



好氧颗粒污泥技术处理石化废水的研究进展

张楠¹,麻微微¹,黄浩勇^{1,2},牛越¹,施雪卿¹

(1. 青岛理工大学环境与市政工程学院, 山东青岛 266000;

2. 新加坡国立大学环境研究院, 新加坡 117411)

[摘要] 石化废水组分复杂、可生化性差、毒性强、危害大,是典型的难生物降解有机工业废水。传统生物工艺由于石化废水中油类、高盐、高COD对微生物的活性抑制作用,很难实现对该废水的高效处理以及达标排放。针对石化废水处理技术的难点,评述了石化废水常规生物处理方法存在的弊端;详述了好氧颗粒污泥(AGS)技术的特点、系统启动期污泥颗粒化的策略,以及该工艺在石化废水处理中发挥的作用和技术优化手段;进一步阐述了好氧颗粒污泥对石化废水中特征污染物的去除效能,并解析了好氧颗粒污泥中的功能微生物群落结构特点。旨在为石化废水的高效处理以及难降解有机污染物的削减提供理论基础和技术参考。

[关键词] 石化废水;好氧颗粒污泥;有机污染物;微生物群落

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)02-0035-10

Research progress in the treatment of petrochemical wastewater by aerobic granular sludge technology

ZHANG Nan¹, MA Weiwei¹, NG How Yong^{1,2}, NIU Yue¹, SHI Xueqing¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology,

Qingdao 266000, China; 2. NUS Environmental Research Institute, Singapore 117411, Singapore)

Abstract: Petrochemical wastewater is a typical refractory organic wastewater, which has complex components, low biodegradability, strong toxicity and great harm. Due to the inadaptability of microorganisms to oil, high salt, and high COD, conventional biological process can hardly achieve efficient treatment of petrochemical wastewater, neither to meet the strict discharge limit. Based on the challenges of petrochemical wastewater treatment, this paper reviewed the shortcomings of conventional biological treatment methods for petrochemical wastewater, described the technical features of aerobic granular sludge (AGS) technology, analyzed the strategy of sludge granulation during system startup, the role of the process in petrochemical wastewater treatment and technical optimization methods, further elaborated its removal performances of typical pollutants in petrochemical wastewater, as well as functional microbial community structures of AGS during the treatment processes. In general, this paper aimed to provide theoretical basis and technical reference for efficient treatment of petrochemical wastewater and reduction of refractory organic pollutants using AGS technology.

Key words: petrochemical wastewater; aerobic granular sludge; organic pollutants; microbial community

石化工业是我国的基础工业,是国民经济的重要组成部分,支撑了多个行业的发展^[1]。然而,石化行业同时也是水污染“大户”,其产生的废水成分复杂、水量波动大、可生化性差,且由于苯系类和硫化

物等有毒物质的存在,常规生物处理工艺很难实现石化废水的高效处理以及难降解污染物的高效削减^[2]。好氧颗粒污泥(AGS)与传统活性污泥相比,具有结构紧凑、沉降速度快、生物量高等优势,对高

[基金项目] 山东省高等学校“青创科技计划”(2020KJD003);山东省自然科学基金青年项目(ZR2020QE236);山东省“泰山学者”工程专项经费(tsqn201812091)

浓度难降解工业废水具有良好的适应能力和较强的耐受能力,且对废水中复杂有机污染物具有较高的降解效能。同时,颗粒污泥作为一种微生物自固定化体系,能有效富集污水处理单元中生长速率较低的功能性微生物,有效提高处理单元对难降解有机物的削减效能,并通过颗粒本身的传质缓冲功能提高微生物对毒性环境的耐受能力^[3]。近年来,好氧颗粒污泥技术在处理石化废水领域的研究取得了较大的进展。笔者总结了好氧颗粒污泥技术处理石化废水的研究现状以及应用发展前景,以期为我国石化废水污染的高效治理提供参考。

1 传统石化废水处理研究现状

1.1 石化废水水质特性

石油化工工业产品繁多,工艺过程复杂,不可避免地会产生大量石化废水。石化废水中常见有机污染物及其质量浓度范围见表1。

表1 石化废水中常见有机污染物

Table 1 Common organic pollutants in petrochemical wastewater

污染物	质量浓度/(mg·L ⁻¹)
COD	250~4 000 ^[4-5]
氨氮	25~200 ^[4-5]
石油类	30~500 ^[4,6]
悬浮物	100~450 ^[4]
苯酚	3~80 ^[7-8]
硫化物	≤50 ^[9]
苯胺	≤110 ^[10]
多环芳烃	1.8~12 ^[11]
硝基苯	100~120 ^[12]
苯	0.5~40 ^[7,13]
酯类	0.005~0.02 ^[13]
酮类	0.007~0.045 ^[13]
腈类	0.003~0.02 ^[13]
胺类	0.01~0.06 ^[13]

石化废水中含有的主要污染物,一般可概括分为有机组分与无机组分2大类别。其中有机组分主要包括卤代烃、苯系物、多环芳烃、多氯联苯、酚类、胺类、醛类、酯类、有机酸、杂环类等多种特征污染物^[1];无机组分主要为硫化氢、氨化合物及微量的重金属等^[14]。同时,石化废水中所含碳、氮、磷等营养成分比例往往不均衡,可生化性较差,并且多种有机污染物(如酚类、胺类等)都具有明显的生物毒性效应,对传统生物处理工艺造成了较大挑战。

1.2 传统石化废水生物处理工艺研究现状

传统石化废水处理工艺流程中,生物法是二级处理的核心单元,主要去除废水中有机污染物和含氮污染物。石化废水生物处理工艺主要包括好氧法、厌氧法以及组合法3种方式。其中好氧工艺主要包括序批式活性污泥工艺(SBR)^[15]、膜生物反应器(MBR)^[16]、高效好氧生物反应器(HCR)^[17]等。由于石化废水中有机物难生化降解的特性,单纯的好氧工艺无法确保满足有机污染物稳定达标排放的要求。相应地,厌氧法是在无氧条件下通过微生物作用将污染物降解为二氧化碳、甲烷的过程。相对好氧法,该生化过程对部分难降解化学结构(如苯环类结构等)具有更好的降解效果。厌氧工艺主要包括厌氧固定膜反应器(AF)^[18]、升流式厌氧污泥床(UASB)^[19]、厌氧折流板反应器(ABR)^[20]等。但厌氧法在运行过程中存在启动期较长、抗水质冲击能力较弱、且操作稳定性较差等缺点,实际应用中有单独利用厌氧工艺处理石化废水的案例。基于好氧法和厌氧法的瓶颈难题,目前石化废水的处理往往采用厌氧和好氧组合工艺^[21-22],以求达到更好的处理效果。从现状看,由于石化行业的高速发展,传统生物处理系统经常处于超负荷的运行状态,工艺运行过程中普遍存在污泥膨胀流失、处理效果差、出水合格率低等问题。因此,亟待对石化废水生物处理工艺进行改进以实现污染物高效处理的目标,满足日益严格的水质排放要求。

