

文章编号:1000-582X(2011)07-096-06

## 阳离子聚丙烯酰胺的反相乳液聚合

郑怀礼<sup>1</sup>, 王 薇<sup>1</sup>, 蒋绍阶<sup>1</sup>, 沈烈翔<sup>2</sup>, 刘 澜<sup>1</sup>, 张会琴<sup>1</sup>, 范 伟<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045;

2. 浙江嘉善海峽净水灵化工有限公司, 浙江 嘉善 314100)

**摘 要:**以丙烯酰胺(AM)和丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DAC)为单体, Span80-Tween80 为复合乳化剂, 液体石蜡为连续相, 通过反相乳液聚合法制备阳离子型高分子聚丙烯酰胺。研究了油水体积比对聚合物特性粘度的影响, 乳化剂用量对聚合物特性粘度的影响, 单体用量对聚合物特性粘度的影响, 阳离子度对聚合物特性粘度的影响及引发剂用量对聚合物特性粘度的影响。结果表明:在油水体积比为 1:1.6、乳化剂用量为 30%、单体用量为 30%、阳离子度为 60% 即  $n(\text{AM}):n(\text{DAC})$  为 2:3, 引发剂用量为 0.15% 的条件下, 得到的聚合产物粘度较大且具有良好的稳定性和溶解性。对产物进行了红外结构表征, 并研究了产物的污泥脱水性能, 获满意结果。

**关键词:**阳离子聚丙烯酰胺; 絮凝剂; 反相乳液聚合; 丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵; 聚丙烯酰胺  
**中图分类号:** X703.1; TQ314.2 **文献标志码:** A

## Synthesis of cationic polyacrylamide using inverse emulsion polymerization

ZHENG Huai-li<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, JIANG Shao-jie<sup>1</sup>, SHEN Lie-xiang<sup>2</sup>,  
LIU Lan<sup>1</sup>, ZHANG Hui-qin<sup>1</sup>, FAN Wei<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Jiashan Haixia Jingshuiling Chemical Industry Co. Ltd., Jiashan, Zhejiang 314100, P. R. China)

**Abstract:** The cationic polyacrylamide is synthesized by acrylamide (AM) and propenoyl-ethyl trimethyl ammonium chloride (DAC) through inverse emulsion polymerization, using liquid paraffin as continuous phase and Span80-Tween80 as compound emulsifier. The influence factors for the viscosity of product and the stability of the system are discussed, such as the ratio of oil to water, emulsifier dosage, monomer dosage, cationic degree and initiator dosage. When the volume ratio of oil to water is 1:1.6, the emulsifier dosage is 30%, the monomer dosage is 30%, the cationic degree is 60%, i. e. the molar ratio of AM to DAC is 2:3, and the initiator dosage is 0.15%, the obtained product has high viscosity and stability. The effects of viscosity and polymer dosage on flocculating are studied in flocculating experiment, and the polymer structure is analyzed by IR spectrum.

**Key words:** cationic polyacrylamide; flocculating agent; inverse emulsion polymerization; propenoyl-ethyl trimethyl ammonium chloride; acrylamide

收稿日期:2011-02-20

基金项目:国家自然科学基金项目((51078366); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07424-004)

作者简介:郑怀礼(1957-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事环境保护和表面处理研究,

(E-mail) zhenghl@cta.cq.cn.

阳离子型聚丙烯酰胺(Cationic Polyacrylamide,简称 CPAM)是由丙烯酰胺单体(AM)和阳离子单体共聚而成,其特点是分子长链上既有酰胺基团,又有带正电荷的阳离子基团。CPAM 作为一种有效的絮凝剂,在水处理领域对悬浮颗粒带负电荷的污水有良好的澄清效果<sup>[1-2]</sup>;在造纸行业它也是一种重要的增强剂,它可以增长纸纤维的裂断长度和增加纸纤维的结合力<sup>[3]</sup>;在石油开采工业中,具有增稠、絮凝和调节流体的流变性等作用<sup>[4-5]</sup>;它还可应用于化工、电子、采矿等行业<sup>[6]</sup>。

近年来由于城镇化的快速发展,城镇污水产量日益增加,在城镇污水处理过程中产生大量的剩余污泥<sup>[7-8]</sup>,由于剩余污泥颗粒细小,呈絮状及胶状结构,相对密度小不易下沉、压实<sup>[9-10]</sup>,含水量高不宜脱水,在剩余污泥处理过程中必须加入高性能污泥脱水絮凝剂。目前,用于污泥处理的费用约占污水处理厂运行费用的 20%~50%。因此,如何有效提高污泥脱水絮凝剂脱水性能,降低处理费用成为业界关注的重要问题<sup>[11]</sup>。

