文章编号：1004-0609(2012)11-3270-08

含对甲基苯基侧链基团的氧肟酸赤泥沉降剂的合成与性能

陈 锋[1]，刘炳迪[1]，王 磊[1]，毕诗文[2]，吴玉胜[3]

(1. 东北大学 理学院，沈阳 110004；2. 东北大学 材料与冶金学院，沈阳 110004；
3. 沈阳工业大学 材料科学与工程学院，沈阳 110870)

摘 要：合成含对甲基苯基侧链结构的氧肟酸类新型高效絮凝剂。首先以丙烯酰胺水溶液为连续相，以对甲基苯乙烯为分散相，在 SPAN-60 及 TWEEN-80 复合乳化剂作用下形成微乳液，在 15~35 ℃下合成丙烯酰胺与对甲基苯乙烯的共聚物；然后采用程序控温方式，在 60~90 ℃下用硫酸羟胺将酰胺羟肟化得到所需产物。用红外光谱、紫外光谱和 DSC 表征产物结构，用黏度法测定产物的相对分子质量。考察所合成聚合物的相对分子质量及对甲基苯基含量对氧化铝生产过程中赤泥矿浆沉降效果的影响。结果表明，氧肟酸类絮凝剂中对甲基苯基质量分数为 10.5%，相对分子质量为 1.1×10^7 时，具有良好的沉降效果，并优于现行使用的国内外产品。

关键词：对甲基苯乙烯；氧肟酸；丙烯酰胺；絮凝剂；赤泥；合成；性能
中图分类号：TF821 **文献标志码**：A

Synthesis and properties of hydroxamic acid red mud flocculant containing side-chain of *p*-tolyl

CHEN Feng[1], LIU Bing-di[1], WANG Lei[1], BI Shi-wen[2], WU Yu-sheng[3]

(1. School of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110004, China;
2. School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China;
3. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

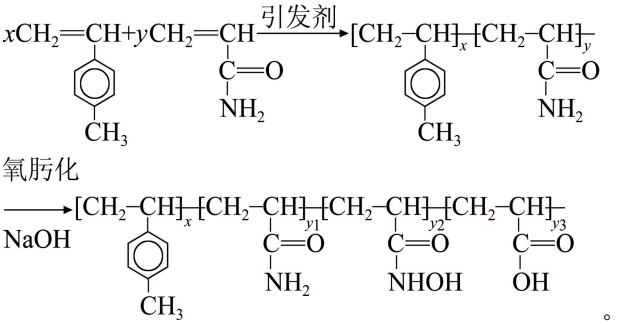
Abstract: A new hydroxamic acid polymer containing *p*-tolyl as high efficiency flocculants was synthesized. Firstly, at 15−35 ℃, the copolymerization of acrylamide and (AM) *p*-methylphenylene was carried out in a microemulsion system, in which AM aqueous solution was the continue phase and *p*-methylphenylene was the dispersed phase using SPAN-60 and TWEEN-80 as surfactants, respectively. Polymers of hydroxamic functions were prepared with hydroxylamine salt at temperatures from 60 to 90 ℃ in the way of program control. The relative molecular mass was measured through the viscose method and the copolymer was characterized by FT-IR, UV and DSC. The effects of relative molecular mass of the copolymer and the content of the *p*-tolyl on red mud setting process in the production process of Al_2O_3 were studied. The results show that the new hydroxamic acid flocculants containing 10.5% *p*-tolyl with the relative molecular mass of 1.1×10^7 are more efficient in settlement effect than the hydroxamic acid flocculants that are widely used at present.

Key words: *p*-methypheaylene; hydroxamic acid; acrylamide; flocculant; red mud; synthesis; property

随着工业对电解铝需求的增加，氧化铝作为电解铝工业的原料，需求量大幅度增加。在氧化铝生产过程中，赤泥沉降是影响氧化铝产量的瓶颈工序，其性能的好坏直接影响赤泥的含碱量和产品的质量[1]。而在赤泥沉降过程中起关键作用的是絮凝剂，其对赤泥的沉降速度及上清液澄清度的影响，直接关系到氧

基金项目：国家自然科学基金资助项目(50804031)
收稿日期：2011-10-15；**修订日期**：2012-04-28
通信作者：陈 锋，副教授，博士；电话：024-83687671；E-mail: chenfeng1231231@sina.com

