

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2020.0371

贺聪慧,王祺,梁瑞松,等.2021.磁强化处理技术在城市污水处理中的研究与应用进展[J].环境科学学报,41(1):54-69

He C H, Wang Q, Liang R S, et al. 2021. Analyse of magnetically enhanced treatment in municipal sewage system[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 41(1):54-69

磁强化处理技术在城市污水处理中的研究与应用进展

贺聪慧,王祺,梁瑞松,王凯军*

清华大学环境学院,环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100084

摘要:磁粉比重高易分离同时具有良好的生物效应,投加磁粉或外加磁场可强化混凝、活性污泥、厌氧消化等常规技术,提升城市污水预处理、生物处理、深度处理和污泥处理等单元的处理效率.在文献及工程调研的基础上,分析介绍磁强化混凝,磁强化活性污泥和磁强化剩余污泥处理 3 大类技术的研究应用现状与未来发展趋势.磁强化技术在未来城市污水处理厂中具有广泛的应用前景,有助于实现城市污水厂能量平衡与合流制溢流污染控制,为城市污水处理提供新思路.

关键词:磁强化处理;城市污水;化学混凝;活性污泥;剩余污泥

文章编号:0253-2468(2021)01-54-16

中图分类号:X703

文献标识码:A

Analyse of magnetically enhanced treatment in municipal sewage system

HE Conghui, WANG Qi, LIANG Ruisong, WANG Kaijun*

State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084

Abstract: With high-density and magnetism effect, magnetic powder is easily separated and recycled, and has potentially positive effects on biological behavior. Magnetic-based technology is commonly applied to improve the processing capacity for biological treatment, in-depth treatment and sludge treatment and so forth via coupling with chemical coagulation, activated sludge, anaerobic digestion and other technologies. Based on literature and engineering investigation, we analyzed comprehensively the current progress and developing trend in magnetically enhanced coagulation, magnetically enhanced activated sludge and magnetically enhanced excess sludge treatment. Magnetically enhanced technology shows great prospect in next generation WWTP, it bolsters the WWTP to meet new goals in energy neutrality and combined sewer overflows pollution control, which provides neo-route for efficient municipal wastewater treatment.

Keywords: magnetically enhanced treatment; municipal wastewater; chemical coagulation; activated sludge; excess sludge

1 引言(Introduction)

磁分离技术最初应用于选矿(Parker, 1977),高梯度磁选机的发明将分离精度提升至纳米级,开始用于处理磁性污水(Moeser *et al.*, 2004),此后,通过外加磁性物质,磁分离的处理对象进一步扩展到生活污水、地表水等弱磁性和非磁性污水,磁性物质的高密度和对磁场的响应有助于分离效率的提升.此外,磁生物效应也得到广泛关注,适量磁性物质或磁场的引入可提升生物处理系统的处理能力和稳定性.磁技术与混凝、活性污泥、厌氧消化及吸附技术相结合,强化城市污水处理的预处理、生物处理、深度处理和污泥处理单元.本文在对国内外相关文献归纳整理的基础上,介绍磁强化混凝,磁

强化活性污泥和磁强化剩余污泥处理 3 类技术研究应用的发展和现状.展望磁强化技术在未来城市污水处理中,特别是实现能量平衡与合流制溢流污染控制中的应用前景,并指出磁强化技术进一步推广时需要解决的问题,为城市污水处理提供新思路.

2 磁强化混凝技术(Magnetically enhanced coagulation treatment)

常规混凝技术通过向污水中投加混凝剂、絮凝剂等化学药剂,使胶体和悬浮态污染物聚结成大的絮凝体,进而通过沉淀去除.磁强化混凝技术通过投加可循环使用的磁性物质,形成以磁种为核心的高密度、结构紧实性的磁性絮体,具有药剂消耗量小、停留时间短、占地面积小的优势.

收稿日期:2020-06-17

修回日期:2020-08-18

录用日期:2020-08-18

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(No.2017ZX07102, 2017ZX07102-003;2017ZX07103, 2017ZX07103-003)

作者简介:贺聪慧(1997—),女,博士研究生, E-mail: hech19@mail.tsinghua.edu.cn; * 责任作者, E-mail: wkj@mail.tsinghua.edu.cn

反应阶段,一方面,磁种增加反应体系颗粒数,提高有效碰撞概率,胡家玮等(2014)发现磁强化混凝体系的 GT 值(时间 T 内单位体积水中两种颗粒相碰撞总次数)显著高于常规混凝;另一方面,磁粉等电点在 7 左右(王少康等, 2019),水体 pH 较低时磁粉表面呈电正性,在电中和作用下磁粉易与水中带负电微粒结合,形成以磁粉为“核心”的磁性絮体, zeta 电位接近于零(Su *et al.*, 2016)。

分离阶段,磁种的加入改善了絮体的结构,与普通混凝形成的均匀海绵状絮体相比,磁种絮体体积小,密度高,更紧实,含水率低,磁粉均匀分布在絮体内部,形成数个以磁粉为核心的凝聚体(王欢, 2017;陈啸等, 2019),提升了絮体沉淀速度和脱水性能(黄光华等, 2019),磁絮体沉降速度为普通混凝絮体的 5.64 倍,产泥量减少 18.25%(Chen *et al.*, 2016)。此外,磁种对磁场的响应将分离方式从重力沉淀拓展到磁辅助沉淀与磁分离。

2.1 磁强化混凝技术影响因素研究

磁强化混凝技术的影响因素已经得到广泛研究。学者们在不同应用场景中识别关键因素、寻求最优参数组合(表 1)。总体来讲,主要影响因素包括:磁种性质与投加量、混凝药剂投加量、停留时间、搅拌强度、pH 值和温度等。反应条件影响絮体的密度、尺寸、磁种成核率等性质,进而决定了污染物的分离率与分离速度。

2.1.1 磁粉性质 磁粉的磁感应强度越大,吸引力越强(王少康等, 2019),等电点与溶液 pH 值的差值越大,越容易与带负电的污染物微粒结合(胡家玮等, 2013),均有利于磁混凝过程的发生。尺寸也是重要参数,一般认为随着粒径的增大,磁粉比表面积减小,不易吸附细小颗粒,同时在投加量一定时,颗粒数目减少,有效碰撞概率降低,磁粉在与污染物充分碰撞之前,容易先因重力沉降,因此粒径越小越好(陈文松等, 2004;张晓彩等, 2018;陈啸等, 2019)。但王少康(2019)指出粒径过小的磁种受惯性离心力影响明显,不利于絮体的形成生长,成型絮体容易破碎,污染物去除效果反而降低,75~105 μm 的粒径是合适范围,同时,不同粒径之间存在协同效应,与筛分后单一粒径的磁粉相比,混合磁粉更具优势。

2.1.2 磁粉投加量 一定范围内,随着磁种投加量的增加,污染物去除效果提升,特别是 COD,超过饱和值后,处理效果稳定甚至略有降低(段志辉等,

2019)。磁种投加过量时,磁种更易在与污染物碰撞前自行团聚,磁种利用率下降,无助于磁性絮体的形成(张晓彩等, 2018)。饱和值与原水性质密切相关,但并不与某一污染物浓度呈简单的线性关系,在机理研究模型建立取得重要进展前,具体应用时仍需开展针对性实验。

2.1.3 混凝剂投加量 磁混凝与常规混凝在混凝原理上没有本质区别,常用混凝剂均可发挥作用,陈瑜等(2011)发现铁系混凝剂的效果略优于铝系混凝剂。磁混凝的主要优势在于高效的碰撞使达到同样处理效果所需的药剂量大大降低。与磁粉类似,混凝剂投加量也存在饱和值,一方面,混凝主要去除大分子不溶有机物,达到极限去除率后剩余有机物以溶解态为主,继续提高混凝剂投加量影响不明显(崔凤国等, 2015);另一方面,混凝剂投加过量,过高的正电荷可能导致胶体颗粒复稳,使混凝效果不升反降(郭玥等, 2016)。

2.1.4 搅拌强度 搅拌分为快搅和慢搅两个阶段。快搅,使磁粉和混凝剂迅速扩散,与水中污染物充分接触,速率在 250~500 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 之间变化处理效果区别不明显(陈瑜等, 2011),因此需控制适中的速率避免动力浪费。慢搅阶段,在絮凝剂的作用下,快搅阶段形成的磁性絮体通过架桥链接尺寸进一步增长,慢搅过快容易使絮体破碎,一般低于 100 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ (蒋海等, 2012)。

2.1.5 处理时间 处理时间包括反应时间和沉淀时间。磁粉的引入增强了絮体的沉淀性能,大大缩短了沉淀时间,王少康等(2019)发现沉降 2 min 即可观察到最佳 TP 去除效果和絮体指数;同时由于对絮体体积的要求降低,混凝反应时间也可缩短至常规混凝的一半以下。需要注意时间的合理分配,快搅时间过长(Su *et al.*, 2016),慢搅时间过短(陈瑜等, 2011)均不利于絮体的稳定和生长。

2.1.6 药剂投加顺序 为达到最佳处理效果,磁粉、混凝剂和絮凝剂的投加需要遵循一定的顺序。一般认为磁粉在快搅阶段加入,若延后至慢搅,则错过絮体形成阶段,难以在絮体内均匀分布,而絮凝剂在慢搅时投加,若提前至快搅则形成的大尺寸絮体对剪切力敏感容易提前破碎(陈瑜等, 2011;蒋海等, 2012;魏锋等, 2019)。混凝剂与磁粉的投加顺序没有统一结论,二者同时、先后投加均有应用(蒋海等, 2012;魏锋等, 2019)。

表 1 磁强化混凝参数优化研究

污水	最佳条件				污染物去除率****							参考文献			
	混凝剂/ PAM/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	磁粉/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	反应时 间**/ min	沉淀时 间/min	搅拌速率***/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	pH	COD	TP	浊度	SS					
二沉池出水	聚合氯 化铝*	11.2	0.5	100	3+33	60	400	8	89%	74%	/	97%	段志辉等, 2019		
							350/ 250	90							
原水		16.8	0.2	100	1+15	2	600/ 150/ 200	/	/	80%	/	/	王少康等, 2019		
			/	/	4+2	/	250	80	/	85%	97%	99%		蒋海等, 2012	
			25-30	90	0.44	414.6	1+5	10	100	49	/	51%			87%
			三氯化铁 300	2	200	2+7	20	300	70	/	61%	98%		99%	陈瑜等, 2011
初沉池进水			0	80	2+3	15	300	6	90%	/	/	80%	赵红花等, 2002		
雨季溢流污水			0	272	2+5	20	350	7	/	/	/	97%	Duan et al., 2011		

注: * 聚合氯化铝浓度以有效成分 Al_2O_3 计; ** 反应时间包括快速搅拌+慢速搅拌两段, 分别列出; *** 部分实验中快速搅拌分多个梯度, 用第一梯度/第二梯度...表示. **** 缩写: 化学需氧量 (chemical oxygen demand, COD), 悬浮物 (suspended solids, SS), 总磷 (total phosphorus, TP).

