

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.061



# 复合紫外光引发体系制备 PDA 及其结构表征

关庆庆<sup>1</sup>, 陈尧<sup>1</sup>, 周祈昕<sup>1</sup>, 钱宇<sup>1</sup>, 唐晓旻<sup>2</sup>, 康晓荣<sup>1</sup>, 徐进<sup>1</sup>

(1. 南京工程学院 环境工程学院, 南京 211167; 2. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**采用氧化还原-偶氮复合引发剂和一种紫外光强度由弱变强的复合紫外光引发体系,以二甲基二烯丙基氯化铵(DMDAAC)和丙烯酰胺(AM)为单体,通过共聚合反应制备 P(DMDAAC-AM)(PDA)。反应体系将引发活化能不同的引发剂与不同紫外光强进行耦合,可维持反应体系内一定浓度的自由基,使反应进行更为均匀彻底,达到有效提高 PDA 特性粘度的目的。研究了合成过程中的相关因素对 PDA 特性粘度的影响规律,并对其合成条件进行优化。结果表明:当偶氮引发剂浓度为 0.3‰、0.4‰、紫外光强度先为 8.5 mW/cm<sup>2</sup>,再升高至 13 mW/cm<sup>2</sup>、AM 与 DMDAAC 质量比为 8:2、总单体质量为 20%时,PDA 特性粘度最高,达到了 19.60 dL/g。核磁共振氢谱和红外光谱表明 PDA 确实由 AM 和 DMDAAC 共聚而成。通过差热-热重分析,证明制备的 PDA 具有良好的热稳定性。絮凝应用实验表明,自制的 PDA 具有良好的絮凝性能。

**关键词:**絮凝;紫外光;表征;阳离子聚丙烯酰胺;引发剂

中图分类号:X703.1 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2019)03-0147-07

## Preparation and characterization of PDA synthesized through a complex UV initiated system

Guan Qingqing<sup>1</sup>, Chen Yao<sup>1</sup>, Zhou Qixin<sup>1</sup>, Qian Yu<sup>1</sup>, Tang Xiaomin<sup>2</sup>, Kang Xiaorong<sup>1</sup>, Xu Jin<sup>1</sup>

(1. Department of the Environmental Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, P. R. China;

2. School of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** In this study, a complex UV initiation system was established by utilizing low light intensity and then high light intensity with redox initiator and azo initiator compound. Acrylamide (AM) and diallyldimethylammonium chloride (DMDAAC) were used as monomers to copolymerize P (DMDAAC-AM) (PDA). Initiators with different activation energies were injected to the system, and UV light with different intensities is controlled to generate radicals at different times. Therefore, high intrinsic viscosity PDA could be prepared as a consequence of even and thorough polymerization. Effect of factors on the intrinsic viscosity of PDA was investigated, and the optimal synthesis condition was obtained. The

收稿日期:2018-08-27

基金项目:江苏省自然科学基金(BK20160779);江苏省高校自然科学基金(16KJB610008);南京工程学院校基金(YKJ201527)

作者简介:关庆庆(1988-),男,博士,主要从事水处理絮凝剂的开发与应用研究,E-mail:wall-g@cqu.edu.cn.

Received:2018-08-27

**Foundation item:** Natural Science Foundation of Jiangsu (No. BK20160779); Natural Science Foundation of Jiangsu Universities (No. 16KJB610008); Academic Research Foundation of Nanjing Institute of Technology (No. YKJ201527)

**Author brief:** Guan Qingqing (1988-), PhD, main research interests: exploit and application of water treatment flocculant, E-mail:wall-g@cqu.edu.cn.

results indicated that the highest intrinsic viscosity of 19.60 dL/g was reached at V-50 concentration of 0.3‰,  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ - $\text{NaHSO}_3$  concentration of 0.4‰, low light intensity of 8.5 mW/cm<sup>2</sup> then increased to 13 mW/cm<sup>2</sup>, mass ratio between AM and DMDAAC of 8:2 and total monomer mass percentage of 20%. It was confirmed that PDA was the copolymer of AM and DMDAAC through proton nuclear magnetic resonance spectroscopy and Fourier-transform infrared spectroscopy. In addition, the prepared PDA possessed an acceptable thermostability and favorable flocculation performance which can be confirmed through thermogravimetric analysis and the flocculation experiment.