2 好氧颗粒污泥处理石化废水的研究现状

2.1 好氧颗粒污泥技术简介

20世纪90年代初,K. MISHIMA等^[23]首次为好氧升流式污泥床反应器(AUSB)中成功发现并培养出了好氧颗粒污泥。好氧颗粒污泥是指废水生物处理系统中由接种的活性污泥经过特殊水力与曝气条件培养形成的以杆菌、球菌和丝状菌为主要菌群,呈现形状规则的球形或椭球形,平均粒径约为2 mm的微生物聚集体^[24]。与传统活性污泥相比,好氧颗粒污泥具有沉降性能良好、结构密实、微生物丰度高、耐冲击负荷能力强等特点^[25]。良好的沉降性能可以有效地提高反应器内的污泥浓度和容积负荷。密实的颗粒结构可以削弱有毒物质对微生物的影响,从而增强对一些较为敏感的微生物(如硝化菌)的保

护。同时由于氧渗透梯度的不同,颗粒中可能同时存在好氧/缺氧区或者好氧/缺氧/厌氧区,可实现同步硝化反硝化过程。另外,优良的耐冲击负荷能力可以使好氧颗粒污泥在处理高浓度、高毒性废水时达到较好的处理效果^[26]。

2.2 系统启动期的污泥颗粒化策略

对于好氧颗粒污泥工艺,系统启动期,即污泥颗粒的形成与生长过程,对系统最终处理效率起到决定性作用。特别是针对石化废水中含有的芳香烃、长链烷烃、醛类和杂环化合物等难降解或毒性有机物,如何启动好氧颗粒污泥系统以快速获得稳定且具有高降解活性的好氧污泥颗粒,是该领域研究的热点问题。现有研究中对不利水质条件下好氧颗粒污泥系统的启动策略主要分为以下几种方式:

(1)通过逐步提高石化废水的比例促进颗粒化的形成。稀释原水并在培养过程中逐步减小稀释比例,使微生物逐步适应水质变化,从而加快污泥颗粒化过程,且有利于维持颗粒污泥的稳定性。金育辉等^[27]在SBR中用石化废水培养好氧颗粒污泥时,依次以体积比为40%、60%的石化废水进行培养,待出现颗粒污泥后换成100%的石化废水继续培养,并同时逐步缩短沉降时间,最终达到稳定,总用时为27 d。培育出的好氧颗粒污泥平均粒径约为1.3 mm,呈棕黄色,颗粒表面粗糙,主要由杆菌组成,并以丝状菌为骨架联结在一起,对COD、总氮、总磷的去除率分别达到85%、56%和90%。贺银莉^[28]采取先以模拟废水作为进水,成功培养出稳定性较好的颗粒污泥后开始逐渐加入石化废水。研究结果表明,在SBR中通过逐步增加石化废水的进水比例,同时逐步缩短沉淀时间可以快速培养出好氧颗粒污泥,对COD和总氮的去除率稳定超过85%。

(2)通过在废水中添加阳离子以加速污泥颗粒化进程。研究表明, Mg^{2+} 可以和蛋白质的酰胺基团结合,提高污泥系统多样性; Ca^{2+} 更容易与多糖的羟基紧密结合,优化颗粒污泥的物理性能^[29]。Helong JIANG等^[30]研究得出添加100 mg/L的 Ca^{2+} 与不添加 Ca^{2+} 相比,好氧颗粒污泥的形成过程可以节省一半时间,16 d即可培养成功。

(3)添加共代谢基质,使多种复杂有机污染物协同降解,从而促进污泥颗粒化。自然界中很多微生物都具有共代谢降解多种有机污染物的功能。当系

统仅存在一种有机污染物且难以去除时,可以通过添加共基质的方式,促进微生物发生共同代谢作用。贺银莉^[28]在用好氧颗粒污泥技术处理石化废水的研究中,通过加入丙酸钠作为共基质,使得胞外聚合物(EPS)含量提高,颗粒污泥的污泥体积指数(SVI)、混合液挥发性悬浮固体浓度(MLVSS)等参数逐渐趋于稳定,同时COD、氨氮、总氮去除效果也达到较高水平。何苗等^[31]的研究表明在降解苯酚的过程中共基质代谢发挥了重要作用,当咪唑、呋喃与苯酚作为共基质时,生物氧化率与基质单一时相比有了明显提高。K. C. LOH等^[32]在共代谢降解四氯苯酚的研究中,采用谷氨酸钠和苯酚作为生长基质,实验表明对于同种微生物,不同目标污染物及其降解产物所产生的碳源毒性不同,利用多种碳源协同作用的方式可有效缓解毒性产生的负面影响。而好氧颗粒污泥在此过程中结构更致密,优势微生物由杆菌和球菌转变为杆菌和短杆菌,性能得到较大改善。所以,添加额外的共基质以共代谢方式运行,是加快污泥颗粒化、维持颗粒致密结构以及较好处理石化废水的一种有效方法。

(4)基于微生物种群间信号分子调控的方法可成为加速好氧颗粒污泥形成与提高颗粒稳定性的另一种有效手段。好氧颗粒污泥的形成已被证明与微生物释放的信号分子息息相关,但目前好氧颗粒污泥处理石化废水的相关文献中,关于信号分子的研究仍鲜有报道。以酰基高丝氨酸内酯(AHL)为代表的信号分子引起的群感效应对好氧颗粒污泥的形成有着重要的影响。群感效应是指微生物通过分泌、积累和感知信号分子来协调其基因表达的现象^[33],它具有控制微生物行为的能力,如生物膜的形成、EPS的分泌以及抗生素的合成等。信号分子可以通过改变微生物的代谢模式提高其附着力。Tingting REN等^[34]研究发现颗粒污泥信号分子可诱导细胞从悬浮生长转化为附着生长。Junping LÜ等^[35]也发现污泥生物附着力和AHL的浓度存在显著正相关性。另外,微生物产生的信号分子浓度达到一定阈值后,便会进入细胞内与受体蛋白结合形成复合物,激活并启动目标基因的表达,继而强化微生物的黏附和聚集特性。研究显示,主动调控环境中AHL的浓度可显著改变微生物的代谢特征,从而营造形成颗粒污泥的有利条件。Yaochen LI等^[36]通