2.1.7 pH pH 过低,水体中金属离子主要以游离态(Al^{3+} 、 Fe^{3+})形式存在,不利于絮体的粘附,桥连和交联(Chen *et al.*, 2016);pH 过高时,离子水解程度提高,除磷效率降低(Duan *et al.*, 2011);此外如前所述,体系 pH 小于磁粉等电点时,磁粉可通过电中和作用强化混凝效果.根据选用的磁粉和混凝剂的性质,反应体系中 pH 一般控制在 6~8 (Chen *et al.*, 2016).

根据目标污染物的不同,各影响因素的重要性尚未有统一的结论(表 2),此外各个影响因素之间可能存在相互依赖关系,例如,更大的磁种投加量需要配合施加高搅拌强度以充分悬浮,避免磁种“假过量”现象(He *et al.*, 2019),单因素优化依次筛选出多影响因素的最优组合具有不确定性,相比之下,通过建立连续变量曲面模型对影响因子及其交互作用进行评价的响应面分析法或提供更全面的解决方案(胡家玮等, 2014).

表 2 磁强化混凝技术操作参数重要性排序

Table 2 Order of parameters' importance in magnetically enhanced coagulation

目标污染物	影响因素重要性(降序)	参考文献
COD SS	混凝剂投加量>反应时间>搅拌强度>磁粉投加量>温度>pH	赵红花等, 2002
COD TP	磁粉投加量>pH>絮凝剂投加量>混凝剂投加量	段志辉等, 2009
TP	混凝剂投加量>磁粉投加量>絮凝剂投加量	胡家玮等, 2014
COD	混凝剂投加量>絮凝剂投加量>磁粉投加量	

2.2 磁强化混凝-吸附协同作用研究

磁强化混凝主要去除水中悬浮态和胶体态物质,突破小分子溶解态物质的去除瓶颈对技术的推广应用至关重要(石宝友, 2019).吸附技术可以从机理上弥补混凝的不足(王欣等, 2015),二者通过去除不同分子量的污染物实现优势互补(刘成等, 2006).基于文献调研与课题组前期研究,笔者提出两种耦合磁强化混凝技术和吸附技术的设想.

2.2.1 直接添加吸附剂 何秋杭等(2018b)开发强化磁分离技术,在磁混凝的基础上复配活性炭 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,预浓缩城市污水时出水溶解性有机物(Solluted Chemical Oxygen Demand, SCOD)平均浓度由 $86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低至 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,强化了溶解性有机物从液相到固相的转移,在中试规模上证实了复配活性炭的有效性.直接添加吸附剂方案面临的主要

担忧是反应时间的不协调.与反应时间通常低于 20 min 的磁混凝相比,吸附被认为是一个更为缓慢的过程,以活性炭为例,其吸附饱和时间,随自身粒径、目标污染物性质等因素变化,通常在 30 min 以上(魏俊起等, 2015).这一顾虑是必要但并不致命的,首先,尽管“磁混凝+吸附”技术尚处于起步阶段,但“混凝+吸附”技术已在饮用水处理中广泛应用于去除消毒副产物前体物(Kristiana *et al.*, 2011)和脱色(Tomaszewska *et al.*, 2004),吸附与混凝可以实现时间上的匹配.一方面,尽管大分子有机物确需较长反应时间,但吸附的主要目标——小尺寸低分子量的污染物达到平衡更快,Uyak 等(2007)发现对小分子污染物的吸附在 20~30 min 达到平衡;另一方面,Wongcharee 等(2019)发现单独使用时,吸附剂对溶解性有机物吸附需要 60 min 才能达到饱和,但与混凝剂混合使用时,这一过程被缩短至 20 min,二者在反应速率上具有协同作用.多项研究均采用“< 2 min 预混合+ < 30 min 混凝吸附同步反应”的实验方案(Szlachta *et al.*, 2009; Younker *et al.*, 2016; Ming *et al.*, 2018),澳大利亚西南饮用水厂在原有混凝单元中直接投加活性炭,进行原位技术升级,是工程规模的典型案例(Kristiana *et al.*, 2011).其次,通过工艺流程设计,例如将活性炭的投加点前移或增加单独的吸附反应箱,在管道、前置工艺单元中创造预吸附环境,可以延长吸附剂的反应时间,最终在磁混凝单元将充分接触的吸附剂-污染物复合体一起去除.最后,如下文所述,使用磁性吸附剂或污泥回流可实现部分吸附剂的循环利用,弥补一次吸附容量利用的不足,也是潜在的解决方案.

2.2.2 磁性吸附剂 另一方案是制备可循环利用的磁性吸附材料,同时充当磁性核心和吸附剂.按底物的不同,主要制备方法可分为“吸附材料赋磁”和“磁性材料拓孔改性”.赋磁是指将活性炭、碳纳米管等多孔吸附材料与铁锰等磁性物质或前躯体混合,通过一步法(Liu *et al.*, 2020)、浸渍法(单国彬等, 2004)或化学沉淀法(马放等, 2016)制备炭-磁复合材料,其中 Fe_3O_4 负载在吸附材料表面,不影响材料孔径和比表面积(Oliveira *et al.*, 2002),而 MnO_2 可促进微孔的形成,但由于其填充效应,材料比表面积略有下降(王星敏等, 2012).改性是指对本身具有一定的吸附能力的磁性物质(例如 Fe_3O_4)进行修饰:酸蚀刻增加比表面积,强化重金属离子的吸附

(李静等, 2020); SiO_2 在材料表面形成致密保护层, 提高稳定性(唐文强等, 2019); 卤胺聚合物增强抗菌性能(李娜等, 2020); 氨基在共价键、氢键及配位键作用下提供丰富的活性吸附位点, 强化对有机物的吸附(常会等, 2019); 镧基、巯基、羧基负载在材料表面分别强化对磷酸盐、 Pb^{2+} 、 Cr^{3+} 的选择性吸附(李晶等, 2020; 钱帆等, 2020). 在独立吸附单元中, 磁性吸附剂已用于去除天然有机物(郭丽燕等, 2001)、离子染料(莫冰玉等, 2015)、重金属离子(田萌等, 2013)和抗生素(Liu *et al.*, 2020)等污染物. 在与混凝结合方面, 储旭(2016)投加磁性吸附剂强化常规混凝, 深度处理制药废水生化尾水, 总有机碳、TP、蛋白质、腐殖酸和多糖去除率均提升. 实际应用“磁性吸附剂+混凝”方案将面临成本挑战, 现有研究更注重吸附剂性能的提升, 相对缺少经济性考量. 笔者认为未来需额外关注与成本密切相关的两方面内容: 一方面, 降低原料成本, 实验室中小剂量制备常使用商业原料, 但实际上吸附和磁性材料来源广泛, 原料成本具有可观的压缩空间. 例如以炼钢厂排放的烟尘和气溶胶凝聚物通过静电除尘后产生“红土”(郑学海等, 2000)、发电厂粉煤灰(王龙贵, 2004)和钢渣(汪玉娇等, 2014)等廉价工业废物为原料可制备性能优良的磁种, 基于农业废弃物、剩余污泥的吸附材料制备方法更是层出不穷, 例如4.2节讨论的基于剩余污泥的磁性吸附材料制备, 在污水处理厂内实现物质循环, 控制成本的潜在方案; 另一方面, 为分摊一次制备成本, 磁性吸附剂的回收率和可重复次数是关键. 在实验室中, 磁性吸附剂已经表现出对外部磁场的高度响应(Sun *et al.*, 2016), Oliveira等(2002)使用0.3 T的磁铁实现吸附材料的完全分离, 在解析、冲洗、干燥后, 磁性吸附剂在5~10个循环内可维持稳定的吸附能力(Oliveira *et al.*, 2002; 储旭, 2016; Falahian *et al.*, 2018). 储旭(2016)计算了磁性吸附剂强化混凝处理生化废水的运行成本, 吸附剂按重复使用5次计算, 与普通混凝相比, 尽管吨水处理成本提高, 但得益于高去除率, 每kg COD_{Cr}降解成本由6.62元降低至5.70元, 此外还节省了40%的处理时间, 综合考虑一次性投资与运行成本, 磁性吸附剂具有经济可行性. 精确定量评估处理规模放大、回收设备变化时磁性吸附剂的回收率、简化再生步骤是磁性吸附剂实际推广应用的必要前提.

2.3 磁强化混凝技术的工程应用

工程中常用的磁强化混凝工艺流程如图1所示, 代表性技术有美国剑桥水务公司的CoMag™技术、青岛洛克环保科技有限公司的SediMag™技术和中建环能科技股份有限公司的MagCS磁介质混凝沉淀技术.

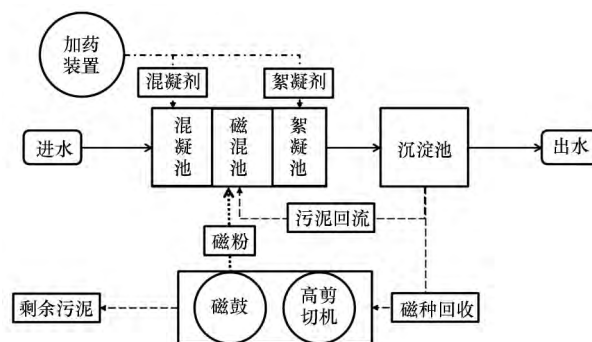


图1 磁强化混凝技术工艺流程示意图

Fig.1 Process of magnetically enhanced coagulation

磁强化混凝由4部分构成, 混凝反应池、沉淀池、加药系统和磁种回收装置, 混凝反应池又可分为混凝池, 磁混池和絮凝池. 待处理污水首先与混凝剂反应, 接着在磁混池中与磁粉碰撞形成以磁种为“核心”的微小絮体, 进一步在絮凝剂的吸附架桥作用下形成大而密实的磁性絮团, 最后污水裹杂着磁性絮团进入沉淀池, 磁性絮团与水在重力作用下分离, 进入磁种回收系统, 被高剪切机打散, 剩余污泥排出, 磁粉被磁鼓回收后在自控下配置成一定浓度的溶液回投至混凝反应池, 实现磁粉的循环利用. 同时, 部分工程中还设计了污泥回流, 剩余污泥中包含的絮凝剂和部分在一次反应中与碱度反应而未能起到除磷作用的混凝剂可以继续发挥作用, 节省药剂.

