in reclaimed water treatment[J]. Journal of Membrane Science, 2018, 567: 216-227.
- [40] SCHREYER J M, OCKERMAN L T. Stability of ferrate (VI) ion in aqueous solution[J]. Analytical Chemistry, 1951, 23(9): 1312-1314.
- [41] 陈西良, 李党生, 陈欣. 微波辐照辅助次氯酸盐氧化法制备高铁酸盐溶液[J]. 广东化工, 2014, 41(17): 73-74.
- CHEN Xiliang, LI Dangsheng, CHEN Xin. Preparation of ferrate solutions by microwave-irradiation assisted hypochlorite-oxidation method[J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, 41(17): 73-74.
- [42] 贾汉东, 鲍改玲, 孙红宾, 等. 次氯酸根对高铁酸盐溶液的稳定作用[J]. 无机盐工业, 2002, 34(5): 4-5, 23.
- JIA Handong, BAO Gailing, SUN Hongbin, et al. Stabilizing action of hypochlorite on ferrate solution[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2002, 34(5): 4-5.
- [43] 许仕荣, 吴小芳, 黄茂林, 等. NaClO 联用  $K_2FeO_4$  预氧化强化混凝去除锰及氨氮的研究[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(4): 1341-1348.
- XU Shirong, WU Xiaofang, HUANG Maolin, et al. An approach to the manganese and ammonia-nitrogen removal via the enhanced coagulation by NaClO and  $K_2FeO_4$  pre-oxidation[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(4): 1341-1348.
- [44] 周俊, 于少明, 王华林, 等. 高铁酸钾与次氯酸钠联合氧化降解聚乙烯醇的研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2010, 33(2): 297-300.
- ZHOU Jun, YU Shaoming, WANG Hualin, et al. Study on united oxidative degradation of polyvinyl alcohol by potassium ferrate and sodium hypochlorite[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2010, 33(2): 297-300.
- [45] OH W D, DONG Zhili, LIM T T. Generation of sulfate radical through heterogeneous catalysis for organic contaminants removal: Current development, challenges and prospects[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2016, 194: 169-201.
- [46] ZHANG Jing, ZHU Liang, SHI Zhenyu, et al. Rapid removal of organic pollutants by activation sulfite with ferrate [J]. Chemosphere, 2017, 186: 576-579.
- [47] 苗宗成, 王蕾, 霍小平, 等. 高铁酸钾/聚合硫酸铁在制革废水处理中的应用[J]. 工业水处理, 2013, 33(2): 45-47.
- MIAO Zongcheng, WANG Lei, HUO Xiaoping, et al. Application of the simultaneously used potassium ferrate-polyferric sulfate to the treatment of integrated tanning wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2013, 33(2): 45-47.
- [48] ZHANG Huanzhou, ZHANG Lei, CUI Jianguo. Study on potassium ferrate and ferric sulfate combined with enhanced phosphorus removal[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 295/296/297/298: 1200-1203.
- [49] 周杰, 王城晨, 朱颖一, 等. 高铁酸盐与过硫酸钠联合降解水中滴滴涕和六六六[J]. 环境工程学报, 2019, 13(10): 2414-2425.
- ZHOU Jie, WANG Chengchen, ZHU Yingyi, et al. Degradation of DDTs and HCHs in aqueous solution by combined  $K_2FeO_4$  and  $Na_2S_2O_8$ [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(10): 2414-2425.
- [50] ZHANG Zhuang, LI Xin, ZHANG Chang, et al. Combining ferrate(VI) with thiosulfate to oxidize chloramphenicol: Influencing factors and degradation mechanism [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(1): 104625.
- [51] ZHU Yating, NIE Jianxin, YANG Xin, et al. Degradation of tetrabromobisphenol A by ferrate(VI)- $CaSO_3$  process: Kinetics, products, and impacts on following disinfection by-products formation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 412: 125297.
- [52] FENG Mingbao, SHARMA V K. Enhanced oxidation of antibiotics by ferrate (VI)-sulfur (IV) system: Elucidating multi-oxidant mechanism[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 341: 137-145.
- [53] SHAO Binbin, DONG Hongyu, FENG Liying, et al. Influence of [sulfite]/[Fe(VI)] molar ratio on the active oxidants generation in Fe(VI)/sulfite process [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 384: 121303.
- [54] ZHANG Zhaocheng, ZHANG Huanzhou, CUI Jianguo. Potassium ferrate combined with powdered activated carbon to remove trace organics in water [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 295/296/297/298: 1183-1186.
- [55] WANG Hongyu, WANG Shujuan, JIANG Jiaqian, et al. Removal of sulfadiazine by ferrate(VI) oxidation and montmorillonite adsorption—Synergistic effect and degradation pathways [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2019, 7(4): 103225.
- [56] WANG Shizong, HU Yuming, WANG Jianlong. Strategy of combining radiation with ferrate oxidation for enhancing the degradation and mineralization of carbamazepine [J]. Science of the Total Environment, 2019, 687: 1028-1033.
- [57] 沈希裴, 王佳莹, 杨玉峰, 等. 高铁酸钾联合  $H_2O_2$  对酸性红 B 废水的预处理试验研究[J]. 浙江工业大学学报, 2010, 38(3): 304-307.
- SHEN Xipei, WANG Jiaying, YANG Yufeng, et al. Experimental study on pretreatment of acid red B wastewater by potassium ferrate combined  $H_2O_2$  [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2010, 38(3): 304-307.
- [58] NING Xun'an, FENG Yinfang, WU Junji, et al. Effect of  $K_2FeO_4$ /US treatment on textile dyeing sludge disintegration and dewaterability [J]. Journal of Environmental Management, 2015, 162: 81-86.

