



文章栏目：工程创新与行业动态

DOI 10.12030/j.cjee.202008188

中图分类号 X703

文献标识码 A

郑心愿, 华英豪. 磁加载多效澄清技术在城市黑臭水体治理和城市生活污水处理中的应用案例[J]. 环境工程学报, 2021, 15(9): 3136-3142.

ZHENG Xinyuan, HUA Yinghao. Application of magnetic ballasted clarification technology in black and smelly water treatment and domestic sewage treatment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(9): 3136-3142.

磁加载多效澄清技术在城市黑臭水体治理和城市生活污水处理中的应用案例

郑心愿, 华英豪*

温华环境科技(北京)有限公司, 北京 100192

第一作者: 郑心愿(1990—), 女, 硕士, 工程师。研究方向: 水污染控制技术。E-mail: zhengxinyuan@wonder-flow.com

*通信作者: 华英豪(1975—), 男, 硕士, 工程师。研究方向: 污水处理技术装备化。E-mail: hyh@wonder-flow.com

摘 要 磁加载多效澄清技术通过在混凝反应中加入磁粉, 利用磁粉密度、粒径、表面电荷、矫顽力等作用提高混凝效果, 增强絮体沉降性能, 缩短混凝沉淀时间并有效提高出水水质。将磁加载多效澄清技术用于大兴某黑臭水体治理工程中, 在进水水质变化条件下, 出水浊度和 TP 均稳定在 5 NTU 和 0.5 mg·L⁻¹ 以下, 表现出较好的抗冲击负荷能力和系统稳定性。在黑龙江某污水处理厂的污水深度处理中, 出水 SS 和 TP 可控制在一级 A 排放标准以下。磁加载多效澄清技术具有抗冲击能力强、出水优良、运行费用低、占地面积小等优势, 在污水处理、水环境治理领域有很好的应用前景。

关键词 磁混凝; 磁粉; 多效澄清技术; 黑臭水体治理; 污水深度处理

基于水环境综合治理和水污染控制的需求, 发展新型污水处理技术和装备已成为我国当前环境工程领域的重要方向。污染物分离和转化是各种污水处理技术的重要目标, 固液分离则是各种污水处理工艺必不可少的关键环节。沉淀、过滤、气浮是常见的固液分离方法, 混凝-沉淀工艺在污水处理工程中已得到广泛应用。磁混凝即在混凝反应中加入磁粉, 加速絮体沉降和泥水分离, 从而实现污染物的高效去除^[1]。磁混凝多效澄清技术主要去除水中悬浮颗粒物、经物理化学反应可形成颗粒物的溶解性污染物(如磷污染、重金属、氟化物等)。相对于常规混凝沉淀, 磁混凝多效澄清技术具有占地面积小、运行成本低、出水水质优良等特点, 在印染^[2]、冶金等行业废水^[1]及市政污水^[3-4]、河道治理^[5]等工程中得到广泛应用。本文旨在解构基于磁混凝沉淀的磁加载多效澄清技术的工艺流程, 通过典型应用案例对该技术的优势进行阐述, 以期在黑臭水体及其他场景的污水处理提供参考。

1 磁加载多效澄清技术的原理、工艺流程及优势

1.1 原理

混凝是向水中投加混凝剂, 通过压缩双电层、电中和、吸附架桥、网捕卷扫等作用实现胶体

脱稳以及细微悬浮颗粒物、胶体等聚集成大颗粒的过程^[6],可为后续沉淀、固液分离提供基础。与常规混凝-沉淀工艺不同,磁混凝在反应过程中投加磁粉,促进絮体形成,且明显增大絮体比重,加速絮体沉降。结合磁粉理化特性,磁混凝沉淀技术原理主要体现在以下5个方面。

1) 磁粉密度。常用磁粉主要成分为四氧化三铁(Fe_3O_4),密度约 $5\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,约是水中悬浮物的5倍。显微镜下可见在磁混凝过程中以磁粉为核心形成的絮体密度高、体积大、结构密实^[7]。根据斯托克斯公式,悬浮颗粒的沉降速度与颗粒密度和直径的平方成正比。磁粉的加入可大大提高絮体的沉降速度。