絮凝法是重要的水处理方法。在絮凝处理过程中,絮凝剂的种类和性质是絮凝处理效果好坏的关键因素<sup>[12-13]</sup>。有了性能优越的絮凝剂,通过控制加药量及混合方法和合理的后续处理工艺,可获得良好的处理效果,因此絮凝剂的研究是实现絮凝处理过程优化的最重要途径<sup>[14-15]</sup>。开发各种高效絮凝剂已成为水处理剂研究热点之一<sup>[16-17]</sup>。

目前,CPAM 主要是通过水溶液来制备。水溶液聚合法制备 CPAM 存在以下不足:1)生产过程为间歇式,不能实现连续生产;2)反应聚合产品为胶体,溶解很困难,使用不方便,若将胶体制成粉体,能耗很高,而且仍需溶解才能使用,使用仍不太方便。反相乳液聚合法制备 CPAM 存在以下优点:1)聚合过程能够实现连续生产,有利于提高生产效率;2)聚合产品为乳液状态,溶解性好,可直接使用,使用方便<sup>[18]</sup>。反相乳液聚合法是一种新型的聚合方法,目前关于 AM 与 DAC 共聚研究尚少。

笔者以丙烯酰胺(AM)和丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DAC)为主要原料,采用反相乳液聚合法制备絮凝性能优异的阳离子聚丙烯酰胺,探讨不同因素对乳液聚合体系的稳定性及特性粘度的影响,并研究自制阳离子聚丙烯酰胺的絮凝性能。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

#### 1.1.1 主要试剂

丙烯酰胺(AM,工业级);丙烯酰氧基乙基三甲

基氯化铵(DAC)(质量分数 80%);液体石蜡(重庆川东化工(集团)有限公司化学试剂厂);氮气(普氮);有机引发剂(化学纯);Tween80(重庆川东化工有限公司);Span80(成都市科龙化工试剂厂)。

#### 1.1.2 主要仪器

TU-1810 紫外可见光谱仪(北京普析通用仪器有限公司);IRPrestige-21 型红外光谱仪(日本 SHIMADZU 公司);恒温水浴锅(上海精宏实验设备有限公司);JJ-1 精密增力电动搅拌器(常州澳华仪器有限公司);恒温干燥箱(上海精宏实验设备有限公司);电子天平(梅特勒-托利多仪器有限公司);乌式粘度计。

### 1.2 实验聚合方法

在装有搅拌器和通氮管的三口烧瓶中,按比例加入一定量的液体石蜡、乳化剂,高速搅拌并通氮保护,然后加入单体 AM 与 DAC 的混合溶液,通氮气保护一定时间后,加入引发剂,继续通氮保护一定时间,并升温至一定温度,持续搅拌至反应完全。

#### 1.3 聚合物特性粘度的测定

将共聚产物用丙酮和乙醇清洗数次后,然后放入烘箱中在 70 ℃下恒温干燥 8 h 得到固体聚丙烯酰胺。按照 GB 12005.1-1989,用一点法在(30±0.05) ℃,1.0 mol/L 的 NaCl 水溶液条件下,用乌式粘度计测定其特性粘度。

#### 1.4 红外谱图表征

将所得聚合物分别用丙酮和乙醇进行处理,真空干燥并粉碎后,用 IRPrestige-21 型红外光谱分析仪测定其谱图。

#### 1.5 絮凝实验

将所得阳离子聚丙烯酰胺配成溶液,按一定的投加量加入 100 mL 的污泥中,搅拌絮凝后进行真空抽滤。测量所得滤液的体积,取滤液用 UV755B 紫外-可见分光光度计测其透光率,并计算其脱水率,计算式为<sup>[1]</sup>

$$\text{脱水率} = \frac{V}{V_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:V 为絮凝后污泥抽滤所得清液的体积,mL;V<sub>0</sub> 为原污泥的体积,mL。

## 2 结果与讨论

### 2.1 油水体积比对聚合物特性粘度的影响

油相作为连续相和分散相,在聚合体系中起着分散体系和传递热量的作用,既影响体系的稳定性和乳化效果,也影响共聚产物的特性粘度。在乳化剂用量(占液体石蜡的质量分数)为 30%,单体用量(占水相质量分数)为 30%,单体摩尔配比为 2:3,引发剂用量(占单体的质量分数)为 0.15%的情况下,