如表3所示, 在我国, 磁强化混凝技术大量应用于污水处理厂提标改造, 深度处理生化出水. 反应池水力停留时间6~20 min, 沉淀池表面负荷在 $20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右, 硫酸铝、聚合氯化铝、聚合硫酸铁均可作为混凝剂, 絮凝剂均选用阴离子聚丙烯酰胺(Polyacrylamide, PAM), 出水水质达到GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级A标准, 甚至更优. 此外, 北京市清河污水处理厂能力提升应急工程采用磁混凝-沉淀技术处理沉砂池超越废水, 停留时间为17 min, 将进水中平均浓度为 $170, 4.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的SS、TP处理至 $21, 0.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 处理后的污水通过退水管道排入清河, 拓展了磁混凝-沉淀技术的应用场景(邓大鹏等, 2011).

表 3 磁强化混凝提标改造工程案例

Table 3 Magnetically enhanced coagulation cases in upgrading and reconstruction

地点	处理规模/ (10^4 t·d ⁻¹)	反应池 HRT/min	沉淀池 表面负荷/ ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	药剂投加			出水水质/($mg \cdot L^{-1}$)				吨水运行 成本/元	参考文献
				混凝剂	PAM/ ($mg \cdot L^{-1}$)	磁粉补充/ ($mg \cdot L^{-1}$)	TP	SS	COD			
浙江	6	/	/	硫酸铝	/	/	/	/	/	/	/	施园, 2018
上海	24	9	25~40		/	/	0.3±0.2	5±3	30±3	0.05	0.05	张燕剑等, 2019
山东	8	/	/	聚合氯化铝	0.5~1.0	2.0	/	<5	/	0.03	0.03	区颖等, 2015
浙江	25	6	18		0.8~1.5	7~8	0.05~0.28	4~8	26~41	0.11	0.11	唐凯峰等, 2018
广东	8	/	/		/	/	<0.5	<10	<40	/	/	吕志国等, 2018
浙江	0.1	/	/		/	/	<0.1	<5	<50	/	/	吕志国等, 2018
青岛	20	20	20		/	/	0.02~0.55	1~17	/	0.09	0.09	霍槐槐, 2017
江西	2	12	12		/	/	<0.3	<5	/	/	/	魏锋等, 2019
天津	5	15	10.8		1	2	/	/	/	/	/	郭金玲等, 2018
辽宁	9	10	16.9		/	/	0.3~0.35	3~9	30~40	/	/	周丽颖, 2018
福建	1.5	10	20	聚合硫酸铁	0.8	5	0.2~0.4	<5	/	0.04	0.04	王国勇, 2019
山东	5.5	10	15		1~2	6~7	0.05	1.27	44.62	0.14	0.14	宋立堂, 2018
江苏	10	5.6	13.5		/	1.14	<0.32	<8	<38	/	/	熊建英, 2018

随着磁分离技术的发展,除了回收磁粉,磁性也在固液分离阶段发挥作用.磁过滤、超磁分离作为补充甚至代替重力沉淀的分离手段,可进一步缩短停留时间、节约占地面积、提高处理效率.黄开(2019)在沉淀池后,增设磁过滤器,二者结合使用有效提高了去除精度和系统稳定性.北京市北小河污水处理厂采用磁混凝-超磁分离作为一级强化处理工艺,反应阶段,絮体只需微絮凝带有磁性即可,无需形成大的絮团,分离阶段,磁盘可产生相当于640倍重力的磁力,接近“秒分”,完整处理时间最短可至3 min(周建忠等,2012).

3 磁强化活性污泥技术 (Magnetically enhanced activated sludge)

磁技术对活性污泥技术同样具有强化作用,向活性污泥体系中投加磁粉或外加磁场,磁粉分离性能和磁生化效应可改善污泥性质,强化沉淀,提高污染物去除效果.近年来,随着活性污泥技术的不断发展,磁强化研究也与时俱进,与膜生物反应器(membrane bio-reactor, MBR),好氧颗粒污泥,厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation, anammox)等新技术结合,起到促进污泥颗粒化,缓解膜污染和促进功能菌富集的作用.

3.1 磁强化活性污泥技术的起源

20世纪90年代日本学者 Ozaki 等(1991)提出了一种“新型磁性颗粒固定化污泥处理方式”,指出磁粉作为污泥颗粒固定化培养载体具有独特优势,解决了粒径选择上的两难,使用非磁性载体时,粒径越大,污泥分离性能越好,但生化反应速率受传质限制,且曝气需求高,粒径小则分离优势难以发挥.而以磁粉为载体时,污泥形成粒径小于0.25 mm的颗粒,传质效率高,易悬浮,利用磁场辅助可实现迅速分离.

随后的10年间,宇都宫大学的研究人员等对磁强化活性污泥系统进行了持续研究.首先验证了磁场辅助对磁污泥沉降性能的提升,按混合液挥发性悬浮固体浓度(mixed liquid volatile suspended solids, MLVSS):磁粉=1:1投加磁粉,初始自由沉降速度提高至对照组的2倍,外加梯度磁场后,提升3~36倍(Sakai *et al.*, 1991).1992年搭建2 L反应器连续处理合成废水中的COD和SS,分离方式采用重力沉降和磁选辅助,30 d内MLVSS稳定在15 mg·L⁻¹,未出现磁性污泥泄露(Sakai *et al.*, 1992).1994年进一步改进了分离装置,在曝气池内安装旋

转磁盘,将分离时间从40 min降低到17 min,同时发现磁盘转速过高(>5 r·min⁻¹)会导致磁性污泥泄露,转速过低(<1 r·min⁻¹)易发生厌氧反应,导致恶臭和出水浑浊,确定合理转速为3 r·min⁻¹(Sakai *et al.*, 1994).1997年开始关注氮的去除,采用40 min间歇-20 min曝气的间歇曝气方式,在290 d实验期间稳定去除约92%的SCOD和87%的总氮(total nitrogen, TN),同时通过设备优化磁分离时间进一步缩短到5 min(Sakai *et al.*, 1997).1999年发现了磁分离对污泥膨胀的抑制作用,将膨胀污泥填充进两个反应器中,90 h后磁分离反应器中污泥体积指数(sludge volume index, SVI)从200 mL·g⁻¹下降并稳定至100 mL·g⁻¹,而重力沉淀反应器中则提高到250 mL·g⁻¹,6 d后磁分离反应器中几乎观察不到丝状菌(酒井保藏等,1999).

3.2 磁强化活性污泥系统性能研究

3.2.1 生物活性 高表面活性的磁粉可充当生物催化剂,提高酶活性(Yavuz *et al.*, 2000),水解产生的Fe²⁺和Fe³⁺也可刺激生化反应,整体体现为生物活性提高,降解污染物的能力也随之增强.Ma等(2017)向SBR反应器中投加60 mg·L⁻¹纳米磁粉,比亚硝酸根降解速率、比硝酸根降解速率和比总磷降解速率均提升,出水中NO₂-N和NO₃-N的浓度显著下降.Ni等(2013)投加50 mg·L⁻¹纳米磁粉,运行60 d后,与脱氮过程密切相关的NOR、NAR、NIR酶活性提高至对照组的112%、123%和127%,TN去除率由对照组的80.3%提升至94.4%.Gao等(2014)研究发现Fe₃O₄水解出适量浓度的Fe²⁺(≤1.5 mg·L⁻¹)和Fe³⁺(≤1.9 mg·L⁻¹)有利于维持最佳ORP范围并聚集酰基高丝氨酸内酯,比厌氧氨氧化速率从0.20 kg·kg⁻¹·d⁻¹提高到0.241 kg·kg⁻¹·d⁻¹,TN去除效率稳定在95%以上.

此外,磁性物质产生或外加的磁场通过影响微生物中的带电自由基和顺磁性过渡金属原子影响酶活性,进而影响生物活动(Dursun *et al.*, 2014).Tomska等(2008)研究表明40 mT的磁场促进脱氮,凯氏氮转化率从82%提高到96%.Ji等(2010)发现在0~500 mT范围内,初期COD降解率随磁场强度的增加而增加,在20 mT时触顶,之后随着磁场强度的进一步增加而急剧下降.王强(2010)研究表明当外加磁场强度在30~90 mT之间变化时,磁场促进好氧反硝化功能菌去除氨氮,60 mT时效果最佳,大于90 mT的磁场强度导致抑制.因此,在一定范围

内,磁场促进微生物活动,但强度过高会起到灭菌作用,不同微生物的阈值存在差别。

3.2.2 生物数量 磁粉充当载体提供微生物生长场所,吸附菌胶团,促使活性污泥形成紧密的团粒结构,降低细菌流失量、提高生物量增加速度。此外磁场也可促进部分微生物的富集。从结果上看,首先磁强化活性污泥系统可维持较高的污泥浓度。Liu 等(2015)研究表明,投加磁粉后 A²O 反应器中 MLVSS 浓度从 3.47 g·L⁻¹ 增加到 7.35 g·L⁻¹;Ying 等(2010) 向间歇曝气反应器中投加磁粉,MLVSS 逐步增长至超过 4.5 g·L⁻¹;徐华正(2016)向低溶氧 A²O 反应器中投加酸改性磁粉,污泥浓度由 1.52 g·L⁻¹ 提升至 4.8 g·L⁻¹。其次,磁活性污泥系统中,世代时间长、繁殖速度慢、容易流失的微生物,例如降解有毒物质的微生物、氨氧化细菌(Ammonia Oxidizing Bacteria, AOB),更易富集。陆光立等(1998)进行苯酚去除极限实验,当苯酚浓度大于 150 mg·L⁻¹ 时,普通活性污泥系统已无脱酚能力,而磁强化活性污泥系统负荷提高到 266 mg·L⁻¹ 时酚去除率仍保持在 85% 以上。Luan 等(2019)向反应器中投加 60 mg·L⁻¹ 磁粉,提高了 AOB 活性,促进亚硝氮的富集。多项研究表明,在生物脱氮反应器外施加静磁场,也有利于 AOB 相对丰度的提高和亚硝氮的积累(Wang *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2017; Jia *et al.*, 2018)。最后,磁粉具有选择性,可抑制污泥膨胀,与絮状菌相比,丝状菌几乎无法吸附磁粉,难以进入磁性污泥絮团,固液分离时容易流失,多次循环后,曝气池中丝状菌逐渐消失,絮状菌成为优势菌种。研究表明磁活性污泥系统启动 5 d 后,镜检几乎观察不到丝状菌(陈秋芳等, 2012)。

