

聚丙烯酰胺类絮凝剂在矿业领域的研究进展

吕帅, 彭伟军*, 苗毅恒, 常鲁平, 曹亦俊

郑州大学 化工学院, 河南 郑州 450001

中图分类号: TD923⁺.3; TD926.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2021)01-0079-06
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2021.01.012

摘要 聚丙烯酰胺在矿业领域中有着重要地位, 广泛用于尾水处理和矿物絮凝。对聚丙烯酰胺类絮凝剂的种类、合成方法、絮凝机理及相关应用进行了综述, 分析了此类絮凝剂在矿业领域应用面临的主要问题, 指出聚丙烯酰胺应该朝着高效、高选择性、环保、安全和经济的方向深入发展。

关键词 聚丙烯酰胺; 絮凝剂; 矿业领域; 选择性; 环保

引言

近年来, 矿产资源开采力度不断加大, 各种矿产资源已呈现出贫、细、杂的特点, 这样势必使矿物解离粒度越来越细, 固液分离愈加困难, 加入性能优良的絮凝剂能够有效解决上述问题。但传统的无机絮凝剂因其用量高、沉降速度较慢、絮体小等缺点, 已无法实现对细小矿物颗粒的絮凝。随着有机絮凝剂的不断发展, 聚丙烯酰胺类絮凝剂逐渐引起了重视, 并逐渐开始取代聚合氯化铝等无机絮凝剂^[1-3]。

聚丙烯酰胺(PAM)属于高分子水溶性聚合物, 具有合成成本低、用量少、分散性强、溶液黏度特性高等优势, 能够作为絮凝剂、助凝剂和污泥脱水剂等使用^[4]。

作为有机絮凝剂中使用最多的一种, 聚丙烯酰胺除了广泛应用在矿业领域外, 还被用于水处理、采油、造纸等领域, 且用量也在逐年增长^[4-7]。然而, 单一结构的聚丙烯酰胺已无法满足越来越复杂的生产状况。尤其在矿业领域, 随着矿物粒度变细, 药剂种类增多, 简单的聚丙烯酰胺很难有效处理各种矿浆与废水, 对其进行深入研究与改性处理受到了广大研究人员的关注^[8, 9]。

1 分类

根据分子链所带电荷性质的不同, 聚丙烯酰胺类

絮凝剂可以分为四大类型: 阴离子型聚丙烯酰胺(APAM)、阳离子型聚丙烯酰胺(CPAM)、非离子型聚丙烯酰胺(NPAM)和两性聚丙烯酰胺(AMPAM)^[10]。

1.1 阴离子型聚丙烯酰胺

阴离子型聚丙烯酰胺是利用阴离子单体与丙烯酰胺聚合而成, 目前常用的阴离子单体为磺酸类和羧酸类。这两类单体活性高, 聚合后产率高, 并且有良好的热稳定性^[11]。与其它三类絮凝剂相比, 阴离子型聚丙烯酰胺的分子量更大, 粘合性更强, 主要用于处理尾矿库水中的金属离子^[12]。

1.2 阳离子型聚丙烯酰胺

阳离子型聚丙烯酰胺与阴离子型聚丙烯酰胺结构相似, 所带电荷相反。由于受到侧链单体结构与电荷密度的影响, 阳离子型聚丙烯酰胺的中和负载与吸附架桥作用更强, 能够快速达到脱稳絮凝的目的。因此, 其应用范围远大于阴离子、非离子和两性聚丙烯酰胺^[13]。

1.3 非离子型聚丙烯酰胺

非离子型聚丙烯酰胺的分子链上没有带电的基团。此类絮凝剂溶于水后, 分子链展开, 主要通过氢键进行吸附, 絮凝能力很低, 适用范围较窄。

收稿日期: 2021-01-17

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFC1908804)

作者简介: 吕帅(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为低品位资源高效加工与利用。E-mail: 15295160537@163.com。

通信作者: 彭伟军(1986-), 男, 博士, 硕士生导师, 研究方向为低品位矿产资源高效加工与利用、化工冶金废水处理。E-mail: pwj@zhu.edu.cn。