**Keywords:** flocculation; UV; characterization; cationic polyacrylamide; redox initiator

PDA 是一类带有高正电荷的线性有机高分子絮凝剂,广泛应用于石油开采、造纸、纺织印染及污泥脱水等领域<sup>[1-2]</sup>。PDA 分子量(可以用特性粘度间接表示)直接影响其絮凝性能,一般分子量越高其絮凝性能越好<sup>[3]</sup>。根据高分子共聚理论,PDA 的分子量主要受到反应体系中自由基浓度的影响,如果自由基浓度过低,则难以引发聚合反应。相反,如果自由基浓度过高,则聚合反应速度过快,反应体系将产生大量热,难以散去,易产生链转移和链终止反应,导致最终降低产物的分子量<sup>[4]</sup>。但是,已有研究通常只能通过引发剂添加量或引发能量的大小来控制反应初期自由基浓度,难以实现对整个反应过程中自由基浓度的控制。通过维持反应体系内一定浓度的自由基,可以达到有效提高产物分子量的目的。例如,赵松梅等<sup>[5]</sup>曾采用氧化还原-偶氮复合引发剂、先低温后高温的控制方法制备出超高分子量 PDA。这是因为,氧化还原引发剂活化能较低,在低温条件下,首先分解产生自由基;在高温条件下,偶氮引发剂再分解形成自由基,继续引发聚合反应提高产品的分子量。Agarwal 等<sup>[6]</sup>曾以硝酸铈铵和过硫酸钾为引发剂接枝共聚 AM、DMDAAC 与瓜尔胶,结果显示,产物接枝率相对于其他方法更高,这是因为过硫酸钾可将失去引发活性的  $\text{Ce}^{3+}$  氧化为具有引发活性的  $\text{Ce}^{4+}$ ,使  $\text{Ce}^{4+}$  能够均匀分布在聚合反应的不同阶段。但是,上述研究采用的热引发方式具有反应时间长、能耗高、反应难以控制等缺陷。笔者已有研究显示,紫外光引发方式具有反应速度快、能耗低等优点,并且光强具有易于控制的优势<sup>[1,7]</sup>。

采用氧化还原-偶氮复合引发剂和一种紫外光强度由弱变强的复合紫外光引发体系,以 AM 和 DMDAAC 为反应单体,以过硫酸钾  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 、亚硫酸氢钠  $(\text{NaHSO}_3)$ -偶氮二异丁基脒(V-50)为氧化还原-偶氮复合引发剂,通过控制光强与引发剂量来控制反应体系中自由基浓度。

研究了引发剂添加量、光照强度、AM 与 DMDAAC 的质量比( $m_{\text{AM}}:m_{\text{DMDAAC}}$ )等因素对 PDA 特性粘度的影响,优化了反应条件,同时,通过核磁共振氢谱、红外光谱与差热-热重分析对制备出 PDA 分子结构和热稳定性进行了研究,同时,探究了自制 PDA 的絮凝性能。

## 1 实验材料、仪器与方法

### 1.1 实验材料与仪器

AM 单体(化学纯,国药集团化学试剂有限公司)、DMDAAC 单体(工业纯,万齐化工、V-50(分析纯,上海瑞龙生化有限公司)、高纯氮气(99.9%,南京上元工业气体厂), $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 、 $\text{NaHSO}_3$ 、尿素、酒精等其他试剂均为分析纯。市售 CPAM 的分子量 18.0 dL/g,阳离子度 30%。