3.2.3 污泥沉淀性能 加载磁粉后污泥比重增加、沉淀速度提升,磁场辅助沉降或磁分离可进一步提高分离效率。秦建峰(2012)发现磁性污泥在 30 min 就达到普通污泥 120 min 的沉降效果,张密林等(2005)发现磁强化将 SBR 反应器沉淀时间从 45 min 缩短至 15 min 同时提高了 COD 去除率。Ying 等(2010)设计一体式磁分离间歇曝气反应器,磁鼓在顶部旋转,活性污泥表现出对磁铁的强烈响应,迅速被吸引并稳定贴附在磁鼓表面,反应器运行 148 d 期间未排泥,在维持高污泥浓度的同时实现良好的固液分离。

3.2.4 污泥颗粒化进程 磁粉通过 3 种机理缩短造粒时间,改善颗粒污泥性质。首先是晶核效应,微

生物附着在磁粉上生长繁殖形成大量胚胎颗粒,改善反应系统的水力条件,提高有效碰撞频率(Wang *et al.*, 2009);其次是 Fe²⁺/Fe³⁺ 的作用,与 Ca²⁺、Mg²⁺ 类似,适量的 Fe²⁺、Fe³⁺ 可中和细菌表面负电荷减少静电斥力、与胞外聚合物(Extracellular Polymeric Substances, EPS)结合架桥充当微生物生长骨架、提供微生物生长所需的微量元素促进酶的合成(Wang *et al.*, 2009;肖蓬蓬等, 2012);最后磁场作为一种选择压力,可提高 EPS 产量、促进铁化合物积累从而增大絮体尺寸(Wang *et al.*, 2012)。磁粉促进污泥颗粒化已经在好氧颗粒污泥(信欣等, 2017;Liang *et al.*, 2017;Domingos *et al.*, 2019)、厌氧氨氧化颗粒污泥(Gao *et al.*, 2014)和厌氧颗粒污泥系统(宿程远等, 2018)中得到证实,缩短造粒时间、提高污泥密度、SVI、表面疏水性,140~200 目的磁粉效果最佳,尺寸过大曝气需求高,尺寸过小容易流失(信欣等, 2017)。

3.2.5 膜生物反应器污染 MBR 是城市污水处理领域最具竞争力的工艺之一,磁性物质的投加有助于缓解膜污染,解决这一限制其应用推广的主要问题。纳米磁粉直接嵌入膜中,在磁场中发生震动,可改善膜亲水性和粗糙度,起到提高膜通量、降低过滤阻力、延长持续过滤时间的效果,已在处理离子染料(Koulivand *et al.*, 2019)、Cu²⁺(Chan *et al.*, 2015)和好氧污泥过滤中(Mehrnia *et al.*, 2016; Noormohamadi *et al.*, 2019)得到应用。Semblante 等(2013)向 MBR 中直接投加纳米磁粉,短期内显著改善了好氧污泥批量过滤过程中的膜性能,由此猜想磁粉通过吸附减少蛋白质引起的膜结垢。此后有两个团队进行了持续研究。浙江工业大学王红宇团队提出磁粉+絮凝剂联合改善膜污染的技术路线,先后尝试复配磁粉+絮凝剂(Wang *et al.*, 2016)和利用壳聚糖、纤维素和淀粉改性磁粉制备磁性絮凝剂(邱川, 2017;吴昌华, 2019),通过强化污泥絮凝、促进微生物利用 EPS 减少了有机物在膜表面的沉积,从而延长可持续过滤时间。中国科学院上海高等研究院李继香团队致力于机理研究,认为磁粉的短期吸附和絮凝作用对延缓膜污染贡献较小,对微生物群落的长期影响起主导作用,磁强化 MBR 在门水平上与膜污染高度相关的拟杆菌含量更低,在纲水平上膜污染先驱细菌——β 变形杆菌和鞘氨醇杆菌膜在膜表面的定殖受到抑制,在属水平上种群丰度更高,意味着更高的稳定性,同时悬浮污泥和生

物膜污泥共有的优势菌种更少,意味着更低的膜污染倾向(Liu *et al.*, 2018; Guo *et al.*, 2019; 张王超等, 2020).此外还发现与纳米级磁粉相比,微米级磁粉表现出更优异的缓解膜污染能力.

3.3 磁强化活性污泥技术的工程应用

美国剑桥水务公司的磁生化 BioMag™ 技术和环能科技公司的 MagBr 磁介质生物反应技术是工程应用的典型代表.

BioMag™ 技术在生物反应池中直接投加磁粉,磁粉随污泥在整个系统中循环,只在排放剩余污泥时进行磁粉回收.如图 2 所示,只需要增加磁粉投加与回收设备,即可与多种活性污泥工艺,例如氧化沟、A²O、CASS、CAST、SBR 等结合,提高处理能力,使出水满足更严苛的营养物去除标准(黑国翔, 2009).以美国 Sturbridge 生活污水处理厂为例,日处理水量 20000 t,出水水质达到 BOD₅<2 mg·L⁻¹、TSS<10 mg·L⁻¹、NH₃-N 未检出、TN<5 mg·L⁻¹、TP<0.1 mg·L⁻¹、浊度<1.0 NTU,同时磁粉回收率>98%(Jimenez *et al.*, 2013).这一技术的主要瓶颈是磁粉回收装置中的剪切机寿命有限,当工艺上游不具备初沉池和细格栅时剪切机容易磨损堵塞,中断运行或造成磁粉流失(Dursun *et al.*, 2014).

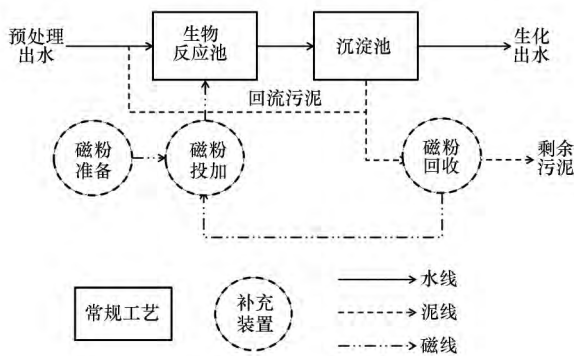


图 2 BioMag™ 技术工艺流程示意图

Fig.2 Process flow diagram of BioMag™

MagBR 技术是环能科技在传统生物移动床工艺基础上创新开发出的复合设备化技术,具有“投加填料”和“一体化”的特点,在生物池中投加的磁性悬浮填料具有高亲水性、高比表面积、高流化性的优势,同时装置一体化,搭建速度快,便于移动,尤其适合应急污染处理处置.MagBR 已应用于北京、四川、湖北等地的河道水质提升、农村污水治理和污水处理厂溢流污染控制工程(孙竟, 2017).

4 磁强化剩余污泥处理技术 (Magnetically enhanced excess sludge treatment)

剩余污泥是城市污水处理的主要副产物,数量庞大,目前我国的剩余污泥年产量已超过 4×10^7 t (含水率 80% 计)(陈思思等, 2020).剩余污泥中含有有机物、营养元素和重金属等,将其作为危险废物处理处置不仅带来高昂的费用,也会造成浪费,2015 年颁布的《水污染防治行动计划》中明确指出“污水处理设施产生的污泥应进行稳定化、无害化和资源化处理处置”.本节介绍两种磁强化剩余污泥处理技术:磁强化厌氧消化和磁性剩余污泥吸附材料制备.

4.1 磁强化污泥厌氧消化技术

全世界有 100 万座以上的污水处理厂采用厌氧消化技术处理剩余污泥(黄惠莹, 2018).磁铁矿作为导电材料可促进厌氧系统中的物种间直接电子转移(direct interspecies electron Transfer, DIET), Baek 等(2014; 2015; 2016; 2017)以乳清废水为基质进行系列厌氧试验, 20 mmol·L⁻¹磁铁矿(以 Fe 计)有效提升甲烷产率和系统稳定性,在不补加磁粉的情况下,厌氧消化反应器可稳定运行超过 250 d.

磁性物质对剩余污泥厌氧消化的促进效果已得到证实.Peng 等(2018)投加 27 g·L⁻¹磁铁矿,甲烷累积产量增加 13.1%,消化池中 VFAs 平均浓度提高了 12.0%.Suanon 等(2016)分别以质量比 0.5% 和 1% 混合脱水剩余污泥与纳米级磁铁矿,中温厌氧发酵实验结果表明低浓度的磁铁矿提高了沼气产量(26%)和甲烷比例(10%),同时有利于金属的稳定化和磷元素的固定,但高浓度的磁铁矿产生抑制,沼气产量降低了 11.5%.近年有机理研究表明磁铁矿通过促进厌氧中的水解酸化过程,为产甲烷提供丰富的底物,而非直接促进产甲烷过程.Zhao 等(2018)通过多点采样、调控产气分别研究了剩余污泥厌氧消化中的“增溶,水解,酸化和产甲烷”四阶段,发现磁铁矿通过异化铁还原作用促进前三阶段,但在产甲烷过程中作为电子受体竞争电子,从而抑制甲烷的产生.