过在菌液中加入 AHL 降解酶,观察到了由于环境中 AHL 浓度下降导致的 EPS 中蛋白质含量显著降低的现象。相反地,胡远超^[37]通过添加外源 AHL 显著增强了好氧颗粒污泥 EPS 的分泌和细胞疏水性,进而达到促进颗粒污泥形成以及加强颗粒稳定性的作用。因此,通过对微生物信号分子浓度的调控,可实现特殊废水环境下好氧颗粒污泥的加速形成。

2.3 特征有机污染物的去除效率及降解机理

以苯胺、苯酚为主的苯系污染物是石化废水中典型的难降解或毒性芳香族有机污染物,其苯环结构在自然环境中具有很高的化学稳定性,对微生物的氧化降解过程有较强的抵抗性。特别是含有高浓度苯胺、苯酚的废水存在一定的生物毒性,对传统活性污泥系统具有显著的活性抑制作用。这种环境胁迫对微生物造成了选择压力,使某些微生物或种群产生了有益于本身存活的遗传适应机制,主要包括基因的自发性点突变、基因水平转移以及基因重排与缺失等^[38],进而使这些微生物能够耐受甚至利用石化废水中的有机污染物作为能量来源,成为该环境下的优势菌群。这些微生物在水力剪切作用下形成形状规则的初始颗粒污泥,之后由于颗粒表面疏水性和 EPS 的增加,颗粒污泥逐步增大,最终形成结构致密的颗粒污泥^[39]。

2.3.1 好氧颗粒污泥对苯胺的去除

苯胺是一种广泛分布于石化工业废水中的污染物,也是石化、医药、印染等多种工业的关键前体和常见中间体^[40]。苯胺对环境和人体健康有双重威胁,已被美国环保署和中国环保部列为重点污染物之一^[41],因此苯胺的生物降解引起了广泛关注。好氧微生物被发现能有效去除苯胺^[42],并且多种苯胺降解菌已被从不同环境样品中分离鉴定,如假单胞菌(*Pseudomonas*)和不动杆菌(*Acinetobacter*)等^[43]。

项正心等^[44]以苯胺为唯一碳源和氮源,培养出针对性降解高浓度苯胺废水的好氧颗粒污泥,苯胺处理最高质量浓度可达 6 000 mg/L,并从该体系中分离出 2 株不同降解特征的苯胺降解菌株。可见,好氧颗粒污泥体系为苯胺降解菌株提供了适宜的生存环境,从而取得了高效的降解效果。Dianzhan WANG 等^[45]也从好氧颗粒污泥降解苯胺的实验中成功分离得到 1 种优势菌株 AN1, AN1 能以苯胺为唯一碳源、氮源和能源,在 pH 和温度分别为 7.0 和

28~35 °C 条件下,当苯胺初始质量浓度为 400 mg/L 时,苯胺降解速率为 17.8 mg/(L·h)。通过 DNA 序列的鉴定,菌株 AN1 为热带假丝酵母菌(*Candida tropicalis*)。Yu JIANG 等^[46]通过实验发现,相比低质量浓度(200 mg/L)苯胺废水,高质量浓度(600 mg/L)苯胺废水中的颗粒污泥结构更为紧凑,分泌的 EPS 更多,疏水性较高,且 TN 去除率更高,这可能是因为更为紧凑的结构中反硝化作用更容易实现。2 种浓度的苯胺废水中苯胺去除率均达到 98.6% 以上。Yajie DAI 等^[47]在探究苯胺对好氧颗粒污泥稳定性影响时得出,当苯胺质量浓度为 10~500 mg/L 时,好氧颗粒污泥的活性受到轻微抑制,但由于微生物群落和好氧颗粒物结构的改变,抑制作用被消除,处理效果随之提高。

2.3.2 好氧颗粒污泥对苯酚的去除

酚类物质常存在于采油、石化、化工和制药等废水中。苯酚可作为微生物利用的碳源,但它对微生物生长具有较强的毒性,破坏其生物群落结构,较低浓度的苯酚就可能对微生物死亡^[48]。

刘国洋等^[49]在探究好氧颗粒污泥对苯酚的降解能力时发现,用含苯酚废水培养的颗粒污泥表面更加光滑、结构更为紧凑、EPS 分泌也更多。当苯酚质量浓度达到 3 000 mg/L 时,去除率可达 98.33%。K. L. HO 等^[50]同时用好氧颗粒污泥和普通活性污泥降解用酸碱预处理过的高浓度苯酚废水,当苯酚质量浓度大于 3 000 mg/L 时,普通活性污泥对苯酚的生物降解就会受到抑制,而好氧颗粒污泥在处理 5 000 mg/L 苯酚时,不仅能够实现有效降解,而且未出现严重的抑制作用。另外,由于好氧颗粒污泥表面存在由大量 EPS 组成的保护层,在经过酸碱预处理后,颗粒仍可较为迅速地降解苯酚。G. MOUSSAVI 等^[51]在用好氧颗粒污泥序批式反应器(GSBR)处理苯酚废水时,在 GSBR 中培养出了含高活性混合菌群的颗粒污泥,实现了对 1 000 mg/L 苯酚废水的完全降解。S. T. L. TAY 等^[52]通过实验得出当苯酚负荷在 0~1.2 kg/(m³·d) 时,苯酚对好氧颗粒污泥无明显毒性且苯酚可以被完全去除。同时发现好氧颗粒污泥有利于有鞘丝状菌的生长,有鞘丝状菌对苯酚的毒性有很大的耐受性。由以上研究可以看出,好氧颗粒污泥独特的结构特点可以有效地保护对毒性耐受性差的微生物,使其能够更好地适应含

苯酚废水的毒性水质条件。

2.3.3 好氧颗粒污泥对其他特征污染物的去除

石化废水中除了含有苯胺、苯酚这2种最常见的苯系污染物外,还含有硝基苯(NB)、多环芳烃(PAHs)、多氯联苯(PCBs)等有机污染物,对它们的处理也是石化废水处理过程中较为关键的一步。

硝基苯废水可生化性差,传统生物处理工艺需结合预处理手段提高废水的可生化性。王电站等^[53]尝试以好氧颗粒污泥系统降解硝基苯,利用三角瓶在摇床上好氧振荡的方法,从硝基苯废水处理厂的好氧污泥中驯化培养出能够有效降解硝基苯的混合菌群,在培养过程中形成了颗粒污泥。结果表明,该系统在以硝基苯为唯一碳源和氮源的情况下可以有效地降解硝基苯,在最适条件下,24 h内可以将600 mg/L的硝基苯完全降解。多环芳烃(PAHs)类污染物除了难以生物降解外,还具有一定的毒性与生态风险。P. OFMAN等^[54]在比较好氧颗粒污泥和絮状污泥对低分子质量多环芳烃的降解实验中发现,絮状污泥在反应初期对PAHs的去除率约为60%,随反应进行,去除率逐渐降低,最后去除率不超过10%,说明絮状污泥可以降解部分PAHs,但微生物自身也会被杀死;而在好氧颗粒污泥反应器中发现,PAHs初期去除率即可达到70%,且随着反应的进行,去除率并不会明显降低。与絮状污泥相比,好氧颗粒污泥对废水毒性的增加表现出了更高的耐受性能。