2) 磁粉粒径。在反应过程中,由于磁粉的存在,水中会产生很多微小漩涡。这些微小漩涡的离心效应产生的紊流动力在混凝反应中起关键作用。而由于磁粉的粒径与其在水中受到的紊流动力大小成反比^[8],若磁粉粒径过小,受力太大,不利于絮体的形成,甚至会打碎已经形成的絮体;若磁粉粒径过大,受力太小,颗粒之间发生碰撞的几率也减小。其次,若磁粉的粒径过大,沉淀速度过快,还未在反应过程中起到作用便已沉降,就失去了投加磁粉的意义。此外,磁粉粒径还影响磁粉的回收效果,粒径过小不利于磁粉的回收。已有研究表明,当磁粉的粒径为 $75\sim 105\text{ }\mu\text{m}$ 时,能够保证良好的混凝效果^[9]。

3) 磁粉表面电荷。关于磁粉表面电荷对混凝的影响目前有3种不同观点:①磁粉表面电荷呈负性,与混凝剂发生电中和作用,静电斥力消除后才能形成较大的絮体。在这个过程中,磁粉与污水中的微小颗粒并无区别^[10];②磁粉的表面电荷会影响系统Zeta电位,加入磁粉后Zeta电位接近零。磁粉与其吸附的颗粒物形成带负电的磁性颗粒作为核心,与水中混凝剂水解产生的正离子发生电中和作用,促进胶体的凝聚,形成致密絮体^[11];③若磁粉带正电荷,与水中微粒所带电荷的电位差值越大,越有利于混凝反应的进行;若磁粉带负电荷,与水中微粒电荷相同,会抑制絮体与磁粉的结合,不利于混凝反应发生^[9]。

4) 磁粉矫顽力。磁粉本身并没有磁性,但磁分离机回收时外加磁场会使磁粉产生磁性^[12]。由于磁粉具有矫顽力,磁粉回收到水中后仍有微弱的磁性,产生磁力。以磁粉为核心的微小絮体在磁力的作用下相互吸引,形成较大的絮体^[9]。

5) 磁粉比表面积大,表面能高,可对水中胶体、微小悬浮颗粒表现出黏附、聚集作用^[13-14];投加磁粉使得水中颗粒间碰撞几率升高,利于絮凝形成^[15-16]。磁粉的粒径、表面电荷、矫顽力等性能参数对混凝会产生促进效应并共同发挥作用,加强电中和反应和絮体生长,提高水中非溶解性污染物去除效果。

1.2 工艺流程

磁加载多效澄清技术是以磁混凝原理为基础,将强化絮凝、二级载体回收技术与加载沉淀技术进行有机集成,形成的磁加载絮凝多效澄清分离工艺技术。该技术通过投加磁粉形成高密度、大体积的均匀絮体,实现污染物的高效去除和絮体与水的快速分离。磁加载多效澄清技术既可用于规模较大的工程项目,亦可装备成磁加载一体化多效澄清系统。

磁加载多效澄清技术的流程包含混凝反应池、絮凝反应池、预沉区、斜管分离区和磁粉回收等部分(见图1)^[17]。各部分特点及工艺参数如表1所示,其工艺流程如下。

1) 混凝反应池。在混凝反应池中,污水与投加的混凝剂进行混凝反应,同时与磁粉进行充分的接触、反应。投加混凝剂后,水体发生混凝反应,絮体与磁粉充分混合。混凝反应采用管道混合器与机械混凝搅拌相结合,搅拌机为快速搅拌机,反应时间为 $1\sim 2\text{ min}$ 。

2) 絮凝反应池。絮体包裹磁粉,形成大体积、高密度的絮体。絮凝反应池内装有絮凝反应搅拌器、导流筒、导流板和絮凝剂投加环等,在导流筒内外形成絮凝能量差。导流筒内部絮凝速度快,由一个轴流搅拌机进行搅拌和提升,将由投加环投加的絮凝剂、回收的磁粉和回流污泥、待