由于回收率不能达到 100%,前文所述的磁强化污水处理系统产生的剩余污泥会携带部分磁粉,这种含磁剩余污泥的厌氧消化性能也得到了研究人员的关注.北京市东坝污水处理厂长期运行中试规模“磁混凝-超磁分离”设备,在细格栅后生化池前对生活污水进行预浓缩,何秋杭(2018b)对比了

磁污泥与同厂剩余污泥,水解实验中磁污泥水解快,SCOD 和挥发性脂肪酸(volatile fatty acid, VFA)浓度高,产气实验中磁污泥甲烷产率和最大产甲烷速率均更高.同时,磁污泥厌氧系统具有更强的抗冲击负荷能力,接种比(基质/接种污泥)从 0.25 提高到 0.5 时,磁污泥的产气变化不明显而剩余污泥甲烷产量降低了一半.赵峰辉等(2019)研究了 20~35 °C 范围内温度对磁污泥厌氧水解酸化产物及产率的影响,结果表明,随着温度的升高,磁污泥水解酸化速率加快,VFA 产量提升,乙酸占比提高,但氮元素释放也增强,30 °C 是合理选择.刘杰等(2020)研究了磁污泥与剩余污泥的协同水解酸化,控制剩余污泥接种比例在 13%左右,可提升 VFA 产量同时避免氮负荷过高.

剩余污泥普遍存在无机质比例过高的问题,与餐厨垃圾、畜禽粪便等有机废弃物共消化是常见措施.现有研究表明磁性物质对猪粪(Liu *et al.*, 2019)、水牛粪(Noonari *et al.*, 2019)、混合畜禽粪便(Abdelsalam *et al.*, 2017)、油菜籽提取废弃物和香蕉厂废弃物(Noonari *et al.*, 2019)等厌氧消化系统均具有促进作用,其对共消化系统的影响值得进一步研究.

4.2 磁性剩余污泥吸附材料

剩余污泥中含有死亡细菌、酵母、真菌和微藻,表面含有丰富的羟基、氨基和羰基等官能团,是潜在的吸附剂制备原料(Maderova *et al.*, 2016).但剩余污泥干化后比表面积较低、分离回收困难,应用受到限制.负载磁性物质可增加离子吸附位点,利用磁场实现快速分离.优化材料性能是目前此类研究的重点,基本制备方法包括干燥剩余污泥与铁盐溶液共沉淀和预制备 Fe_3O_4 与剩余污泥直接混合.比表面积、稳定性,对不同目标污染物的吸附容量和解吸重复性是关键指标.

Hu 等(2014)将干燥污泥与 FeSO_4 、 FeCl_3 溶液(优化 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}=1$)混合,90 °C 碱性环境中共沉淀, Fe_3O_4 结晶到材料表面强化了对离子染料和 COD 的吸附.陈力等(2017)进行正交试验分析出调控参数按重要性排序为磁化温度 > $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ > 磁泥比. Ifthikar 等(2017)将 ZnCl_2 拓孔的剩余污泥和 FeCl_3 、 FeSO_4 溶液混合室温共沉淀,负载 Fe_3O_4 后吸附材料比表面积从 $40.96 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 提高到 $103.35 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,对铅的吸附容量从 $44.91 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 提高到 $249.00 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,5 个周期内解吸效率高于 90%.

Maderova 等(2016)研发直接混合方法:微波辐射法合成的磁性氧化铁微粒(25~100 nm)与热处理剩余污泥按干重 1:2 在室温下 $25 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 混合 30 min.磁性颗粒与污泥中微生物和胞外物质结合,形成直径在数十到数百微米之间的磁性絮状吸附剂,对碱性染料苯胺蓝,尼罗蓝,俾氏麦棕和番红的吸附容量分别达到 768.2、246.9、515.1 和 $326.8 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,吸附结束后永磁铁可在 20 s 内分离出材料.Liu 等(2019)将化学共沉淀法制备的磁性 Fe_3O_4 纳米粒子修饰到剩余污泥表面,制得材料对 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 的吸附容量分别为 $72.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $71.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,使用有机溶剂解吸,4 次循环后解吸效率为 88.2% 和 87.1%.

此外 Gu 等(2017)提出电芬顿活化技术,双层铁板阳极提供的 Fe^{2+} 与水中溶解氧生成的 H_2O_2 反应,生成的 Fe^{3+} 在污泥分解再稳定过程中吸附在絮体表面.与共沉淀相比,电芬顿法制备的生物炭尺寸小,比表面积大,孔隙度高,铁浸出率低.

为推动磁性剩余污泥吸附材料的实际应用,除了进一步优化材料性能外,有必要研发易于放大的制备与再生方法并进行详尽的经济性评估.

5 磁强化处理技术未来应用展望与建议 (Prospects and suggestions for future applications)

5.1 磁技术在实现城市污水处理厂能量平衡中的应用

城市污水是待处理废物更是潜在资源,随着污水处理观念的不断革新,碳中和、能量平衡正成为热门话题(Kartal *et al.*, 2010; Hao *et al.*, 2015),McCarty 等(2011)更指出通过节能降耗,污水处理有望从能源消费者转变为生产者.如图 3 所示,通过“革命”或“改造”两种技术路线均可推动基于活性污泥(conventional activated sludge, CAS)的传统技术路线转变为“能量平衡”的污水处理技术,磁强化在各个环节中大有用武之地.

“改造”路线致力于在传统污水处理的基础上开源节流,一方面,强化能量回收,设置热泵回收热能(Hao *et al.*, 2015),提高厌氧消化设施的运行率(McCarty *et al.*, 2011)、以空置负荷共消化外源有机废物(Hao *et al.*, 2015)尽可能回收化学能,磁性物质可强化厌氧过程;另一方面降低能耗,好氧颗粒污泥将不同空间中的反应集中于颗粒污泥内部

的分层结构,可显著节约泵送污水污泥的能耗(van Loosdrecht *et al.*, 2014),磁性物质可加速污泥的颗

粒化进程并且提高系统稳定性.

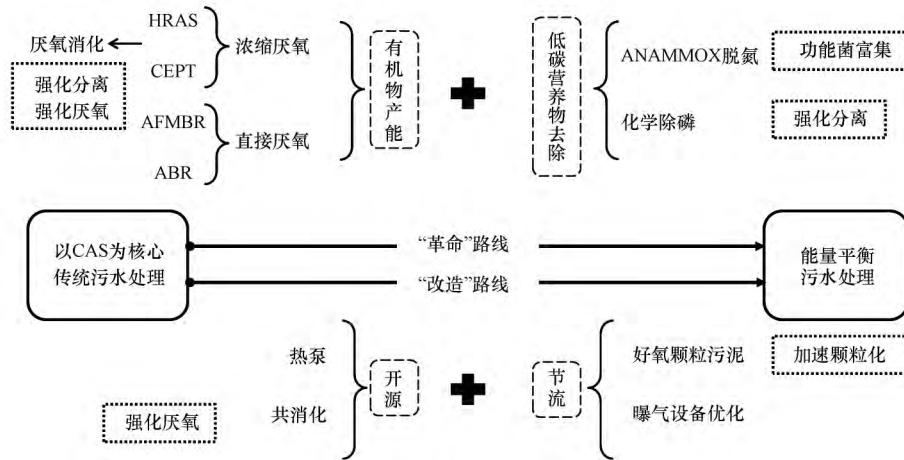


图3 磁强化技术在实现城市污水处理能量平衡中的应用

Fig.3 Application of magnetically enhanced treatment towards the energy neutrality of municipal sewage treatment

“革命”路线则彻底突破以CAS为核心的限制,将其实现有机物和营养物去除的功能拆分到“有机物产能”和“低碳营养物去除”两个环节(刘智晓, 2017).上游环节最大化提取污水中有机物以厌氧方式实现化学能回收.当城市污水不满足直接厌氧的有机物浓度要求时,常采用高负荷活性污泥法(high rate activated sludge, HRAS)或化学强化一级处理(chemically enhanced primary treatment, CEPT)通过生物絮凝吸附或化学混凝捕获有机物,实现污水的预浓缩(Guven *et al.*, 2019),浓缩效率与固液分离效率密切相关,磁混凝沉淀和磁分离可优化基于重力的固液分离方式,强化浓缩效果.近年来污水直接厌氧的可行性也得到关注,厌氧流化膜生物反应器(anaerobic fluidized membrane bioreactor, AFMBR)(McCarty *et al.*, 2011)或厌氧折流板反应器(anaerobic baffled reactor, ABR)(Hao *et al.*, 2015)可将浓缩与厌氧合二为一,AFMBR和ABR系统中的磁强化效应尚未得到证实,但参考上流式厌氧污泥床(马凯丽等, 2020)、厌氧SBR(Xu *et al.*, 2008)中的强化效应,磁强化在生活污水直接厌氧处理中具有应用前景值得进一步探究.提取有机物后,污水贫有机物富营养物,需进一步处理以满足排放或回用标准,这对营养物去除技术提出不依赖碳源的新要求.针对氮,基于anammox的生物脱氮技术具有节约曝气和不需外加碳源的优势(Kartal *et al.*, 2010),磁效应可促进功能菌富集,加速系统启动和稳定;针对磷,磁混凝沉淀技术本身即是化学除磷

领域的佼佼者.

磁强化技术在实现城市污水处理厂能量平衡中具有广阔的应用前景,未来应系统分析设计多种磁强化处理技术联合使用的可能性及不同处理单元间的相互作用.

5.2 磁技术在城市污水处理厂溢流污染控制中的应用

在暴雨等高降水量时期,合流制排水系统中水量陡增超过污水厂设计处理能力的现象称为合流制排水系统污水溢流(Combined Sewer Overflows, CSOs),CSOs具有瞬时水量大、固体悬浮物含量高、污染负荷高等特点,直接进入水体会造成严重的环境污染,CSOs控制是世界范围内水环境治理普遍面临的难题,按干预阶段可划分为源头控制,过程控制和末端控制.其中末端控制着眼于污水处理厂内,可进一步分为3个层次,雨量较小时利用贮水池存放溢流量,晴天时分批并入常规处理流程进行完全处理;雨量进一步提升时,利用侧流旋流分离器、高效沉淀池等简单处理后排放;大暴雨时水量超出贮水池和侧流处理能力,直接超越排放(麦穗海等, 2004;唐磊等, 2012).这一体系存在的问题包括处理程度低,侧流多为物化手段对营养物质处理能力不足,且旱季设备空置(高郑娟等, 2019).