2.3.4 好氧颗粒污泥对特征有机污染物的降解机理

石化废水中的难降解有机污染物以苯环类为主,生物降解中最难实现的是对苯环的开环。以苯酚为例,由于好氧颗粒污泥中存在大量微生物,会产生多种胞外生物酶,在这些生物酶作用下,苯环上的羟基首先被羧基取代;受羧基影响,苯环结构变得相对不稳定,再经过生物酶诱导,环状结构被打开,生成链烷烃,进而降解为乙酸、异丁酸等小分子物质,并最终矿化为CO₂和H₂O^[55]。好氧颗粒污泥对苯系物的降解除了从难降解的大分子物质逐步降解为小分子物质外,还可能在众多生物酶作用下,苯环之间发生相互联结,但其稳定性比单个苯环低,经过一系列生化反应,达到开环的目的,最终变为小分子物质被微生物同化利用或完全矿化。

2.4 颗粒污泥生物相的结构组成特点

在好氧颗粒污泥培养前期,由于大量絮凝性较强、沉降率较低的污泥流失,生物量呈现明显下降趋势。运行一段时间后,微生物开始适应水质环境,细胞生长速率增大,生物量也逐渐增加。从微生物丰度方面看,最初接种的絮状污泥的物种丰度最高,而在造粒阶段开始下降,这可能是由于有毒物质的干扰以及絮凝污泥的排放造成的。当颗粒污泥达到稳定运行后,生物量浓度增加,微生物多样性得到一定程度的恢复^[56]。Yu JIANG等^[57]通过实验发现,经过长时间的操作,微生物的均匀性和多样性呈现先下降后上升的趋势,而且污泥造粒过程中微生物群落发生了显著变化。

好氧颗粒污泥微生物的群落结构在形成过程中不断动态演变。在门级水平上,变形菌门在接种絮状污泥中占比最高,其次是放线菌门、糖化菌门、厚壁菌门和衣原体门等。形成好氧颗粒污泥后,变形菌门、放线菌门仍是优势菌门,拟杆菌门、衣原体门和硬毛菌门丰度逐渐提高,也逐渐成为系统中的优势菌群^[58]。进一步研究发现,变形菌门在整个颗粒化培养过程中丰度均相对较高。变形菌门相对丰度较高的原因是由于该分类下的假单胞菌属、短波单胞菌属等微生物能够以苯胺、苯酚等芳香族化合物为碳源^[59],对石化废水具有更好的适应能力。

在纲级水平上,接种絮状污泥中的主要类别是甲型变形菌纲、放线菌纲、丙型变形菌纲、暖绳菌纲、梭状芽孢杆菌纲和衣原体纲等。在好氧颗粒污泥完全形成后,优势菌群以 α -变形菌纲、 β -变形菌纲和 γ -变形菌纲为主,这也是变形菌门占比最高的原因。成熟的好氧颗粒污泥内富集了多种芳香族降解菌株,它们在富含苯胺、苯酚的环境中具有代谢潜能,从而有效去除了有毒物质和COD。

在属级水平上,相对接种污泥,好氧颗粒污泥完全成熟后微生物的组成发生了显著变化。好氧制粒完成后,微生物成分浓缩,假单胞菌成为优势菌属。假单胞菌是污水处理系统中最常见的菌属之一,可用于去除苯酚、除草剂和重金属等多种污染物^[60]。丛毛单胞菌属也是成熟的好氧颗粒污泥中丰度较高的菌属,属于 β -变形菌纲的一员。它是好氧颗粒污泥反应器处理高浓度含铵、芳烃和盐类混合物废水的优势属之一^[61]。可以看出,成熟的好氧颗粒污泥

含有多种能够降解苯胺、苯酚等有毒物质的功能微生物菌群,显示了好氧颗粒污泥技术在难降解有机废水处理中的巨大应用潜力。表2总结了降解石化

废水中苯酚、苯胺以及其他特征有机污染物的部分高效功能性菌株,合理利用这些菌株,可作为强化手段提高现行石化废水生物处理工艺的处理效能。

表2 颗粒污泥中降解石化废水特征污染物的功能微生物

Table 2 Functional microorganisms for degrading key pollutants of petrochemical wastewater in granular sludge

功能菌	门	科	属	菌株	参考文献	
苯酚降解菌	变形菌门 (Proteobacteria)	假单胞菌科 (Pseudomonadaceae)	假单胞菌属 (<i>Pseudomonas</i>)	MTCC4996 L12	[62] [63]	
		莫拉菌科 (Moraxellaceae)	不动杆菌属 (<i>Acinetobacter</i>)	PHEA-2	[64]	
		产碱菌科 (Alcaligenaceae)	产碱菌属 (<i>Alcaligenes</i>)	P5	[65]	
		肠杆菌科 (Enterobacteriaceae)	肠杆菌属 (<i>Enterobacter</i>)	A4	[66]	
		放线菌门 (Actinobacteria)	诺卡氏菌科 (Nocardiaceae)	红球菌属 (<i>Rhodococcus</i>)	PNAN5 PB-1	[67] [68]
	厚壁菌门 (Firmicutes)	芽孢杆菌科 (Bacillaceae)	芽孢杆菌属 (<i>Bacillus</i>)	B10	[69]	
	苯胺降解菌	变形菌门 (Proteobacteria)	产碱菌科 (Alcaligenaceae)	粪产碱杆菌属 (<i>Alcaligenes</i>)	LS1	[70]
			伯克氏菌科 (Burkholderiaceae)	伯克氏菌属 (<i>Burkholderia</i>)	ZL-1	[71]
莫拉菌科 (Moraxellaceae)			不动杆菌属 (<i>Acinetobacter</i>)	AN-1	[72]	
从毛单胞菌科 (Comamonadaceae)			代尔夫特菌属 (<i>Delftia</i>)	DK	[73]	
放线菌门 (Actinobacteria)		诺卡氏菌科 (Nocardiaceae)	红球菌属 (<i>Rhodococcus</i>)	DH-2	[74]	
厚壁菌门 (Firmicutes)		芽孢杆菌科 (Bacillaceae)	芽孢杆菌属 (<i>Bacillus</i>)	JHX-8	[75]	
硝基苯降解菌	变形菌门 (Proteobacteria)	假单胞菌科 (Pseudomonadaceae)	假单胞菌属 (<i>Pseudomonas</i>)	M3	[76]	
其他污染物降解菌	多环芳烃降解菌	放线菌门 (Actinobacteria)	诺卡氏菌科 (Nocardiaceae)	红球菌属 (<i>Rhodococcus</i>)	Q3	[77]
多氯联苯降解菌	变形菌门 (Proteobacteria)	假单胞菌科 (Pseudomonadaceae)	假单胞菌属 (<i>Pseudomonas</i>)	P-6-5	[78]	