化铝的生产速度和产品质量。随着以高效、节能的管道化溶出为手段的氧化铝生产工艺的推广和应用，管道化溶出产生的细赤泥对絮凝剂的要求越来越高。目前，国内外在此生产过程中使用的絮凝剂，以氧肟酸类絮凝剂较为普遍。这种类型的絮凝剂是在20 世纪 80 年代由 SPITZER 和 YEN[2]最先提出的，主要采用聚丙烯酰胺改性的方法合成[3]。氧肟酸类絮凝剂具有沉降后上清液澄清度高、压缩带液固比低等优点，但其沉降速度相对较慢，因此，提高氧肟酸类絮凝剂的沉降速度成为当前的研究热点[4−7]。EVERETT [8]提出在氧肟酸类高聚物支链上引入水杨酸结构的化合物以加快絮凝剂的沉降速度；GARY 等[9]研究了在高聚物支链上引入 3~4 个 C 原子的酯基结构进行改性；徐方等[10]采用自制的丙烯酰胺−丙烯酸钠−β−衣康酸单甲酯共聚物对赤泥浆料进行沉降实验；MATTHEW 等[11]提出用含 Si—O 键结构的氧肟酸类絮凝剂改善其沉降效果。但这些聚合体合成工艺复杂、成本高，不适于工业应用，并且酯基或 Si—O 键在强碱性的赤泥浆料中易水解，产生小分子有机化合物，对后续工序有潜在的影响。本文作者曾提出采用含苯环结 构、相对分子质量较大的氧肟酸类絮凝剂[12](简称 HHCP)，虽能显著提高沉降速度，但相对分子质量过大的絮凝剂在实际使用过程中溶解时间较长，使用不方便，同时絮凝下来的赤泥黏性较大，给后续处理带来不利。为此，本文作者在氧肟酸类物质结构中接入具有更强疏水特性的烷基苯结构，合成了相对分子质量较为适中、带有对甲基苯基侧链结构的氧肟酸类聚合物(以下简称 PTHA)，反应式如下：



。

这种结构的高分子聚合物不但容易合成，而且在适中的相对分子质量时就具有较快的絮凝沉降速度，在工业实验中取得了较好的效果。

1　实验

1.1　仪器与试剂

810FT−IR 红外光谱仪(Perkin-Elmer 公司生产)；UV−2401PC 紫外分光光度(SHIMADZU 公司生产)；乌式黏度计(4−0.60，沈阳市卫工玻璃计器厂生产)；LEICA DM RX 偏光显微镜(德国 LEICA 公司生产)；TG209C 差热扫描量热分析(DSC)仪(德国 NETZSCH 公司生产)。

对甲基苯乙烯(北京易莱西诺生物科技有限公司生产，分析纯)，使用前经减压蒸馏纯化；丙烯酰胺(天津市泰兴试剂厂生产，分析纯)，使用前二次重结晶纯化；硫酸羟胺(丹东化工二厂生产，分析纯)；甲醇、亚硫酸氢钠、过硫酸钾(沈阳化学试剂厂生产，分析纯)；司盘−60、吐温−80(大连化学试剂厂生产，分析纯)；扩链剂 HN(河南大兴化工厂生产)。赤泥矿浆来源于中国铝业河南分公司氧化铝厂 3 次沉降车间，热矿浆，油浴保温 98 ℃，固含量为 63 g/L。

1.2　聚合物的合成

聚合物的合成过程分两步，即高分子聚合过程与羟肟化改性过程。

将 10.0 g 丙烯酰胺溶解于 50.0 mL 水中，再加入 EDTA 2.54 mg，缓慢例入 250 mL 四口烧瓶中，静置 10 min，排除氧气，置于 30 ℃的恒温水浴中。将 0.6 g 由司盘−60 与吐温−80 组成的 HLB 值为 10 的复合乳化剂和 2 g 对甲基苯乙烯加入反应体系中，剧烈搅拌并通氮气 30 min 除氧，再加入引发剂 0.002 g/mL 亚硫酸氢钠溶液 1.5 mL、0.003 g/mL 过硫酸钾溶液 3 mL、扩链剂 0.04 g、搅拌反应，约 6 h 完成聚合反应，得到略微透明的白色乳液。

将 8.0 g 的硫酸羟胺溶于水中，调节 pH 值至 10，然后将此混合液倒入上述反应烧瓶中，继续通氮气，先于 60 ℃下反应 4 h，再于 90 ℃下反应 2 h。反应终止后，加入甲醇至产物沉淀并分离，用水溶解，再用甲醇沉淀，抽滤。将所得高聚物用甲苯浸泡 30 h，除去对甲基苯乙烯共聚物，最后取出，减压干燥得产物，为白色固体。

1.3　产物的结构表征

采用紫外光谱法测定高分子链上对甲基苯基的含量[13]；红外光谱的测定：将产物粉末压制成膜，在红外光谱仪下进行红外光谱测定；氧肟酸结构的测定：利用氧肟酸结构与 Fe^{3+}的显色反应，将产物配成 0.10%的水溶液，滴入 3 滴 1.0%的 $FeCl_3$ 溶液，观察颜色变化；DSC 测试：氮气气氛，升温速率为 20 K/min，测试温度范围为 20~230 ℃；相对分子质量的测定：用乌氏黏度剂测量产物水溶液的相对黏度，并通过 Mark-Houwink 方程[14]计算相对分子质量，其中参数

k=3.73×10^{-4}，α=0.66，温度 30 ℃，实验介质 1 mol/L NaCl 溶液；对甲基苯乙烯转化率的测定：根据最终产物中对甲基苯基的含量及对甲基苯乙烯的投料量，求出对甲基苯乙烯的转化率。

