

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.S0.010

有机高分子污泥脱水絮凝剂研究

谭 洋,冯丽颖,严伟嘉,孙永军,郑怀礼

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400045)

摘 要:对近年来广泛研究和使用的有机高分子污泥脱水絮凝剂进行了综述,有机高分子污泥脱水絮凝剂按合成方法分为聚合型和天然改性型;聚合型根据电荷类型分为了阳离子型、阴离子型、非离子型和两性型;天然改性型又可分为碳水化合物类和壳聚糖类。同时对污泥脱水絮凝剂的絮凝机理进行归纳阐述。对这六类污泥脱水絮凝剂的优缺点和应用现状进行了论述,并对高分子污泥脱水絮凝剂的发展前景进行了展望。

关键词:污泥;絮凝剂;有机高分子;污泥脱水

中图分类号:X171 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)S0-0046-05

Research and development trends on Organic polymer Flocculent to sludge dewatering

Tan Yang, Feng Liying, Yan Weijia, Sun Yongjun, Zheng Huaili *

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Regions Eco-Environment, Ministry of Education,
Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: This paper reviewed organic polymer sludge dewatering flocculant which was researched and used extensively. Organic polymer sludge dewatering flocculant can be divided into polymeric and natural modified according to synthesis method. Polymeric flocculant can be divided into cationic, anionic, nonionic and amphoteric. Natural modified flocculant can be divided into carbohydrates and Chitosan. Meanwhile, the paper elaborated and generalized the flocculation mechanism of organic polymer sludge dewatering flocculant. Also, the paper discoursed the advantages, disadvantages and application Status of these six flocculants. Finally, the prospects of sludge dewatering polymer flocculant were prospected.

Key words: sludge; flocculant; organic polymer; sludge dewatering

随着中国城镇化水平提高,污水处理设施建设和处理力度不断加大,污水处理量急剧提高。“十一五”期间,污水处理量已达到 1.3×10^9 t/d,“十二五”期间还将增加 $9\,000 \times 10^4$ t,成为仅次于美国的最大污水处理国。但同时,污水厂的建设运行伴随着大量污泥的产生,这些污泥含水率高(95%—99.5%)^[1],污泥中含有大量的有机物和重金属,若处理不当将会给水体和大气带来严重的二次污染。由于

污泥处理成本较高、且污泥产量日益增加,处理标准愈加严格,污泥处理已成为重要的研究课题^[2]。

在对污泥最终处置之前,需要对其脱水,使污泥含水率下降至80%左右。目前,中国大多数污水处理厂采用投加有机高分子絮凝剂,通过有机高分子絮凝剂的吸附架桥及电中和等作用,使得污泥胶体颗粒发生絮凝沉降。相比于无机絮凝剂,有机高分子絮凝剂具有投加量少,絮凝速度快、受温度及pH

收稿日期:2015-03-15

基金项目:国家自然科学基金(21177164);重庆大学大学生科研训练计划(SRTP)。

作者简介:谭洋(1994-),男,主要从事絮凝剂研发与应用,(E-mail) zhl@cqu.edu.cn。

值波动影响较小等优势,因而广泛应用于工业废水处理和污泥脱水^[3]。

笔者对国内外高分子有机絮凝剂的研究进展进行探索并分类叙述了其特点及应用领域。其中,有机高分子絮凝剂可分为单体聚合型和天然有机高分子改性型,其中单体聚合型可按离解基团电离出的电荷类型分为阳离子型、阴离子型、非离子型和两性型。天然有机高分子改性絮凝剂又可分碳水化合物类,壳聚糖类絮凝剂两类,本文将分别进行阐述。

1 单体聚合型污泥脱水絮凝剂

单体聚合型有机高分子絮凝剂主要以丙烯酰胺单体为主,与带有一些带电基团或具有特殊功能的基团的单体发生聚合反应得到分子量极高并可溶于水的链状化合物。污泥脱水絮凝剂中,合成型有机高分子絮凝剂分子中活性基团丰富,分子量大,与污泥颗粒的吸附性能好,可形成较大的絮体,故大多数城市污水处理厂均采用合成型有机高分子絮凝剂作为污泥脱水剂。聚丙烯酰胺类是最常用的合成型絮凝剂^[4]。聚丙烯酰胺类絮凝剂又可分为阳离子型、阴离子型、非离子型和两性型。