3 结论

对好氧颗粒污泥技术在石化废水处理领域研究进展进行梳理,得出如下结论:首先,基于好氧颗粒污泥技术生物量高、微生物组成多样、耐高负荷和耐高毒性等优点,可用于实现石化废水中难降解或潜毒性有机污染物的高效削减。其次,作为好氧颗粒污泥技术的主要难点,颗粒形成过程和颗粒稳定性一直是关注的焦点问题。可以通过添加共基质或金属离子的方式加速颗粒的形成,而通过促进EPS的分泌、优势微生物的富集则能有效提高颗粒稳定性。另外,提高颗粒污泥中微生物的多样性、筛选驯化特定污染物降解菌以及微生物信号分子调控等手段都将是强化石化废水生物法处理效率及系统稳定

性的重要调控策略。

参考文献

- [1] 丁鹏元,党伟,腾艳,等.石化废水深度处理技术的研究进展[J].科学技术与工程,2019,19(7):7-14.
DING Pengyuan,DANG Wei,TENG Yan,et al. The advanced treatment technologies for petrochemical wastewater: An overview [J]. Science Technology and Engineering,2019,19(7):7-14.
- [2] ZHANG Hanmin,HE Yinli,JIANG Tao,et al. Research on characteristics of aerobic granules treating petrochemical wastewater by acclimation and co-metabolism methods[J]. Desalination,2011,279(1/2/3):69-74.
- [3] LI Anjie,LI Xiaoyan,YU Hanqing. Aerobic sludge granulation facilitated by activated carbon for partial nitrification treatment of ammonia-rich wastewater[J]. Chemical Engineering Journal,2013,218:253-259.

- [4] 汪孟波,李鑫. AO工艺应用于含油废水处理[J]. 污染防治技术, 2018, 31(1): 37-38.
- WANG Mengbo, LI Xin. AO process applied to oily wastewater treatment[J]. Pollution Control Technology, 2018, 31(1): 37-38.
- [5] 王雄,董斌,王婷,等. 某针状焦石化废水处理工程实例[J]. 工业水处理, 2016, 36(12): 106-108.
- WANG Xiong, DONG Bin, WANG Ting, et al. Case study on the treatment of needle-shaped coke petrochemical wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2016, 36(12): 106-108.
- [6] 潘国强,邓亮. 气浮-陶瓷膜耦合工艺处理炼油厂含油废水[J]. 中国给水排水, 2020, 36(18): 118-121.
- PAN Guoqiang, DENG Liang. Oily wastewater treatment by a coupling process of air floatation and ceramic membrane[J]. China Water and Wastewater, 2020, 36(18): 118-121.
- [7] KIM E, YULISA A, KIM S, et al. Monitoring microbial community structure and variations in a full-scale petroleum refinery wastewater treatment plant[J]. Bioresource Technology, 2020, 306: 123178.
- [8] HAKMAOUI A, ABOURI M, KADMI Y, et al. Valorization of *Opuntia ficus-indica* pads and steel industry FeCl₃-rich rejection for removing surfactant and phenol from oil[J]. Journal of Health and Pollution, 2020, 10(28): 201-204.
- [9] 王晓阳. 石油化工企业含油污水处理及回用水处理工艺设计[J]. 工业用水与废水, 2010, 41(4): 50-53.
- WANG Xiaoyang. Process design for oily wastewater treatment and reuse in petrochemical corporations[J]. Industrial Water and Wastewater, 2010, 41(4): 50-53.
- [10] WANG Li, SUZELLE B, KIM J W. Biodegradation of pentyl amine and aniline from petrochemical wastewater[J]. Journal of Environmental Management, 2007, 83(2): 191-197.
- [11] PATEL K, PATEL M. Improving bioremediation process of petroleum wastewater using biosurfactants producing *Stenotrophomonas* sp. S1VKR-26 and assessment of phytotoxicity [J]. Bioresource Technology, 2020, 315: 123861.
- [12] 何士龙,高迎新,杨敏,等. Fenton氧化法用于低可生化性石化废水预处理的研究[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2009, 36(3): 87-91.
- HE Shilong, GAO Yingxin, YANG Min, et al. Pre-treatment of low biodegradable of petrochemical wastewater with Fenton oxidation[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science, 2009, 36(3): 87-91.
- [13] FU Liya, WU Changyong, ZHOU Yuexi, et al. Ozonation reactivity characteristics of dissolved organic matter in secondary petrochemical wastewater by single ozone, ozone/H₂O₂, and ozone/catalyst[J]. Chemosphere, 2019, 233: 34-43.
- [14] 王琳琳. 催化臭氧氧化-生物膜组合工艺处理石化废水的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- WANG Linlin. Catalytic ozonation oxidation-biofilm coupling process for petrochemical wastewater treatment research[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [15] 彭永臻,高凯,余政哲. 两段SBR法处理石油化工废水[J]. 给水排水, 1996, 22(6): 26-28.
- PENG Yongzhen, GAO Kai, YU Zhengzhe. Two-stage SBR process for petrochemical wastewater treatment[J]. Water and Wastewater, 1996, 22(6): 26-28.
- [16] 樊耀波,王菊思,姜兆春. 膜生物反应器净化石油化工污水的研究[J]. 环境科学学报, 1997, 17(1): 68-74.
- FAN Yaobo, WANG Jusi, JIANG Zhaochun. Treatment of petrochemical waste water with a membrane bioreactor[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1997, 17(1): 68-74.
- [17] 汪海峰,张东曙,李皓,等. HCR处理石化废水的试验研究[J]. 工业用水与废水, 2002, 33(3): 54-56.
- WANG Haifeng, ZHANG Dongshu, LI Hao, et al. Experimental research on HCR treatment of petrochemical wastewater[J]. Industrial Water and Wastewater, 2002, 33(3): 54-56.
- [18] PATEL H, MADAMWAR D. Single and multichamber fixed film anaerobic reactors for biomethanation of acidic petrochemical wastewater-systems performance [J]. Process Biochemistry, 2001, 36(7): 613-619.
- [19] CHEN Chunmao, LIANG Jiahao, YOZA B A, et al. Evaluation of an up-flow anaerobic sludge bed (UASB) reactor containing diatomite and maifanite for the improved treatment of petroleum wastewater[J]. Bioresource Technology, 2017, 243: 620-627.
- [20] JI G D, SUN T H, NI J R, et al. Anaerobic baffled reactor (ABR) for treating heavy oil produced water with high concentrations of salt and poor nutrient [J]. Bioresource Technology, 2000, 100(3): 1108-1114.
- [21] 关卫省,刘珊,张志杰. 厌氧-好氧法处理石化废水的研究[J]. 中国沼气, 1999, 17(1): 17-20.
- GUAN Weisheng, LIU Shan, ZHANG Zhijie. Study on petrochemical wastewater treatment by anaerobic-aerobic biological process[J]. China Biogas, 1999, 17(1): 17-20.
- [22] WU Changyong, ZHOU Yuexi, SUN Qingliang, et al. Applying hydrolysis acidification-anoxic oxic process in the treatment of petrochemical wastewater: From bench scale reactor to full scale wastewater treatment plant[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 309: 185-191.
- [23] MISHIMA K, NAKAMURA M. Self-immobilization of aerobic activated sludge: A pilot study of the aerobic upflow sludge blanket process in municipal sewage treatment [J]. Water Science and Technology, 1991, 23(4/5/6): 981-990.
- [24] 王建龙,张子健,吴伟伟. 好氧颗粒污泥的研究进展[J]. 环境科学学报, 2009, 29(3): 449-473.
- WANG Jianlong, ZHANG Zijian, WU Weiwei. Research advances in aerobic granular sludge [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(3): 449-473.
- [25] DE GRAAFF D R, VAN LOOSDRECHT M C M, PRONK M. Stable granulation of seawater-adapted aerobic granular sludge with filamentous *Thiothrix* bacteria [J]. Water Research, 2020,