1.4 两性聚丙烯酰胺

两性聚丙烯酰胺同时具有阳离子型聚丙烯酰胺和阴离子型聚丙烯酰胺的特性,因为分子链上同时含有阴阳两种离子基团。根据基团分布的差异,两性聚丙烯酰胺可以分为两种结构:一般两性聚电解质结构和甜菜碱型聚电解质结构,如图 1 所示^[14]。一般两性聚电解质正负基团随机分布在支链上,是目前应用较多的一种结构。

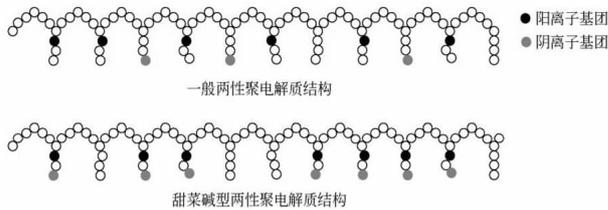


图 1 随机型和甜菜碱型两性聚电解质的结构示意图

Fig. 1 Structural schematic diagram of random and betaine amphoteric polyelectrolyte

在两性聚丙烯酰胺中,阴离子基团可以提高聚合物的稳定性和抗剪切性能,加快无机物的絮凝,阳离子基团能够吸附有机物,促进聚合,提高耐盐性。两种基团的协同作用,使两性聚丙烯酰胺脱水性能得到明显提高,降低了 pH 和温度对絮凝效果的影响^[15]。

表 1 不同聚丙烯酰胺絮凝剂合成方法比较

Table 1 Comparison of synthesis methods of different polyacrylamide flocculants

编号	合成方法	体系构成	产品类型	缺点	优点
1	水溶液聚合	单体、引发剂、水	粉剂	储运费较高、固含量低、线性差	设备简单、成本低、安全性高
2	乳液聚合	单体、引发剂、乳化剂、油相	乳液	不便运输、成本高、环保性差	散热均匀、易溶解、保质期长
3	胶束共聚	单体、引发剂、表面活性剂、水	珠粒状	成本高、表面活性剂残留多	反应稳定、固含量高、方便储运
4	光引发聚合	光引发剂、光源、单体	胶块	光照射不均匀、难规模化生产	生产方便、成本低、纯度高
5	模板聚合	单体、模板分子	胶块	多元反应的理论不足、技术不成熟	定向性好
6	超声聚合	引发剂、超声波、单体	胶块	分子量不高	成本低、均匀性好

3 絮凝机理

无论使用何种聚丙烯酰胺,絮体都主要通过以下过程形成:絮凝剂首先在溶液中分散,进而向固液界面扩散,然后在颗粒表面吸附。携带絮凝剂的颗粒再与其它颗粒碰撞使其它颗粒被吸附,形成了微小的絮体,这些絮体进一步碰撞生长,最后形成体积较大的絮体沉降下来。整个絮凝过程离不开电性中和负载、吸附架桥作用和网捕卷扫三个部分,这也是絮凝的主要作用机理^[20]。

2 制备方法

聚丙烯酰胺类絮凝剂的合成属于自由基共聚过程,由引发剂引发产生自由基,经过链转移、链增长与链终止,最后形成聚合物。目前聚丙烯酰胺类絮凝剂的合成方法主要有水溶液聚合、乳液聚合、胶束共聚等方法^[5, 8, 16]。每种方法各有优缺点,具体如表 1 所示。

水溶液聚合又称共溶剂法,即把所有单体与引发剂加入水溶液中,通过机械搅拌合成相应的絮凝剂。此方法极其简单,对设备要求也不高,但产物单体含量很低,产率不高,目前已通过引入超声、光照或模板聚合增强聚合效果^[17, 18]。

乳液聚合是将丙烯酰胺水溶液分散在含有其它单体的油相之中,加入乳化剂形成 W/O 体系,再引发聚合生成产物。此方法有效解决了一些单体溶解性差的问题,反应体系也很稳定,但乳化剂的成本很高,用量较大^[19]。