可调光强紫外灯(GXZ1000,上海季光特种照明电器厂,主波长 365 nm)、乌式粘度计( $\Phi = 0.55$  mm,上海申谊玻璃制品有限公司)、超声波仪(JP-080S,深圳市洁盟清洗设备有限公司)、红外光谱仪(550SeriesII,梅特勒托利多仪器有限公司)、差热-热重分析仪(SDTQ600,美国 TA 仪器)。

### 1.2 PDA 的制备

将一定量 AM 和 DMDAAC 用超纯水溶解在石英反应瓶中,而后添加尿素并溶解,通氮气驱氧 15 min 以后,迅速依次加入 V-50、过硫酸钾、亚硫酸氢钠,再通氮气 15 min 后,将反应容器密封后置于超声波仪器中 5 min,将反应器皿置于匀速转盘上,先调节光强在较低档位反应 40 min,然后将光强升高至 13 mW/cm<sup>2</sup> 反应 40 min,关闭紫外灯后,将反应器皿置于常温条件下 2 h,进行熟化即可得到聚合产物。将所得到的聚合产物剪碎,经丙酮提纯、无水乙醇清洗后放置于真空干燥箱内,在温度 60 °C 条件下烘干,干磨、粉碎后即获得粉末状产品。

### 1.3 PDA 的结构表征

PDA 的特性粘度测定方法参照《水处理剂阳离

子型聚丙烯酰胺的技术条件和试验方法(GB/T 31246—2014)》。核磁共振氢谱、红外光谱和差热—热重测定参考相关文献进行<sup>[8]</sup>。

#### 1.4 絮凝应用实验

以高岭土悬浊液为处理对象,采用自制 PDA 和市售 CPAM 进行絮凝应用实验,具体实验方法参见文献<sup>[7]</sup>。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 复合光引发体系制备 PDA 反应条件优化

2.1.1 偶氮引发剂和氧化还原引发剂添加量对 PDA 特性粘度的影响 图 1 和图 2 分别表示 V-50 和  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ - $\text{NaHSO}_3$  浓度对 PDA 特性粘度的影响,PDA 的特性粘度均随着两类引发剂浓度的增加呈现出先上升再下降的趋势,这个现象与 PDA 反应原理密切相关。Seabrook 等<sup>[9]</sup>已经证实紫外光引发水溶液聚合 PAM 符合自由基聚合理论。在自由基聚合理论中,聚合产物受到反应体系中自由基浓度的影响。在聚合反应初期,自由基浓度主要受到反应体系中引发剂浓度和外加能量(在本文中即为紫外光强)的影响,一般反应体系中,引发剂浓度越高、紫外光光强越高,则产生的自由基浓度就越高,反之,则自由基浓度就越低。当 V-50 或者  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ - $\text{NaHSO}_3$  浓度较低时,由于自由基浓度过低则容易产生笼闭效应,即低浓度自由基被高粘度溶液包围时,链增长难以持续进行,导致聚合产物 PDA 的特性粘度较低。随着引发剂浓度的持续上升,反应体系中自由基浓度也会随之上升,笼闭效应可以避免,因此 PDA 的特性粘度将会明显上升。但是,自由基共聚合的链增长阶段将释放大量的热,所以,当 V-50 或  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ - $\text{NaHSO}_3$  浓度过高时,自由基浓度过高,聚合反应速度过快,导致反应体系内迅速积累大量的热无法散去,易产生链转移和链终止反应,因而产生 PDA 的特性粘度随引发剂浓度进一步升高而降低的现象<sup>[10]</sup>。由图 1、图 2 可知,V-50 和  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ - $\text{NaHSO}_3$  浓度分别为 0.3%和 0.4%时,PDA 的特性粘度最高。