- 175:115683.
- [26] 刘唯玉. 好氧颗粒污泥快速形成条件优化及处理效能研究[D]. 沈阳:辽宁大学, 2020.
- LIU Weiyu. The optimization plan about rapid conditions of aerobic granular sludge and the study of treatment efficiency [D]. Shenyang: Liaoning University, 2020.
- [27] 金育辉, 吴敌, 宋郭静, 等. 好氧颗粒污泥法处理石化废水[J]. 环境工程学报, 2014, 8(12): 5335-5338.
- JIN Yuhui, WU Di, SONG Guojing, et al. Treating petrochemical wastewater using aerobic granular sludge [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(12): 5335-5338.
- [28] 贺银莉. 好氧颗粒污泥结合共代谢处理石化废水的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2011.
- HE Yinli. Research on the treatment of petrochemical wastewater with aerobic granules based on co-metabolism [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [29] SAJJADAB M, KIMAB K S. Studies on the interactions of Ca^{2+} and Mg^{2+} with EPS and their role in determining the physicochemical characteristics of granular sludges in SBR system [J]. Process Biochemistry, 2015, 50(6): 996-972.
- [30] JIANG Helong, TAY J H, LIU Yu, et al. Ca^{2+} augmentation for enhancement of aerobically grown microbial granules in sludge blanket reactors [J]. Biotechnology Letters, 2003, 25(2): 95-99.
- [31] 何苗, 张晓健, 顾夏声, 等. 杂环化合物好氧生物降解性能的研究[J]. 中国环境科学, 1997, 17(6): 481-484.
- HE Miao, ZHANG Xiaojian, GU Xiasheng, et al. Study on the aerobic biodegradability of heterocyclic compounds [J]. China Environmental Science, 1997, 17(6): 481-484.
- [32] LOH K C, WANG Sijing. Enhancement of biodegradation of phenol and a nongrowth substrate 4-chlorophenol by medium augmentation with conventional carbon sources [J]. Biodegradation, 1997, 8(5): 329-338.
- [33] WATERS C M, BASSLER B L. Quorum sensing: Cell-to-cell communication in bacteria [J]. Annual Review of Cell and Developmental Biology, 2005, 21(1): 319-346.
- [34] REN Tingting, YU Hanqing, LI Xiaoyuan. The quorum-sensing effect of aerobic granules on bacterial adhesion, biofilm formation, and sludge granulation [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, 88(3): 789-797.
- [35] LÜ Junping, WANG Yaqin, ZHONG Chen, et al. The microbial attachment potential and quorum sensing measurement of aerobic granular activated sludge and flocculent activated sludge [J]. Bioresource Technology, 2014, 151: 291-296.
- [36] LI Yaochen, ZHU Jianrong. Role of *N*-acyl homoserine lactone (AHL)-based quorum sensing (QS) in aerobic sludge granulation [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014, 98(17): 7623-7632.
- [37] 胡远超. 外加 AHLs 和活性污泥对解体好氧颗粒污泥修复过程的影响[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- HU Yuanchao. Effects of exogenous AHLs and activated sludge on the repair process of disintegrated aerobic granular sludge [D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [38] 赵百锁, 王慧, 李瑞瑞, 等. 好氧细菌对多环芳烃降解机制的研究进展[J]. 微生物学通报, 2008, 35(3): 414-420.
- ZHAO Baisuo, WANG Hui, LI Ruirui, et al. Recent advances in biodegradative mechanism of polycyclic aromatic hydrocarbons by aerobic bacteria [J]. Microbiology China, 2008, 35(3): 414-420.
- [39] 倪丙杰, 俞汉青, 谢文明, 等. 好氧颗粒污泥形成机理与模型 [EB/OL]. (2007-12-28) [2020-12-04]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200712-844>.
- NI Bingjie, YU Hanqing, XIE Wenming, et al. Formation mechanism and model of aerobic granular sludge [EB/OL]. (2007-12-28) [2020-12-04]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200712-844>.
- [40] CHEN W S, HUANG C P. Mineralization of aniline in aqueous solution by electrochemical activation of persulfate [J]. Chemosphere, 2015, 125: 175-181.
- [41] GITI E, MOHAMAD S, FATEMEH M. The utilization of aniline, chlorinated aniline, and aniline blue as the only source of nitrogen by fungi in water [J]. Water Research, 2001, 35(5): 1219-1224.
- [42] WANG Li, BARRINGTON S, KIM J W. Biodegradation of pentyl amine and aniline from petrochemical wastewater [J]. Journal of Environmental Management, 2007, 83(2): 191-197.
- [43] XIAO Chengbin, NING Jun, YAN Hai, et al. Biodegradation of aniline by a newly isolated *Delftia* sp. XYJ6 [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2009, 17(3): 500-505.
- [44] 项正心, 张丽丽, 陈建孟. 好氧颗粒污泥及其高效菌株降解苯胺的试验研究[J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3336-3341.
- XIANG Zhengxin, ZHANG Lili, CHEN Jianmeng. Aniline removal by aerobic granules and high-efficiency aniline-degrading bacteria [J]. Environmental Science, 2009, 30(11): 3336-3341.
- [45] WANG Dianzhan, ZHENG Guanyu, WANG Shimei, et al. Biodegradation of aniline by *Candida tropicalis* AN1 isolated from aerobic granular sludge [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 123(12): 2063-2068.
- [46] JIANG Yu, WEI Li, YANG Kai, et al. Investigation of rapid granulation in SBRs treating aniline-rich wastewater with different aniline loading rates [J]. Science of the Total Environment, 2019, 646: 841-849.
- [47] DAI Yajie, JIANG Yixin, SU Haijia. Influence of an aniline supplement on the stability of aerobic granular sludge [J]. Journal of Environmental Management, 2015, 162: 115-122.
- [48] 郑晓英, 王兴楠, 陈卫, 等. 好氧颗粒污泥处理高浓度及难降解废水研究进展[J]. 水资源保护, 2012, 28(4): 64-68.
- ZHENG Xiaoying, WANG Xingnan, CHEN Wei, et al. Progress in research on treatment of high-strength and refractory wastewater with aerobic granular sludge [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(4): 64-68.

