

吴震,陈飞勇,刘汝鹏,等. 磁介质混凝沉淀技术的现状及探索[J]. 净水技术, 2023, 42(2):23-38.

WU Z, CHEN F Y, LIU R P, et al. Current situation and exploration of magnetic medium coagulation and sedimentation technology[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(2):23-38.

磁介质混凝沉淀技术的现状及探索

吴震¹, 陈飞勇², 刘汝鹏^{2,*}, 卢永峰³, 孙翠珍¹, 罗从伟¹

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东济南 250101; 2. 山东建筑大学资源与环境创新研究院, 山东济南 250101; 3. 日照市沐锦矿业有限公司, 山东日照 276800)

摘要 磁介质混凝沉淀技术因具有混凝效果好、污染物去除率高、污泥产量低、流程短等优点备受国内外学者的关注。文章简要介绍了磁介质混凝沉淀技术的工艺流程、优缺点,通过MEDLVO理论在微观层面解释了该技术的原理,总结了磁介质混凝沉淀技术混凝剂种类及投加量、磁介质性质及投加量、药剂投加顺序、处理时间及搅拌强度、pH等工艺参数对混凝效果的影响及其优化。通过对比不同学者的研究结果发现,磁介质之间磁力的相互吸引作用也会促进絮体的聚集沉淀,磁介质混凝沉淀技术各工艺参数会因待处理水样的水质不同而异。同时,文章列举了磁介质混凝沉淀技术的工程应用实例,并展望了该技术可能的发展方向。

关键词 污水处理 磁介质混凝沉淀 MEDLVO理论 磁性混凝剂 磁介质改进

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2023)02-0023-16

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.02.004

Current Situation and Exploration of Magnetic Medium Coagulation and Sedimentation Technology

WU Zhen¹, CHEN Feiyong², LIU Rupeng^{2,*}, LU Yongfeng³, SUN Cuizhen¹, LUO Congwei¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. Resources and Environment Innovation Institute, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

3. Rizhao Shujin Mining Co., Ltd., Rizhao 276800, China)

Abstract Magnetic media coagulation and sedimentation technology has attracted the attention of domestic and foreign scholars due to its advantages of good coagulation effect, high pollutant removal rate, low sludge output, and short process. The article briefly introduces the technological process, advantages and disadvantages, explaining the principle of this technology at the microscopic level through MEDLVO theory, summarizing the types and dosage of magnetic medium coagulation and sedimentation technology, the properties and dosage of magnetic medium, and the order of chemical dosage. The influence and optimization of processing time, stirring intensity, pH and other process parameters on the coagulation effect. By comparing the research results of different scholars, it is found that the magnetic attraction between the magnetic medium also promotes the aggregation and sedimentation of flocs, and the process parameters of the magnetic medium coagulation and sedimentation technology varies according to the quality of the water samples to be treated. At the same time, the paper lists the engineering application examples of the magnetic medium coagulation and sedimentation technology and prospects the possible development direction of this technology.

Keywords wastewater treatment magnetic medium coagulation and sedimentation MEDLVO theory magnetic coagulant magnetic medium improvement

[收稿日期] 2022-03-04

[基金项目] 山东省引进顶尖人才“一事一议”项目;黄河流域(山东)水环境健康关键技术与高端装备研发

[作者简介] 吴震,男,硕士,研究方向为重介质混凝沉淀技术去除氟化物, E-mail: 2576551632@qq.com。

[通信作者] 刘汝鹏,男,博士,教授,研究方向为市政工程, E-mail: 13904@sdjzu.edu.cn。

混凝是通过投加混凝剂和助凝剂,使水中的胶体及悬浮颗粒凝聚,形成较大的絮体,通过沉淀有效地去除水中细小悬浮物和胶体的过程^[1],其处理效果会影响后续处理。传统混凝工艺存在水力停留时间(HRT)长、池体占地面积大等缺点。若想得到更

高标准的出水,需要过量投加聚合氯化铝(PAC)、聚合硫酸铁(PFS)等药剂,一方面导致成本增加,另一方面碳排放量大幅上升、水中重金属离子浓度增高,与当前碳中和政策相悖,并影响人体健康。

近年来,重介质混凝沉淀技术发展较快,根据重介质能否被磁铁吸引,将其划分为加砂混凝沉淀和磁介质混凝沉淀。加砂混凝沉淀技术是在混凝阶段投加非磁性重介质(如石英砂或海砂)、混凝剂和絮凝剂。重介质的加入加重了絮凝作用产生的絮凝物的重量,使其重力增大,加速沉淀,缩短反应时间,同时提高总磷(TP)、悬浮固体(SS)、化学需氧量(COD)去除效果。由于重介质的压缩作用,污泥含水率降低,重介质的回收又减少了污泥总量,方便污泥后续处理。但非磁性重介质回收率过低,且对设备磨损程度较大。磁介质混凝沉淀技术是通过向混合池中投加磁性重介质(如赤铁矿或 Fe_3O_4),促进絮凝的加速进行,并通过解絮机、磁介质分离机对沉淀污泥中的磁介质进行高效回收利用的一种技术。该技术凭借混凝效果好、沉降速度快、浑浊度去除效果好、占地面积小、可省略过滤池等优点广泛应用于水处理领域。相比于加砂混凝沉淀技术,该技术能够实现高达99%的磁介质回收率^[2],提高了磁介质利用率,降低了成本。

本文介绍了磁介质混凝沉淀技术发展历程、工艺流程及工作原理,对该技术的主要工艺参数进行优化研究。同时,通过实例分析该技术的应用现状,并展望其应用前景。

1 磁介质混凝沉淀技术介绍

1.1 发展历程

1792年,William Fullarton 申请了一项专利,其中描述了用磁铁分离铁矿物的磁分离技术^[3]。早期磁分离技术的使用只能依赖于物质本身的磁性。1852年,一家纽约公司使用磁分离技术将磁铁矿从磷灰石中分离出来,自此,磁分离技术被应用于分离金属铁和磁铁矿^[4]。20世纪50年代,高梯度磁分离系统引入磁分离技术,这意味着磁分离可以更普遍地应用于非强磁性颗粒物质的分离问题,为磁介质混凝沉淀技术的出现奠定基础^[5]。20世纪60年代,前苏联学者将磁介质投加到混凝池中,使污水中的部分非磁性杂质磁化,再利用高梯度磁分离技术回收磁介质,絮体的理化性质及出水水质均取得良

好效果,是目前已知最早使用的磁介质混凝沉淀技术^[6]。2000年前后,磁介质混凝沉淀技术在国外已被大规模使用,然而该技术刚被引入我国^[7-9],在国内水处理工程方面得以应用,但是推广速度缓慢。近十年来,稀土永磁的使用使得磁介质回收这一技术难题取得突破性进展,目前磁介质回收率可高达99%以上,推动了磁介质混凝沉淀技术在国内污水废水处理领域的广泛应用^[10]。但是,磁介质混凝沉淀技术在地表水处理领域尚处于探索阶段。

1.2 工艺流程

该工艺由混凝、沉淀、磁介质回收和检测控制4个单元组成^[11]。进水首先进入3格设有不同转速机械搅拌的磁介质混凝池,依次投加混凝剂、磁介质、絮凝剂。磁介质混凝池出水进入沉淀池,其沉淀的磁介质污泥一部分回流至磁介质混凝池的第二格中;另一部分磁介质污泥通过解絮机进行处理,之后再通过磁分离器对磁介质进行回收再利用。磁介质混凝沉淀技术工艺流程如图1所示。

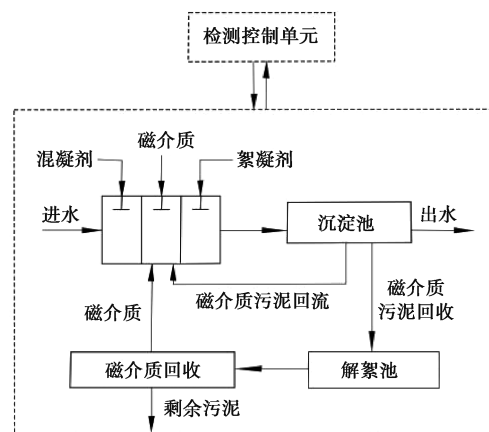


图1 磁介质混凝沉淀技术工艺流程图

Fig. 1 Process Diagram of Magnetic Medium Coagulation and Sedimentation

1.3 作用原理及 MEDLVO 理论

1.3.1 基本作用原理

磁介质混凝沉淀技术与传统混凝沉淀技术相比,其作用机理除了双电层压缩、电中和、架桥、网捕卷扫外,磁介质之间磁力的相互吸引作用也会促进絮体的聚集沉淀。如图2所示,磁介质可能存在于絮体内部,还可能依附在絮体表面。

当带有磁性的杂质颗粒或磁介质颗粒存在于一个磁介质颗粒的微磁场内时,两者之间会相互吸引。杂质颗粒或磁介质颗粒黏附的絮体也会随之聚集,

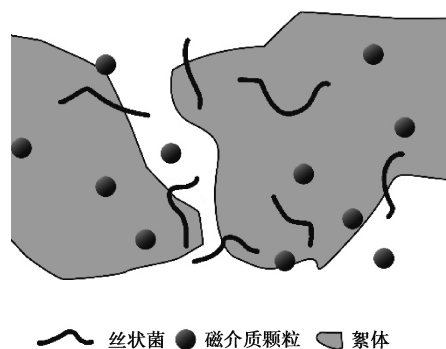


图 2 混凝絮体产生后磁介质的位置示意图

Fig. 2 Sketch Map of the Magnetic Medium Position after Coagulation Flocs Formation

使得形成的絮体体积更大、更紧密。另外,磁介质比重较大,能够大幅增加絮体所受重力,加快絮体的沉降,同时能够压实污泥,降低污泥含水率。

此外,国内外学者对磁介质混凝沉淀技术的基本原理进行了探讨。陈啸等^[11]采用磁介质混凝沉淀技术对某赤铁矿尾水进行处理,发现磁介质的加入使得形成的絮体更大、更紧凑,主要归因于磁介质强化了混凝剂对赤铁矿颗粒的吸附作用。陈文松等^[12]通过试验证明磁介质混凝沉淀技术反应与传统混凝沉淀技术没有本质区别,磁介质的加入没有改变混凝剂的双电层压缩、吸附电中和、吸附架桥、网捕卷扫机理,只是形成的磁性絮团增强了污染物的磁性。Wu 等^[13]在研究细粒煤泥的沉淀时发现磁介质混凝沉淀技术的主要作用机制是悬浮颗粒之间的磁性作用。这些学者的研究结果都说明磁介质混凝沉淀技术的作用机理存在磁力的相互吸引作用,这种作用能够促进絮体的凝聚沉淀。