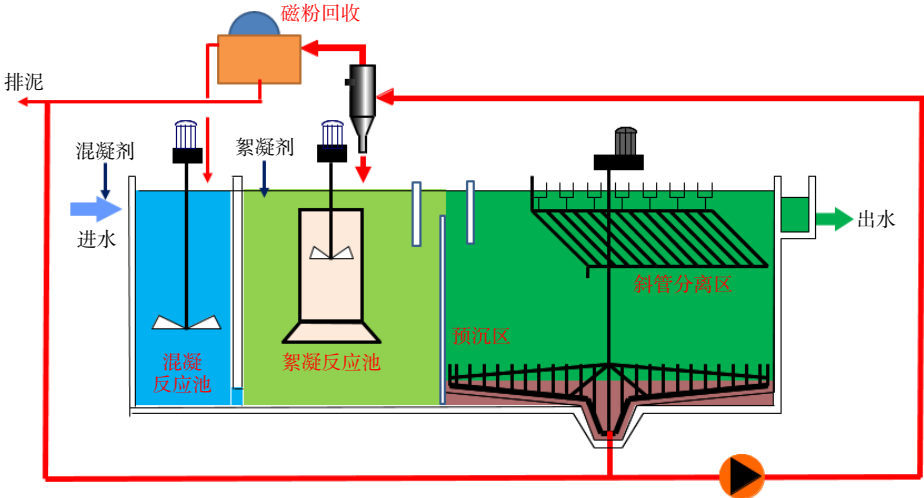


图 1 磁加载多效澄清技术结构图

Fig. 1 Technical structure of a magnetic clarifier with multi-effects

表 1 磁加载多效澄清技术系统结构简介

Table 1 Brief introduction to the structure of the multi-effect clarification technology system

名称	主要设备	作用	工艺参数
混凝反应池	快速搅拌机	絮体初步形成；产生磷酸盐沉淀	反应时间：1~2 min
絮凝反应池	搅拌机，导流筒，导流板，加药环	投加载体；加载絮体形成	反应时间：2~3 min
预沉区	刮泥机	绝大部分加载絮体在此区域分离	1)分离时间：4~6 min
斜管分离区	斜管	微量小絮体被斜管捕获重新回至沉淀区，保障优异的出水效果	2)上升流速：20~40 m·h ⁻¹
磁粉回收	污泥泵，旋流器，磁分离机	污泥排出系统前将介质进行两级回收	污泥回流量：3%~8%

絮凝污水进行充分的搅拌混合，并推动混合液在反应器内不断循环流动，促使形成体积较大、密实、均匀的矾花。

3) 预沉区。大部分絮体在预沉区快速沉降。絮凝水通过水力隔墙和沉淀池间的淹没堰进入预沉区，因加载磁粉后絮体比重较大，具有较好的沉淀性能，绝大部分悬浮固体在此区域沉淀(超过90%)并浓缩。浓缩池内设置带有栅条的刮泥机，提高污泥浓缩效果。浓缩污泥的浓度为10~20 g·L⁻¹。

4) 斜板分离区。在构筑物中设置斜板分离区，以保证出水澄清。斜板的设计一方面可提高水力上升流速，节约占地；另一方面将预沉区逃逸的剩余矾花进一步分离，保证出水澄清。整个斜板区的均匀配水非常重要，可以避免水流短路，使沉淀在最佳状态下完成。

5) 磁粉回收。磁粉回收系统包括水力旋流器和磁分离机。2种回收方法的有机结合，可增加磁粉的回收效率，高效回收磁粉，节省运行费用。

1.3 技术优势

1) 抗冲击能力强。磁粉与回流污泥增加了絮凝池的污泥浓度，可达到3~5 g·L⁻¹，远高于进水悬浮物浓度。进水水质的变化对系统影响很小，体现了抗冲击能力。

2) 出水稳定。磁粉的加入促进了混凝反应的发生，增强对水中微小悬浮物的捕捉能力，提高了对污水中污染物的去除效果。二沉池出水的SS降至10 mg·L⁻¹以下，TP降至0.5 mg·L⁻¹以下，达到一级A的出水标准。

3) 占地面积小。以磁粉为晶核的絮体密度高，可实现固液快速分离，上升流速可达到40 m·h⁻¹，

水力停留时间小于 10 min。磁加载一体化多效澄清系统结构设计紧凑，占地为普通沉淀池的 1/3~1/10，适用于现有污水处理厂的提标改造或新建污水处理厂的深度处理工艺。