1.1 阳离子型高分子污泥脱水絮凝剂

阳离子高分子絮凝剂是链状高分子化合物,携带多种活泼基团并可与多种物质吸附并形成氢键,通过吸附架桥作用与电中和作用达到有除浊、脱色、吸附等的功能^[5]。阳离子絮凝剂是目前被广泛使用的絮凝剂,被广泛应用于污泥脱水处理的生产过程中。

阳离子型高分子絮凝剂包括:丙烯酰胺和阳离子单体的共聚化合物、聚亚胺和聚二甲基二丙基氯化铵等。在国内水处理中使用广泛的阳离子絮凝剂是阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)^[6]。由其高效的处理性能而在处理酒精厂废水、啤酒厂废水等产生的废水中也有着广泛的应用。在这些工程处理的废水中,常含有有机与无机溶剂、烃类等对环境有害的成分,经过处理达标才可排放至环境中^[7]。目前在国内外最常用的阳离子絮凝剂是丙烯酰胺的阳离子共聚化合物。合成聚丙烯酰胺常用的方法有水相聚合、分散聚合和反向乳液聚合等,目前较先进的合成方法还利用了胶囊聚合、光引发、热引发聚合等手段^[8]。

Saurabh Agarwal 等采用投加阳离子絮凝剂,以及先投加少量阳离子絮凝剂再投加阴离子絮凝剂的方式对活性污泥进行脱水研究,试验结果表明阳

离子絮凝剂具有较好的污泥脱水性能,但是考虑到经济因素,先投加少量阳离子絮凝剂再投加阴离子絮凝剂的方式更加具有实际的经济应用价值^[9]。Huaili Zheng 等合成有机高分子絮凝剂 P(AM-DAC-BA),应用于市政污泥脱水,当投加量为 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 为 7 时,上清液剩余浊度为 38 NTU,滤饼含固率最大值为 28.5%^[10]。段文猛等通过反相乳液聚合法制备的 P(AM-DAC)特性粘度可达 1378.7 mL/g ,含聚污水经处理后含油量仅为 3.4 mg/L ,浊度为 24 NUT,目前主要用于处理含聚污水^[11]。Junren Zhu 等在较高阳离子含量下合成得到的 P(AM-DMC-DAC)特性粘度可达 36 dL/g ,絮凝能力和溶解性能均十分优秀,主要用于处理城市污水处理厂产生的污泥^[12]。郑怀礼等采用无机引发剂与有机引发剂作为复合引发剂通过水溶液聚合法合成的 P(AM-DAC)分子量可达 1.2×10^7 ,污泥脱水实验中滤液透光率可达 96.90%,滤饼含水率达 64.50%,主要用于处理城市污水处理厂产生的污泥^[13]。卢红霞采用水溶液聚合法合成的 P(AM-DAC-DMC)特性粘度可达 13.8535 dL/g ,污泥脱水实验中滤液透光率可达 99.6%,脱水率达 90%以上^[14]。Li-Juan Wang 等通过硫酸铵溶液分散聚合合成的 P(AM-AMHP)特性粘度可达 2.372 dL/g ^[15]。

1.2 阴离子型有机高分子絮凝剂

阴离子絮凝剂是在所有有机高分子絮凝剂中研究、使用时间最长的絮凝剂种类,而这些较为成熟的絮凝剂种类至今仍有吸引人们关注的特性。阴离子型有机高分子絮凝剂最大的特点即是造价低廉。工艺成熟的阴离子型高分子絮凝剂成本远低于阳离子型高分子絮凝剂,且仍能获得良好的絮凝效果。目前阴离子型高分子絮凝剂已有多种合成方法,主要有均聚后水解法、均聚共水解法、沉淀聚合法、反相乳液聚合法、共聚法、辐射聚合法、光聚合法等。这些合成方法都各有其优势以及局限性。

阴离子有机高分子絮凝剂已有很长的发展历史,工艺已经较为成熟,阴离子羧基基团具有与多种物质发生物理化学反应的特性,这使其除了具备高分子链网捕与吸附架桥的特性外同时还具有优异的表面活性性能,有广阔的应用前景。