1.4 沉降效果的测试与表征

在 45 ℃下，用 3%~4%NaOH 溶液将制得的高聚物配制成 0.05%溶液。取若干支沉降管，分别装入高度为 250 mm 的赤泥矿浆，分别加入各种絮凝剂溶液 2 mL，搅拌 10 次，并记录在 0.5、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 min 时的压缩带高度(mm)。沉降 30 min 后，取上清液测定吸光度。

2 结果和讨论

2.1 合成产物的结构表征

图 1 所示为合成产物(对甲基苯基含量为 10.5%，质量分数)的紫外光谱。从图 1 可见，在 220 nm 处和 270 nm 左右的两个强吸收带分别为双取代苯环结构的 E_2 和 B 特征吸收带，这是由苯结构中环状共轭系统的跃迁产生的，说明化合物结构中有苯环基团，而氧肟酸聚合物在 270 nm 处则没有吸收。

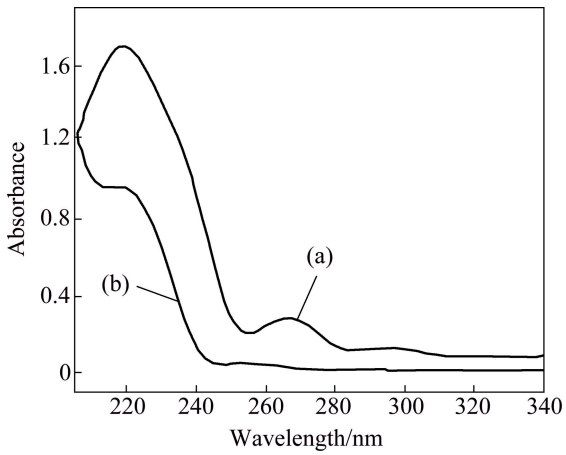


图 1 共聚物的紫外光谱图

Fig. 1 UV spectra of copolymer: (a) Hydroxamic acid polymer containing *p*-methylphenylene; (b) Hydroxamic acid polymer

图 2 所示为合成产物(对甲基苯基含量为 10.5%)的红外光谱。由图 2 可见，1 602 和 1 500 cm^{-1} 处为苯环的特征吸收峰，820 cm^{-1} 处为苯环的对位双取代特征吸收峰。在谱图中还可以观察到 3 345 cm^{-1} 和 1 670 cm^{-1}(与苯环 1 655 cm^{-1} 处的特征吸收重叠)处酰胺键

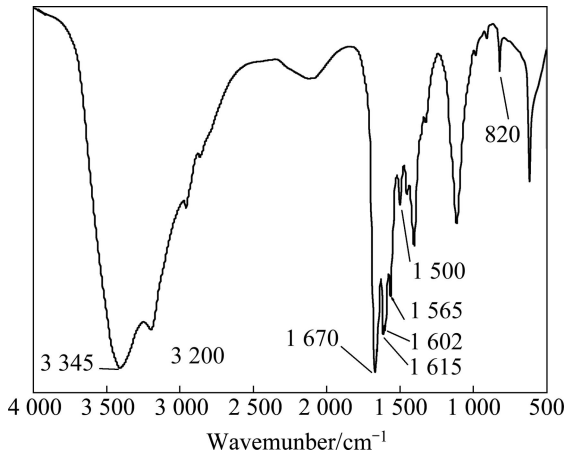


图 2 共聚物的红外光谱

Fig. 2 IR spectrum of copolymer

的特征吸收峰以及 1 615 cm^{-1} 处氧肟酸基团的特征吸收峰。

另外，从显色反应可以看到体系变成血红色。这是因为氧肟酸结构可以与 Fe^{3+}发生配合反应[15]，从而显红色，由此可以证明结构中氧肟酸结构的存在。

将聚对甲基苯乙烯、聚丙烯酰胺(PAM)及本实验第一步共聚反应所制得的丙烯酰胺与对甲基苯乙烯共聚物进行 DSC 分析，结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出，聚对甲基苯乙烯与聚丙烯酰胺的 T_g 分别为 116.0 ℃和 168.5 ℃，而本研究合成的共聚物的 T_g 有两个，即 119.5 和 164.2 ℃，介于聚对甲基苯乙烯与聚丙烯酰胺的 T_g 之间，说明共聚物具有两相结构，是嵌段型的。上述检测结果证明，所合成化合物为目标产物。