胶束共聚是利用含有表面活性剂的水溶液溶解聚丙烯酰胺形成胶束,再加入其它单体,形成均相体系后引发共聚。此方法可以有效提高单体的含量,但是表面活性剂的残留问题一直未得到有效的解决。

不同的制备方法优缺点各不相同,在合成中应根据目标产物与单体的性质确定最适宜的方案,达到最优的效果。

3.1 中和负载

在絮凝剂与悬浮颗粒所带电荷相反的情况下,电性中和负载起主要作用,絮凝剂与悬浮颗粒之间具有很强的吸附作用。由于大部分悬浮颗粒表面带负电荷,因此阳离子型聚丙烯酰胺可以在很多情况下起到较好的絮凝效果^[21]。加入相反电荷的絮凝剂后,悬浮颗粒的 Zeta 电位逐渐趋向于零,两者之间的范德华力逐渐增强,促进了絮体的生成,主要过程如图 2 所示。但当絮凝剂投量过多时,絮体可能会发生电荷反转而分散,对絮凝造成负面作用,此时絮凝剂存在最佳用

量,即悬浮颗粒表面电位接近零时的用量^[22]。

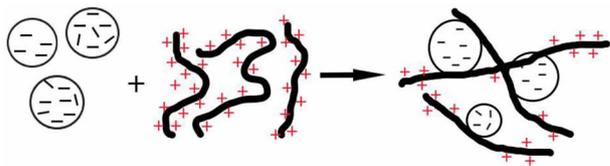


图 2 中和负载机理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of neutralization load mechanism

另外,絮凝剂的电荷密度对中和负载也会产生重要影响。当絮凝剂的电荷密度较高时,会降低最佳用量;当絮凝剂的电荷密度相对较低时,悬浮颗粒会把絮凝剂吸附在颗粒表面,阻碍主链的伸展扩散,形成“静电贴片”^[3]。此时生成的絮体体积小并且碰撞后不会继续生长,严重降低了絮凝效果,“贴片”的形成过程如图 3 所示。



图 3 “静电贴片”形成过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of forming process of “electrostatic patch”

3.2 吸附架桥

当聚合物的分子量很大、电荷密度不是很高时,长链聚丙烯酰胺会通过静电引力、氢键、范德华力等吸附悬浮颗粒,链的中部和两端与多个颗粒相互连接,起到“桥连”作用,主要过程如图 4 所示。

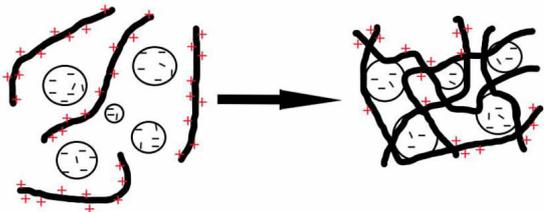


图 4 吸附架桥机理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of adsorption bridging mechanism

吸附架桥是在聚合物分子链足够长的基础上发生的,长链的一端吸附悬浮颗粒后,另一端延伸到其它颗粒表面进行吸附,从而形成“絮体—分子链—絮体”的结构^[23]。另外,悬浮颗粒表面的空白空间对架桥作用影响较大,在表面空间预留充分的条件下,会促进吸附架桥的发生,方便聚合物附着。因此,对于絮凝剂的用量也需要有合理的把握,过多的投量会完全覆盖住颗

粒表面,不利于分子链吸附其他颗粒。

3.3 网捕卷扫

当高分子水溶性聚丙烯酰胺所带电荷密度较高时,其长链会在水溶液中完全伸展,分子链之间互相交错形成网状结构^[6]。随着投量的增加,网状结构不断扩大,对悬浮颗粒的吸附能力显著提高,形成一种大规模的卷扫,最后沉降。网捕卷扫的过程如图 5 所示,此过程主要发生在絮凝的后半段,产生的絮体体积大,沉降速度快,但对絮凝剂的链长、分子量和溶解性能要求较高。