- [59] DENG Yang, WU Meiyin, ZHANG Huiqin, et al. Addressing harmful algal blooms (HABs) impacts with ferrate(VI): Simultaneous removal of algal cells and toxins for drinking water treatment[J]. Chemosphere, 2017, 186: 757-761.

[作者简介] 郑林昊(1997—), 硕士研究生, E-mail: zlh970818@163.com。通讯作者: 蒋晖, 博士, 讲师, E-mail: Jianghui1368@163.com。

[收稿日期] 2022-07-10(修改稿)

\*\*\*\*\*  
(上接第16页)

- [64] LI Ailin, WU Zihao, WANG Tingting, et al. Kinetics and mechanisms of the degradation of PPCPs by zero-valent iron ( $\text{Fe}^0$ ) activated peroxydisulfate (PDS) system in groundwater[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 357: 207-216.
- [65] 陈天民, 陈颖明, 马红玉, 等. 炭基- $\text{Co}_3\text{O}_4$  复合材料活化过一硫酸盐降解阿特拉津[J]. 中国环境科学, 2020, 40(11): 4786-4794.
- CHEN Tianmin, CHEN Haoming, MA Hongyu, et al. Biochar- $\text{Co}_3\text{O}_4$  composite activates peroxydisulfate to degrade atrazine[J]. China Environmental Science, 2020, 40(11): 4786-4794.

- [66] JATTA S, HUANG Shengyi, LIANG Chenju. A column study of persulfate chemical oxidative regeneration of toluene gas saturated activated carbon[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 375: 122034.

\*\*\*\*\*  
[作者简介] 王庆宏(1984—), 博士, 副教授; E-mail: wangqhqh@163.com。通讯作者: 詹亚力, 博士, 教授, E-mail: ylzhan1970@163.com。

[收稿日期] 2022-07-06(修改稿)

\*\*\*\*\*  
·国内外水处理技术信息·

微塑料手动提取装置及微塑料手动提取方法——朱诚, 卢迪, 李占明, 等. CN 107553776A

本发明提供微塑料手动提取装置及提取方法, 涉及液体污染物分离处理技术领域, 具体涉及微塑料手动提取装置, 包括由上及下依次连接的分离筒、连接筒和混合筒, 分离筒、连接筒和混合筒整体形成只具有顶部一个开口的壳体结构; 连接筒内设置有用于控制流体是否流通的阀体组件; 阀体组件的上方或下方设置有用于过滤微塑料的滤网; 混合筒筒壁上设置有用于气体流入的通气孔。还涉及

微塑料手动提取方法, 在海岸带规定区域进行取样, 取样后带回且烘干处理; 向提取装置放入样品和分离液, 进行通气、加液等操作, 将析出的微塑料倒出并烘干。采用本发明技术方案, 能够用于沉积物中微塑料颗粒的提取, 结构简单, 使用方便, 便于操作的同时, 还具有较高的回收率。