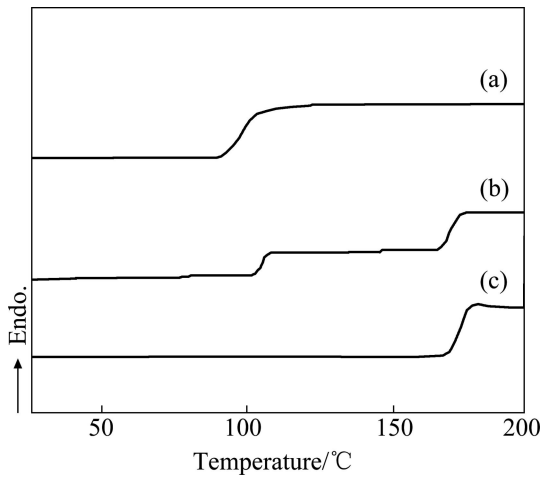


图 3 共聚物的DSC曲线

Fig. 3 DSC curves of copolymers: (a) Poly(*p*-methylstyrene); (b) (AM-PMS) copolymer; (c) PAM

2.2　聚合温度对产物相对分子质量及对甲基苯基转化率的影响

在第一步聚合反应中，不同反应温度对产物相对分子质量和对甲基苯乙烯转化率的影响如图 4 所示。由图 4 可见，在 15~30 ℃，产物相对分子质量差别不大，但温度高于 30 ℃后，随着温度的增加，产物的相对分子质量逐渐降低。

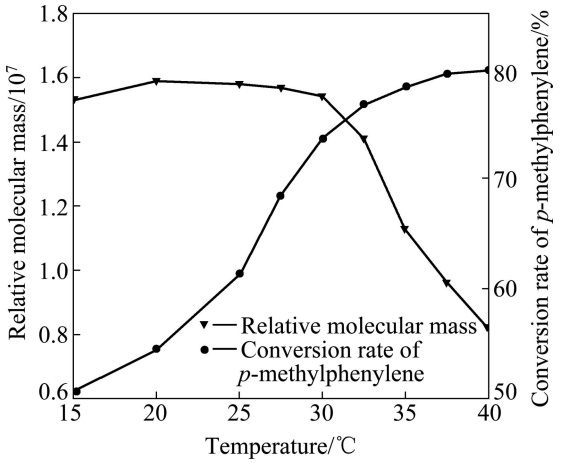


图 4　反应温度对产物相对分子质量及对甲基苯基转化率的影响

Fig. 4　Effect of temperature on relative molecular mass of product and conversion rate of *p*-methylphenylene

丙烯酰胺与对甲基苯乙烯的聚合反应为自由基反应过程。一般来说，升高温度可以加快反应速率，但降低产物的相对分子质量。这是因为在链引发阶段，自由基的分解需要大量的能量，在这个阶段，高温比低温更能促进自由基的分解，从而形成更多的初级自由基，这就使体系中的分子链数目增多，从而使每个分子链的聚合度降低；而在链终止阶段，由于歧化终止所需要的能量比偶合终止所需要的能量多，因此，升高温度更有利于高分子链的歧化终止，这也使产物的相对分子质量降低。另外，高温还有利于链转移的发生，这也是温度过高使产物相对分子质量降低的原因之一。

由图 4 可见，对甲基苯乙烯的转化率随温度的升高而增加，到 35 ℃后转化率增加幅度变缓。一般来说，提高温度可增加分子有效碰撞的几率，有利于反应的进行。

2.3　对甲基苯基在高分子结构中的含量对沉降效果的影响

在本研究中，所用赤泥矿浆是由铝土矿经“管道化溶出”产生的工业热赤泥矿浆，也是目前最细、最难沉降的矿浆。目前工业上赤泥沉降时的矿浆温度通常为 98 ℃左右，选此温度来评定絮凝剂的沉降效果，以使评价结果具有实际意义。

图 5 所示为调节对甲基苯乙烯的用量，得到含不同对甲基苯基质量分数的聚合物对赤泥矿浆的沉降效果。由图 5 可见，随着对甲基苯基引入量的增大，沉降效果明显变好，但当引入量超过 14%以后，沉降效果的改善便不再明显。当对甲基苯基质量分数为 7%~14%时，沉降效果较好。

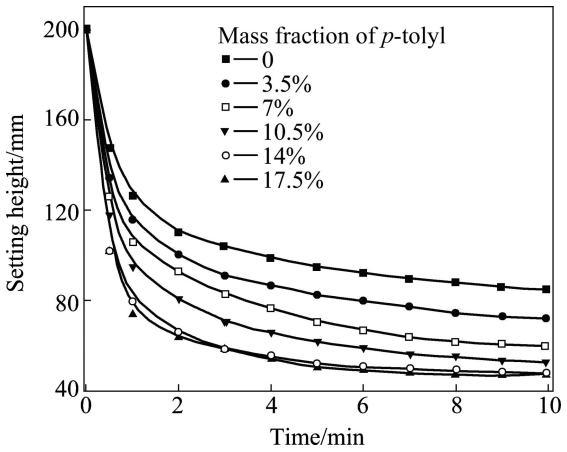


图 5　对甲基苯基含量对产物沉降效果的影响

Fig. 5　Effect of *p*-tolyl content on setting velocity(Copolymer relative molecular mass of 1.1×10^7)