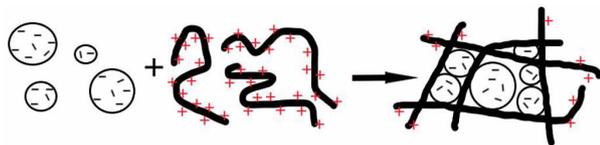


图 5 网捕卷扫机理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the mechanism of net catching and sweeping

由于絮凝剂的种类越来越多,结构组成也愈加复杂,所以在絮凝过程中并不是只有某一种机理存在,而是多种机理协同作用,最后形成絮体完成沉降。目前被广泛接受的主要是以上三种机理,但随着改性絮凝剂的发展应用,絮凝机理需要进一步的深入探究与完善。

4 在矿业领域的应用

随着对聚丙烯酰胺的研究逐渐深入,其在矿业方面的应用越来越受到重视。从低分子量到高分子量,从单一结构到复合结构,各种类型的聚丙烯酰胺都在矿业领域发挥着重要作用。

4.1 微细粒矿物浮选

聚丙烯酰胺能够通过吸附架桥与网捕卷扫作用有效吸附细小颗粒使之聚团絮凝,便于实现微细粒矿物浮选分离。

杨招君等^[24]采用阴离子型聚丙烯酰胺(APAM)对低品位锡细泥进行选择性絮凝浮选研究。试验矿样中锡的品位为 0.40%,嵌布粒度微细,含有大量细泥。在 pH 为 6.5、APAM 用量为 15 g/t 时,锡的品位和回收率达到最高,分别为 4.58% 和 72.67%。继续增加絮凝剂的用量,锡的品位与回收率出现显著下降趋势。

岳双凌等^[25]利用聚丙烯酰胺,通过选择性絮凝—柱浮选回收钼尾矿中的辉钼矿。在固定矿浆浓度与其它药剂的情况下,当丙烯酰胺的用量为 20 g/t 时,钼的品位从 0.69% 提高到了 4.6%,回收率达到了 75%。

继续增加聚丙烯酰胺的用量,钼的品位逐渐降低,絮凝剂的选择性开始下降。

Satu Strandman 等^[26]通过水溶液聚合,制备了一系列非离子型与阴离子型聚丙烯酰胺,并对微细油砂尾矿进行絮凝试验,考察了不同种类聚丙烯酰胺的摩尔质量、溶液浓度和电荷密度对絮凝效果的影响。结果显示,当聚合物的摩尔质量为 6 800 000 g/mol、浓度为 50×10^{-6} g/L 时,对油砂尾矿的絮凝效果较好,明显优于普通类型的聚丙烯酰胺。研究结果对油砂尾矿的治理具有重要意义。

于淙权^[27]对聚丙烯酰胺进行疏水改性,并研究其对微细粒煤泥的絮凝浮选效果。结果表明,改性后的聚丙烯酰胺在投量为 8 g/t 时,精煤的回收率达到了 70% 以上。与未改性的聚丙烯酰胺相比,絮凝浮选效率提高了近 2%,并且尾煤灰分明显降低。

李凤久等^[28]采用常规絮凝剂和接枝共聚聚丙烯酰胺对单矿物和人工混合矿进行絮凝试验,考察了不同类型絮凝剂的选择性。单矿物试验结果表明,淀粉接枝聚丙烯酰胺、磺化聚丙烯酰胺和苛性玉米淀粉均对赤铁矿有较强的絮凝能力,石英矿物在试验范围内均不絮凝。此外,淀粉接枝聚丙烯酰胺对混合矿的絮凝能力最强,在投量为 3 mg/L 时,混合矿沉降物中铁的品位为 42%,回收率为 91.42%,相比原矿提高了 12%。

普通类型的聚丙烯酰胺能够有效絮凝微细粒,但用量过高时,选择性会明显下降,降低了矿物的品位与回收率。对其进行改性处理后,不仅可以提高絮凝效果,降低用量,也能够增强此类絮凝剂对目标矿物的选择性。