目前应用较多的阴离子污泥脱水絮凝剂种类较多,具有投加量少,沉降速度快,沉渣易脱水等特点^[16]。王树芹等人通过大量实验指出,阴离子型聚丙烯酰胺絮凝剂相对分子质量为 800×10^4 ,水解度

20%时污泥絮凝能力最佳^[17]。聂小保等人采用铁盐和阴离子聚丙烯酰胺联合调剂的方法处理给水厂排泥水,实验得沉速为 3.18 mm/s,污泥比阻为 4×10^{11} m/kg,上清液浊度为 10 NTU,絮凝效果与阳离子絮凝剂相当,但成本更低^[18]。Jiangya Ma 等合成阴离子聚丙烯酰胺 P(AM-AA-AMPS)将其应用于污泥脱水,其效果优于市售 PAM,最小含水率可达 65.1%^[19]。

1.3 非离子型絮凝剂

目前常用的非离子型污泥絮凝剂主要为聚丙烯酰胺类,其分子量在 $200 \sim 1\,500 \times 10^4$ 之间^[20],水解度在 0~5%之间,含固量 $\geq 88\%$,适用于酸性环境中。非离子聚丙烯酰胺的侧基中有酰胺基,其化学性质活泼,能与多种物质发生化学反应,并可获得种类繁多的衍生物。但其临近基团效应使得反应受到限制,不能完全进行。分子链中的酰胺基也带来了高亲水性,能以任意比例溶于水的优异特性^[21]。

非离子絮凝剂可用于处理市政污泥。此时非离子絮凝剂在污水中起到吸附架桥作用,通过分子间的范德华力和氢键力使胶体脱稳而从水中沉淀下来。同时其还可配合无机絮凝剂以获得更佳的絮凝性能^[22]。

1.4 两性型污泥脱水絮凝剂

随着污泥中污染物的种类复杂化,两性絮凝剂的优越性在实际应用中越来越突出。两性型絮凝剂兼有阴离子和阳离子絮凝剂的特性,同时带有阴阳离子基团,适用于阴阳离子共存的污泥处理中,并且 pH 适用范围大,因而受到人们的关注^[23]。两性高分子絮凝剂的高分子链节上同时具有正负两种电荷基团的聚电解质,其在水体环境介质中呈现不同的特性^[24]。制备两性型污泥脱水絮凝剂的方法中,天然改性两性高分子絮凝剂可利用其分子链上的官能团不同的反应活性分别与不同电性的离子醚化剂反应制得;化学手段合成的两性高分子絮凝剂的制备原理主要可基于阴阳离子单体多元共聚和聚丙烯酰胺的曼尼奇接枝反应制备得到^[11]。

肖锦等人制备 P(CG-AC)主要用于处理造纸混合污泥,对造纸混合污泥的絮凝脱水性能好于同样试验环境下的 PHP 和 PAM-C;冉千平等考察了不同剂量 P(AM-DM-MA)在不同 pH 值下的絮凝性能,实验结果显示其絮凝性能优良,分子量可达 17×10^6 ,是非常有潜力的水处理剂^[25]。陈密峰等人采用水溶液自由基聚合法制备了两性絮凝剂 P(AM-AMPS-DMDAAC),其特性粘度可达 1440

ml. g⁻¹,主要用于化洗煤水,污泥脱水,其有聚合物热稳定性高的特点^[26]。黄志华等合成两性絮凝剂 P(AM-DAC-AMPS),絮凝脱水后,污泥滤饼含水率最小可达 77.8%^[27]。

2 改性天然高分子絮凝剂

天然改性高分子脱水剂主要是利用一些天然有机物进行化学改性或与有机单体接枝共聚作为絮凝剂使用的一类有机高分子絮凝剂,种类可分为淀粉改性类、纤维素改性类和壳聚糖改性类等。

天然高分子絮凝剂具有成本低廉,主体成分不需人工合成且来源广泛、改性成本低廉,易于生物降解的特点,使其具有良好的发展前景,也是未来絮凝剂环境友好化的发展趋势^[28]。但由于目前研究发现的天然高分子絮凝剂或多或少存在一些瑕疵和缺陷,需要人工对其进行化学处理以改进其絮凝性能,经过处理的天然高分子絮凝剂被称为天然改性高分子絮凝剂。目前碳水化合物类,壳聚糖类絮凝剂两大类天然高分子絮凝剂的应用较为广泛。