改变油水体积比进行反相乳液聚合,研究并测定在不同油水体积比下聚合产物的特性粘度,研究结果见表 1。

表 1 油水体积比对聚合物特性粘度的影响

油水体积比 /(mL · mL <sup>-1</sup> )	特性粘度/(mL · g <sup>-1</sup> )	稳定性
1.4:1.0	566	很差
1.2:1.0	592	较差
1.0:1.0	652	差
1.0:1.2	733	一般
1.0:1.4	771	较好
1.0:1.6	894	好
1.0:1.8	797	较好

由表 1 知,随着油水体积比的减小,产物的特性粘度呈先增加后减小的变化趋势,当  $V(\text{油}):V(\text{H}_2\text{O})=1:1.6$  时,产物的特性粘度最高。当油水体积比较大时,油相对单体起到稀释作用,体系中单体浓度下降,阻碍了聚合反应的进行,不利于提高聚合物的特性粘度。当油水体积比减小时,一方面由于溶解在油相中的乳化剂的量减小,油相不能很好地分散乳胶粒子,导致聚合时乳胶粒子发生粘黏而出现凝胶<sup>[19]</sup>;另一方面由于油相体积减少,聚合热不易分散,易发生爆聚。

## 2.2 乳化剂用量对聚合物特性粘度的影响

乳化剂是一类表面活性剂,在反相乳液聚合体系中,乳化剂是重要组成部分,其作用是将单体水溶液分散成小的单体液滴,分布在油相中,达到乳化的效果<sup>[20]</sup>,其性质和用量对乳胶粒子的大小、聚合物的特性粘度和乳液的稳定性有显著的影响。

在油水体积比为 1:1.6,单体用量(占水相质量分数)为 30%,单体摩尔配比为 2:3,引发剂用量(占单体的质量分数)为 0.15% 的情况下,改变乳化剂用量(占液体石蜡的质量分数)进行反相乳液聚合。研究并测定不同乳化剂用量下产物的特性粘度,研究结果见图 1。

由图 1 知,随着乳化剂用量的增加,产物的特性粘度呈先增加后减小的变化趋势,当乳化剂用量为 30% 时,产物的特性粘度最高。当乳化剂用量较低时,液滴表面没有完全被乳化剂分子覆盖,乳胶粒子易发生聚结,析出较多胶粒;当乳化剂用量较高时,一方面乳化剂分子将微液滴包裹得更加严实,使油水界面膜加厚,增大粒子表面积,从而导致链增长,另一方面自由基向乳化剂的链转移几率提高,削弱了 AM 的助乳化作用,使液滴内部的有效自由基含量增加,加快了链终止<sup>[21-22]</sup>。

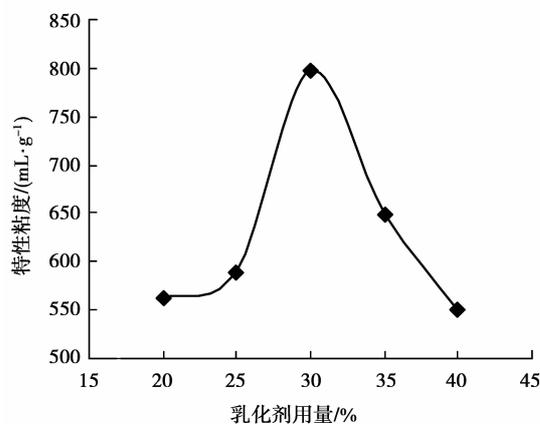


图 1 乳化剂用量对聚合物特性粘度的影响

## 2.3 单体用量对聚合物特性粘度的影响

反相乳液聚合的引发及成核都是在乳胶粒子内,反应时体系中的单体液滴将自身的单体不断以扩散的方式补充到成核的乳胶粒中使反应持续。单体作为反应的基本原料,其用量对聚合反应的顺利进行有重要影响。

在油水体积比为 1:1.6,乳化剂用量(占液体石蜡的质量分数)为 30%,单体摩尔配比为 2:3,引发剂用量(占单体的质量分数)为 0.15% 的情况下,改变单体用量(占水相质量分数)进行反相乳液聚合。研究并测定不同单体用量下产物的特性粘度,研究结果见图 2。