4.2 尾矿废水处理

在选矿过程中,会产生大量废水,由于各种药剂的作用,废水中除含有悬浮颗粒外,还含有各类金属离子与有害物质。如果不对尾矿废水进行有效处理,环境会受到严重破坏,水资源也会被大量浪费。聚丙烯酰胺在通常用作助凝剂,通过与其它絮凝剂联合作用,能够有效提高尾矿废水的净化效果。

G. Fijałkowska 等^[29]将阴离子型聚丙烯酰胺与黏土矿物配合使用处理高岭石废液,发现 APAM 能够有效加速重金属离子的积累,促进颗粒的聚集,具有优良的絮凝效果。

Shaofei Shi 等^[30]把聚丙烯酰胺和有机蒙脱土聚合制备了改性聚丙烯酰胺/有机蒙脱土(PAM/OMMT)絮凝剂。采用该絮凝剂处理煤矿废水,研究了絮凝剂对浊度去除率和沉淀时间的影响,并与 PAM 进行了比较。试验结果表明,PAM/OMMT 是一种高效的复合絮

凝剂,在聚合物表面形成的疏水微粒子具有较强的吸附能力和分散能力,蒙脱土提高了絮凝剂本体的质量,缩短了絮凝沉降时间,除浊率可达 95.5%。与 PAM 相比,PAM/OMMT 具有较高的浊度去除率、较高的沉降速度、较低的污泥相对含水量以及较低的温度和 pH 敏感性等优点。

姜智超等^[31]针对某钨铋矿选矿废水中乙硫氮和苯甲羟酸残留过量问题,将阳离子型聚丙烯酰胺和氧化剂联合使用,在氧化 45 min,聚丙烯酰胺加入 2 min 后,废水中的 COD 含量降至 59.0 mg/L,COD 去除率达到了 69.8%,排放水水质满足一级标准。

章丽萍等^[32]利用阳离子型聚丙烯酰胺作为混凝剂,研究了其对钨矿选矿废水中难沉降胶体的去除效果。试验结果表明:基于实际选矿废水水质调研配制的模拟选矿废水浊度为 1 390 NTU,悬浮物为 2 780 mg/L。分子量 1 500 万的阳离子型聚丙烯酰胺的投加量为 30 mg/L,氯化钙投加量为 50 mg/L,反应后静置沉淀 20 min,上清液浊度为 7.11 NTU,浊度去除率高达 99.48%,改变了以传统絮凝剂聚合氯化铝除去胶体的方式。

李利军^[33]根据混凝沉降废水处理技术及锡尾矿水的特征,采用两段去除法对废水进行沉降净化试验。结果表明,加入聚丙烯酰胺进行一段处理,能够有效提高悬浮物的沉降速度,药剂耗费为 0.031 ~ 0.0124 元/ m^3 ,具有很高的经济性。

将聚丙烯酰胺进行改性处理或与其它种类絮凝剂复配使用,在处理尾矿废水时,能够有效加快絮体的聚集沉降,缩短絮凝时间,对悬浮颗粒、水体的浊度和 COD 等均有良好的去除效果,并且具有良好的经济效益。

4.3 浸出矿浆处理

矿物品位逐渐降低,导致有用矿物在矿浆中的浸出速率明显降低,很难进行有效的固液分离。在矿浆中加入聚丙烯酰胺类物质,可以有效解决此类问题。

陈先友等^[34]针对中性浸出一弱酸浸出一还原浸出一沉铜—赤铁矿法除铁的湿法炼锌过程中的各种矿浆进行絮凝沉降试验,全面分析了影响矿浆絮凝沉降效果的主要因素。结果显示,中性浸出矿浆中,各种聚丙烯酰胺都有较好的絮凝沉降效果,弱酸浸出和还原浸出矿浆不宜使用阴离子和阳离子型絮凝剂,沉铜矿浆由于含固量较低,导致各种聚丙烯酰胺的絮凝效果均不理想。