因此,磁介质混凝沉淀技术主要利用电荷吸附、物理吸附、杂质磁化以及磁化后的杂质与磁介质的相互吸引等作用,强化混凝效果,提高出水水质。

1.3.2 MEDLVO 理论

对于传统混凝,DLVO 和 Extended-DLVO (EDLVO) 理论被用于描述传统混凝过程中的颗粒碰撞和聚集程度。DLVO 理论认为相距 d m 的两颗粒间作用势能由范德华作用能、双电层静电能及潜在生成势能组成^[14]。EDLVO 理论认为相距 d m 的两颗粒间作用势能包括 DLVO 理论中的全部势能和 Lewis 酸碱相互作用能^[15]。

磁介质混凝沉淀技术中,杂质颗粒有机率被磁介质磁化,当颗粒具有磁性时,DLVO 和 EDLVO 理论不能全部涵盖相距 d m 的两颗粒间作用势能,这就需要对 EDLVO 理论进行改进,即在原有 EDLVO 理论中的全部势能的基础上增加磁作用能^[16],将这种修改后的理论命名为 Magnetic-Extended-DLVO (MEDLVO) 理论。

根据颗粒间总势能 Φ 的大小,可以将颗粒在悬浮体系中的存在状态分为 3 类:若 $\Phi > 0$,颗粒为分散状态;若 $\Phi < 0$,颗粒为凝聚状态;若 $\Phi = 0$,颗粒为分散凝聚的临界状态^[17],对应的悬浮液体体系的 Zeta 电位值称之为临界聚沉电位值。在磁介质混凝沉淀技术中,范德华作用能减小(吸引力增强)、双电层静电能减小(排斥力减弱)、潜在生成势能增大(排斥力增强)、Lewis 酸碱相互作用能减小(吸引力增强)、磁作用能产生(产生吸引力)。由此可见,相比于传统混凝沉淀技术,磁介质混凝沉淀技术的总势能增大,颗粒表现为吸引力增强。因此,磁絮体更为紧密、体积更小,混凝处理效果增强。

1.4 优势及问题

磁介质混凝沉淀技术的实质是一种强化混凝沉淀技术。相比于传统混凝沉淀技术,磁介质混凝沉淀技术形成的絮体体积更大、更紧实,沉降速度更快;常规沉淀池的表面负荷为 $1 \sim 3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,磁介质混凝沉淀技术的沉淀表面负荷可达 $20 \sim 40 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,远远高于传统混凝沉淀技术;传统混凝沉淀技术 HRT 一般为 $40 \sim 60 \text{ min}$,而磁介质混凝沉淀技术 HRT 可小于 20 min ,大幅缩短了 HRT,减少占地面积,增强抗冲击负荷能力;沉淀出水水质明显优于传统混凝沉淀技术,同时还具有明显的除磷效果;磁介质还可以回收使用,损耗率极低^[18];磁介质的使用可以大幅降低 PAC 等混凝剂的投加量^[19-21]。

但是,磁介质过高的密度可能会导致淤积的发生,加上对设备、管道磨损程度大,增高了该技术的应用难度。

2 磁介质混凝沉淀技术的主要工艺参数

磁介质混凝沉淀技术的出水水质受混凝剂种类及投加量、聚丙烯酰胺(PAM)投加量、磁介质性质及投加量、药剂投加顺序、处理时间、搅拌强度、pH 和温度等工艺参数的影响很大。工艺参数的差异会

影响产生絮体的大小及紧密程度,进而影响沉淀效果,产生不同的出水水质。目前,已有很多学

者^[10,12,22-29]对多个工艺参数进行了试验分析研究,如表1所示。

表1 磁介质混凝沉淀技术工艺参数优化

Tab. 1 Optimization of Technological Process Parameters of Magnetic Medium Coagulation and Sedimentation Technology

编号	混凝剂		PAM 投加量/ (mg· L ⁻¹)	磁介质		药剂投 加顺序	反应时间/min		沉淀 时间/ min	搅拌速率/ (r·min ⁻¹)		pH 值	污染物去除率		
	种类	投加量/ (mg· L ⁻¹)		投加量/ (mg· L ⁻¹)	粒径/ μm		快搅	慢搅		快搅	慢搅		COD _{Cr}	SS	TP
1 ^[10]	PAC	25~30	-	-	-	PAC→磁介 质→PAM	4	2	-	250/250	80	-	85%	99%	97%
2 ^[22]	PAC	16.8	0.2	100	30~200	-	1	15	2	600/150/ 200	50	-	-	-	80%
3 ^[23]	PAC	-	-	-	-	磁介 质 → PAC→PAM	1.67	3.5	30	250	50	7.06~ 7.88	40.25%	90.58%	88.5%
4 ^[24]	PAC	1 800	150	2 000	-	PAC + 磁介 质→PAM	3	20	30	300/140	70	9.5	-	94.72%	-
5 ^[25]	PAC	90	0.44	414.6	-	-	1	5	10	100	49	-	51%	-	87%
6 ^[26]	FeCl ₃	300	2	200	-	FeCl ₃ + 磁介 质→PAM	2	7	20	300	70	-	61%	-	98%
7 ^[12]	PFC	25.7	0.5	150	<10	PFC + 磁介 质→PAM	2	3	30	250	70	8~10	-	-	-
8 ^[27]	PFC	25	0.5	280	-	PFC + 磁介 质→PAM	-	-	-	250	50	-	-	-	-
9 ^[28]	PFS	2.23	0	272	-	-	2	5	20	350	60	7.39	-	-	-
10 ^[29]	硫酸铝	60	0	80	-	-	2	3	15	300	60	6	90%	-	-

注:1和6为城市生活污水;2为二沉池出水;3为养猪废水;4为微蚀刻铜废废水;5为微污染河水;7为高浊水;8为含油废水;9为雨季溢流污水;10为初沉池进水;-表示未检验或论文中未提及;PFC为聚合氯化铁。

2.1 混凝剂

2.1.1 混凝剂的种类及投加量

常规的混凝剂如 PAC、PFC、PFS、硫酸铝等,不同混凝剂都能够产生带正电荷的水解产物,并与体系中带负电荷的胶体颗粒结合使其脱稳,进而聚集在一起形成较大的絮体并沉淀。相比于传统混凝,磁介质混凝形成了磁性絮体,并且在磁力的影响下,磁性絮体更紧密、体积更大,沉淀速度更快。

另外,混凝剂投加量的多少也会影响混凝效果。投加一定量的混凝剂时,混凝效果会随着混凝剂投加量的增加逐渐达到最佳。但是,混凝剂投加不足或过量都会对混凝效果产生影响。当混凝剂投加不足,混凝不充分,出水水质差;当混凝剂投加过量,形成的带正电荷的水解产物就会过量,过高的正电荷导致胶体颗粒复稳,混凝效果变差^[30-31]。

对于不同水质,可通过试验确定最佳混凝剂种类及其投加量,控制水处理成本的同时提高出水

水质。

2.1.2 磁性混凝剂

近年来,由于天然混凝剂具有可再生、成本相对较低、产生生物可降解污泥较少等优点,其在水处理行业得到广泛关注。然而,即使使用粗植物萃取物作为混凝剂,其沉淀时间也较长,同时有机物含量增加。为应对这一缺陷,可引入磁性纳米氧化铁粒子,与天然混凝剂结合,进而提高混凝性能。因此,当下国内外较多学者将磁性天然混凝剂作为研究重点,多数采用豆科植物提取液作为天然混凝剂,使用分散法和吸附法两种方法引入磁性纳米氧化铁粒子。分散法是将提取物使用磁性纳米氧化铁粒子功能化,吸附法是将蛋白质固定在改性或未改性的磁性纳米氧化铁粒子表面。同时,也有部分学者将磁性纳米氧化铁粒子与常规混凝剂结合使用,同样可以达到较好的处理效果。基于 MEDLVO 理论,磁性混凝剂具有磁性,且可使部分杂质具有磁性,两磁性颗

粒间磁作用能的存在可以促进较大胶体颗粒的形成。

Okoli 等^[32]首次成功利用磁性纳米氧化铁与辣木蛋白合成磁性天然混凝剂,之后许多学者开始研究天然混凝剂的制备方法和来源、磁性天然混凝剂的合成、混凝变量的控制(如混凝剂投加量、搅拌时间等)以及磁性天然混凝剂混凝机制。Reck 等^[33]利用基于辣木分馏蛋白的新型磁性混凝剂处理含合成染料的废水,磁场的存在大大加速了分离,并且提高了染料去除效率。Santos 等^[34]采用改性溶胶-凝胶法合成 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米颗粒,随后使用辣木整体种子提取物和无乙醇提取油(Mo-et),产生具有抗菌活性的新型混凝剂[$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 和 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-Mo(et)}$],在外部磁场的影响下,进行絮凝试验,可完全灭活原水中的大肠杆菌。

天然混凝剂提取后若未能规范储存,容易降解,因此,天然混凝剂需现用现制。这一缺点严重限制了天然混凝剂的试验及商用规模,同时也妨碍了磁性天然混凝剂的进一步研究。目前已经探索了几种储存方法,如冷冻干燥^[35-36]和喷雾干燥^[37-38]。就磁性天然混凝剂的合成方法而言,常用的方法有分散法和吸附法两种。分散法制备简单,且合成物应对不同水质的原水混凝效果均较好。但使用粗提取物时,水中有机物的含量可能会增加,且只有磁性纳米氧化铁粒子能够回收利用。吸附法合成的磁性天然混凝剂可以在污泥中提取出来重复利用,但是这一方法的研究相对有限。由于磁性纳米氧化铁粒子的存在,磁性天然混凝剂的沉降时间更快。因此,磁性天然混凝剂作为一种绿色、可持续的水处理解决方案具有广阔的应用前景。

2.2 磁介质

2.2.1 磁介质的性质及投加量

磁介质的投加是该技术区别于其他技术的要素之一,磁介质粒径、磁性、投加量的不同均会产生不同的混凝效果。

磁介质粒径过大时,对设备和管道的磨损较大,再增大粒径时混凝效果变化不明显,反而会徒增运营成本、加大对设备和管道的磨损;磁介质粒径过小时,磁介质磁性较弱、碰撞效率低,吸附作用会相对较弱,沉淀时间相对粒径较大时有所增加,混凝效果较差^[39]。Ha 等^[40]以磁铁矿作为磁介质、硫酸铝作为混凝剂处理造纸废水,研究发现随着废水流量、浑