在高分子结构中引入适量的对甲基苯基支链结构，可以阻碍分子链之间的相互接近，从而减小了分子间的作用力，有利于链的打开，使产物更易溶于水。另外，更为重要的是由于对甲基苯基的存在提高了分子链的疏水性，显著增大了沉降速度。但如果对甲基苯基结构引入过多，则会限制整个高分子链的运动，进而降低其他官能团对赤泥的吸附速度，对絮凝产生不利影响。

2.4　聚合物 PTHA 相对分子质量对沉降速度的影响

图 6 所示为聚合物 PTHA 相对分子质量对沉降速度的影响。由图 6 可见，PTHA 相对分子质量在 0.5×10^7~1.1×10^7 范围内，随着相对分子质量的增加，沉降效果越来越好；当其相对分子质量超过 1.1×10^7 后，随着相对分子质量的增加，提高沉降效果的趋势变缓。

高分子絮凝剂的沉降过程分为以下几个步骤[16]：1) 高分子化合物溶于或分散于溶液体系中，高分子链在体系中充分打开；2) 其结构中的极性基团通过物理或化学作用将细微悬浮物吸附在一起，并起“吸附桥

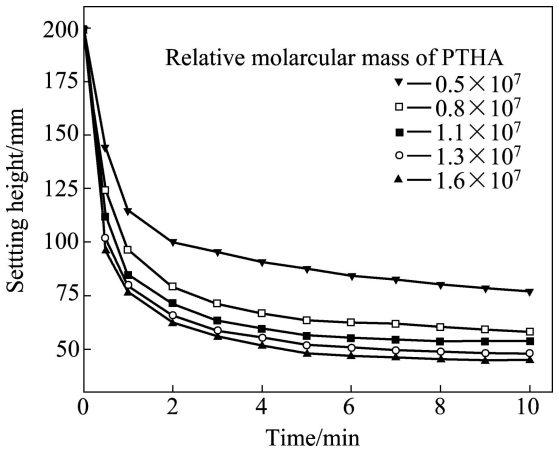


图 6 聚合物 PTHA 的相对分子质量对沉降速度的影响

Fig. 6 Effect of relative molecular mass of copolymer PTHA on setting velocity

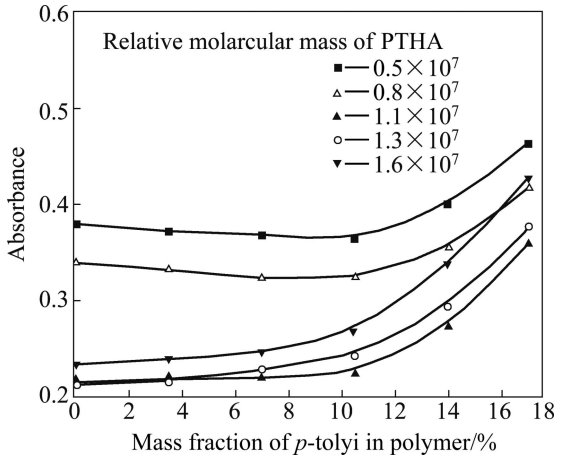


图 7 聚合物 PTHA 相对分子质量及对甲基苯基含量对上清液澄清度的影响

Fig. 7 Effect of relative molecular mass of copolymer PTHA and *p*-tolyl content on clarifying degrees of clarified liquid

连”作用使悬浮物形成小颗粒；3) 高分子化合物自身链的长度及疏水性将小颗粒团聚成大絮团并沉降下来。在相对分子质量较低的范围内(小于 1.1×10^7)，高分子链容易在体系中充分打开，对于极性基团相同的化合物，决定沉降速度的主要因素为高分子化合物自身链的长度及疏水性的大小。高分子链越长，链上所带的极性基团越多，形成的絮团越大，沉降速度越快；在相对分子质量超过一定量(大于 1.1×10^7)时，高分子结构中极性基团的相互作用使高分子链不容易在体系中充分打开，产生“缠绕”现象，这时，极性基团不能充分发挥吸附小颗粒的作用，影响其沉降效果，因此，沉降效果提高的趋势反而降低。

2.5 聚合物 PTHA 的相对分子质量及对甲基苯基含量对上清液澄清度的影响

图 7 所示为 PTHA 的相对分子质量及对甲基苯基含量对上清液澄清度的影响。由图 7 可见，对于相对分子质量小于 1.1×10^7 的聚合物，在对甲基苯基含量低于 10.5%时，对甲基苯基含量对上清液澄清度几乎没有影响，与不引入对甲基苯基结构的聚合物水平相当，基本上保持了氧肟酸类絮凝剂上清液澄清度好的特点，可满足实际应用要求。当相对分子质量为 1.1×10^7、对甲基苯基含量低于 10.5%时，吸光度最低，澄清度最高。而当对甲基苯基含量高于 10.5%时，澄清度急剧变差。当相对分子质量大于 1.1×10^7 后，随着相对分子质量及对甲基苯基含量的增加，澄清度逐渐变差。