谢添等^[35]以刚果(金)高泥氧化铜浸出矿浆为试验对象,进行了有机高分子聚丙烯酰胺的选型试验,探究了最佳沉降效果下浸出矿浆浓度、絮凝剂种类和用

量等参数指标,再针对浓密机结构进行优化改造,并取得了较好的效果。结果表明:选择刚果某公司生产的1 800~2 300 万分分子量的AN 905 型絮凝剂,能满足高泥氧化铜矿的生产浓缩作业要求。根据沉降试验,生产浸出矿浆质量浓度20%,絮凝剂作用的沉降效果最佳,单耗为100 g/t 矿。

史消升等^[36]以云南某炼铜企业的脱硒渣浮选尾矿为原料,研究了不同改性聚丙烯酰胺对矿浆沉降的影响。结果表明,与未加入絮凝剂的相比,改性阳离子型聚丙烯酰胺絮凝剂和改性阴离子型聚丙烯酰胺絮凝剂均能较大幅度地提高矿浆的沉降速率。两种改性絮凝剂相比,改性阳离子聚丙烯酰胺絮凝剂更有利于获得较佳的沉降效果,且在沉降温度90 ℃、絮凝剂加入量为0.005~0.006 g/L 时,絮凝沉降效果最佳。

传统的聚丙烯酰胺在处理矿浆时,极易受到pH、温度和矿浆浓度等因素的限制,沉降效果较差。通过改性处理后,其絮凝性能得到了显著提升,并且用量也相对更低。但改性聚丙烯酰胺的生产成本与生产技术问题还未彻底解决,目前无法大规模生产。

聚丙烯酰胺在微细粒矿物浮选、选矿尾水处理和矿浆浓缩等方面起着重要作用。尤其在选择性絮凝方面,改性聚丙烯酰胺已经受到广泛研究,利用巯基等基团接枝在聚丙烯酰胺类物质上,形成巯基乙酰化系列改性聚丙烯酰胺(包括巯基乙酰化聚丙烯酰胺、巯基乙酰化胺甲基聚丙烯酰胺、巯基乙酰化羧甲基聚丙烯酰胺、巯基乙酰化磺甲基聚丙烯酰胺和聚二硫代羧基化聚丙烯酰胺等),可以显著提高聚合物对金属离子螯合能力,增强其选择性,拓宽其在应用范围。

5 结语

聚丙烯酰胺类物质逐渐得到了高效研究发展,在矿业领域被大量使用。但目前应用最多的还是几种传统的聚丙烯酰胺,这几类物质的选择性都较差,导致其在矿业领域中有很大局限性,而具有选择性的改性聚丙烯酰胺弥补了这一缺点。很多矿物呈现疏水性,利用疏水型改性聚丙烯酰胺对此类矿物进行絮凝,不仅可以加快絮凝的速度,还能够有效提高矿物与絮凝剂的疏水作用效果,强化絮凝过程。在加入大量药剂后,矿浆一般表现出电负性,采用阳离子型改性聚丙烯酰胺处理矿浆,可以大幅度强化电性中和作用,促使絮凝剂与矿浆充分作用,快速达到处理要求。此外,针对不同矿物的特性差异(如对pH、温度的敏感性差异),开发具有高选择性的敏感型聚丙烯酰胺,能够有效絮凝含有大量难分离脉石矿物的低品位矿产。随着矿物开采过程越来越复杂,研究具备优异选择性的新型聚丙烯酰胺势在必行。

另外,聚丙烯酰胺属于高分子化合物,其分子量的大小直接影响絮凝效果。目前,主要通过改变引发剂的用量控制聚合物的相对分子量,应用较多的聚丙烯酰胺类絮凝剂分子量在600 万~4 000 万之间。分子量较低时,主链长度较短,不仅增加絮凝剂用量,而且极易形成“静电贴片”,对絮凝起反作用。分子量过高时,絮凝剂较难溶解,并且会使矿浆粘度过大,导致絮体难以沉降,大大降低了絮凝效果。因此,选用适当分子量的聚丙烯酰胺极为重要。