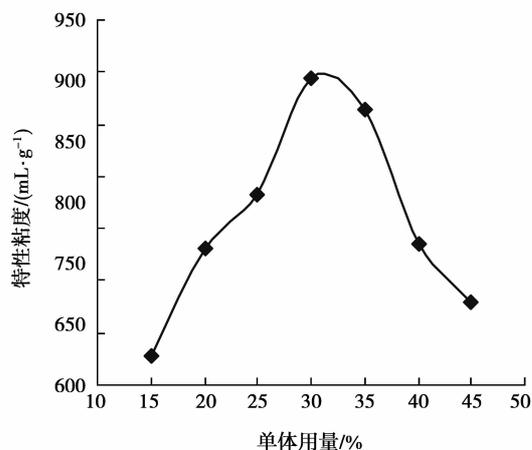


图 2 单体用量对聚合物特性粘度的影响

由图 2 知,随着单体用量的增加,产物的特性粘度呈先增加后减小的变化趋势。当单体用量为 30% 时,产物的特性粘度最高。随着单体用量的增加,聚合反应速率加快,产物特性粘度增加;但单体用量过高,聚合过程中的链转移及链终止速率增加程度超过了聚合速率的增加程度<sup>[23]</sup>,体系聚合热不

能及时散出,导致体系温度急剧上升,破坏乳化作用,造成聚合产物相对分子质量下降。

#### 2.4 阳离子度对聚合物特性粘度的影响

由于 AM 和 DMC 两种单体的竞聚率相差很大,因此要获得特性粘度较高的共聚物,控制两者的比例是关键。当油水体积比为 1:1.6,乳化剂用量(占液体石蜡的质量分数)为 30%,单体用量(占水相质量分数)为 30%,引发剂用量(占单体的质量分数)为 0.15%的情况下,改变阳离子度进行反相乳液聚合,研究并测定不同阳离子度下聚合产物的特性粘度,研究结果见图 3。

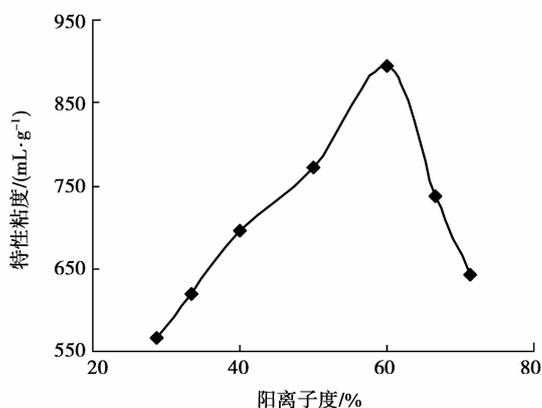


图 3 阳离子度对聚合物特性粘度的影响

由图 3 知,随着阳离子度的增加,产物的特性粘度呈先增加后减小的变化趋势。当阳离子度为 60%即  $n(\text{AM}):n(\text{DAC})=2:3$  的时候,产物的特性粘度最高。这是由于当阳离子度较低时,高活性的 AM 含量较高,导致了聚合反应速率过快,聚合热不易散出,加快了链终止,使产物特性粘度较低;随着阳离子度的增加,DAC 的用量也逐渐增加,DAC 与 AM 的碰撞几率增加,缩小了 2 种单体的活性差异,使分子链增长,提高聚合产物的特性粘度;但是当阳离子度过高时,DAC 的含量过大,较强的空间效应和电荷排斥作用会降低单体的扩散速率和反应活性,降低聚合产物的特性粘度。

#### 2.5 引发剂用量对聚合物特性粘度的影响

在乳液聚合中,引发剂用量对聚合有很大影响,它用量虽少,但对聚合速率的快慢、特性粘度的高低、乳胶粒子的大小和形态有相当大的影响。

在油水体积比为 1:1.6,乳化剂用量(占液体石蜡的质量分数)为 30%,单体用量为 30%(占水相质量分数),单体摩尔比为 2:3 的情况下,改变引发剂用量进行反相乳液聚合。研究并测定不同引发剂用量下产物的特性粘度,研究结果见图 4。

由图 4 知,随着引发剂用量的增加,产物的特性

粘度呈先增加后减小的变化趋势。当引发剂用量为 0.15%时,产物的特性粘度最高。随着引发剂用量的增加,自由基数目也随之增加,产物的特性粘度逐渐增加;当引发剂用量过高时,活性自由基数目增多,从而瞬间引发的单体量增多,导致乳胶粒数目增多,使粒径减小,容易产生爆聚;当引发剂用量太少时,不利于分子链的增长,聚合反应不完全,产物很少<sup>[18]</sup>。