磁强化活性污泥技术可提升污水处理厂CSOs处理能力.工程经验表明将普通活性污泥升级为磁活性污泥,可在不增加占地面积的前提下将处理能力提高到3倍,同时模块化的磁种投加回收设备和

城市污水厂中自有的各种形式生物反应池均可简便结合.因此如图 4 所示的“旱季:普通活性污泥+雨季:磁活性污泥”理论上是实现 CSOs 污染末端控制的可行方案,初沉池可以同样的方式升级为磁强化混凝池,同步提升预处理能力.未来需进一步探讨实际操作中启动时间、设备磨损等具体问题.

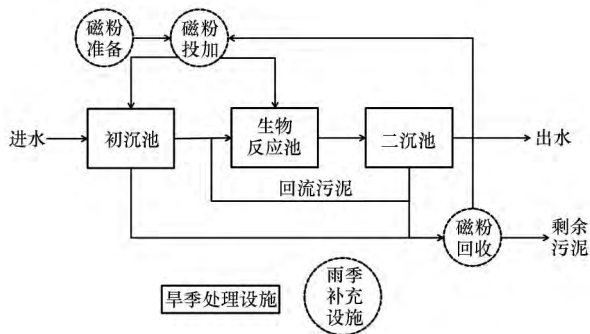


图 4 磁强化技术在实现 CSOs 污染控制中的应用

Fig.4 Application of magnetically enhanced treatment towards the control of CSOs pollution

5.3 磁技术在城市污水处理厂推广应用的问题与挑战

磁分离技术在城市污水处理领域极具潜力,但进一步的推广应用仍面临问题与挑战,可重点关注以下 3 方面、进一步展开研究.

①磁种优化.磁种的选择、制备和回收是磁强化技术的核心,决定了性能优势与成本效益.首先,在选择磁种时,应考虑目标物质的不同,结合技术的不同,识别关键因素例如表面性质、密度、尺寸、磁性,进行针对性的筛选优化;其次,实验研究中通常使用商业磁种,放大到实际工程中成本问题突出,应探究利用廉价磁种的可行性,例如 2.2.2 节讨论的基于工业废物的磁种;最后,磁强化设备运行的效果稳定性与成本高度依赖于磁种回收率,这也是实际工程与小型实验存在偏差的主要原因之一,从磁种出发,解决剩磁问题、耐腐蚀问题、与污染物活性污泥的分离问题都是稳定提高磁种回收率的可行途径.

②磁分离设备研发.高效低耗的设备是将理论应用于实践的必备条件,新型磁分离设备的研发能够促进磁强化技术的进一步推广.这里的磁分离设备有两层含义,一是实现磁种回收的磁分离设备,与磁种优化双管齐下最终实现磁种回收率的提高;二是实现固液分离的磁分离设备,代替重力沉淀,利用磁种对磁场的响应,进一步提高分离效率,最

大化磁强化技术的分离优势.

③机理挖掘.机理研究是技术创新的基石.近年来,在加载絮凝领域出现多种直观的絮体追踪表征方法,可借鉴利用新技术,明确磁种与污染物的结合机制,磁性絮体的运动与相互作用关系,以指导磁分离设研发备,关键参数识别与药剂精准投加.

6 结论(Conclusions)

1) 磁强化混凝技术具有药剂消耗量低,停留时间短的优势,在深度处理单元已经得到了广泛的应用.未来应关注协同吸附作用强化溶解性物质的去除,以磁分离代替重力沉淀进一步提升分离效率,以及应用场景的拓展.

2) 磁强化活性污泥系统生物活性高、数量大同时污泥沉降性能优越.随着活性污泥技术的发展,磁效应在颗粒污泥,膜生物反应器和以厌氧氨氧化为基础的的新型生物脱氮体系中均可起到强化作用.

3) 磁技术可促进剩余污泥向能源与资源的转化,一方面强化厌氧消化产能,另一方面可制备高效易分离的剩余污泥磁性吸附材料.

4) 磁强化技术在实现城市污水厂能量平衡和 CSOs 污染控制中都大有可为,具有广阔的应用前景.

责任作者简介:王凯军(1960—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为水污染控制与资源化.E-mail: wjk@mail.tsinghua.edu.cn.

参考文献(References):

- Abdelsalam E, Samer M, Attia Y A, *et al.* 2017. Influence of zero valent iron nanoparticles and magnetic iron oxide nanoparticles on biogas and methane production from anaerobic digestion of manure [J]. *Energy*, 120: 842-853
- Baek G, Jung H, Kim J, *et al.* 2017. A long-term study on the effect of magnetite supplementation in continuous anaerobic digestion of dairy effluent - Magnetic separation and recycling of magnetite [J]. *Bioresource Technology*, 241: 830-840
- Baek G, Kim J, Cho K, *et al.* 2015. The biostimulation of anaerobic digestion with (semi) conductive ferric oxides; their potential for enhanced biomethanation [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99(23): 10355-10366
- Baek G, Kim J, Lee C. 2016. A long-term study on the effect of magnetite supplementation in continuous anaerobic digestion of dairy effluent - Enhancement in process performance and stability [J]. *Bioresource Technology*, 222: 344-354
- Baek G, Kim J, Lee C. 2014. Influence of ferric oxyhydroxide addition on biomethanation of waste activated sludge in a continuous reactor

- [J]. *Bioresour Technology*, 166: 596-601
- Chan K H, Wong E T, Irfan M, *et al.* 2015. Enhanced Cu(II) rejection and fouling reduction through fabrication of PEG-PES nanocomposite ultrafiltration membrane with PEG-coated cobalt doped iron oxide nanoparticle [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 47: 50-58
- 常会, 范文娟, 曾成华, 等. 2019. 氨基功能化磁性氧化石墨烯吸附亚甲基蓝的性能探讨[J]. *冶金分析*, 39(8): 52-60
- 陈力, 邵骏, 杨姗姗, 等. 2017. 磁性泥质活性炭最佳制备工艺条件[J]. *西安工程大学学报*, 31(4): 445-450
- 陈秋芳, 农文贵, 崔巍. 2012. 磁技术在污水处理中的作用机理及应用[J]. *环境科学与管理*, 37(8): 110-114
- 陈思思, 杨殿海, 庞维海, 等. 2020. 我国剩余污泥厌氧转化的主要影响因素及影响机制研究进展[J]. *化工进展*, 39(04): 1511-1520
- 陈文松, 韦朝海, 韩虹. 2004. 磁性絮团形成的最佳参数及机理研究[J]. *四川环境*, (01): 1-4
- 陈啸, 伍喜庆, 岳涛, 等. 2019. 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*, 41(11): 1313-1318
- 陈瑜, 李军, 陈旭姿, 等. 2011. 磁絮凝强化污水处理的试验研究[J]. *中国给水排水*, 27(17): 78-81
- Chen Y, Luo M, Cai W. 2016. Influence of operating parameters on the performance of magnetic seeding flocculation [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(3): 2873-2881
- 储旭. 2016. 磁吸附强化混凝深度处理制药废水生化尾水研究[D]. 南京: 南京大学. 128
- 崔凤国, 杨鹏, 张伟军, 等. 2015. 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*, 9(9): 4359-4364
- 单国彬, 张冠东, 田青, 等. 2004. 磁性活性炭的制备与表征[J]. *过程工程学报*, (2): 141-145
- 邓大鹏, 董惠芳, 李大功, 等. 2011. 磁分离技术的工程应用实践[J]. *中国给水排水*, 27(18): 83-86
- Domingos D G, Henriques R O, Xavier J A, *et al.* 2019. Increasing activated sludge aggregation by magnetite nanoparticles addition[J]. *Water Science and Technology*, 79(5): 993-999
- Duan M F, Xie Q J, Liu X, *et al.* 2011. Optimum Condition for Magnetic Coagulation Treatment of Municipal Sewer Overflow[Z]. *IEEE*. 1-4
- 段志辉, 李彦, 李光柱, 等. 2019. 磁絮凝深度处理生活污水[J]. *中国农村水利水电*, (7): 110-113
- Dursun D, Jimenez J. 2014. Getting more out of activated sludge plants by using a biomag process[J]. *Florida Water Resources Journal*, 1: 62-66
- Falahian Z, Torki F, Faghilhan H. 2018. Synthesis and application of polypyrrole /Fe₃O₄ nanosize magnetic adsorbent for efficient separation of Hg²⁺ from Aqueous solution[J]. *Global Challenges*, 2(1): 1700078
- Gao F, Zhang H, Yang F, *et al.* 2014. The effects of zero-valent iron (ZVI) and ferrous oxide (Fe₃O₄) on anammox activity and granulation in anaerobic continuously stirred tank reactors (CSTR) [J]. *Process Biochemistry*, 49(11): 1970-1978
- 高郑娟, 孙朝霞, 贾海峰. 2019. 旋流分离技术在雨水径流和合流制溢流污染控制中的应用进展[J]. *建设科技*, (Z1): 96-100
- Gu L, Li C, Wen H, *et al.* 2017. Facile synthesis of magnetic sludge-based carbons by using Electro-Fenton activation and its performance in dye degradation[J]. *Bioresour Technology*, 241: 391-396
- Guo H, Hu J, Li J, *et al.* 2019. Systematic insight into the short-term and long-term effects of magnetic microparticles and nanoparticles on critical flux in membrane bioreactors [J]. *Journal of Membrane Science*, 582: 284-288
- 郭金玲, 张长华, 陈凡阵. 2018. 污水处理厂应急提标工程实例[J]. *供水技术*, 12(6): 39-43
- 郭丽燕, 马伟, 扈振友, 等. 2001. 赋磁活性炭粉去除饮用水中的有机物[J]. *中国给水排水*, (2): 71-72
- 郭玥, 杜磊, 李庆, 等. 2016. 不同铝系混凝剂处理印染废水[J]. *环境工程学报*, 10(4): 1847-1852
- Guvén H, Dereli R K, Ozgun H, *et al.* 2019. Towards sustainable and energy efficient municipal wastewater treatment by up-concentration of organics [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 70: 145-168
- Hao X D, Batstone D, Guest J S. 2015. Carbon neutrality: An ultimate goal towards sustainable wastewater treatment plants [J]. *Water Research*, 87: 413-415
- 何秋杭, 金正宇, 宫徽, 等. 2018b. 基于强化磁分离的市政污水碳源浓缩技术研究[J]. *水处理技术*, 44(10): 114-118
- 何秋杭. 2018a. 强化磁分离污水碳源浓缩资源化技术研究[D]. 北京: 清华大学
- He W P, Xi Z L, Lu W J, *et al.* 2019. Comparative analysis on floc growth behaviors during ballasted flocculation by using aluminum sulphate (AS) and polyaluminum chloride (PACl) as coagulants [J]. *Separation and Purification Technology*, 213: 176-185
- 黑国翔. 2009. 高效磁分离 CoMag™ 与磁生化 BioMag™ 技术介绍 [C]. 全国城镇污水处理及污泥处理处置技术高级研讨会, 中国云南昆明
- 胡家玮, 李军, 卞伟. 2014. 城市废水磁混凝预处理及其表征分析[J]. *给水排水*, 50(S1): 221-225
- 胡家玮, 李军, 于凤芹, 等. 2013. 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*, 39(3): 459-465
- Hu S, Hu S. 2014. Kinetics of ionic dyes adsorption with magnetic-modified sewage sludge [J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(3): 905-912
- 黄光华, 王哲晓, 吉青青, 等. 2019. 超磁分离污泥脱水性能影响因素的研究[J]. *节能与环保*, (10): 79-81
- 黄惠莹. 2018. 国内剩余污泥厌氧消化强化处理研究进展[J]. *中国沼气*, 36(4): 29-32
- 黄开. 2019. 磁加载沉淀-磁过滤在混合市政污水深度处理工程中的应用[J]. *给水排水*, 55(6): 35-39
- 霍槐槐. 2017. 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*, 33(8): 53-56
- Ifthikar J, Wang J, Wang Q, *et al.* 2017. Highly efficient lead distribution by magnetic sewage sludge biochar: Sorption mechanisms and bench applications [J]. *Bioresour Technology*, 238: 399-406
- Ji Y, Wang Y, Sun J, *et al.* 2010. Enhancement of biological treatment of wastewater by magnetic field [J]. *Bioresour Technology*, 101