同时,聚丙烯酰胺类絮凝剂的二次污染问题也应当受到重视。采用可降解物质对聚丙烯酰胺进行环保改性,在提高选择性的同时提高降解能力,开发廉价、安全、无污染的绿色聚丙烯酰胺也是此类絮凝剂深入发展的新方向。

参考文献:

- [1] 王茜,赵磊. 新型无机高分子絮凝剂研究进展[J]. 辽宁化工,2017,46(2):185-186.
- [2] 赵诗雨,孙连军,付道松,等. 复合高分子絮凝剂的研究与应用进展[J]. 化肥设计,2018,56(6):1-4.
- [3] LEE C S, ROBINSON J, CHONG M F. A review on application of flocculants in wastewater treatment[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2014, 92(6): 489-508.
- [4] 王勤. 新型聚丙烯酰胺絮凝剂的合成与研究进展[J]. 化工管理,2019(36):194-195.
- [5] 王辉. 阳离子聚丙烯酰胺微球的合成及在污水处理中的应用研究[D]. 西安:长安大学,2019.
- [6] GREGORY J, BARANY S. Adsorption and flocculation by polymers and polymer mixtures[J]. Adv Colloid Interface Sci, 2011, 169(1): 1-12.
- [7] ZHANG P, WANG W, ZHOU Y, et al. Preparation and solution properties of a novel cationic hydrophobically modified polyacrylamide for enhanced oil recovery[J]. Journal of Macromolecular Science, Part A, 2019, 55(12): 764-769.
- [8] 任豹,闵凡飞,陈军,等. 疏水改性聚丙烯酰胺的合成方法研究进展[J]. 洁净煤技术,2018,24(6):1-7.
- [9] 李嘉. 巯基乙酰化改性聚丙烯酰胺及其衍生物重金属螯合絮凝剂的性能研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2019.
- [10] 赵燕丽. 几种絮凝剂对微藻采收及生物柴油制备的影响[D]. 济南:山东建筑大学,2019.
- [11] 陈新. 阴离子聚丙烯酰胺P(AM-IA-AMPS)的制备及应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2019.
- [12] 李卓序. 新型阴离子聚丙烯酰胺的接枝合成及回收淀粉的应用[D]. 杭州:浙江工商大学,2017.
- [13] LI J, WU FP, WANG EJ. Hydrophobically associating polyacrylamides modified by a novel self-associative cationic monomer[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2010, 28(2): 137-145.
- [14] 朱阳阳,金二锁,宋君龙,等. 两性聚丙烯酰胺的性质、合成与应用研究进展[J]. 化工进展,2015,34(3):758-766,789.
- [15] 刘伟,唐华东. 高分子量两性聚丙烯酰胺的研究进展[J]. 应用化工,2018,47(9):1952-1956.
- [16] GAYATHRI K, PALANISAMY N. Methylene blue adsorption onto an