浊度的增加,较大的磁铁矿颗粒(10 μm)性能优于较小的颗粒(5 μm)。磁介质的投加并不是简单的单一粒径投加,而应该是多种粒径投加。

不同粒径的磁介质在磁性大小上也存在着差异,粒径较小的磁介质磁性也相对较小。磁介质在多次回收利用后,其磁性会相对减弱,甚至会没有磁性,这就会影响磁介质回收的效率。磁性大小还会影响形成的絮体之间的相互吸附作用。磁性小时,絮体吸附能力就会变弱,较新的磁介质而言形成的絮体相对较小,这就需要通过投加新的磁介质来解决这一问题。

磁介质颗粒表面电荷也会影响混凝效果,但是关于其表面所带电荷的正负并没有确切的研究。有学者^[41]认为磁介质颗粒表面带负电荷,有学者^[42]认为磁介质颗粒表面不带电荷,还有学者^[24]认为磁介质颗粒表面正负电荷都存在。当磁介质颗粒带正电荷时,能够与混凝剂结合,吸附更多的带负电荷的杂质颗粒,促进更大絮体的形成;当磁介质颗粒不带电荷时,吸附带负电荷的杂质颗粒并作为絮体核心,促进混凝进行;当磁介质颗粒带负电荷时,由于杂质颗粒主要带负电荷,会抑制混凝的进行。

磁介质投加量不同,混凝效果也会有所不同。磁介质投加量过小时,混凝不充分;投加过量时,混凝效果变化不明显。张晓彩等^[43]处理油田废液时发现磁介质投加量为 14 g/L 时,其平均粒径为 45 μm 时,沉降时间可降至 10 min 以内,然而磁介质投加量大于 14 g/L 时,沉降时间变化不大。Li 等^[44]采用磁铁矿(Fe_3O_4)和 PFS 去除砷,发现当磁铁矿剂量从 25 mg/L 增加到 300 mg/L 时,砷去除量从 72.5%增加到 90.9%,增加磁介质的投加量可以提高砷的去除率。Zeng 等^[45]通过对模拟的浑浊水进行处理,发现随着 Fe_3O_4 剂量从 0 增加到 30 mg/L,浑浊度去除效率从 70%增加到 96%,继续增加磁介质,浑浊度去除效率差异很少,这表明在一定范围内增加 Fe_3O_4 投加量可以明显提高浑浊度的去除率。

总之,磁介质粒径、磁性及投加量与沉淀时间及污染物去除率之间不是简单的线性关系,需要经过各种试验研究建立系统的数学模型。

2.2.2 磁介质的改进

若要达到预期处理效果,需要投加大量磁介质。磁介质的使用效率较低,这在一定程度上限制了磁介质混凝沉淀技术的实际适用性。为克服这一局限

性,同时提高磁介质的分散性、化学稳定性及其混凝效果,近年来提出了一种磁介质的改进方案。即在磁介质表面功能化或涂以化学层,形成磁性复合材料^[46],再将磁性复合材料作为磁介质引入到磁介质混凝沉淀技术中使用。

目前,用于磁介质改进的表面功能化涂层有无机材料(如石墨烯、 SiO_2 、聚乙烯亚胺、壳聚糖、阳离子淀粉、植物多酚等)、人工合成有机聚合物和天然提取物^[46-48]。用于表面功能化的化合物一方面提高了磁性复合材料的电泳迁移率和等电点,增强混凝效果,另一方面使其更容易回收再利用,提高回收率。然而,这一工艺复杂,且涂层容易分离,回收后需要重复涂层工艺^[49],这就需要找寻一种稳定性较强的表面功能化的化合物。

SiO_2 作为涂层时,在酸性和碱性环境中都表现出良好的稳定性,可以拓宽位于内核的磁介质对 pH 的适用范围,降低 pH 对絮凝的影响^[50]。 SiO_2 涂层还可以克服其他作用力对范德华力的影响,从而改善了磁介质的分散性^[51-52]。此外, SiO_2 涂层中大量的硅醇基团可以与多种化学物质发生反应,有助于与特定的配体结合^[53-54],促进混凝进行。Liu 等^[55]首次通过 SiO_2 对 Fe_3O_4 进行功能化处理,合成核-壳结构的磁性复合材料 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ 并用以混凝处理。在初始浑浊度为 200 NTU、pH 值为 7.0、 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ 投加量为 1.0 g/L、 Ca^{2+} 摩尔浓度为 4.5 mmol/L 时,高岭土的去除率可达 93.8%。研究发现, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ 在 pH 值为 2.0~12.0 均能得到较高的去除率,超声处理可使 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ 有效地从磁介质絮体中分离出来,回收 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ 颗粒由于其稳定的表面性质,对高岭土的去除率仍处于较高水平。

目前,磁介质的改进仍处于试验阶段,并未大规模推广使用,未来这将成为磁介质混凝沉淀技术的研究重点之一。通过对磁介质进行改进,增强磁介质的分散性、稳定性,加强其混凝效果,提高出水水质同时减少磁介质的投加,实现节能减排,降低成本。

2.3 药剂投加顺序

在快速搅拌阶段投加磁介质,可以使水中能被磁化的杂质具有磁性,便于发挥磁介质的相互吸引作用,使得形成的絮体更大。若磁介质投加过晚便会错过混凝的最佳时间,混凝效果无法达到最佳,因此,磁介质需要在快速搅拌阶段完成投加。对于混

凝剂,有学者^[56]认为需要与磁介质同时投加,也有学者^[57]认为要在磁介质之前或之后投加。PAM 等絮凝剂在快速搅拌阶段投加时,会导致形成的较大絮体在剪切力的作用下被破坏,影响混凝效果,因此,絮凝剂需要在慢速搅拌过程中投加。

磁介质、混凝剂和絮凝剂的投加顺序并没有一个定论,投加顺序不同,处理效果也会有所不同。无论哪种投加顺序,絮凝剂都需要在最后投加,即在慢速搅拌过程中投加。

2.4 处理时间及搅拌强度

磁介质混凝沉淀技术的处理时间由反应时间和沉淀时间两部分组成,其中,反应时间又分为快速搅拌时间和慢速搅拌时间。反应时间应该做到合理分配,快速搅拌时间过长、慢速搅拌时间不足均不利于絮体的稳定形成,进而影响沉淀效果。由于对絮体大小要求的降低,反应时间能够缩短至常规混凝时间的 1/2 以下。另外,磁介质的投加增强了絮体的沉淀性能,大大缩短了沉淀时间。

搅拌强度的不同也会产生不同的混凝效果。当搅拌转速过慢时,混凝不充分,形成絮体较小,杂质去除效果较差;当搅拌转速过快时,混凝形成的较大絮体受搅拌影响而破碎,影响混凝效果。总之,在快速搅拌和慢速搅拌两个阶段分别寻求一个最佳的搅拌速度尤为重要。

2.5 pH

不同酸碱度的环境下,会发生不同的反应,反应的程度也会有所不同。混凝剂的水解能够产生羟基离子,不同 pH 环境下混凝剂的水解程度不同。在一定范围内,随着 pH 的增加,混凝剂水解程度高,促进了胶体颗粒与羟基离子的结合,混凝效果较好。但是,pH 过高时,混凝剂的水解受到抑制,抑制了羟基离子的产生,混凝效果变化不明显。郭玥等^[31]通过对比不同 pH 环境对混凝效果的影响,研究发现 pH 值处于 6.0~9.0 时混凝效果较好。Chen 等^[24]对合成的微蚀刻铜废料处理,研究发现,废水初始 pH 值为 9.5 时处理效果最好。Zhang 等^[58]利用反向传播神经网络(BPNN)和一般回归神经网络(GRNN),研究发现中性和碱性环境有利于磁介质混凝过程,但较高的 pH 影响效果不显著。

可见,磁介质、混凝剂、絮凝剂的作用环境对 pH 有一定的要求,可调控 pH 达到 3 种药剂都能发挥较好作用的范围,也可对磁介质、混凝剂、絮凝剂进

行改进以增强其化学稳定性。

2.6 工艺参数的重要度及其确定

影响磁介质混凝沉淀技术混凝效果的工艺参数较多,但是不同工艺参数的影响程度会有所不同。学者们通过正交试验对工艺参数的重要性做了研究。赵红花等^[29]研究磁介质混凝沉淀技术对 COD_{Cr}、SS 的去除,发现工艺参数的重要性排序为混凝剂投加量>反应时间>搅拌强度>磁介质投加量>温度>pH。段志辉等^[57]通过对目标污染物 COD_{Cr}、SS、TP 处理,发现工艺参数的重要性排序为磁介质投加量>pH>PAM 投加量>混凝剂投加量。这说明对于不同的水质条件,工艺参数的重要性不同,这就需要学

者在研究时建立系统的数据库以供设计时参考。

应对不同水质,其工艺参数的确定也有所不同,可以通过响应面和人工神经网络相结合等方法对各个最佳工艺参数进行预测。针对 TP、浑浊度较高的原水,通过上述方法预测出 PAC、磁介质、PAM 投加量分别为 28.42、623、0.18 mg/L 时 TP 和浑浊度的去除率最高^[59]。

3 磁介质混凝沉淀技术的应用

当下,磁介质混凝沉淀技术在市政污水、工业废水处理方面均有所应用,如表 2^[60-74]所示。此外,也有学者在地表水处理方面应用该技术进行探索。

表 2 磁介质混凝沉淀技术工程应用实例
Tab. 2 Engineering Application Examples of Magnetic Medium Coagulation and Sedimentation