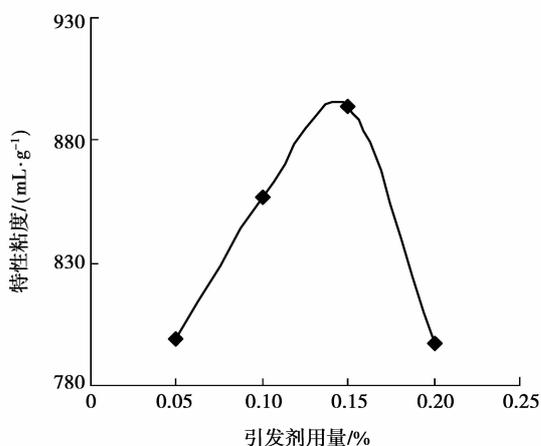


图 4 引发剂用量对聚合物特性粘度的影响

#### 2.6 聚合产物的红外光谱表征

对优化条件下合成的 AM/DAC 共聚物进行红外光谱研究,研究结果见图 5。由图 5 知,在  $3446\text{ cm}^{-1}$  处为氨基— $\text{NH}_2$  特征吸收峰,由于此聚合物有强烈的吸水性,聚合物含少量的结合水,在  $2924\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰为甲基和亚甲基的伸缩振动吸收峰,在  $1652\text{ cm}^{-1}$  处为酰氧基团的特征吸收峰, $1479\text{ cm}^{-1}$  处为  $-\text{CH}_2-\text{N}-(\text{CH}_3)_3$  亚甲基的弯曲振动吸收峰, $1093\text{ cm}^{-1}$  为高分子链骨架上的 C—C 吸收峰,产物具有 AM/DAC 共聚物的特征吸收峰,说明产物是 AM/DAC 的共聚物。

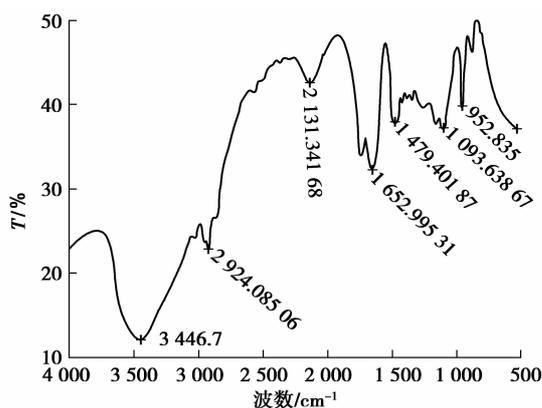


图 5 聚合物的红外光谱图

### 3 絮凝实验

用本研究合成的阳离子絮凝剂对城镇污水处理厂剩余污泥进行污泥脱水絮凝实验,研究产物的特性粘度和产物投加量对絮凝性能的影响。

#### 3.1 投加量对絮凝性能的影响

絮凝剂的投加量对污泥脱水性能有较大的影响。投加量太少,不足以改善污泥的脱水性能;投加量过多,对有机高分子絮凝剂来说由于分子量太大,形成的絮团结构较疏松,影响泥饼的剥离性能<sup>[24]</sup>。

配置 0.5 g/L 的聚丙烯酰胺溶液,按不同投加量分别加入 100 mL 污泥中,搅拌絮凝后,进行真空抽滤,测量滤液的透光率、浊度和污泥脱水率,研究结果见表 2。由表 2 可知,滤液的透光率和污泥脱水率随着投加量的增加而增加,滤液浊度随着投加量的增加而减小。在投加量为 25 mL 时具有较好的透光率、滤液浊度和污泥脱水率,由此可得优化投加量为 25 mL,污泥的透光率为 96.9%,滤液浊度为 11.2,污泥脱水率为 83.2%。

表 2 投加量对絮凝性能的影响

投加量/mL	透光率/%	滤液浊度	脱水率/%
19	92.9	24.4	76.0
21	93.9	21.2	78.4
23	96.7	15.6	82.4
25	96.9	11.2	83.2
27	95.6	15.5	80.8
29	94.8	17.9	79.2