4) 运行成本低。①磁粉的投加促进了混凝反应的发生，搅拌反应设计提高了药剂的反应效率，同时污泥回流的设置可进一步回收利用未完全反应的药剂，使得系统达到相同反应效率所需的药剂减少。一般能节约 20%~50% 的药剂使用量；②投加磁粉后形成絮体大且密实，污泥量减少，可降低污泥处理处置费用；③旋流器与磁分离机的两级回收，可实现磁粉的有效回收，节约运行费用。

2 磁加载多效澄清技术的应用案例

2.1 磁加载多效澄清技术在城市黑臭水体治理中的应用

黑臭水体是指城市建成区内颜色(黑色或泛黑色)令人不悦，并(或)气味(臭或恶臭)令人不适的水体统称。黑臭水体的产生不仅不利于城市美观，在其附近生长的细菌和真菌等会威胁人群健康^[18]。已有研究发现，悬浮颗粒物与水体发黑有直接联系，对水质致黑起主导作用^[19]。磁加载多效澄清技术可快速、高效地去除污水中的悬浮物，是黑臭水体应急路旁处理的有效手段。

某黑臭水体位于北京市大兴区，河水呈白色、浑浊、恶臭，属于重度黑臭水体。河水中不仅含有大量生活污水还有部分工业废水，水质波动很大。解决该水体的黑臭问题，不仅要在水中的悬浮物有较强的去除能力，还要求污水处理系统对水质水量有抗冲击性。此外，该地区规划后期建污水处理厂，只需对该水体临时应急治理即可，不适宜土建动工。综合考虑对悬浮物的去除能力，对水质水量的抗冲击能力，对水体治理的紧迫性、临时性和环境美观等要求，磁加载多效澄清系统成为该黑臭水体治理的首选方案。本项目选用 5 000 m³·d⁻¹ 的集装箱式一体化多效澄清系统作为旁路处理的一个临时处理站(见图 2)，反应池、沉淀池、加药系统、磁粉回收系统和污泥脱水系统全部集成在一个集装箱内，方便运输，在现场仅需连接进水管和电就可快速通水调试。多效澄清系统的工艺参数如表 2 所示。



图 2 一体化多效澄清系统外观
Fig. 2 Outlook of magnetic integrated multi-effect caltrification

表 2 5 000 m³·d⁻¹ 的集装箱式一体化多效澄清系统设计参数
Table 2 Technological parameter of a 5 000 m³·d⁻¹ container with multi-effect clarification system

集装箱	设备尺寸			斜管 面积	上升 流速	停留 时间	药剂投加量			污泥 回流量
	混凝反应池	絮凝反应池	沉淀池				PAC	PAM	磁粉	
12.0 m×3.0 m× 3.0 m	1.5 m×1.5 m× 2.4 m	2.2 m×2.2 m× 2.4 m	2.8 m×3.0 m× 2.4 m	8.4 m ²	24.8 m·h ⁻¹	10 min	80 mg·L ⁻¹	1~2 mg·L ⁻¹	5 g·L ⁻¹	15 m ³

系统投加的药剂为 PAC 和 PAM，设备运行过程中，根据水质在药剂设计投加量的基础上调整加药量。设备运行期间，出水澄清(见图 3(a))，且水质稳定(见图 3(b)~(d))。污水受季节、降雨等方面的影响，水质变化很大。进水浊度为 17.4~149 NTU，而出水浊度稳定在 5 NTU 以下(见图 3(b))，去除率大于 85%，体现了系统的抗冲击能力；进水 TP 为 0.51~2.60 mg·L⁻¹，而出水 TP 均低于 0.5 mg·L⁻¹，去除率大于 80%，体现了系统具有良好的除磷能力(见图 3(c))；系统的 COD 去除率为 40%~60%，

出水 COD 略低于进水中 SCOD 的含量,而当 SCOD 含量较高时,COD 去除率较差(见图 3(d))。由此发现,磁混凝工艺首要去除了非溶解性的有机物。若要进一步降低出水的 SCOD,可选用活性炭与磁混凝相结合的工艺^[20]。