上清液澄清度的好坏取决于絮凝剂与被絮凝物间的吸附效果，这一方面取决于氧肟基团与赤泥间的相互作用，另一方面取决于絮凝剂相对分子质量的大小。当相对分子质量较小时，高分子化合物将赤泥聚成大絮团并沉降下来的作用较弱，澄清度相对较低。随着相对分子质量的增大，絮凝沉降作用变强，澄清度逐渐变好。但当相对分子质量过大时，由于聚合物的分子链在溶液中不宜展开及沉降速度的加快，一些小颗粒赤泥不易或来不及被充分吸附沉降，澄清度开始变差；当对甲基苯基的含量较高时，絮凝剂中氧肟基含量相对较低，吸附效果相对减弱，一些小颗粒赤泥不易被吸附，澄清度势必逐渐变差；而当相对分子质量过大且对甲基苯基含量过高时，既不利于絮凝剂在水中溶解分散，又不利于一些小颗粒赤泥与絮凝剂间的吸附，因此，澄清度必然变差。

2.6 絮凝剂中对甲基苯基含量对赤泥沉降物外观的影响

图 8 所示为相对分子质量为 1.1×10^7、对甲基苯基含量不同的絮凝剂，按 1.4 节方法对赤泥矿浆进行沉降后，取沉降的赤泥及上清溶液涂于玻片上进行观察得到的偏光显微镜照片。

由图 8 可见，随着絮凝剂中对甲基苯基含量的增加，沉降絮团体积逐渐增大且更加紧密。但当其含量高于 10.5%时，这种趋势减弱。絮凝剂中对甲基苯基含量的增加使絮凝剂的疏水性增加，一旦絮凝剂的亲水基与赤泥表面的极性基结合形成絮团，赤泥絮团疏水性增加，容易在溶液中聚集并沉淀。但对甲基苯基的含量过高时，絮凝剂的水溶性会减低，不宜在水溶液中伸展打开，因此，絮凝效果反而减弱。

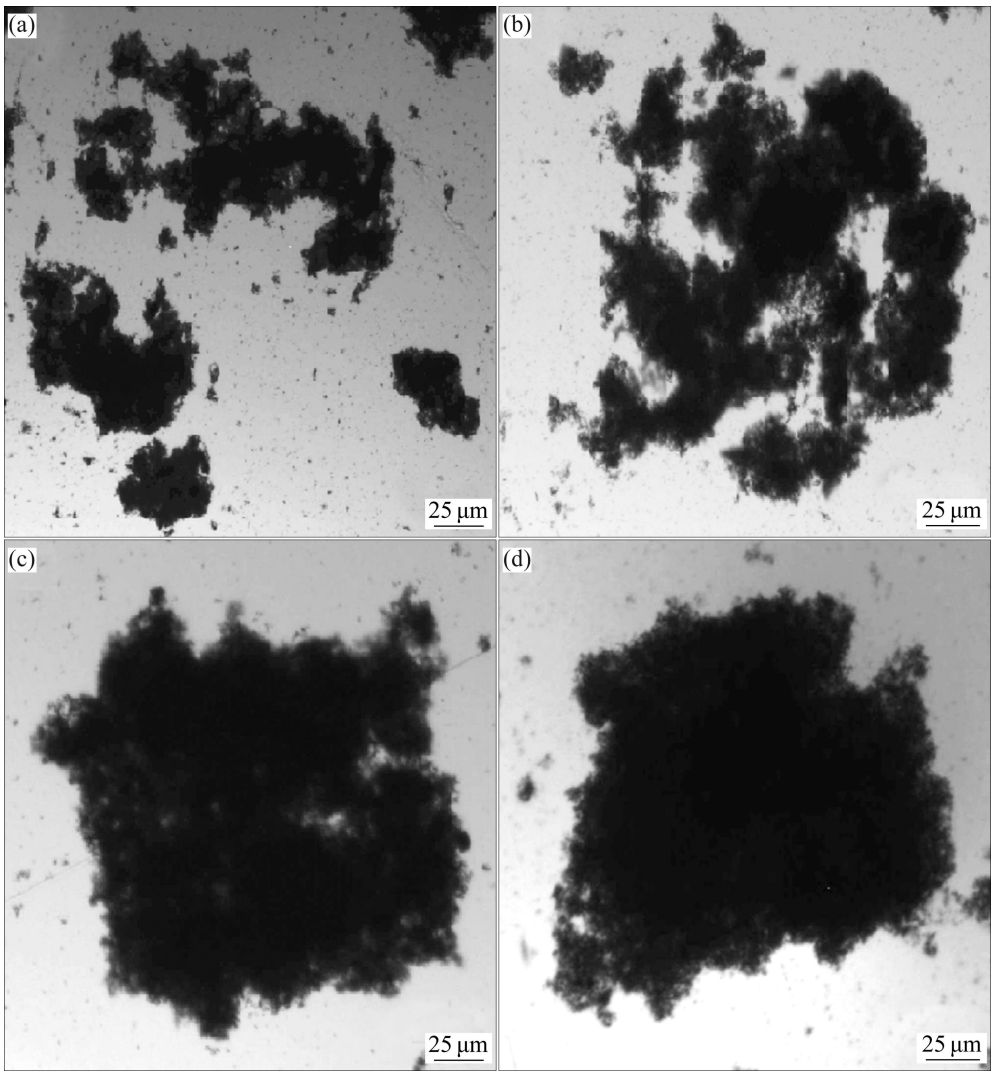


图 8　絮凝剂中对甲基苯基含量对沉降絮团形状的影响

Fig. 8　Influence of *p*-tolyl content (mass fraction) in flocculent on regiment shape (Copolymer relative molarcular mass of 1.1×10^7): (a) 3.5%; (b) 7%; (c) 10.5%; (d) 14%