编号	处理规模/ (m ³ ·d ⁻¹)	反应池 HRT/ min	沉淀池表 面负荷/ (m ³ ·m ⁻² · h ⁻¹)	药剂投加			出水水质/(mg·L ⁻¹)				运行成本/ (元·m ⁻³)
				混凝剂 种类	PAM/ (mg·L ⁻¹)	磁介质补 充/ (mg·L ⁻¹)	BOD ₅	COD _{Cr}	SS	TP	
1 ^[60]	15 万	4.6	—	PAC	—	4	4.6	14	5	0.10	—
2 ^[61]	5 万	15	10.8	PAC	1	2	2.9~5.5	13.6~25.6	2.2~4.5	0.17~0.27	—
3 ^[62]	9 万	10	16.9	PAC	—	—	2~6	30~40	3~9	0.3~0.35	—
4 ^[63]	3.5 万	9.55	17.43	PAC	0.5~0.8	1.2	—	—	1~4.4	0.01~0.24	—
5 ^[64]	20 万	20	20	PAC	—	—	—	—	1~17	0.02~0.55	0.09
7 ^[65]	25 万	6	18	PAC	0.8~1.5	7~8	4.4~10	26~41	4~8	0.05~0.28	0.11
8 ^[66]	8 万	—	—	PAC	—	—	—	<40	<10	<0.5	—
9 ^[67]	2 万	12	12	PAC	—	—	4.88	14.72	<5	<0.3	—
10 ^[68]	8 万	—	—	PAC	0.5~1.0	2.0	—	—	<5	<0.02	0.03
11 ^[69]	1.44 万	8.7	12	PAC	1.0	1~4	—	251.5	8.35	—	0.059~0.109
12 ^[70]	—	4~11	20	SPFS	0.5~2.0	20~30	—	—	—	—	—
13 ^[71]	1.5 万	7~10	15~30	SPFS	0.8	5	—	—	<5	0.2~0.4	0.04
14 ^[72]	5.5 万	10	15	SPFS	1~2	6~7	—	44.62	1.27	0.05	0.14
15 ^[73]	10 万	5.6	13.5	SPFS	—	1.14	<8.9	<38	<8	<0.32	—
16 ^[74]	20 万	—	14.9	—	—	—	2.7±0.5	10.3±2.4	2.3±0.6	0.07±0.02	—

注:—表示未检验或论文中未提及;SPFS 为固体聚合硫酸铁。

3.1 市政污水处理

随着城市的发展,人口的急剧增加导致生活污水总量增加。目前,我国大部分的城镇污水处理厂执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,但是对于水环境敏感地区来说,出水污染物浓度仍无法满足水环境整体质量要求^[75]。因此,我国一些区域颁布了地方性的标

准,部分污水处理厂出厂水中 COD_{Cr}、总氮(TN)、TP、SS 指标要求达到地表水质量标准中“准Ⅳ类”(部分指标满足Ⅳ类要求)^[76]或Ⅲ类水质指标。各大污水处理厂需要处理的污水总量增加,加上国家对污水处理厂出水指标的严格要求,部分污水处理厂不得不进行提标改造。

上海市某污水处理厂将处理规模由原先的 3.0

万 m^3/d 扩建为 6.0 万 m^3/d , 对氧化沟进行改造, 并增加磁介质混凝沉淀池和精密过滤器等深度处理措施, 出水水质由原来的《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准提高为一级 A⁺ 标准 (其中氨氮和 TP 执行地表水 IV 类水标准)^[72]。山东省广饶县污水处理厂使用磁介质混凝沉淀技术, 对 SS、TP 和 COD_{Cr} 的去除率分别达到了 91.1%、96.5% 和 32.5%, 降低了处理成本, 出水水质稳定^[77]。郑利兵等^[78] 使用磁介质混凝沉淀技术对市政废水进行处理, 两个磁混凝处理站点的总化学需氧量 (TCOD_{Cr}) 去除效果为 52.53% 和 64.41%、TP 的去除率分别为 76.78% 和 81.59%, 但氨氮、盐类基本无去除效果, 结果表明该技术对废水中各类溶解性有机物都有削减作用, 并能有效去除 SS、非溶解态的有机物、磷和高芳香性、疏水性、腐殖化程度的大分子有机物。刘兴等^[79] 利用磁介质混凝沉淀技术处理城市溢流雨水, TSS、浑浊度、 COD_{Cr} 、TP、氨氮的去除率分别为 98.4%、98.6%、63.9%、93.2%、36.3%, 对 TSS、浑浊度和 TP 的去除效果较好。

目前, 较多的污水处理厂进行提标改造, 将原有的传统混凝沉淀工艺改造为磁介质混凝沉淀工艺, 提高了出水水质。该技术在市政污水处理方面的应用较为成熟。

3.2 工业废水处理

在国内, 使用磁介质混凝沉淀技术处理油田废水、焦化废水、印染废水、木材加工行业废水、钢铁行业废水等工业废水处理效果都较好^[80]。油田废水的处理主要是降低水体中的含油量和悬浮颗粒数^[81], 由于污染物种类复杂、大分子有机物含量过高、 BOD_5 含量过低等因素, 传统的物理法、化学法和生物法处理时效率低、能耗高^[82]。目前, 大多出油田废水按照《碎屑岩油藏注水水质指标及分析方法》(SY/T 5329—2012) 中的指标处理后回注。磁介质混凝沉淀技术相比于传统混凝沉淀技术除油量更高^[83]。吴春辉等^[84] 研究发现, 投加磁介质对油田废水中含油量、 COD_{Cr} 和 SS 的去除效果明显, 处理时间明显缩短, 但磁粉的回收率较低, 为 75% 左右。

近年来, 我国焦化行业快速发展, 焦化废水的排放量大幅增加。2011 年—2019 年, 我国年平均焦炭产量为 4.5 亿 t, 产生的焦化废水可高达 3.1 亿 t (按

每吨焦炭产生 0.7 t 废水计算)^[85]。焦化废水中含有大量有机物, 成分复杂、可生化性差、难降解, 导致焦化废水的处理成本增加。将磁介质混凝沉淀技术应用到焦化废水的处理, 取得了良好的处理效果。敬双怡等^[86] 采用磁化后的 PFS 处理焦化废水, 发现产生的絮体含水率低、密度更大、沉降速度更快, 出水水质明显提高。张哲等^[87] 研究发现在磁介质、PFS、PAM 投加量分别是 400、800、8 mg/L 时, 依次投加磁介质、PFS 和 PAM 处理焦化废水效果最佳, COD_{Cr} 、浑浊度、氨氮的去除率分别可达 62.5%、22.3%、92.2%, 沉淀时间为 20 min, 缩短了沉淀时间并提高了混凝效果。

印染废水、造纸废水中含有较多的溶解性有机物, 成分复杂, 直接使用磁介质混凝沉淀技术处理时效果并不是很好, 需要先对印染废水、造纸废水进行预处理后再投加混凝剂、磁介质、絮凝剂, 进而达到处理印染废水、造纸废水的目的。韩虹等^[88] 利用磁介质混凝沉淀技术处理印染废水, 色度、 COD_{Cr} 、SS 去除率比传统混凝法分别高出 17.3%、21.7%、24.2%, 此时絮体较大, 沉降速度大幅加快, 污泥压缩, 体积减小了 61%。

另外, 将磁介质混凝沉淀技术与其他技术耦合后处理污水, 也可以得到较好的处理效果。Tian 等^[89] 利用“臭氧预处理-MABR 工艺-磁介质混凝沉淀技术”处理医药废水, COD_{Cr} 去除率为 97.7%~98.0%、氨氮去除率为 98.8%~99.2%、TN 去除率为 90.1%~90.7%、SS 去除率为 100%、色度去除率为 93.8%, 处理效果较好。

总之, 应用磁介质混凝沉淀技术处理各种工业废水都得到了较好的处理效果, 使得该技术的应用范围拓展到了各种工业废水的处理, 而不是只局限于市政污水的处理。

3.3 地表水处理

磁介质混凝沉淀技术主要应用于市政污水和工业废水的处理, 在其他水处理领域几乎没有应用。Lü 等^[90] 通过广口瓶试验评估了磁介质混凝工艺对地表水的处理效果, 结果表明磁性颗粒的加入可以显著加速絮凝物的沉降并提高污染物的去除率。

这一研究结果表明, 磁介质混凝沉淀技术能够应用于地表水处理。该技术在地表水处理, 甚至饮用水处理方面, 都有很大的发展潜力。只有药剂达到食品级要求, 并且各项出水指标能够达标, 才能将

该技术应用到饮用水处理领域。

4 磁介质混凝沉淀技术应用拓展

4.1 与其他技术组合使用

磁介质混凝沉淀技术去除的对象主要是非溶解性污染物和胶体,对于溶解性污染物的去除受限。将磁介质混凝沉淀技术与能够去除溶解性污染物的工艺组合使用,可以达到更深层度对杂质的去除。

绍兴柯桥江滨水处理有限公司针对纺织废水去除 COD_{Cr} 工艺设计时选用“活性炭吸附+磁介质混凝沉淀”联合工艺,处理规模为 $20.0 \text{ 万 m}^3/\text{d}$,出水 COD_{Cr} 、色度、SS 等各项指标优于《纺织染整工业水污染物排放标准》(GB 4287—2012)标准要求,且项目各系统、设备稳定运行^[91]。丁静等^[92]选用“混凝+AO+气浮+臭氧+磁介质混凝”工艺处理印染废水,处理规模为 $20.0 \text{ 万 m}^3/\text{d}$,对 COD_{Cr} 、SS、TN、色度的去除率分别达到 95.9%、98.7%、81.7%、99.5%,抗冲击负荷能力强,出水满足排放标准。陈斌等^[93]选用“改良型 AAO+磁介质混凝沉淀+臭氧+活性炭”工艺处理重金属离子高、有机物浓度高、可生化性低的工业废水,出水 COD_{Cr} 、氨氮、TN、TP、SS 去除率分别达到 89.7%、88.3%、74.8%、92.4%、96.1%,且出水稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。陈鸯^[94]采用“磁介质混凝沉淀+SBR”工艺路线,对食品加工废水进行处理,出水水质稳定,达到国家安全排放标准。朱涛等^[95]对山东某工业园区污水处理厂进行提标改造至一级 A 排放标准,采用“芬顿高级氧化+磁介质混凝沉淀+滤布滤池”组合工艺深度处理难降解有机废水,升级改造完成后,处理规模为 $7.5 \text{ 万 m}^3/\text{d}$,出水各项指标稳定满足排放要求。郴州某县城污水厂采用“MBBR+磁介质混凝沉淀”工艺作为核心工艺进行提标改造,改造后处理水量提高至 $2.0 \text{ 万 m}^3/\text{d}$,污水厂稳定运行且出水水质达到一级 A 标准^[96]。

另外,还有学者在磁介质混凝沉淀技术实现短流程处理方面做出研究。高翔等^[97]选用“反应沉淀一体式矩形环流生物反应器+磁介质混凝沉淀”工艺实现短流程处理远期规模为 $3.0 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 的生活污水,成功解决污水厂用地紧张的问题,且出水稳定满足一级 A 标准。罗浩等^[98]使用“RPIR+磁介质混凝沉淀”组合工艺,实现污水处理的快速生化、高效