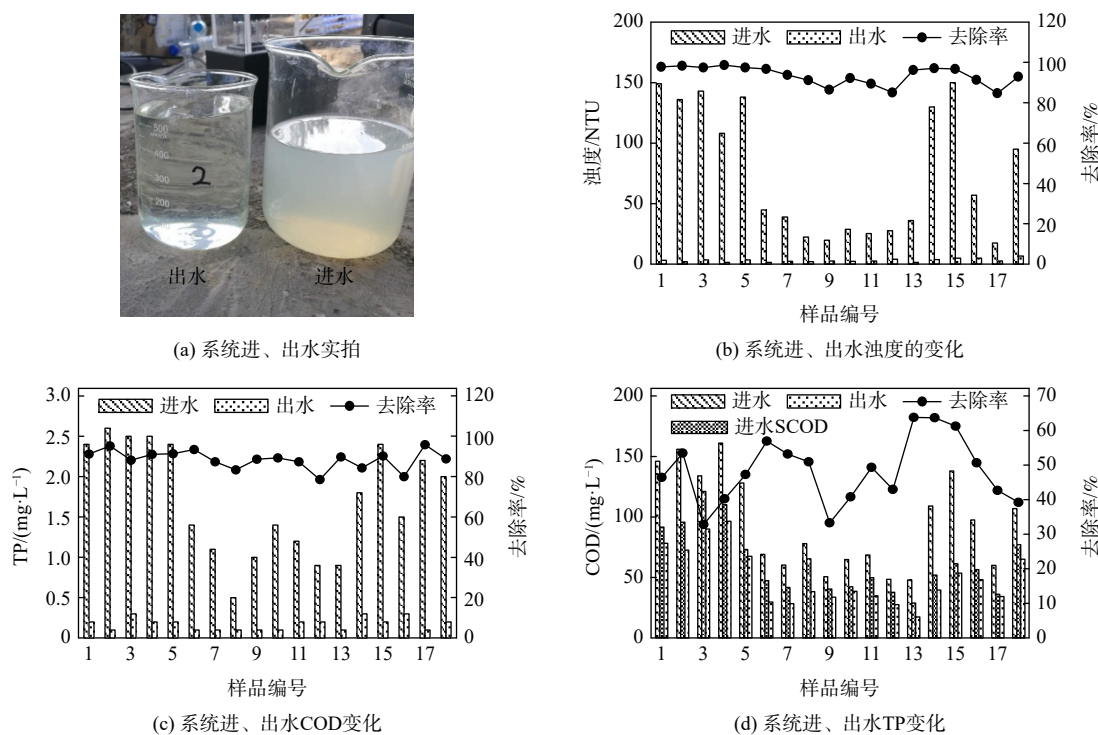


图3 应用于黑臭水体治理中的一体化多效澄清系统进出水水质

Fig. 3 Comparison diagram of inlet and outlet water quality of an integrated multi-effect clarification system

2.2 磁加载多效澄清技术在城市污水处理厂深度处理单元中的应用

近年来,我国城市污水处理厂的排放标准由一级B提升为一级A。为满足排放标准,污水处理厂均增加了对生化出水进行深度处理的单元。多效澄清技术因其占地面积小、高效的SS和TP去除能力,在污水深度处理中得到推广和应用。

黑龙江省某污水处理厂主要处理生活污水,水处理量约 $25\,000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,其中一期工程处理水量 $12\,500\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。经过EBIS(efficient biological integration system)微氧循环流生物处理系统后,二沉池出水TP为 $0.5\sim 2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,SS为 $15\sim 30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,COD为 $20\sim 50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (见图4),水质未达标,需要增加深度处理工艺对二沉池出水进行处理,以实现污水处理厂的达标排放。该项目SS和TP为主要的目标污染物,磁载多效澄清技术能够有效去除污水中的SS,而且常用的混凝剂PAC也是一种除磷剂,能够进一步降低TP含量。另外,由于是老厂提标改造,厂区面积有限,磁加载多效澄清技术可达到节约占地面积的目的。最终采用构筑物形式的磁加载多效澄清技术对二沉池出水进行深度处理,其设计参数如表3所示。为保证出水稳定达标,该项目一方面在混凝反应池和絮凝反应池之间增加了磁粉反应池,使磁粉和污水混合均匀,保证均匀、密实的大体积絮体的形成;另一方面降低了系统的水力负荷,上升流速降低到 $14.8\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

由于二沉池出水水质稳定,磁加载多效澄清技术按设计加药量运行。调试完成后,连续10 d对多效澄清池的进出水进行监测(结果见图4)。由图4可知,经多效澄清技术深度处理的出水COD保持在 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,出水SS小于 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TP小于 $0.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,已达到一级A的排放标准。