- [49] 刘国洋,赵白航,李军,等. 好氧颗粒污泥降解苯酚[J]. 环境工程学报, 2014, 8(9): 3645-3650.
LIU Guoyang, ZHAO Baihang, LI Jun, et al. Phenol degradation by aerobic granular sludge[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(9): 3645-3650.
- [50] HO K L, CHEN Yuyou, LIN Bin, et al. Degrading high-strength phenol using aerobic granular sludge[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, 85(6): 2009-2015.
- [51] MOUSSAVI G, BARIKIN B, MAHMOUDI M. The removal of high concentrations of phenol from saline wastewater using aerobic granular SBR[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 158(3): 498-504.
- [52] TAY S T L, MOY B Y P, JIANG H, et al. Rapid cultivation of stable aerobic phenol-degrading granules using acetate-fed granules as microbial seed[J]. Journal of Biotechnology, 2005, 115(4): 387-395.
- [53] 王电站,周立祥. 好氧颗粒污泥的培养及其降解硝基苯的活性[J]. 环境科学, 2010, 31(1): 147-152.
WANG Dianzhan, ZHOU Lixiang. Cultivation of aerobic granular sludge and characterization of nitrobenzene-degrading[J]. Environmental Science, 2010, 31(1): 147-152.
- [54] OFMAN P, SKOCZKO I. Comparison of Σ LMW utilization rate from saline wastewater in SBR reactors with granular and flocked activated sludge[J]. Proceedings, 2019, 16(1): 17.
- [55] 魏金亮. 影响因素对厌氧微生物降解苯酚的性能研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2018.
WEI Jinliang. Study on the influencing factors on the performance of anaerobic microbial degradation of phenol[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2018.
- [56] 王硕,于水利,付强,等. 处理含油废水的好氧颗粒污泥形成过程及其特性研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(6): 1779-1785.
WANG Shuo, YU Shuili, FU Qiang, et al. Formation process and characteristics of aerobic granular sludge in oily wastewater treatment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(6): 1779-1785.
- [57] JIANG Yu, WEI Li, YANG Kai, et al. Rapid formation of aniline-degrading aerobic granular sludge and investigation of its microbial community succession[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 166: 1235-1243.
- [58] ZHAO Yongsheng, QU Dan, ZHOU Rui, et al. Bioaugmentation with GFP-tagged *Pseudomonas migulae* AN-1 in aniline-contaminated aquifer microcosms: Cellular responses, survival and effect on indigenous bacterial community[J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2016, 26(5): 891-899.
- [59] LIU Na, LI Haijun, DING Feng, et al. Analysis of biodegradation by-products of nitrobenzene and aniline mixture by a cold-tolerant microbial consortium[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 260: 323-329.
- [60] QU Yuanyuan, ZHANG Ruijie, MA Fang, et al. Bioaugmentation with a novel alkali-tolerant *Pseudomonas* strain for alkaline phenol wastewater treatment in sequencing batch reactor[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2011, 27(8): 1919-1926.
- [61] RAMOS C, SUÁREZ-OJEDA M E, CARRERA J. Biodegradation of a high-strength wastewater containing a mixture of ammonium, aromatic compounds and salts with simultaneous nitrification in an aerobic granular reactor[J]. Process Biochemistry, 2016, 51(3): 399-407.
- [62] KOTRESHA D, VIDYASAGAR G M. Isolation and characterisation of phenol-degrading *Pseudomonas aeruginosa* MTCC 4996[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2008, 24(4): 541-547.
- [63] 王清东,李玉玺,王乙羽,等. 一株降解苯酚芦苇内生菌的分离与鉴定[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(14): 40-41.
WANG Qingdong, LI Yuxi, WANG Yiyu, et al. Isolation and identification of a phenol-degrading endophyte from phragmites australis[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2020, 26(14): 40-41.
- [64] XU Yuquan, CHEN Ming, ZHANG Wei, et al. Genetic organization of genes encoding phenol hydroxylase, benzoate 1, 2-dioxygenase alpha subunit and its regulatory proteins in *Acinetobacter calcoaceticus* PHEA-2[J]. Current Microbiology, 2003, 46(4): 235-240.
- [65] BAEK S H, YIN Chengrui, LEE S T. Aerobic nitrate respiration by a newly isolated phenol-degrading bacterium, *Alcaligenes* strain P5[J]. Biotechnology Letters, 2001, 23(8): 627-630.
- [66] 李金达,易梦雯,王丽丽,等. 可降解苯酚的厌氧产电菌株的分离筛选及生物学特性研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2020, 25(2): 146-155.
LI Jinda, YI Mengwen, WANG Lili, et al. Isolation and screening of a strain of anaerobic electricity-producing phenol degrading bacteria and biological characteristics research[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2020, 25(2): 146-155.
- [67] 沈锡辉,刘志培,王保军,等. 苯酚降解菌红球菌PNAN5菌株(*Rhodococcus* sp. strain PNAN5)的分离鉴定、降解特性及其开环双加氧酶性质研究[J]. 环境科学学报, 2004, 24(3): 482-486.
SHEN Xihui, LIU Zhipai, WANG Baojun, et al. Isolation, identification of phenol-degrading *Rhodococcus* sp. strain PNAN5 and characterization of its ring-cleavage dioxygenases[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, 24(3): 482-486.
- [68] 马馨月,魏思洁,柯檀,等. 红球菌PB-1对高浓度苯酚及苯系物的降解研究[J]. 安全与环境工程, 2020(2): 85-91.
MA Xinyue, WEI Sijie, KE Tan, et al. Degradation of high concentration phenol and benzenes by *Rhodococcus* sp. PB-1[J]. Safety and Environmental Engineering, 2020(2): 85-91.
- [69] 任瑞凡,刘永阳,曲文浩,等. 一株苯酚降解菌株的筛选鉴定及特性研究[J]. 天津农业科学, 2018, 24(11): 11-16.
REN Ruifan, LIU Yongyang, QU Wenhao, et al. Study on screening, identification and characterization of a phenol-degrading bac-