沉淀。吴明明等^[99]使用“A/RPIR+磁介质混凝沉淀”作为核心工艺新建污水处理厂,实现短流程处理生活污水,减少占地面积,有效降低能耗。

磁介质混凝沉淀技术通过与其他工艺的组合联用,成功攻克各大项目技术方面的难关,出水均能满足各类水处理标准,拓宽该技术的应用领域,促使该技术朝着短流程应用方向发展。

4.2 作为某项污染物的专项去除技术

磁介质混凝沉淀技术目前在水处理领域已经较为成熟,特别是在污废水处理方面。其中,这一技术作为针对重金属离子、磷的专项去除技术已被众多工程应用。另外,还有学者利用该技术对抗生素的处理做出相应研究。

(1) 去除重金属离子

磁介质混凝沉淀技术最早便应用于含铁废水的处理,且去除率较高,沉淀速度较快。另外,存在于废水中的重金属离子,如 Cr^{6+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 等,也可用磁介质混凝沉淀技术进行高效去除。林峰等^[100]利用该技术对电镀废水进行处理,其中 Cr^{6+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 的去除率均大于 99%,相比于常规混凝沉淀工艺,整体占地面积减小, HRT 缩短,仅需 10~20 min。康小红等^[101]通过静态烧杯试验处理含铜废水,研究发现当磁介质和 PFS 投加量分别为 400 mg/L 和 100 mg/L、pH 值为 8.0、沉淀时间为 20 min 时, Cu^{2+} 的去除效果最好,同时研究发现影响 Cu^{2+} 去除效果的因素主次顺序为磁介质投加量>pH>PFS 投加量>沉淀时间。孙水裕等^[102]利用该技术处理含 Ni^{2+} 电镀废水,出水中 Ni^{2+} 质量浓度为 0.42 mg/L, Ni^{2+} 去除率为 99%,达到了国家排放标准。何磊^[103]利用该技术对重金属废水进行预处理,结果表明重金属离子污染物的去除率大于 99%,较常规混凝去除率提高 4%~14%,且 HRT 缩短 50%,较常规混凝缩短 5~22 min。

可见,针对重金属离子,磁介质混凝沉淀技术可以作为其专项去除技术之一。

(2) 去除磷

含磷废水的处理分为化学法和生物法两种,当含磷量较高时,生物法已经无法将含磷量降到相应标准以下。化学除磷中,磁介质混凝沉淀技术能够将高含磷污水的含磷量处理到标准以下,去除率优于常规混凝沉淀技术。厦门市环保局要求当地出水执行地表Ⅳ类标准,其中 TP 质量浓度 $\leq 0.3 \text{ mg/L}$ 。

厦门市集美污水处理厂出水执行一级 B 标准,为提高出水指标进行磁介质混凝沉淀技术改造,当进水 TP 质量浓度为 2 mg/L 时,出水 TP 质量浓度为 0.26 mg/L,TP 去除率可达 87%,且出水 TP 满足当地规定^[104]。戴凌云^[105]利用磁介质混凝沉淀技术对高含磷污水进行处理,结果表现该技术大幅缩短絮体的沉降时间,减少占地面积,在高含磷污水处理中具有可行性。周传庭等^[106]利用该技术处理高磷废水,当进水 TP 质量浓度在 20 mg/L 左右时,出水 TP 质量浓度可稳定控制在 0.3 mg/L 以下,研究证实磁介质混凝沉淀技术在高磷废水化学除磷中更具优势。磁介质的投加使形成的絮体更大,吸附效果更好,沉降更快,对水中悬浮性磷的去除效果优于常规混凝沉淀技术,因此,磁介质混凝沉淀技术对 TP 的去除较常规混凝有明显提升^[25]。

5 展望

磁介质混凝沉淀技术的推广及应用仍面临着很多难题,接下来可以从磁介质改进及其与磁性天然混凝剂联合使用、磁介质混凝沉淀技术与其他技术耦合、磁介质混凝沉淀技术作为某项污染物的去除技术 3 个方向加强研究。

(1) 磁介质改进及其与磁性天然混凝剂联合使用

将磁介质作为内核,外涂以 SiO_2 等化学层合成磁性复合材料,增强磁介质的分散性、稳定性,且提高其混凝效果。然而,这一工艺复杂,且应用于磁介质混凝沉淀技术的试验较少。深化磁介质改进技术、完善各种参数控制将作为磁介质混凝沉淀技术的重点研究方向之一。

目前,有较多学者都在研究磁性天然混凝剂,其中天然混凝剂的制备复杂且存储时间有待延长,局限了磁性天然混凝剂的合成及商用规模。用分散法合成的磁性天然混凝剂时使用粗提取物,可能会导致水中有机物的含量增加,增加处理难度,且只有磁性纳米氧化铁粒子能够回收利用。吸附法合成的磁性天然混凝剂可以在污泥中提取出来重复利用,但是这一方法的研究相对有限。下一步,应深入研究蛋白质固定在磁性纳米氧化铁粒子表面的固定方法及其固定稳定性,并研究利用这一方法制成的磁性天然混凝剂的各种性能参数。

未来,通过研究磁性天然混凝剂和磁介质多次

回收利用时污染物的去除效果,确定其可以回收利用的次数,并为其补充投加量的确定提供参考依据。将改进的磁介质与吸附法合成的磁性天然混合剂引入到磁介质混凝沉淀技术中,可将磁介质与磁性天然混合剂同步回收利用,一方面减少磁介质的投加,降低成本,另一方面通过投加少量磁性天然混合剂与磁介质达到处理水质标准,节能减排,逐步实现现代化绿色水厂建设。

(2) 磁介质混凝沉淀技术与其他技术耦合

当前只是存在磁介质混凝沉淀技术与其他工艺的组联合用,从本质上将磁介质混凝沉淀技术与其他工艺耦合的应用较少。活性炭能够吸附水中的数百种物质,包括非溶解性和溶解性的污染物及其他化学物质。芬顿工艺可以氧化去除大分子有机物,将其氧化成无机态,从而降低 COD_{Cr} 浓度。因此,可以将磁介质混凝沉淀技术与活性炭工艺、芬顿工艺分别耦合,利用各自优势,取长补短,以提高处理效果。未来实现该技术与能够去除溶解性污染物的工艺耦合,可以达到更深度对杂质的去除,处理效果更佳。另外,结合 RPIP 等新型装备,探索结合磁介质混凝沉淀技术实现短流程处理的组合工艺,在基建面积有限的条件下占据主导地位,实现节能减排。

(3) 磁介质混凝沉淀技术作为某项污染物的去除技术

磁介质混凝沉淀技术已作为针对重金属离子、磷的专项去除技术研究,下一步,可以将该技术稍加改进后作为其他污染物的专项去除技术。如对于氟化物的去除,可以在磁介质混凝沉淀技术的基础上投加氯化钙等物质,促进氟化钙沉淀的形成,进而达到除氟效果。将该技术对其他污染物对象做出针对性改进,拓宽该技术去除对象的同时,使该技术发展成一种低成本、高去除率的综合去除工艺。

参考文献

- [1] 崔凤国,杨鹏,张伟军,等. 混凝和活性炭吸附深度处理制药废水中有机物去除特征[J]. 环境工程学报, 2015, 9(9): 4359-4364.
- CUI F G, YANG P, ZHANG W J, et al. Removal characteristics of organic contaminants of pharmaceutical wastewater in advanced treatment with coagulation and PAC adsorption [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(9): 4359-4364.

- [2] LEE K, LEE S Y, PRAVEENKUMAR R, et al. Repeated use of stable magnetic flocculant for efficient harvest of oleaginous *Chlorella* sp. [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 167: 284–290. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.06.055.
- [3] PARKER M R. Physics of magnetic separation [J]. *Contemporary Physics*, 1977, 18(3): 279–306. DOI: 10.1080/00107517708231486.
- [4] GUNTHER C G. Electro-magnetic ore separation [M]. New York: Hill Publishing Company, 1909.
- [5] DE L C. Magnetic separation in water pollution control [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1973, 9(3): 314–316. DOI: 10.1109/TMAG.1973.1067685.
- [6] 刘露露. 铁磁性物质耦合混凝—超滤膜过工艺研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2016.
LIU L L. Study on the process of ferromagnetic material coupling coagulation-ultrafiltration membrane [D]. Tianjin: Tiangong University, 2016.
- [7] YING T Y, YIACOUMI S, TSOURIS C. High-gradient magnetically seeded filtration [J]. *Chemical Engineering Science*, 2000, 55: 1011–1113. DOI: 10.1016/S0009-2509(99)00383-8.
- [8] HUANG Z L, HU Y H, XU J, et al. Removal of phosphate from municipal sewage by high gradient magnetic separation [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2004, 11(4): 391–394. DOI: 1005-9784(2004)04-0391-04.
- [9] 宋金璞, 张善文, 于林, 等. 高梯度磁滤除菌试验研究 [J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 1996, 29(5): 101–104.
SONG J P, ZHANG S W, YU L, et al. Research on removing bacteria with high gradient magnetic filter [J]. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, 1996, 29(5): 101–104.
- [10] 蒋海, 安琳, 欧芳. 磁混凝沉淀技术在城市污水处理中的应用 [J]. *市政技术*, 2012, 30(1): 108–110.
JIANG H, AN L, OU F. Application of magnetic coagulating sedimentation technology in urban sewerage treatment [J]. *Municipal Engineering Technology*, 2012, 30(1): 108–110.
- [11] 陈啸, 伍喜庆, 岳涛, 等. 矿山尾矿水的磁种絮凝处理及机理研究 [J]. *环境污染与防治*, 2019, 41(11): 1313–1318.
CHEN X, WU X Q, YUE T, et al. Study on the magnetic seed flocculation treatment of mine tailings water and its mechanism [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41(11): 1313–1318.
- [12] 陈文松, 韦朝海, 韩虹. 磁性絮团形成的最佳参数及机理研究 [J]. *四川环境*, 2004(1): 1–4.
CHEN W S, WEI C H, HAN H. Study on optimum parameters and mechanism of forming magnetic composite flocs [J]. *Sichuan Environment*, 2004(1): 1–4.
- [13] WU X Q, YUE T, DAI L. Magnetic seeding sedimentation (MSS) of coal slimes [J]. Sanya: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2016. DOI: 10.1088/1742-6596/52/1/012003.
- [14] LOVELAND J P, RYAN J N, AMY G L, et al. The reversibility of virus attachment to mineral surfaces [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1996, 107: 205–221. DOI: 10.1016/0927-7757(95)03373-4.
- [15] OSS C J V. Interfacial forces in aqueous media [M]. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [16] ROSENSWEIG R E. Ferrohydrodynamics [M]. New York: Courier Corporation, 2014.
- [17] PARK J A, KIM S B. DLVO and XDLVO calculations for bacteriophage MS2 adhesion to iron oxide particles [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2015, 181: 131–140. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2015.01.005.
- [18] 贾伯林, 杨志宏, 王亚, 等. 磁介质混凝沉淀技术的进展与创新 [J]. *广东化工*, 2020, 47(2): 98–100.
JIA B L, YANG Z H, WANG Y, et al. Progress and innovation in magnetic medium coagulation and sedimentation wastewater treatment technology [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2020, 47(2): 98–100.
- [19] 黑国翔. CoMag 磁混凝工艺在一级 A 提标改造中的应用 [J]. *中国给水排水*, 2011, 27(22): 97–99.
HEI G X. Application of CoMag magnetic coagulation to upgrading for first level A criteria [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(22): 97–99.
- [20] WAN T J, SHEN S M, SIAO S H, et al. Using magnetic seeds to improve the aggregation and precipitation of nanoparticles from backside grinding wastewater [J]. *Water Research*, 2011, 45(19): 6301–6307. DOI: 10.1016/j.watres.2011.08.067.
- [21] AMBASHTA R D, SILLANPÄÄ M. Water purification using magnetic assistance: A review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 180(1/2/3): 38–49. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.04.105.
- [22] 王少康, 程方, 郭兴芳, 等. 磁粉在磁加载混凝深度除磷中的作用机理分析 [J]. *环境工程学报*, 2019, 13(2): 302–309.
WANG S K, CHENG F, GUO X F, et al. Mechanism analysis of magnetic powder function in deep phosphorus removal by magnetic coagulation [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(2): 302–309.
- [23] RITIGALA T, CHEN Y L, ZHENG J X, et al. Comparison of an integrated short-cut biological nitrogen removal process with magnetic coagulation treating swine wastewater and food waste digestate [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 329: 124904. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.124904.
- [24] CHEN Y Q, LUO M, CAI W F. Influence of operating parameters on the performance of magnetic seeding flocculation [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(3): 2873–2881. DOI: 10.1007/s11356-015-5601-5.
- [25] 胡家玮, 李军, 于凤芹, 等. 磁絮凝法处理河水工艺条件的响应面分析 [J]. *北京工业大学学报*, 2013, 39(3): 459–