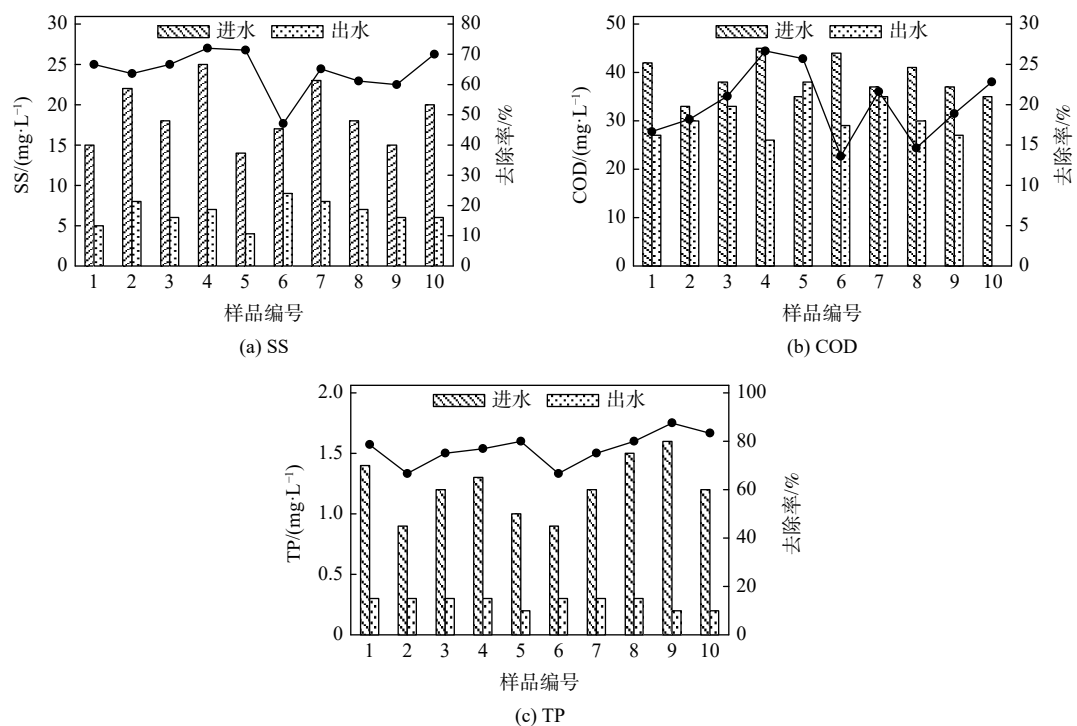


图 4 应用于黑龙江省某污水处理厂的提标改造深度处理工艺效果

Fig. 4 Comparison diagrams of inlet and outlet water quality in an advanced treatment process in Heilongjiang province

表 3 12 500 m³·d⁻¹ 的构筑物式多效澄清系统工艺参数

Table 3 Technological parameter of a 12 500 m³·d⁻¹ constructional multi-effect clarifying system

构筑物尺寸				斜管 面积	上升 流速	停留 时间	药剂投加量			污泥 回流量
混凝反应池	磁粉反应池	絮凝反应池	沉淀池				PAC	PAM	磁粉	
2.2 m×2.2 m× 3.8 m	2.2 m×2.2 m× 3.8 m	3.0 m×3.0 m× 3.8 m	6.0 m×6.0 m× 6.4 m	35 m ²	14.8 m·h ⁻¹	32 min	30 mg·L ⁻¹	1 mg·L ⁻¹	3 g·L ⁻¹	30 m ³

3 结语

以磁混凝原理为基础形成的磁加载多效澄清技术，已在黑臭水体治理、污水深度处理得到推广和应用，并达到较好且稳定的出水效果。磁加载多效澄清技术高效的固液分离能力，与各种高效处理药剂(重金属去除剂、除氟剂等)、功能吸附材料(活性炭、改性沸石粉等)或生物处理等协同使用，可实现各种特定污染物的高效低耗去除，可广泛应用于工业废水、市政和园区污水、自来水、雨水处理等领域。

参 考 文 献

[1] 王东升, 张明, 肖峰. 磁混凝在水与废水处理领域的应用[J]. 环境工程学报, 2012, 6(3): 705-713.