2.7　聚合物 PTHA 与国内外常见絮凝剂沉降效果的比较

图 9 所示是以对甲基苯基含量为 10.5%、相对分子质量为 0.5×10^7、1.1×10^7 和 1.6×10^7 时的 PTHA 絮凝剂与目前工业使用的相对分子质量为 1.8×10^7 的含苯环的氧肟酸絮凝剂(文献[12]表明，在此相对分子质量时，HHCP 的效果最好)及国外絮凝剂 Nalco9779 沉降速度的比较。图 10 所示为在加入不同量的絮凝剂后上清液澄清度的比较。

由图 9 和 10 可见，在沉降速度及上清液澄清度方面，PTHA 在相对分子质量相对较低(1.1×10^7)时，即具有与相对分子质量为 1.8×10^7 的 HHCP 相近的沉降效果，且优于国外 Nalco9779 絮凝剂的沉降效果。而相对分子质量相对较低的 PTHA 絮凝剂会使沉降下来

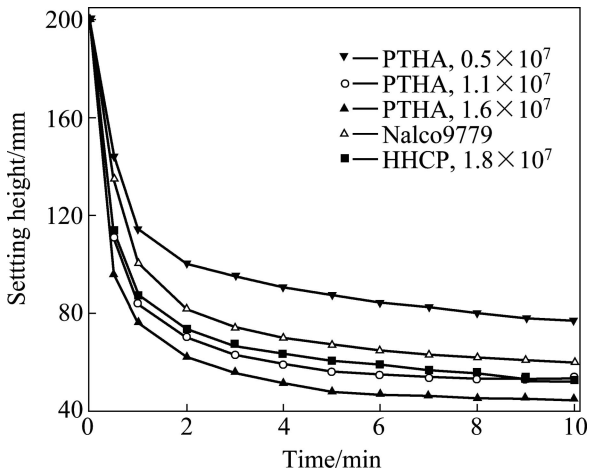


图 9　不同絮凝剂沉降速度的比较

Fig. 9　Comparison of setting velocity of different flocculants

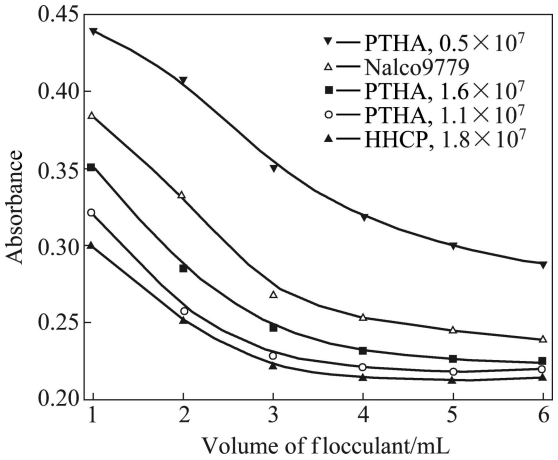
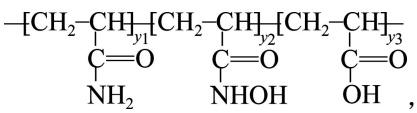


图 10 上清液澄清度的对比

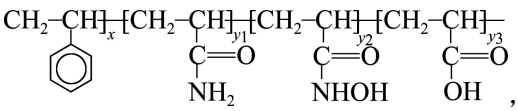
Fig. 10 Comparison of absorbance of clarified liquid

的赤泥黏性降低，这将有利于后续过滤工段。

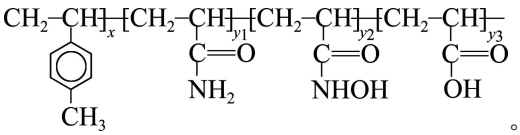
根据文献[2]，Nalco9779 主要成分为氧肟酸絮凝剂，其分子结构为



HHCP 分子结构为



PTHA 分子结构为



三者结构相比，PTHA 分子中对甲基苯基疏水性大于 HHCP 分子中苯基的疏水性，而 Nalco9779 氧肟酸絮凝剂没有疏水性侧链，因此，与赤泥形成絮团后，PTHA 更易使絮团沉降，从而导致即使其相对分子质量不是很大，也能产生较好的沉降效果。