- terium strain[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2018, 24(11): 11-16.
- [70] 王斌, 蔡凯, 邵汝英, 等. 苯胺高效降解菌的筛选及其代谢机制[J]. 环境保护科学, 2020, 46(4): 117-121.
- WANG Bin, CAI Kai, SHAO Ruying, et al. Study on the screening of aniline-degrading strain and its co-metabolism mechanism[J]. Environmental Protection Science, 2020, 46(4): 117-121.
- [71] 王亚娥, 王萍, 郑莹, 等. 1株具有铁氧化功能的苯胺降解菌的降解特性[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(3): 140-145.
- WANG Ya'e, WANG Ping, ZHENG Ying, et al. Screening and degradation characteristics of an aniline degrading bacteria with iron oxidation function[J]. Environmental Science and Technology, 2019, 42(3): 140-145.
- [72] HOU Luanfeng, WU Qingping, GU Qihui, et al. Community structure analysis and biodegradation potential of aniline-degrading bacteria in biofilters[J]. Current Microbiology, 2018, 75(7): 918-924.
- [73] 刁刻, 吴琼, 邱业先. 一株苯胺降解菌的筛选及其降解效率研究[J]. 苏州科技大学学报: 自然科学版, 2017(2): 43-48.
- DIAO Ke, WU Qiong, QIU Yexian. Isolation and effect of an aniline-degrading bacterium named DK[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2017(2): 43-48.
- [74] 李大卉, 乔悦, 贾冬梅, 等. 一株苯胺降解菌的分离鉴定及其降解特性[J]. 环境与健康杂志, 2020, 37(2): 158-163.
- LI Dahui, QIAO Yue, JIA Dongmei, et al. Isolation, identification and biodegradation characteristics of an aniline-degrading strain[J]. Journal of Environment and Health, 2020, 37(2): 158-163.
- [75] 蔡莉. 固定化高效苯胺降解菌的制备及处理苯胺印染废水的研究[J]. 印染助剂, 2017, 34(8): 33-37.
- CAI Li. Preparation of immobilized high efficient aniline degrading bacteria and treatment of aniline printing and dyeing wastewater[J]. Textile Auxiliaries, 2017, 34(8): 33-37.
- [76] 刘小琳, 康巧梅. 废水中硝基苯降解菌的分离鉴定及特性研究[J]. 资源节约与环保, 2018(2): 85-87.
- LIU Xiaolin, KANG Qiaomei. Isolation, identification and characteristics of nitrobenzene degrading bacteria in wastewater[J]. Resources Economization and Environment Protection, 2018(2): 85-87.
- [77] 高秀荣, 林姗姗, 孙安琪, 等. 一株多环芳烃降解菌的筛选及其降解特性[J]. 环境工程学报, 2020, 14(6): 1668-1678.
- GAO Xiurong, LIN Shanna, SUN Anqi, et al. Screening and degradation characteristics of a PAHs-degrading bacteria[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(6): 1668-1678.
- [78] 孙桂婷. 多虑联苯降解菌的筛选、鉴定及其降解特性研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2018.
- SUN Guiting. Isolation, identification and characterization of a PCBs-degrading bacteria[D]. Yantai: Yantai University, 2018.
-
- [作者简介] 张楠(1996—), 硕士研究生。电话: 17860768026, E-mail: z0214n@163.com。通讯作者: 施雪卿, 教授, 博导。E-mail: shixq85@163.com。
- [收稿日期] 2021-11-22(修改稿)

(上接第34页)

- [55] WANG Yunting, ZHANG Gong, XUE Yudong, et al. In situ anodic induction of low-valence copper in electro-Fenton system for effective nitrobenzene degradation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(31): 32165-32174.
- [56] CHEN Dandan, DOU Yuhao, TANG Qin, et al. New insight on the combined effects of hydrothermal treatment and $\text{FeSO}_4/\text{Ca}(\text{ClO})_2$ oxidation for sludge dewaterability improvement: From experimental to theoretical investigation[J]. Fuel Processing Technology, 2020, 197: 106196.
- [57] VORONTSOV A V. Advancing Fenton and photo-Fenton water treatment through the catalyst design[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 372: 103-112.
- [58] DONG Xiongbo, DUAN Xiaodi, SUN Zhimin, et al. Natural illite-based ultrafine cobalt oxide with abundant oxygen-vacancies for highly efficient Fenton-like catalysis[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2020, 261: 118214.
- [59] LI Haitao, GAO Qiang, WANG Guanshuai, et al. Unique electron reservoir properties of manganese in $\text{Mn}(\text{II})$ -doped CeO_2 for reversible electron transfer and enhanced Fenton-like catalytic performance[J]. Applied Surface Science, 2020, 502: 144295.
- [60] ZHUANG Yuan, WANG Xuechun, LIU Qiaozhi, et al. N-doped FeOOH/RGO hydrogels with a dual-reaction-center for enhanced catalytic removal of organic pollutants[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 379: 122310.
- [61] LYU Lai, YAN Dengbiao, YU Guangfei, et al. Efficient destruction of pollutants in water by a dual-reaction-center Fenton-like process over carbon nitride compounds-complexed $\text{Cu}(\text{II})-\text{CuAlO}_2$ [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(7): 4294-4304.
- [62] YU Guangfei, LYU Lai, ZHANG Fagen, et al. Theoretical and experimental evidence for $\text{rGO}-4\text{-PP Nc}$ as a metal-free Fenton-like catalyst by tuning the electron distribution[J]. RSC Advances, 2018, 8(6): 3312-3320.
-
- [作者简介] 程凡(1997—), 硕士。E-mail: chengfangk@163.com。通讯作者: 蒋进元, 研究员, 博士, 硕士生导师。E-mail: jiangjinyuan@craes.org.cn。
- [收稿日期] 2021-11-18(修改稿)