[2] 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(1): 64-67.

[3] 罗国华, 张春, 郑利兵, 等. 猪粪沼液的磁混凝预处理工艺优化及评估[J]. 环境工程学报, 2019, 13(2): 414-423.

[4] 张燕剑, 马小杰, 侯亚红. 磁混凝工艺在城镇污水厂提标改造中的应用[J]. 净水技术, 2019, 38(8): 21-25.

[5] 李继香. 应用加载磁混凝处理微污染河水[J]. 环境工程学报, 2014, 8(7): 2901-2905.

[6] YAN M, WANG D, YU J, et al. Enhanced coagulation with polyaluminum chlorides: Role of pH/alkalinity and speciation[J]. Chemosphere, 2008, 71(9): 1665-1673.

- [7] 阳旭, 甘树, 闻圣, 等. 高浊度原水磁加载混凝应急饮用水处理实验研究[J]. 水处理技术, 2017, 43(9): 104-108.
- [8] 王绍文. 惯性效应在絮凝中的动力学作用[J]. 中国给水排水, 1998, 14(2): 13-16.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 刘德贤, 张冬梅. 掺硅 Fe_3O_4 磁粉磁性能的研究[J]. 磁性材料及器件, 1998(1): 3-5.
- [13] KARAPINAR N. Magnetic separation of ferrihydrite from wastewater by magnetic seeding and high-gradient magnetic separation[J]. International Journal of Mineral Processing, 2003, 71(1/2/3/4): 45-54.
- [14] LV M, ZHANG Z, ZENG J, et al. Roles of magnetic particles in magnetic seeding coagulation-flocculation process for surface water treatment[J]. Separation & Purification Technology, 2018, 212: 337-343.
- [15] STOLARSKI M, EICHHOLZ C, FUCHS B, et al. Sedimentation acceleration of remanent iron oxide by magnetic flocculation[J]. China Particuology, 2007, 5(1/2): 145-150.
- [16] 曾慧峰, 孙春宝, 王然, 等. 垃圾渗滤液的加载磁絮凝预处理工艺研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(10): 2303-2306.
- [17] 华英豪. 一体化多效澄清处理装置: CN206089322U[P]. 2017-04-12.
- [18] 刘建福, 陈敬雄, 辜时有. 城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险[J]. 环境科学, 2016, 37(4): 1264-1271.
- [19] 应太林, 张国莹. 苏州河水体黑臭机理及底质再悬浮对水体的影响[J]. 上海环境科学, 1997(1): 23-26.
- [20] 吉青青, 陈立, 周文彬, 等. 污水厂应用活性炭+磁混凝沉淀提标中试[C]//《环境工程》编委会, 工业建筑杂志社有限公司. 《环境工程》2019年全国学术年会论文集. 北京: 工业建筑杂志社有限公司, 2019: 15-19.

(责任编辑: 靳炜)

Application of magnetic ballasted clarification technology in black and smelly water treatment and domestic sewage treatment

ZHENG Xinyuan, HUA Yinghao*

Wonder-Flow Environmental Technology (Beijing) Co. Ltd., Beijing 100192, China

*Corresponding author, E-mail: hyh@wonder-flow.com

Abstract Magnetic ballasted clarification is the enhanced coagulation and sedimentation process by the ballasted reaction with magnetic particles addition and recovery. In the reaction, the coagulation efficiency and flocs settling performance and the effluent quality are enhanced greatly due to the positive effects by the higher density, particle size, surface charge, and the coercivity of the magnetic particles. In the treatment and remediation of a black and odorous water body in Daxing district, Beijing, magnetic ballasted clarification achieved stable effluent turbidity and TP below 5 NTU and $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively regardless of significant variation of influent quality. This indicates strong resistance against variations in influent pollutant load and shows high stability of sewage treatment. In a tertiary wastewater treatment process in Heilongjiang province, the effluent SS and TP achieved Class 1A discharge standard by applying this technology. Therefore, the one stage magnetic clarifier with multi-effects is potentially valuable for the treatment of sewage due to the advantages of stable performance, good efficiency, low operating cost, and low land requirement.

Keywords magnetic coagulation; magnetic particles; multi-effect clarification; black and odorous water treatment; tertiary wastewater treatment