2.1 碳水化合物类絮凝剂

碳水化合物类絮凝剂包括了淀粉、丹宁、葡萄糖、纤维素等,是自然界存在最广泛的有机化合物。此类天然高分子化合物的分子链上有大量活性基团(如羟基、酚羟基),结构多样,因此,它的化学性质较活泼,在进行化学改性后得到的絮凝剂可取得良好的絮凝效果^[29]。

此类化合物中,改性淀粉絮凝剂得到了极大的关注,并取得了一定的成果。马希晨等人在一定的接枝物、甲醛、二甲胺摩尔配比,一定反应温度和时间的条件下,用淀粉-丙烯酸胺接枝共聚物为原料合成了同时具有阴阳离子基团的两性高分子絮凝剂^[30]。Sujit Banerjee 对大豆蛋白改性作为处理造纸污泥的絮凝剂,试验表明具有较好的污泥脱水性能,脱水后滤饼含固率最大可达 36%^[31]。Mahmut Oè Zaccar 等从斛果壳中分离出丹宁酸作为污泥脱水剂,对比试验表明单宁酸的脱水效果优于阴离子聚丙烯酰胺和 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ^[32]。Xuwei Long 等以鼠李糖脂作为脱水剂,对含油污泥进行脱水研究,当投加量为 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \sim 1\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 值 5~7、温度在 $10^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 时,可以去除 50~80%的水分,同时使得污泥体积减少 60%~80%^[33]。

此类化合物因其材料来源广,结构多样,生产工艺简单,无毒等优势而在饮用水净化剂、油田废水破乳剂以及印染、酿酒、电路板印刷等轻工业方面得到

了较为广泛的应用。

2.2 壳聚糖类絮凝剂

甲壳素是不溶于水,稀酸碱的片状半透明固体。将甲壳素用浓碱处理后可生成壳聚糖。壳聚糖是有珍珠光泽的片状半透明固体,可溶于大多数稀酸^[34]。由于合成壳聚糖的原材料甲壳素(又名几丁质)在自然界中储量巨大,使得壳聚糖类絮凝剂的生产成本非常低廉。壳聚糖可由甲壳素脱乙酰化反应制成,在工业上可由虾蟹壳为原料处理获得^[35]。壳聚糖本身可直接用于絮凝过程,但由其分子量小、在酸性条件下易水解等缺陷,人们可通过接枝、交联、共聚等方法对壳聚糖进行改性处理,以得到更优的絮凝效果。壳聚糖类絮凝剂是一种天然高分子絮凝剂,目前壳聚糖絮凝剂在工业上已有大量的应用,在国外也已有国家将其用于处理给水饮用水和污水。中国对壳聚糖类絮凝剂进行了改良,使之能处理水中的重金属粒子与 COD 等污染物。目前每年的壳聚糖类絮凝剂用量超过 500 t。

黄丽莎等人经实验证明,壳聚糖可吸附重金属离子,且对污泥絮凝也有一定效果,指出壳聚糖在污泥絮凝中具有应用价值^[36]。邹鹏等人通过污泥比阻测定,得出壳聚糖类应用于污泥脱水时的最佳投加量为 10 g/L,而壳聚糖与氯化铝复合,通过两段法应用于处理污泥,可大大提高污泥脱水性能^[37]。

3 污泥絮凝机理

有机高分子的絮凝机理主要分为两种:电中和作用和高分子吸附架桥作用。

电中和作用:主要发生于带电荷的有机高分子絮凝剂处理污泥的过程中,絮凝剂中的极性基团在水溶液中电离,形成部分带有电的基团,其具中和带有相反电荷的胶体颗粒中电荷的作用,与此同时,相反电荷之间产生强烈的吸附作用。电荷中和后,压缩胶粒双电层,污泥体系不再稳定,胶粒开始聚集成团,质量增大,易于发生沉降。研究中的阳离子型絮凝剂、阴离子型絮凝剂、两性絮凝剂、碳水化合物类絮凝剂以及壳聚糖类絮凝剂絮凝时有该作用。

吸附架桥作用:这发生于所有有机高分子絮凝剂对污泥脱水过程,絮凝剂分子在水中呈线性展开,长链的末端会吸附在不同胶体颗粒的表面上,一条长链可吸附多个胶体颗粒,此过程如架桥一样把胶体颗粒连接起来。聚合物的链状分子起了桥梁和纽带的作用,聚合物分子将许多胶体颗粒连成一体,增加了质量和体积,容易发生絮凝沉降。该作用广泛