#### 3.2 特性粘度对絮凝性能的影响

絮凝剂特性粘数较小时,架桥作用较弱,不利于污泥的絮凝沉降;特性粘数增大可增强絮凝剂的吸附架桥功能,使絮团迅速增大,从而加快污泥的絮凝沉降<sup>[25]</sup>。

把不同特性粘度的自制聚丙烯酰胺配成浓度为 0.5 g/L 的溶液,分别取 25 mL 该溶液加入 100 mL 的污泥中,搅拌絮凝后,进行真空抽滤,测其滤液的透光率、浊度和污泥脱水率,研究结果见表 3。由表 3 知,特性粘度的增加有利于滤液透光率和污泥脱水率的提高,浊度的降低。当特性粘度为 894 mL/g 时,滤液的透光率为 96.9%,滤液的浊度为 11.2,污泥的脱水率为 83.2%。

表 3 特性粘度对絮凝性能的影响

特性粘度 ( $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ )	透光率/%	滤液浊度	脱水率/%
894	96.9	11.2	83.2
864	96.4	12.3	80.0
853	96.2	13.1	79.2
820	95.4	15.5	78.4
797	94.1	20.2	76.8
769	93.3	22.8	76.2
771	93.1	23.6	75.2

## 4 结 论

1) 研究得到优化聚合条件为:油水体积比为 1:1.6,乳化剂用量为 30% (占油相的质量分数),单体用量为 30% (占水相的质量分数),阳离子度为 60% 即  $n(\text{AM}):n(\text{DAC})$  为 2:3,引发剂用量为 0.15% (占单体的质量分数),得到的产物特性粘度可达 894 mL/g。

2) 用特性粘度为 894 mL/g 的产物,在优化条件下进行污泥脱水絮凝实验,研究结果表明:污泥的透光率可达 96.9%,滤液浊度可达 11.2,污泥脱水率可达 83.2%。

#### 参考文献:

- [1] 惠泉,刘福胜,于世涛. 阳离子聚丙烯酰胺反相胶乳的制备及其絮凝性能[J]. 化工进展, 2008, 27(6): 887-889.  
HUI QUAN, LIU FU-SHENG, YU SHI-TAO. Preparation and flocculating performance of inverse emulsion of cationic polyacrylamide [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2008, 27(6): 887-889.
- [2] CHEN D N, LIU X G, YUE Y M, et al. Dispersion copolymerization of acrylamide with quaternary ammonium cationic monomer in aqueous salts solution[J]. European Polymer Journal, 2006, 42(6): 1284-1297.
- [3] MARTIAL P, JEAN MARC C, JOSEPHS, et al. Synthesis in inverse emulsion and properties of water soluble associating polymers [J]. Applied Polymer Science, 2002, 84(7): 1418-1430.
- [4] 李小兰,王久芬,陈孝飞. 反相乳液聚合合法合成超高相对分子量聚丙烯酰胺的研究[J]. 应用化工, 2005, 34(7): 412-414.  
LI XIAO-LAN, WANG JIU-FEN, CHEN XIAO-FEI. Study on synthesis of ultra-high molecular weight polyacrylamide by inverse emulsion polymerization[J]. Applied Chemical Industry, 2005, 34(7): 412-414.