465.
HU J W, LI J, YU F Q, et al. Analysis of magnetic flocculation process conditions for river water treatment by response surface method[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(3): 459-465.
- [26] 陈瑜, 李军, 陈旭雯, 等. 磁絮凝强化污水处理的试验研究[J]. 中国给水排水, 2011, 27(17): 78-81.
CHEN Y, LI J, CHEN X L, et al. Study on enhanced treatment of sewage with magnetic flocculation technology[J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(17): 78-81.
- [27] 王利平, 何又庆, 范洪波, 等. 磁絮凝分离法处理含油废水的试验[J]. 环境工程, 2007(3): 12-15.
WANG L P, HE Y Q, FAN H B, et al. Treatment of oily wastewater by magnetic flocculation separation process [J]. Environmental Engineering, 2007(3): 12-15.
- [28] DUAN M F, XIE Q J, LIU X, et al. Optimum condition for magnetic coagulation treatment of municipal sewer overflow[C]. Wuhan: 5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2011. DOI: 10.1109/icbbe. 2011. 5780932.
- [29] 赵红花, 王九思. 用磁絮凝法处理城市污水的试验研究[J]. 兰州铁道学院学报, 2002(3): 79-82.
ZHAO H H, WANG J S. Experiment in treatment of municipal wastewater by magnetic flocculation [J]. Journal of Lanzhou Railway University, 2002(3): 79-82.
- [30] CHENG W P, CHI F H, LI C C, et al. A study on the removal of organic substances from low-turbidity and low-alkalinity water with metal-polysilicate coagulants[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2008, 312(2/3): 238-244. DOI: 10.1016/j.colsurfa. 2007. 06. 060.
- [31] 郭玥, 杜磊, 李庆, 等. 不同铝系混凝剂处理印染废水[J]. 环境工程学报, 2016, 10(4): 1847-1852.
GUO Y, DU L, LI Q, et al. Coagulation process using different Al-based coagulants in treatment of dyeing wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(4): 1847-1852.
- [32] OKOLI C, BOUTONNET M, MARIEY L, et al. Application of magnetic iron oxide nanoparticles prepared from microemulsions for protein purification[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2011, 86: 1386-1393. DOI: 10.1002/jctb. 2704.
- [33] RECK I M, BAPTISTA A T A, PAIXÃO R M, et al. Application of magnetic coagulant based on fractionated protein of *Moringa oleifera* Lam. seeds for aqueous solutions treatment containing synthetic dyes [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(11): 12192-12201. DOI: 10.1007/s11356-020-07638-2.
- [34] SANTOS T R T, MATEUS G A P, ANDRADE M B, et al. A simple and effective method for *Escherichiacoli* inactivation in aqueous medium using natural based superparamagnetic coagulant [J]. Environmental Progress and Sustainable Energy, 2021, 40(2): 13503. DOI: 10.1002/ep. 13503.
- [35] KATAYON S, NOOR M J M M, ASMA M, et al. Effects of storage conditions of moringa oleifera seeds on its performance in coagulation [J]. Bioresource Technology, 2006, 97(13): 1455-1460. DOI: 10.1016/j.biortech. 2005. 07. 031.
- [36] MOHAMED E H, MOHAMMAD T A, NOOR M J M M, et al. Influence of extraction and freeze-drying durations on the effectiveness of moringa oleifera seeds powder as a natural coagulant [J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 55(13): 3628-3634. DOI: 10.1080/19443994. 2014. 946713.
- [37] MOHAMMAD T A, MOHAMED E H, NOOR M J M M, et al. Coagulation activity of spray dried salt extracted moringa oleifera [J]. Desalination and Water Treatment, 2013, 51(7/8/9): 1941-1946. DOI: 10.1080/19443994. 2012. 715435.
- [38] NOOR M J M M, MOHAMED E H, MOHAMMAD T A, et al. Effect of the packaging and storage conditions on the coagulation activity of spray-dried salt-extracted moringa oleifera [J]. Desalination and Water Treatment, 2013, 51(7/8/9): 1947-1953. DOI: 10.1080/19443994. 2012. 715428.
- [39] LUO L Q, NGUYEN A V. A review of principles and applications of magnetic flocculation to separate ultrafine magnetic particles [J]. Separation and Purification Technology, 2017, 172: 85-99. DOI: 10.1016/j.seppur. 2016. 07. 021.
- [40] HA D W, LEE Y J. Research of superconducting magnetic separation in Korea [J]. Teion Kogaku (Journal of Cryogenics and Superconductivity Society of Japan), 2011, 46(11): 629-634. DOI: 10.2221/jcsj. 46. 629.
- [41] 陈文松. 磁种混凝与高梯度磁分离相耦合的废水处理技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2003.
CHEN W S. Study on wastewater treatment technology of magnetic seed coagulation coupled with high gradient magnetic separation [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2003.
- [42] 陈宇, 张明, 王周, 等. 纳米磁粉复配混凝剂深度处理木薯酒精废水研究[J]. 环境工程, 2017, 35(5): 11-15.
CHEN Y, ZHANG M, WANG Z, et al. Magnetic nanoparticle-composited coagulants and their advanced treatment for cassava distillery wastewater [J]. Environmental Engineering, 2017, 35(5): 11-15.
- [43] 张晓彩, 林森明, 何飞, 等. 磁絮凝技术在油田废液治理中的应用初探[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(5): 158-159.
ZHANG X C, LIN S M, HE F, et al. Application of magnetic flocculation technology in the treatment of oilfield waste liquid [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2018, 38(5): 158-159.
- [44] LI Y R, WANG J, ZHAO Y, et al. Research on magnetic seeding flocculation for arsenic removal by superconducting magnetic separation [J]. Separation and Purification Technology,