- (22): 8535-8540
- Jia W, Zhang J, Lu Y, *et al.* 2018. Response of nitrite accumulation and microbial characteristics to low-intensity static magnetic field during partial nitrification[J]. *Bioresource Technology*, 259: 214-220
- 蒋海, 安琳, 欧芳. 2012. 磁混凝沉淀技术在城市污水处理中的应用[J]. *市政技术*, 30(1): 108-110
- Jimenez J, Woodard S, Vareika M, *et al.* 2013. Improving Simultaneous Nitrogen Removal Performance through Magnetite Addition [C]. *WEF / IWA Nutrient Removal and Recovery: Trends in Resource Recovery and Use*, Vancouver
- 酒井保藏, 高橋不二雄. 1999. 磁気分離法による活性汚泥中の糸状菌とフロック形成菌の分離[J]. *水環境学会誌*, 22(4): 323-326
- Kartal B, Kuenen J G, van Loosdrecht M C M. 2010. Sewage Treatment with Anammox[J]. *Science*, 328(5979): 702
- Koulivand H, Shahbazi A, Vatanpour V. 2019. Fabrication and characterization of a high-flux and antifouling polyethersulfone membrane for dye removal by embedding Fe₃O₄-MDA nanoparticles [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 145: 64-75
- Kristiana I, Joll C, Heitz A. 2011. Powdered activated carbon coupled with enhanced coagulation for natural organic matter removal and disinfection by-product control: Application in a Western Australian water treatment plant[J]. *Chemosphere*, 83(5): 661-667
- 李静, 邵孝候, 林锴, 等. 2020. 纳米 Fe₃O₄ 负载酸改性炭对水体中 Pb²⁺、Cd²⁺ 的吸附[J]. *农业资源与环境学报*, 37(2): 241-251
- 李晶, 张鹏, 黄海明, 等. 2020. 镧基改性 Fe₃O₄ 吸附废水中磷酸盐研究[J]. *燕山大学学报*, 44(1): 75-80
- 李娜, 权贵鹏, 敖玉辉, 等. 2020. 季铵化卤胺聚合物改性 Fe₃O₄@SiO₂ 纳米粒子的制备及抗菌性能研究[J]. *化工新型材料*, 48(1): 110-114
- Liang X, Gao B, Ni S. 2017. Effects of magnetic nanoparticles on aerobic granulation process[J]. *Bioresource Technology*, 227: 44-49
- 刘成, 黄廷林, 赵建伟. 2006. 混凝、粉末活性炭吸附对不同分子量有机物的去除[J]. *净水技术*, (1): 31-33
- Liu C, Tong Q, Li Y, *et al.* 2019. Biogas production and metal passivation analysis during anaerobic digestion of pig manure: effects of a magnetic Fe₃O₄/FA composite supplement[J]. *RSC Advances*, 9(8): 4488-4498
- 刘杰, 赵峰辉, 于德爽, 等. 2020. 超磁分离污泥与剩余污泥协同水解酸化[J]. *环境工程学报*, 14(1): 86-95
- Liu P, Li H, Liu X, *et al.* 2020. Preparation of magnetic biochar obtained from one-step pyrolysis of salix mongolica and investigation into adsorption behavior of sulfadimidine sodium and norfloxacin in aqueous solution[J]. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 41(2): 214-226
- Liu Y, Li J, Guo W, *et al.* 2018. Use of magnetic powder to effectively improve the performance of sequencing batch reactors (SBRs) in municipal wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 248: 135-139
- Liu Y, Liu Q, Li J, *et al.* 2018. Effect of magnetic powder on membrane fouling mitigation and microbial community/composition in membrane bioreactors (MBRs) for municipal wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 249: 377-385
- Liu Y, Yang Q, Feng R, *et al.* 2019. A magnetic activated sludge for Cu(II) and Cd(II) removal: adsorption performance and mechanism studies [J]. *New Journal of Chemistry*, 43(46): 1862-1871
- 刘智晓. 2017. 未来污水处理能源自给新途径——碳源捕获及碳源改向[J]. *中国给水排水*, 33(8): 43-52
- Liu Z, Liang Z, Wu S, *et al.* 2015. Treatment of municipal wastewater by a magnetic activated sludge device[J]. *Desalination and Water Treatment*, 53(4): 909-918
- 陆光立, 赵庆祥. 1998. 磁粉活性污泥法工艺技术研究[J]. *城市环境与城市生态*, 11(2): 10-12
- Luan J, Wang J, Zhu L. 2019. Effect of magnetic field on denitrification of anaerobic ammonia oxidation [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 592: 12096
- 吕志国, 王哲晓, 张勤. 2018. MagCS 磁介质混凝沉淀技术介绍及应用[C]. 2018(第六届)中国水生态大会, 中国江苏南京: 6
- Ma B, Wang S, Li Z, *et al.* 2017. Magnetic Fe₃O₄ nanoparticles induced effects on performance and microbial community of activated sludge from a sequencing batch reactor under long-term exposure [J]. *Bioresource Technology*, 225: 377-385
- 马放, 周家晖, 郭海娟, 等. 2016. 磁性活性炭的制备及其吸附性能[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 48(2): 50-56
- 马凯丽, 李锡林, 朱振奎, 等. 2020. Fe₃O₄ 对厌氧处理系统的强化作用研究[J]. *环境科学学报*, 40(6): 2111-2117.
- Maderoza Z, Baldikova E, Pospiskova K, *et al.* 2016. Removal of dyes by adsorption on magnetically modified activated sludge [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(7): 1653-1664
- 麦穗海, 黄翔峰, 汪正亮, 等. 2004. 合流制排水系统污水溢流污染控制技术进展[J]. *四川环境*, (3): 18-21
- Mecarty P L, Bae J, Kim J. 2011. Domestic wastewater treatment as a net energy producer-can this be achieved? [J]. *Environmental Science & Technology*, 45(17): 7100-7106
- Mehrnia M R, Homayoonfal M. 2016. Fouling mitigation behavior of magnetic responsive nanocomposite membranes in a magnetic membrane bioreactor [J]. *Journal of Membrane Science*, 520: 881-894
- Ming Z, Yu C, Li X, *et al.* 2018. Enhanced removal of bio-refractory dissolved organic matter from cassava distillery wastewater by powdered activated carbon-ballasted coagulation: Detailed study of separation characteristics and mechanisms[J]. *Chemosphere*, 211: 1054-1064
- 莫冰玉, 唐玉斌, 陈芳艳, 等. 2015. 磁性活性炭的制备及其对水中甲基橙的吸附[J]. *环境工程学报*, 9(4): 1863-1868
- Mooser G D, Roach K A, Green W H, *et al.* 2004. High - gradient magnetic separation of coated magnetic nanoparticles [J]. *AIChE Journal*, 50(11): 2835-2848
- Ni S, Ni J, Yang N, *et al.* 2013. Effect of magnetic nanoparticles on the performance of activated sludge treatment system [J]. *Bioresource Technology*, 143: 555-561
- Noonari A A, Mahar R B, Sahito A R, *et al.* 2019. Anaerobic co-