- [5] 赵娜娜,佟瑞利,邹立壮,等. 疏水改性高分子絮凝剂的合成及其对含油污水的净化[J]. 环境化学, 2008, 27(4):454-457.  
ZHAO NA-NA, TONG RUI-LI, ZOU LI-ZHUANG, et al. Synthesis of hydrophobically modified cationic flocculant and its efficiency for the treatment of waste water [J]. Environmental Chemistry, 2008, 27(4): 454-457.
- [6] 魏鑫,钟宏. 反相乳液聚合的研究进展[J]. 化学与生物工程, 2007, 24(12):12-14.  
WEI XIN, ZHONG HONG. Research progress of inverse emulsion polymerization [J]. Chemistry and Bioengineering, 2007, 24(12):12-14.
- [7] 方俊华,周健,唐德昕,等. 中国小城镇污泥资源化方案决策方法的探讨[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2007, 30(2): 75-80.  
FANG JUN-HUA, ZHOU JIAN, TANG DE-XIN, et al. Decision on the program for Chinese little towns' sludge utilization [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007, 30(2): 75-80.
- [8] 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.  
ZHENG HUAI-LI, TANG XUE, SHENG LIE-XIANG, et al. Synthesis, characterization and application of cationic P(AM-DMC) used for sludge dewatering [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(7):115-122.
- [9] 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.  
ZHENG HUAI-LI, LI LING-CHUN, YU YANG, et al. Synthesis of cationic polyacrylamide flocculant for sludge dewatering [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2008, 27(4):564-568.
- [10] ZHANG S H, ZHENG P, HUA Y M. Nitrogen removal from sludge dewatering effluent through anaerobic ammonia oxidation process [J]. Journal of Environmental Sciences, 2005, 17(3):1030-1033.
- [11] 徐龙君,徐宏亮. 微生物絮凝剂的化学结构特征分析[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(12):1426-1429.  
XU LONG-JUN, XU HONG-LIANG. Chemical structural characteristics of microbial flocculant [J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(12): 1426-1429.
- [12] 郑怀礼. 生物絮凝剂与絮凝技术[M]. 北京:北京化学工业出版社, 2004.
- [13] ZHENG H L, SUN X P, HE Q. Study on synthesis and trapping property of dithiocarbamates macromolecule heavy metal flocculant [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 110(4):2461-2466.
- [14] OHM T I, CHAE J S, KIM J E, et al. A study on the dewatering of industrial waste sludge by fry-drying technology [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 168(1):445-450.
- [15] ZENG Y B, PARK J. Characterization and coagulation performance of a novel inorganic polymer coagulant-poly-zinc-silicate-sulfate [J]. Colloids and Surfaces A: physicochemical and engineering aspects, 2009, 334(1/3):147-154.
- [16] LEI G Y, MA J, GUAN X H, et al. Effect of basicity on coagulation performance of polyferric chloride applied in eutrophicated raw water [J]. Desalination, 2009, 247(1/3):518-529.
- [17] GAO B Y, YUE Q Y, WANG Y. Coagulation performance of polyaluminum silicate chloride (PASiC) for water and wastewater treatment [J]. Separation and Purification Technology, 2007, 56(2): 225-230.
- [18] HEMBENDEZ B J, HUNKELER D J. Inverse-emulsion polymerization of acrylamide using block copolymeric surfactants: mechanism, kinetics and modeling [J]. Polymer, 1997, 38(2):437-447.
- [19] PABON M, SELB J, CANDAU F, et al. Polymerization of acrylamide in solution and inverse emulsion: number molecular weight distribution with chain transfer agent [J]. Elsevier Science, 1999, 40(11):3101-3106.
- [20] INCHAUSTI I, SASIA P M, KATIME I. Copolymerization of dimethylaminoethylacrylate-methyl chloride and acrylamide in inverse emulsion [J]. Journal of Materials Science, 2005, 40(18):4833-4838.
- [21] ZHU J H, SHAO F, ZHAN Y H, et al. Acrylamide as cosurfactant and hydrotrope in the pseudoternary Span80-Tween 85/isopar M/water emulsion/microemulsion forming system [J]. Colloids and Surfaces A: physicochemical and engineering aspects, 2006, 290(1/3):19-24.
- [22] ARMANET L, HUNKELER D. Phase inversion of polyacrylamide-based inverse-emulsions: influence of invertinG-surfactant type and concentration [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2007, 103(6):3567-3584.
- [23] 高庆,张国杰,周庆涛,等. AM-DMC 反相乳液共聚合研究 [J]. 化学与生物工程, 2005, 22(2):40-42.  
GAO QING, ZHANG GUO-JIE, ZHOU QING-TAO, et al. Study on inverse emulsion copolymerization of acrylamide and (2-methacryloyloxyethyl) trimethyl ammonium chloride [J]. Chemistry and Bioengineering, 2005, 22(2):40-42.
- [24] 杨风霞,齐新华,王建新,等. CPAM 在污泥脱水工艺中的絮凝效果研究及应用 [J]. 应用化工, 2007, 36(9): 930-932.  
YANG FENG-XIA, QI XIN-HUA, WANG JIAN-XIN, et al. Flocculating effect and application of CPAM in sludge dehydration [J]. Applied Chemical Industry, 2007, 36(9):930-932.
- [25] 吴敦虎,熊琼,林辉,等. 有机高分子絮凝剂在污泥脱水中的应用研究 [J]. 水处理技术, 2004, 30(4):116-118.  
WU DUN-HU, XIONG QIONG, LIN HUI, et al. The application and study of the high molecular flocculant in dewatering of sludge [J]. Technology of Water Treatment, 2004, 30(4):116-118.