- 2010, 73(2): 264–270. DOI: 10.1016/j.seppur.2010.04.011.
- [45] ZENG H, LI Y R, XU F Y, et al. Feasibility of turbidity removal by high-gradient superconducting magnetic separation [J]. *Environmental Technology*, 2015, 36(19): 2495–2501. DOI: 10.1080/09593330.2015.1036130.
- [46] ZHAO Y, WANG X Y, JIANG X X, et al. Harvesting of *Chlorella vulgaris* using Fe_3O_4 coated with modified plant polyphenol[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(26): 26246–26258. DOI: 10.1007/s11356-018-2677-8.
- [47] JIANG X X, ZHAO Y, WANG X Y, et al. Adsorption of aqueous Cd (II) over a Fe_3O_4 /plant polyphenol magnetic material[J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 2018, 67(8): 738–753. DOI: 10.2166/aqua.2018.051.
- [48] PANDA S K, AGGARWAL I, KUMAR H, et al. Magnetite nanoparticles as sorbents for dye removal: A review [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, 19: 2487–2525. DOI: 10.1007/s10311-020-01173-9.
- [49] MA J Y, FU X, JIANG L Y, et al. Magnetic flocculants synthesized by Fe_3O_4 coated with cationic polyacrylamide for high turbid water flocculation [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25: 25955–25966. DOI: 10.1007/s11356-018-2610-1.
- [50] ZAREI A, SAEDI S, SEIDI F. Synthesis and application of $\text{Fe}_3\text{O}_4 @ \text{SiO}_2 @ \text{Carboxyl-terminated PAMAM dendrimer nanocomposite}$ for heavy metal removal[J]. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 2018, 28: 2835–2843. DOI: 10.1007/s10904-018-0948-y.
- [51] WANG X Y, ZHAO Y, JIANG X X, et al. In-situ self-assembly of plant polyphenol-coated Fe_3O_4 particles for oleaginous microalgae harvesting [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 214: 335–345. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.03.019.
- [52] LIU C, JIANG X X, WANG X Y, et al. Magnetic polyphenol nanocomposite of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{PP}$ for Cd (II) adsorption from aqueous solution[J]. *Environmental Technology*, 2022, 43(6): 935–948. DOI: 10.1080/09593330.2020.1811394.
- [53] CHEN F H, GAO Q, NI J Z. The grafting and release behavior of doxorubicin from $\text{Fe}_3\text{O}_4 @ \text{SiO}_2$ core-shell structure nanoparticles via an acid cleaving amide bond: The potential for magnetic targeting drug delivery[J]. *Nanotechnology*, 2008, 19(16): 165103. DOI: 10.1088/0957-4484/19/16/165103.
- [54] MARIA S, MIHAI G, LAURENTIA A, et al. Synthesis and applications of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ core-shell materials [J]. *Current Pharmaceutical Design*, 2015, 21(37): 5324–5335. DOI: 10.2174/1381612821666150917094031.
- [55] LIU C, WANG X Y, QIN L L, et al. Magnetic coagulation and flocculation of a kaolin suspension using Fe_3O_4 coated with SiO_2 [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(5): 105980. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105980.
- [56] CHEN Y L, SUI Q W, YU D W, et al. Development of a short-cut combined magnetic coagulation-sequence batch membrane bioreactor for swine wastewater treatment [J]. *Membranes*, 2021, 11(2): 83. DOI: 10.3390/membranes11020083.
- [57] 段志辉, 李彦, 李光柱, 等. 磁絮凝深度处理生活污水[J]. *中国农村水利水电*, 2019(7): 110–113, 118.
- DUAN Z H, LI Y, LI G Z, et al. The treatment of domestic sewage by magnetic flocculation [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019(7): 110–113, 118.
- [58] ZHANG X H, HE X W, WEI M, et al. Magnetic flocculation treatment of coal mine water and a comparison of water quality prediction algorithms [J]. *Mine Water and the Environment*, 2019, 38: 391–401. DOI: 10.1007/s10230-019-00590-9.
- [59] WANG K M, MAO Y X, WANG C H, et al. Application of a combined response surface methodology (RSM)–artificial neural network (ANN) for multiple target optimization and prediction in a magnetic coagulation process for secondary effluent from municipal wastewater treatment plants [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(24): 36075–36087. DOI: 10.1007/s11356-021-18060-7.
- [60] 陈小杏, 许东兴. 磁混凝高效沉淀池在污水厂提标改造工程中的应用[J]. *居舍*, 2021(9): 29–30.
- CHEN X X, XU D X. Application of magnetic coagulation sedimentation tank in upgrading project of wastewater treatment plant[J]. *Jushe*, 2021(9): 29–30.
- [61] 郭金玲, 张长华, 陈凡阵. 污水处理厂应急提标工程实例[J]. *供水技术*, 2018, 12(6): 39–43.
- GUO J L, ZHANG C H, CHEN F Z. Project of emergency and upgrade of urban wastewater treatment plant [J]. *Water Technology*, 2018, 12(6): 39–43.
- [62] 周丽颖, 王旭. 某 CAST 工艺污水处理厂升级改造工程实践 [C]. 合肥: 2018 中国环境科学学会科学技术年会, 2018.
- ZHOU L Y, WANG X. A CAST process sewage treatment plant upgrading project practice [C]. Hefei: Proceedings of 2018 CEST Annual Conference, 2018.
- [63] 霍槐槐. SediMag® 磁絮凝技术用于污水厂高效沉淀池改造[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(14): 122–126.
- HUO H H. Application of SediMag® magnetic sedimentation technique in renovation of high-efficiency sedimentation tank in WWTP[J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(14): 122–126.
- [64] 霍槐槐. SediMag® 磁絮凝沉淀用于污水处理提标改造和深度除磷[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(8): 53–56.
- HUO H H. Applications of SediMag® magnetic sedimentation technology in upgrading reconstruction and phosphorus removal of wastewater treatment[J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(8): 53–56.
- [65] 唐凯峰, 王旭阳, 赵乐军, 等. 磁加载混凝澄清技术在污水

- 深度处理领域的应用[J]. 给水排水, 2018, 54(10): 35-39.
- TANG K F, WANG X Y, ZHAO L J, et al. Application of magnetic loading coagulation-clarification technology in advanced wastewater treatment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 54(10): 35-39.
- [66] 吕志国, 王哲晓, 张勤. MagCS 磁介质混凝沉淀技术介绍及应用[C]. 南京: 2018(第六届)中国水生态大会, 2018.
- LÜ Z G, WANG Z X, ZHANG Q. Introduction and application of MagCS magnetic media coagulation sedimentation technology [C]. Nanjing: 2018 (6th) China Aquatic Ecology Conference, 2018.
- [67] 魏锋, 曹名帅. 改良型氧化沟+磁混凝沉淀工艺用于污水处理厂扩容提标[J]. 中国给水排水, 2019, 35(18): 55-57.
- WEI F, CAO M S. Application of improved oxidation ditch and magnetic coagulation sedimentation process in expansion and upgrading of WWTP[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(18): 55-57.
- [68] 区颖, 黑国翔. 磁混凝澄清工艺在污水厂提标中的应用[J]. 环境保护与循环经济, 2015, 35(5): 31-32.
- QU Y, HEI G X. Application of CoaMag clarification tank process in in upgrading of WWTP[J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2015, 35(5): 31-32.
- [69] 李政, 高健磊, 周子鹏. 磁混凝工艺在化工废水预处理段的应用[J]. 工业水处理, 2021, 41(10): 141-144.
- LI Z, GAO J L, ZHOU Z P. Application of magnetic coagulation in the pretreatment section of chemical wastewater[J]. Industrial Water & Wastewater, 2021, 41(10): 141-144.
- [70] 王国勇. SediMag® 磁絮凝沉淀技术在漳州开发区污水处理厂的应用[J]. 能源与节能, 2020(10): 80-81.
- WANG G Y. Application of SediMag® magnetic flocculation precipitation technology in sewage treatment plant of Zhangzhou Development Zone[J]. Energy and Energy Conservation, 2020(10): 80-81.
- [71] 王国勇. SediMag® 磁絮凝沉淀技术在污水处理厂深度处理中的应用[C]. 北京: 《环境工程》2019 年全国学术年会, 2019.
- WANG G Y. A SediMag® magnetic sedimentation technology for deep treatment in a wastewater treatment plant [C]. Beijing: Environmental Engineering, 2019 National Academic Conference, 2019.
- [72] 牟晋铭. 上海某污水处理厂提标改造工程案例[J]. 净水技术, 2020, 39(3): 48-52.
- MU J M. Upgrading and reconstruction project of a wastewater treatment plant in Shanghai[J]. Water Purification Technology, 2020, 39(3): 48-52.
- [73] 熊建英. MBBR+磁混凝工艺用于污水处理厂提标改造[J]. 中国给水排水, 2018, 34(20): 50-55.
- XIONG J Y. Application of MBBR + magnetic coagulation process for upgrading of wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(20): 50-55.
- [74] 沙超. 污水处理厂优于一级 A 提标改造工程设计案例——以深圳某污水处理厂为例[J]. 净水技术, 2021, 40(4): 127-132.
- SHA C. Engineering design and discussion of a WWTP better than first grade A standard upgrading and reconstruction project in Shenzhen[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(4): 127-132.
- [75] 张鹤清, 朱帅, 吴振军, 等. 城镇污水处理厂“准IV类”标准提标改造技术简析[J]. 环境工程, 2019, 37(6): 26-30.
- ZHANG H Q, ZHU S, WU Z J, et al. Analysis of "quasi-category IV" standard upgrading and reconstruction technology for municipal wastewater treatment plants [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(6): 26-30.
- [76] 杨晨宵, 盛铭军, 黄继会, 等. “准IV类”标准下城镇污水厂提标改造的难点与举措[J]. 工业水处理, 2020, 40(11): 15-21.
- YANG C X, SHENG M J, HUANG J H, et al. Difficulties and measures for upgrading and reconstruction of urban sewage treatment plants under quasi-IV standard[J]. Industrial Water & Wastewater, 2020, 40(11): 15-21.
- [77] 宋立堂. 磁混凝沉淀工艺在污水处理中的应用[J]. 市政技术, 2018, 36(4): 192-194.
- SONG L T. Application of magnetic coagulating sedimentation process in sewage treatment [J]. Municipal Engineering Technology, 2018, 36(4): 192-194.
- [78] 郑利兵, 焦赞仪, 陈梅雪, 等. 磁混凝工艺处理市政废水中的污染物去除特征研究[J]. 环境科学学报, 2020, 40(6): 2118-2127.
- ZHENG L B, JIAO Y Y, CHEN M X, et al. The pollutants removal in municipal wastewater treatment by magnetic coagulation technology [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(6): 2118-2127.
- [79] 刘兴, 吴春笃, 解清杰, 等. 城市溢流雨水的磁絮凝净化初步研究[J]. 工业安全与环保, 2011, 37(2): 4-6.
- LIU X, WU C D, XIE Q J, et al. Primary study on treatment of municipal rainwater overflow by magnetic coagulation [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2011, 37(2): 4-6.
- [80] 周曼莉. 磁混凝沉淀技术在污水处理中的应用[J]. 环境与发展, 2019, 31(8): 88-90.
- ZHOU M L. Application of magnetic coagulating sedimentation technology in sewage treatment[J]. Environment and Sustainable Development, 2019, 31(8): 88-90.
- [81] 钱程. 油田污水处理工艺技术优化策略[J]. 化学工程与装备, 2021(2): 238-239.
- QIAN C. Optimization strategy of oilfield wastewater treatment technology[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2021(2): 238-239.
- [82] 杜伟, 付美龙, 张蒙, 等. 油田污水生化处理技术研究进展