- digestion of canola straw and banana plant wastes with buffalo dung: Effect of Fe_3O_4 nanoparticles on methane yield [J]. *Renewable Energy*, 133(C): 1046-1054
- Noormohamadi A, Homayoonfal M, Mehrnia M R, *et al.* 2019. Employing magnetism of Fe_3O_4 and hydrophilicity of ZrO_2 to mitigate biofouling in magnetic MBR by Fe_3O_4 -coated ZrO_2 /PAN nanocomposite membrane [J]. *Environ Technol*, 41 (20): 2683-2704
- Oliveira L C A, Rios R V R A, Fabris J D, *et al.* 2002. Activated carbon/iron oxide magnetic composites for the adsorption of contaminants in water[J]. *Carbon*, 40(12): 2177-2183
- Ozaki H, Liu Z, Terashima Y. 1991. Utilization of Microorganisms Immobilized with Magnetic Particles for Sewage and Wastewater Treatment [J]. *Water Science and Technology*, 23 (4/6): 1125-1136
- Parker M. 1977. The physics of magnetic separation [J]. *Contemporary Physics*, 18(3): 28
- Peng H, Zhang Y, Tan D, *et al.* 2018. Roles of magnetite and granular activated carbon in improvement of anaerobic sludge digestion[J]. *Bioresource Technology*, 249: 666-672
- 钱帆, 赵南翔, 刘兴宏, 等. 2020. 巯基改性纳米 Fe_3O_4 分离富集-火焰原子吸收法测定水样中的铅[J]. *山东化工*, 49(2): 96-97
- 秦建峰. 2012. 磁絮凝强化城市污水处理的试验研究[D]. 太原: 太原理工大学. 76
- 邱川. 2017. 壳聚糖耦合四氧化三铁 (Fe_3O_4 /CS) 对减缓 MBR 膜污染速率的应用研究[D]. 杭州: 浙江工业大学
- 区颖, 黑国翔. 2015. 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*, 35(5): 31-32
- Sakai Y, Kurakata S, Takahashi F. 1991. Magnetic forced sedimentation of flocs in activated sludge supplemented with ferromagnetic powder of iron oxide[J]. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 71 (3): 208-210
- Sakai Y, Tani K, Takahashi F. 1992. Sewage treatment under conditions of balancing microbial growth and cell decay with a high concentration of activated sludge supplemented with ferromagnetic powder[J]. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 74(6): 413-415
- Sakai Y, Terakado T, Takahashi F. 1994. A sewage treatment process using highly condensed activated sludge with an apparatus for magnetic separation [J]. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 78(1): 120-122
- Sakai Y, Miama T, Takahashi F. 1997. Simultaneous removal of organic and nitrogen compounds in intermittently aerated activated sludge process using magnetic separation [J]. *Water Research*, 31 (8): 2116
- Semblante G U, Tampubolon S D R, You S, *et al.* 2013. Fouling reduction in membrane reactor through magnetic particles [J]. *Journal of Membrane Science*, 435: 62-70
- 施园. 2018. 磁混凝澄清工艺在污水厂提标中的应用[J]. *水处理技术*, 44(11): 136-137
- 石宝友. 2019. 絮凝技术新进展: 仿生絮凝剂广谱去除水体污染物[J]. *环境工程学报*, 13(3): 505-506
- 宋立堂. 2018. 磁混凝沉淀工艺在污水处理中的应用[J]. *市政技术*, 36(4): 192-194
- Su Z, Li X, Yang Y, *et al.* 2016. Optimization of magnetic-seeding coagulation in artificially polluted surface water treatment by response surface methodology [J]. *Desalination and Water Treatment*, 57(44): 20671-20682
- Suanon F, Sun Q, Mama D, *et al.* 2016. Effect of nanoscale zero-valent iron and magnetite (Fe_3O_4) on the fate of metals during anaerobic digestion of sludge[J]. *Water Research*, 88: 897-903
- 孙竞. 2017. MagBR-MBBR 一体化磁性生物膜污水处理技术与应用 [Z]. 中国福建厦门: 1483-1490
- Sun X, Li Q, Yang L, *et al.* 2016. Removal of chromium (VI) from wastewater using weakly and strongly basic magnetic adsorbents: adsorption/desorption property and mechanism comparative studies [J]. *RSC Advances*, 6(22): 18471-18482
- Szlachta M, Adamski W. 2009. Effects of natural organic matter removal by integrated processes: alum coagulation and PAC-adsorption [J]. *Water Science & Technology*, 59(10): 1951-1957
- 唐凯峰, 王旭阳, 赵乐军, 等. 2018. 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*, 54(10): 35-39
- 唐磊, 车伍, 赵杨, 等. 2012. 合流制溢流污染控制系统决策[J]. *给水排水*, 48(7): 28-34
- 唐文强, 高艳蓉, 何志鹏, 等. 2019. 功能性 Fe_3O_4 @ SiO_2 核-壳纳米复合材料应用研究进展[J]. *工业催化*, 27(11): 1-6
- 田萌, 东赫, 王芳, 等. 2013. 磁性活性炭对 Cr(VI) 的吸附等温线测定[J]. *电镀与环保*, 33(6): 39-42
- Tomaszewska M, Mozia S, Morawski A W. 2004. Removal of organic matter by coagulation enhanced with adsorption on PAC [J]. *Desalination*, 161(1): 79-87
- Tomska A, Wolny L. 2008. Enhancement of biological wastewater treatment by magnetic field exposure[J]. *Desalination*, 222(1/3): 368-373
- Uyak V, Yavuz S, Toroz I, *et al.* 2007. Disinfection by-products precursors removal by enhanced coagulation and PAC adsorption [J]. *Desalination*, 216(1/3): 334-344
- van, Loosdrecht M C M, Damir B. 2014. Anticipating the next century of wastewater treatment [J]. *Science*, 344: 1452-1453
- Wang F, Lu S, Wei Y, *et al.* 2009. Characteristics of aerobic granule and nitrogen and phosphorus removal in a SBR [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 164(2): 1223-1227
- 王国勇. 2019. SediMag[®] 磁絮凝沉淀技术在污水处理厂深度处理中的应用 [Z]. 中国北京: 218-220
- Wang H, Chen Z, Miao J, *et al.* 2016. A novel approach for mitigation of membrane fouling: Concomitant use of flocculant and magnetic powder[J]. *Bioresource Technology*, 209: 318-325
- 王欢. 2017. 絮凝-磁分离技术处理废水性能研究[D]. 大连: 大连理工大学. 67
- 王龙贵. 2004. 回收粉煤灰磁珠在污水处理中的应用[J]. *环境污染治理技术与设备*, 03: 88-89
- 王强. 2010. 磁强化好氧反硝化菌的生物脱氮机制与效能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学. 150
- 王少康, 程方, 郭兴芳, 等. 2019. 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, 13(2): 302-309
- Wang S G, Gai L H, Zhao L J, *et al.* 2009. Aerobic granules for low-strength wastewater treatment: formation, structure, and microbial community[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology Biotechnology*, 84(7): 1015-1020
- 王欣, 金正宇, 宫徽, 等. 2015. 强化混凝-吸附预处理生活污水[J]. 环境工程学报, 9(3): 1015-1020
- Wang X H, Diao M H, Yang Y, *et al.* 2012. Enhanced aerobic nitrifying granulation by static magnetic field[J]. *Bioresource Technology*, 110(none): 105-110
- 王星敏, 徐龙君, 张渝文, 等. 2012. 锰磁活性炭的制备及其性能表征[J]. 环境工程学报, 6(12): 4666-4670
- 汪玉娇, 高国才, 郭华. 2014. 磁分离技术在水处理中的研究现状及开发钢渣磁种的可行性[J]. 冶金设备, S1:109-111
- Wang Z, Liu X, Ni S, *et al.* 2017. Weak magnetic field: A powerful strategy to enhance partial nitrification[J]. *Water Research*, 120: 190-198
- 魏锋, 曹名帅. 2019. 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, 35(18): 55-57
- 魏俊起, 颜小星. 2015. 粉末活性炭去除污水处理厂二沉池出水中难降解 COD 的试验研究[J]. 城市住宅, (8): 106-108
- Wongcharee S, Aravinthan V, Erdei L. 2019. Removal of natural organic matter and ammonia from dam water by enhanced coagulation combined with adsorption on powdered composite nano-adsorbent[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 17: 100557
- 吴昌华. 2019. 改性 Fe_3O_4 包碳材料对减缓 MBR 膜污染的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学
- 肖蓬蓬, 曹德菊, 李浩, 等. 2012. 3 种金属离子对好氧颗粒污泥形成及污染控制影响[J]. 四川农业大学学报, 30(3): 342-347
- 信欣, 管蕾, 郭俊元, 等. 2017. SBR 加载不同粒径磁性活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制[J]. 环境科学, 38(11): 4679-4686
- 熊建英. 2018. MBBR+磁混凝工艺用于污水处理厂提标改造[J]. 中国给水排水, 34(20): 50-55
- 宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 等. 2018. 磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响[J]. 环境科学, 39(3): 1316-1324
- 徐华正. 2016. 低溶氧 A/O 磁生化法污水处理新工艺的研究[D]. 杭州: 浙江师范大学
- Xu Y B, Sun S Y. 2008. Effect of stable weak magnetic field on Cr(VI) bio-removal in anaerobic SBR system[J]. *Biodegradation*, 19(3): 455-462
- Yavuz H U L, Celebi S S. 2000. Effects of magnetic field on activity of activated sludge in wastewater treatment[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 26(1): 22-27
- Ying C, Umetsu K, Ihara I, *et al.* 2010. Simultaneous removal of organic matter and nitrogen from milking parlor wastewater by a magnetic activated sludge (MAS) process[J]. *Bioresource Technology*, 101(12): 4349-4353
- Younker J M, Walsh M E. 2016. Effect of adsorbent addition on floc formation and clarification[J]. *Water Research*, 98(Jul.1): 1-8
- 张密林, 任月明, 李凯峰, 等. 2005. 磁性细菌生物法处理屠宰废水[J]. 中国给水排水, (7): 36-38
- 张王超, 郭洪成, 郭冀峰, 等. 2020. 微纳米磁性粒子对膜生物反应器运行效能的影响[J]. 环境工程学报, 14(10): 2719-2727
- 张晓彩, 林森明, 何飞, 等. 2018. 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, 38(5): 158-159
- 张燕剑, 马小杰, 侯亚红. 2019. 磁混凝工艺在城镇污水厂提标改造中的应用[J]. 净水技术, 38(8): 21-25
- 赵峰辉, 于德爽, 刘杰, 等. 2019. 温度对超磁分离初沉污泥水解酸化的影响[J]. 环境工程学报, 13(6): 1374-1381
- 赵红花, 王九思. 2002. 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, (3): 79-82
- Zhao Z, Zhang Y, Li Y, *et al.* 2018. Comparing the mechanisms of ZVI and Fe_3O_4 for promoting waste-activated sludge digestion[J]. *Water Research*, 144: 126-133
- 郑学海, 刘东方, 杨彦涛. 2000. 廉价磁种及磁絮凝分离装置的开发与应用[J]. 中国给水排水, 8: 33-35
- 周建忠, 靳云辉, 罗本福, 等. 2012. 超磁分离水体净化技术在北小河污水处理厂的应用[J]. 中国给水排水, 28(6): 78-81
- 周丽颖. 2018. 某 CAST 工艺污水处理厂升级改造工程施工实践[Z]. 中国安徽合肥. 1242-1247
- Zhou X, Lu Y, Chen L, *et al.* 2017. Effect of magnetic field on running performance of shortcut nitrification process [J]. *Environmental Engineering*, 35(3): 34-37