3 结论

1) 红外光谱和紫外光谱证明，以对甲基苯乙烯和丙烯酰胺为原料，用微乳液聚合并经羟肟化改性可以合成含对甲基苯基结构的氧肟酸类聚合物。

2) 在氧肟酸类物质的结构中接入具有更强疏水特性的对甲基苯基结构能增强其疏水性，有利于絮凝沉降。当 PTHA 的相对分子质量在 0.8×10^7~1.3×10^7、对甲基苯基质量分数为 7%~14%时，赤泥沉降效果较好。

3) 采用对甲基苯基的含量为 10.5%、相对分子质量为 1.1×10^7 的 PTHA 絮凝剂，其对赤泥沉降效果，优于相对分子质量为 1.8×10^7 的 HHCP 絮凝剂，并优于国外广泛使用的 Nalco9779 絮凝剂。

REFERENCES

[1] 吴玉胜, 毕诗文, 李文成, 杨志华. 分解过程氢氧化铝产品粒度变化机理及规律[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(12): 2060−2065.
WU Yu-sheng, BI Shi-wen, LI Wen-cheng, YANG Zhi-hua. Mechanism and rule of $Al(OH)_3$ particles variation in seed precipitation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(12): 2060−2065.

[2] SPITZER D P, YEN W S. Polymers containing hydroxamic acid groups for reduction of suspended solids in Bayer process streams: US, 4767540[P]. 1988−08−30.

[3] LEWELLYN M E, SPITZER D P. Preparation of modified acrylamide polymers: US, 4902751[P]. 1990−02−20.

[4] JIANG Y R, YIN Z G, YI Y L, ZHOU X H. Synthesis and collecting properties of novel carboxyl hydroxamic acids for diaspore and aluminosilicate minerals[J]. Minerals Engineering, 2010, 23(10): 830−832.

[5] ZHANG K Y, HU H P, ZHANG L J, CHEN Q Y. Effects of polymeric flocculants on settlement of Bayer red mud generated from Chinese diaspore bauxite[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2008, 8(2): 268−273.

[6] TIAN D T , XIE H Q. Synthesis and flocculation characteristics of konjac glucomannang polyacry lamide[J]. Polymer Bulletin, 2008, 61: 277−285.

[7] ZONOOZI M H, MOGHADDAM M R A, ARAMI M. Removal of acid red 398 dye from aqueous solutions by coagulation/ flocculation process[J]. Environmental Engineering and Management Journal, 2008, 7(6): 695−699.

[8] EVERETT C P. New salicylic acid containing red mud flocculants[J]. Light Metals, 2003, 132: 137−143.

[9] GARY A S, ALLISON L B, REBECCA K H, MICHAEL H M, MICHAEL V S. The effect of a hydroxamic acid-containing polymer on active matrix metalloproteinases[J]. Biomaterials, 2009, 30(10): 1890−1897.

[10] 徐 方, 胡慧萍, 陈启元. 新型絮凝剂对拜耳法溶出赤泥沉降性能的影响[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(1): 77−82.
XU Fang, HU Hui-ping, CHEN Qi-yuan. Effects of new flocculants on settlement of Bayer red mud[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(1): 77−82.

[11] MATTHEW J D, LEWELLYN M, QI D, HAUNN L T C, MATTHEW T. Use of silicon-containing polymers for improved flocculation of solids in processes for the production of alumina from bauxite: US, 0098607 A1[P]. 2010−04−22.

[12] 陈　锋, 王连嵩, 毕诗文, 谢志辉, 贾志军. 一种带有苯环结构的氧肟酸类赤泥絮凝剂的合成及应用[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(3): 498−503.
CHEN Feng, WANG Lian-song, BI Shi-wen, XIE Zhi-hui, JIA Zhi-jun. Synthesis and application of a new high-molecular-mass hydroxamic acid flocculant containing phenyl[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(3): 498−503.

[13] 高保娇, 扬去峰. 胶束增溶紫外分光光度法测定水溶性共聚物中苯乙烯的含量[J]. 分析化学, 2002, 30(1): 69−71.
GAO Bao-jiao, YANG Qu-feng. Determination of styrene in water-soluble copolymer by micell solubilization-ultraviolet spectrophotometry[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2002, 30(1): 69−71.

[14] CHUA H H, LIN D V, SONI U. Poly (trimethylene terephthalate) molecular weight and Mark-Houwink equation[J]. Polymer, 2001, 42(12): 7137−7139.

[15] ALBRECHE G A, CRUMBILISS A L. In iron transport and storage in microorganism, plants and animals[J]. Metal Ions in Biological Systems, 1998, 35: 239−243.

[16] 刘志远, 李昱辰, 王鹤立, 居玉坤. 复合絮凝剂的研究进展及应用[J]. 工业水处理, 2011, 31(5): 5−8.
LIU Zhi-yuan, LI Yu-chen, WANG He-li, JU Yu-kun. Research progress in and application of composite flocculant[J]. Industrial Water Treatment, 2011, 31(5): 5−8.

(编辑　陈卫萍)