地出现于上述所有的絮凝剂絮凝过程中。

此外,有些絮凝剂还有其特殊的絮凝原理:阳离子絮凝剂是线性高分子化合物,可携带多种活泼基团并与许多物质亲和、吸附形成氢键,具有除浊、脱色、吸附等功能;两性絮凝剂在絮凝过程中还有分子间的“缠绕包裹”效应,使污泥颗粒粗大易于沉降;改性天然高分子絮凝剂中,壳聚糖絮凝剂絮凝过程中链上某些活性基团会与污泥颗粒发生某些反应,使胶体失稳,从而污泥易于沉降。

4 结 语

与无机絮凝剂相比,有机高分子絮凝剂有着分子量大,吸附架桥能力强,可携带多种活性基团的特点,具有用量少、絮凝效果好的优势。但也具有一定的缺点:合成工艺复杂,合成技术还不成熟,残留单体具有一定的毒性。高效、廉价、低毒、无公害已成为目前絮凝剂的发展趋势。研究将向絮凝剂的改良、已有絮凝剂制备工艺的改进和研发新型絮凝剂等方面发展。

参考文献:

- [1] 申迎华,王斌,王志忠. 有机高分子絮凝剂在污泥脱水中的应用[J]. 高分子材料科学与工程, 2004, 20(5): 55-58.
- [2] 杨其文,雷燕. 三峡库区城市污水厂污泥的处理现状及展望[J]. 重庆三峡学院学报, 2013, (3): 1-3.
- [3] 姚萌,程国淡,谢小青,等. 城市污水厂污泥化学调理深度脱水机理[J]. 环境工程学报, 2012, 6(8): 2787-2792.
- [4] 苗庆显,高立芹,秦梦华. 水处理有机絮凝剂的研究进展[J]. 工业水处理, 2006, 26(10): 14-17.
- [5] Cho MS B K, Yoon K J. Dispersion polymerization of acrylamide with quaternary ammonium cationic comonomer in aqueous solution [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 87(7): 1101-1108.
- [6] 卢伟,马江雅,尚娟芳. 阳离子聚丙烯酰胺的聚合方法研究进展[J]. 化学研究与应用, 2013, 25(5): 609-613.
- [7] 郑怀礼,李凌春,蔚阳,等. 阳离子聚丙烯酰胺污泥脱水絮凝剂的制备[J]. 化工进展, 2008, 27(4): 564-568.
- [8] 李富生,胡星琪,段明,等. 聚丙烯酰胺的合成技术及应用研究[J]. 应用化工, 2002, 31(5): 1-4.
- [9] Agarwal S, Mohammad Abu-Orf, John T. Sequential polymer dosing for effective dewatering of ATAD sludges [J]. Water Research 2005 (39): 1301 - 1310.