- [J]. 当代化工, 2017, 46(4): 673-676.
- DU W, FU M L, ZHANG M, et al. Research progress of biochemical treatment technology for oilfield wastewater [J]. Contemporary Chemical Industry, 2017, 46(4): 673-676.
- [83] TANG J, WANG J, JIA H, et al. The investigation on Fe_3O_4 magnetic flocculation for high efficiency treatment of oily micro-polluted water [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 244: 399-407. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.05.068.
- [84] 吴春辉, 高琦, 时登春. 磁混凝处理油田废水试验研究[J]. 枣庄学院学报, 2020, 37(5): 1-4.
- WU C H, GAO Q, SHI D C. Experimental study on magnetic coagulation treatment of oilfield wastewater [J]. Journal of Zaozhuang University, 2020, 37(5): 1-4.
- [85] 何绪文, 员润, 吴娟, 等. 焦化废水深度处理新技术及其相互耦合特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 175-182.
- HE X W, YUAN R, WU X, et al. Research on characteristics of new technologies and intercoupling technologies for advanced treatment of coking wastewater [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2021, 49(1): 175-182.
- [86] 敬双怡, 王丽, 李松原, 等. 焦化废水的电磁混凝实验研究[J]. 化工环保, 2013, 33(5): 398-401.
- JING S Y, WANG L, LI S Y, et al. Experimental study on electromagnetic coagulation of coking wastewater [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2013, 33(5): 398-401.
- [87] 张哲, 杨云龙. 磁絮凝技术深度处理焦化废水的试验研究[J]. 工业用水与废水, 2012, 43(2): 25-29.
- ZHANG Z, YANG Y L. Experimental study on advanced treatment of coking wastewater by magnetic flocculation technology [J]. Industrial Water & Wastewater, 2012, 43(2): 25-29.
- [88] 韩虹, 陈文松, 韦朝海. 印染废水处理的磁混凝-高梯度磁分离协同作用[J]. 环境工程学报, 2007(1): 64-67.
- HAN H, CHEN W S, WEI C H. Synergistic effect of magnetic coagulation-high gradient magnetic separation on dyeing wastewater treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2007(1): 64-67.
- [89] TIAN H L, ZHANG H M, LI P, et al. Treatment of pharmaceutical wastewater for reuse by coupled membrane-aerated biofilm reactor (MABR) system [J]. RSC Advances, 2015, 5(85): 69829-69838. DOI: 10.1039/c5ra10091g.
- [90] LÜ M, ZHANG Z H, ZENG J Y, et al. Roles of magnetic particles in magnetic seeding coagulation-flocculation process for surface water treatment [J]. Separation and Purification Technology, 2019, 212: 337-343. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.11.011.
- [91] 始终走在技术创新及应用的前列——磁混凝技术的领跑者[J]. 环境与生活, 2021(7): 85-87.
- Always in the forefront of technology innovation and application——The leader of magnetic coagulation technology [J]. Environment and Life, 2021(7): 85-87.
- [92] 丁静, 张建良, 任焯, 等. 混凝+A/O+气浮+臭氧+磁混凝工艺处理印染废水[J]. 中国给水排水, 2021, 37(20): 112-115.
- DING J, ZHANG J L, REN Y, et al. Treatment of dyeing wastewater by a combined process of coagulation, A/O, flotation, ozone, and magnetic coagulation [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(20): 112-115.
- [93] 陈斌, 唐晶, 叶青徽, 等. 改良型 AAO-磁混凝沉淀-臭氧-活性炭工艺在城镇污水处理厂中的应用实例[J]. 工业用水与废水, 2021, 52(4): 81-84.
- CHEN B, TANG J, YE Q H, et al. An application example of improved AAO-magnetic coagulation sedimentation-ozone-activated carbon process in urban sewage treatment plant [J]. Industrial Water & Wastewater, 2021, 52(4): 81-84.
- [94] 陈鸯. 磁混凝-SBR 工艺在食品加工废水处理中的应用[J]. 宜春学院学报, 2015, 37(6): 101-103.
- CHEN Y. Application of magnetic coagulation-SBR process to the wastewater treatment in food processing [J]. Journal of Yichun University, 2015, 37(6): 101-103.
- [95] 朱涛, 黎艳葵. 芬顿+磁混凝沉淀+滤布滤池应用于园区综合废水升级改造[J]. 环境科技, 2017, 30(1): 31-34.
- ZHU T, LI Y K. Application of combined process on Fenton and coagulation sedimentation with magnetic powder and cloth media filter to upgrade industrial synthesis wastewater [J]. Environmental Science and Technology, 2017, 30(1): 31-34.
- [96] 曾明正, 周长胜. MBBR+磁混凝工艺在 CASS 工艺污水处理厂提质扩容中的应用——以郴州某县城污水厂为例[J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(1): 112-114, 117.
- ZENG M Z, ZHOU C S. Application of MBBR + magnetic coagulation process in quality improvement and capacity expansion of cass process sewage treatment plant——Taking a sewage plant in a county of Chenzhou as an example [J]. Leather making and environmental technology, 2022, 3(1): 112-114, 117.
- [97] 高翔, 于水利. 某污水厂用地紧张情况下“RPIR+磁混凝澄清池”的应用[J]. 环境生态学, 2021, 3(9): 70-73, 78.
- GAO X, YU S L. Application of "RPIR + magnetic coagulation clarifier" in a wastewater treatment plant under land shortage [J]. Environmental Ecology, 2021, 3(9): 70-73, 78.
- [98] 罗浩, 王钦祥, 刘博翔. 基于“RPIR+磁混凝”污水应急处理站的构建[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(6): 234-235.
- LUO H, WANG Q X, LIU B X. Building "RPIR + magnetic coagulation sedimentation tank" sewage treatment station [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2020, 46(6): 234-235.
- [99] 吴明明, 熊珍, 徐海飞, 等. A/RPIR+磁混凝工艺调试及能耗分析[J]. 净水技术, 2021, 40(6): 158-162.

- WU M M, XIONG Z, XU H F, et al. Process commissioning and energy consumption analysis of A/RPIR + magnetic coagulation[J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(6): 158-162.
- [100] 林峰, 姜素华, 涂云鹏. 高压脉冲电絮凝+加载磁絮凝工艺处理电镀废水[J]. *广州化工*, 2013, 41(8): 149-150.
- LIN F, JIANG S H, TU Y P. Treatment of electroplating wastewater with high-voltage pulse electrocoagulation and electrocoagulation magnetic flocculation [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2013, 41(8): 149-150.
- [101] 康小红, 杨云龙. 磁絮凝去除工业废水中铜离子的试验研究[J]. *工业用水与废水*, 2011, 42(3): 24-27.
- KANG X H, YANG Y L. An experimental study on removal of copper ions from industrial wastewater by magnetic flocculation [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2011, 42(3): 24-27.
- [102] 孙水裕, 张俊浩, 刘炳基, 等. 磁种凝聚-磁分离技术处理含 Ni^{2+} 电镀废水的研究[J]. *环境工程*, 2002(4): 17-19.
- SUN S Y, ZHANG J H, LIU B J, et al. Research on treatment of Ni^{2+} -bearing electroplating wastewater by magnetic particle coagulation-magnetic separation [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2002(4): 17-19.
- [103] 何磊. 磁混凝在重金属废水预处理中的应用设计要点[J]. *净水技术*, 2018, 37(5): 56-61.
- HE L. Key points of design and application of magnetic coagulation in pretreatment of heavy metal wastewater[J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(5): 56-61.
- [104] 龚正. 磁混凝澄清池在污水除磷中应用[J]. *江西建材*, 2017(16): 76-76.
- GONG Z. Application of magnetic coagulation clarifier in wastewater phosphorus removal[J]. *Jiangxi Building Materials*, 2017(16): 76-76.
- [105] 戴凌云. 磁混凝技术在高含磷污水处理中的应用[J]. *磷肥与复肥*, 2017, 32(10): 47-49.
- DAI L Y. Application of magnetic coagulation technology in high phosphorus wastewater treatment [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2017, 32(10): 47-49.
- [106] 周传庭, 陈广, 周振. 磁混凝高效沉淀池用于处理高磷废水[J]. *中国市政工程*, 2020(3): 53-55, 130-131.
- ZHOU C T, CHEN G, ZHOU Z. Treatment of high phosphorus wastewater with high efficiency sedimentation tank of magnetic coagulation[J]. *China Municipal Engineering*, 2020(3): 53-55, 130-131.
-
- (上接第 13 页)
- [63] UYGUNER C S, SUPHANDAG S A, KERC A, et al. Evaluation of adsorption and coagulation characteristics of humic acids preceded by alternative advanced oxidation techniques[J]. *Desalination*, 2007, 210(1/2/3): 183-193. DOI: 10.1016/j.desal.2006.05.043.
- [64] AYEKOE C Y P, ROBERT D, GONE L D. Combination of coagulation-flocculation and heterogeneous photocatalysis for improving the removal of humic substances in real treated water from Agb River (Ivory-Coast)[J]. *Catalysis Today*, 2017, 281: 2-13. DOI: 10.1016/j.cattod.2016.09.024.
- [65] RODRÍGUEZ F J, MARCOS L A, NÚÑEZ L A, et al. Effects of ozonation on molecular weight distribution of humic substances and coagulation processes-A case study: The zquiza reservoir water[J]. *Ozone Science & Engineering*, 2012, 34(5): 342-353.
- [66] HUMBERT H, GALLARD H, JACQUEMET V, et al. Combination of coagulation and ion exchange for the reduction of UF fouling properties of a high DOC content surface water[J]. *Water Research*, 2007, 41(17): 3803-3811.
- [67] DRIKAS M, DIXON M, MPRRAN J, et al. Long term case study of MIEX pre-treatment in drinking water; understanding NOM removal [J]. *Water Research*, 2011, 45(4): 1539-1548.
- [68] WATSON K, FARRÉ M J, KNIGHT N. Enhanced coagulation with powdered activated carbon or MIEX® secondary treatment: A comparison of disinfection by-product formation and precursor removal[J]. *Water Research*, 2015, 68(6): 454-466.
- [69] HUANG W, HE H, DONG B, et al. Effects of macro-porous anion exchange and coagulation treatment on organic removal and membrane fouling reduction in water treatment[J]. *Desalination*, 2015, 355: 204-216. DOI: 10.1016/j.desal.2014.10.045.
- [70] XU J, XU W, WANG D, et al. Evaluation of enhanced coagulation coupled with magnetic ion exchange (MIEX) in natural organic matter and sulfamethoxazole removals: The role of Al-based coagulant characteristic[J]. *Separation and Purification Technology*, 2016, 167: 70-78. DOI: 10.1016/j.seppur.2016.05.007.
- [71] XIN H, GAO B, RONG H, et al. Effect of using polydimethyl-diallylammonium chloride as coagulation aid on polytitanium salt coagulation performance, floc properties and sludge reuse[J]. *Separation and Purification Technology*, 2015, 143: 64-71. DOI: 10.1016/j.seppur.2015.01.024.
- [72] METCALFE D, ROCKEY C, JEFFERSON B, et al. Removal of disinfection by-product precursors by coagulation and an innovative suspended ion exchange process[J]. *Water Research*, 2015, 87: 20-28. DOI: 10.1016/j.watres.2015.09.003.
- [73] KEELEY J, JARVIS P, SMITH A D, et al. Coagulant recovery and reuse for drinking water treatment [J]. *Water Research*, 2016, 88: 502-509. DOI: 10.1016/j.watres.2015.10.038.