- eco-friendly modified polyacrylamide/graphite composites; Investigation of kinetics, equilibrium, and thermodynamic studies[J]. Separation Science and Technology, 2019, 55(2): 266-277.
- [17] WANG C, LI X, LI P. Study on preparation and solution properties of hydrophobically associating polyacrylamide by emulsifier-free ultrasonic assisted radical polymerization[J]. Journal of Polymer Research, 2012, 19(8): 1-7.
- [18] ZHOU Y, ZHENG H, HUANG Y, et al. Hydrophobic modification of cationic microblocked polyacrylamide and its enhanced flocculation performance for oily wastewater treatment[J]. Journal of Materials Science, 2019, 54(13): 10024-10040.
- [19] 张丽华. 模板反相微乳液聚合疏水缔合聚丙烯酰胺的合成研究[J]. 橡塑技术与装备, 2020, 46(10): 9-16.
- [20] CHEN F, LIU W, PAN Z, et al. Characteristics and mechanism of chitosan in flocculation for water coagulation in the Yellow River diversion reservoir[J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 34(1): 191-197.
- [21] ZHANG Y, MIAO Z, ZOU J. A new cation-modified Al-polyacrylamide flocculant for solid-liquid separation in waste drilling fluid[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 16(10): 41-49.
- [22] 杨开吉, 姚春丽. 阳离子高分子聚合物絮凝机理及应用研究进展[J]. 造纸科学与技术, 2019, 38(5): 19-26.
- [23] 陈秋. 改性聚丙烯酰胺类絮凝剂的合成及应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [24] 杨招君, 徐晓衣, 袁祥奕. 低品位锡细泥选择性絮凝浮选试验研究[J]. 中国矿业, 2019, 28(S1): 212-215+219.
- [25] 岳双凌, 廖寅飞, 马子龙. 选择性絮凝-柱浮选回收铅精选尾矿中的微细粒辉钼矿[J]. 矿产综合利用, 2018, 10(5): 52-57.
- [26] STRANDMAN S, VACHON R, DINI M, GIASSON S, et al. Polyacrylamides revisited: flocculation of kaolin suspensions and mature fine tailings[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2018, 96(1): 20-26.
- [27] 于淙权. 疏水改性聚丙烯酰胺的制备及选择性絮凝-浮选研究[J]. 矿产综合利用. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.TD.20200622.1157.178.html>.
- [28] 李凤久, 刘殿一, 郑卫民, 等. 微细粒赤铁矿-石英体系的选择性絮凝试验研究[J]. 矿产综合利用, 2016(3): 49-53.
- [29] FIJALKOWSKA G, WIŚNIEWSKA M, SZEWCZUK-KARPISZ K. Adsorption and electrokinetic studies in kaolinite/anionic polyacrylamide/chromate ions system[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 603(25): 232-239.
- [30] SHI S F, ZHENG L, WANG Y Q, et al. Preparation and Application Study on the Coalmine Wastewater Flocculant - PAM/OMMT[J]. Advanced Materials Research, 2012, 581(82): 223-227.
- [31] 姜智超, 余侃萍. 氧化-絮凝法处理钨铋选矿废水[J]. 矿冶工程, 2019, 39(1): 91-94.
- [32] 章丽萍, 吴胜念, 宋学京, 等. 难沉降钨矿选矿废水处理研究[J]. 矿业科学学报, 2020, 5(6): 687-695.
- [33] 李利军. 混凝沉淀处理锡选矿废水的研究[J]. 云南化工, 2016, 43(5): 51-54.
- [34] 陈先友, 朱北平, 陈刚, 等. 湿法炼锌矿浆絮凝沉降效果研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(10): 1-4.
- [35] 谢添, 刘芳斌, 童雄, 等. 刚果(金)高泥氧化铜矿的絮凝沉降试验研究及技改应用[J]. 矿冶, 2020, 29(6): 26-31+39.
- [36] 史清升, 俞小花, 李荣兴, 等. 改性离子型絮凝剂对含锑矿浆沉降性能的影响[J]. 矿冶, 2019, 28(3): 49-53.

Advances of Polyacrylamide Flocculants in Mining Industry

LV Shuai, PENG Weijun, MIAO Yiheng, CHANG Luping, CAO Yijun

Zhengzhou University School of Chemical Engineering, Zhengzhou 450001, Henan, China

Abstract: Polyacrylamide plays an important role in mining industry and is widely used in tail water treatment and mineral flocculation. In this paper, the types, synthesis methods, flocculation mechanism and related applications of these flocculants were reviewed. The main problems in the application of polyacrylamide flocculants in mining industry are pointed out, and it is expounded that polyacrylamide should be developed deeply in the direction of high efficiency, high selectivity, environmental protection, safety and economy.

Key words: polyacrylamide; flocculant; mining field; selectivity; environmental protection

引用格式: 吕帅, 彭伟军, 苗毅恒, 常鲁平, 曹亦俊. 聚丙烯酰胺类絮凝剂在矿业领域的研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(1): 79-84.

Lv S, Peng WJ, Miao YH, Chang LP, and Cao YJ. Advances of polyacrylamide flocculants in mining industry[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2021, 41(1): 79-84.