- [10] Zheng H L, Sun Y L, Tang X M. UV-Initiated Polymerization of Cationic Polyacrylamide: Synthesis, Characterization, and Sludge Dewatering Performance [J]. The ScientificWorld Journal 2013, 2013: 1-7.
- [11] 段文猛, 邓清月, 李爽, 等. 反相乳液聚合制备高相对分子质量和高阳离子度的聚丙烯酰胺[J]. 石油化工, 2011, 40(9): 968-973.
- [12] Zhu J R, . Synthesis and characterization of a dewatering reagent: cationic polyacrylamide (P(AM - DMC - DAC)) for activated sludge dewatering treatment [J]. Desalination and Water Treatment, 2012, 2013 (51): 2791-2801.
- [13] 郑怀礼, 唐雪, 沈烈翔, 等. 阳离子 P(AM-DAC)污泥脱水剂的合成、表征与应用[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(7): 115-122.
- [14] 卢红霞, 刘福胜, 于世涛. 阳离子聚丙烯酰胺絮凝剂的制备及其絮凝性能[J]. 化工环保, 2007, 27(4): 374-378.
- [15] Li J W . A water-soluble cationic flocculant synthesized by dispersion polymerization in aqueous salts solution [J]. Sep Purif Technol, 2009, 67: 331-335.
- [16] Yang X T, Zhao J W, Liu Y, et al. Application of anionic PAM in sludge Dewatering [J]. Water Technology, 2007, 1(4): 34-36.
- [17] 王树芹, 罗松涛, 李国忠, 等. 阴离子型聚丙烯酰胺相对分子质量和水解度对污泥脱水性能影响的研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(8): 1706-1713.
- [18] 聂小保, 黄廷林, 张刚等. 铁盐与阴离子型 PAM 联合调质处理给水厂排泥水试验研究[J]. 给水排水, 2007, 33(8): 46-49.
- [19] Ma J Y, Zheng H L, Tan M Z. Synthesis, characterization, and flocculation performance of anionic polyacrylamide P(AM-AA-AMPS) [J] Polym. Sci. 2013, 129: 1984-1991.
- [20] 申娟娟, 刘根起, 宋金月, 等. 有机高分子絮凝剂的研究现状[J]. 材料开发与应用, 2011, 26(2): 96-99.
- [21] 王永军, 方申文, 郭海军, 等. 非离子型聚丙烯酰胺絮凝剂的制备及其絮凝性能[J]. 化工环保, 2013, 33(4): 358-362.
- [22] 张悦周, 吴耀国, 胡思海, 等. 微生物絮凝剂的研究与应用进展[J]. 化工进展, 2008, 27(3): 24-29.
- [23] 刘千钧, 詹怀宇, 刘明华, 等. 两性木素絮凝剂对生物活性污泥的絮凝脱水性能[J]. 造纸科学与技术, 2004, 23(3): 27-29.
- [24] 肖锦, 周勤, 王杰等. 天然高分子改性制两性絮凝剂及其性能研究[J]. 工业水处理, 2007, 27(9): 20-23.
- [25] 冉千平, 黄荣华, 马俊涛等. 低电荷密度的两性高分子絮凝剂絮凝机理初步探讨[J]. 高分子材料科学与工程, 2003, 19(2): 146-149.
- [26] 陈密峰, 杨健茂, 石启增, 等. 两性絮凝剂 P(AM/AMPS/DMDAAC)的合成及应用[J]. 工业水处理, 2005, 25(7): 1-4.
- [27] 黄志华, 胡勇有, 程建华. 两性高分子污泥脱水剂 PADA 的合成与表征 [J]. 高分子材料科学与工程, 2008, 24(6): 50-53.
- [28] 朱正中, 司友斌, 刘小红, 等. 天然高分子絮凝剂 (GNMF)特性及应用研究[J]. 水处理技术, 2006, 32(11): 66-67, 82.
- [29] 张鹏, 王洪运, 秦绪平. 疏水改性阳离子聚丙烯酰胺絮凝剂的制备及其絮凝性能[J]. 化工环保, 2010, 30(3): 265-269.
- [30] 马希晨, 吴星娥, 曹亚峰. 淀粉基两性天然高分子改性絮凝剂的合成 [J]. 吉林大学学报, 2004, 42(2): 273-276.
- [31] Banerjee S. Dewatering fibrous sludge with soy protein [J]. Process Biochemistry 2014(49): 120-123.
- [32] Mahmut Oè Zacar, Ayhan Sengil. Effectiveness of tannins obtained from valonia as a c2agulant aid for dewatering of sludge [J]. Wat. Res. 2000, 34, (4): 1407-1412.
- [33] Long X W, Zhang G L, Li H, Qin M. Dewatering of floated oily sludge by treatment with rhamnolipid [J]. Water Research, 2013 (47): 4303-4311.
- [34] 沈一丁, 石珞. 壳聚糖交联阳离子高分子絮凝剂的表征及应用[J]. 高分子材料科学与工程, 2002, 18(4): 101-104.
- [35] Vijayay P, Boddum S R, et al. Modified chitosan and calcium alginate biopolymer sorbents for removal of nickel (ò) through adsorption [J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 72: 261-271.
- [36] 黄丽莎, 李加新, 周宁怀. 壳聚糖在废水处理中的应用 [J]. 环境污染与防治, 2001, 23(5): 245-248.
- [37] 邹鹏, 宋碧玉, 王琼. 壳聚糖絮凝剂的投加量对污泥脱水性能的影响[J]. 工业水处理, 2005, 25(5): 35-37.

(编辑 侯 湘)