2.1.2 光照强度对 PDA 特性粘度影响 如前所述,如果紫外光强度较高,则引发剂迅速发生反应产生较高浓度自由基,反之,自由基浓度较低<sup>[11]</sup>,因此,研究了反应第一阶段光照强度对 PDA 特性粘度的影响,实验结果如图 3 所示。在反应初始阶段,光照强度与引发剂浓度对 PDA 特性粘度影响规律类似,即呈现出随光强升高 PDA 特性粘度先上升再下

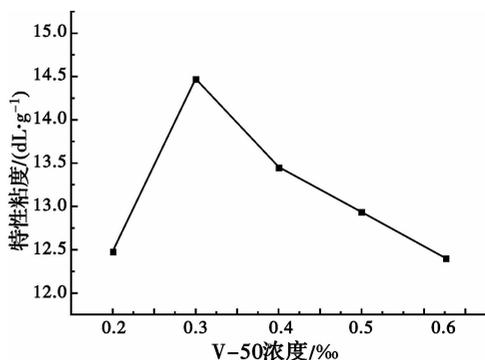


图 1 V-50 浓度对 PDA 特性粘度影响

Fig. 1 Effect of V-50 concentration on intrinsic viscosity of PDA

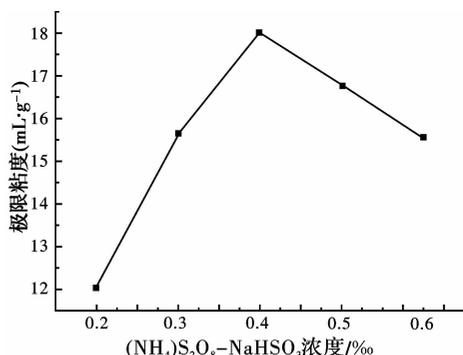


图 2  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ - $\text{NaHSO}_3$  浓度对 PDA 特性粘度影响

Fig. 2 Effect of  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ - $\text{NaHSO}_3$  concentration on intrinsic viscosity of PDA

降的趋势,产生这一现象的原理也类似于引发剂浓度对 PDA 特性粘度影响原理。当光强较低时,由于外加能量较小,因此,引发剂反应速率较慢,反应体系中自由基浓度较低,也容易出现上述的笼闭效应,导致制备出的 PDA 特性粘度较低,当紫外光光强提升时,由于自由基浓度也将得到提升,因此,会出现 PDA 特性粘度上升的现象,并且,当初始阶段光照强度为  $8.5 \text{ mW/cm}^2$  时,PDA 特性粘度最高,达到了  $18.60 \text{ dL/g}$ 。如果进一步提升光照强度将导致自由基浓度过高,反应体系产热过多,易产生链转移和链终止反应,因此,出现特性粘度随着光强上升而下降的现象。

值得注意的是,当初始光强为  $13 \text{ mW/cm}^2$  时,整个反应过程即为恒定的光强模式,由图 3 可知,在论文的复合光引发体系之下,制备出的 PDA 特性粘度明显更高,这也是论文采用复合光引发体系的优势所在。产生这一现象的原因如下:在复合光引发反应体系当中,反应初期,在低光强紫外灯照射下,活化能较低的氧化还原引发剂首先产生自由基,引发聚合反应,随后,在高光强紫外灯照射下,活化能

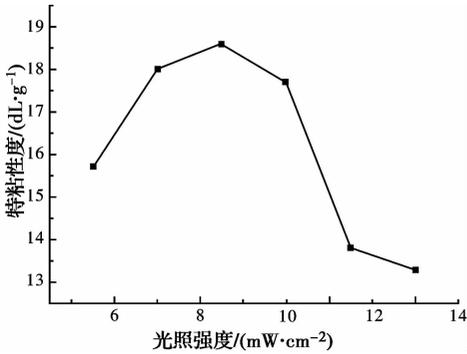


图3 反应第一阶段光照强度对PDA特性粘度影响  
Fig. 3 Effect of the first-stage light intensity on the intrinsic viscosity of PDA

较高的偶氮引发剂分解产生自由基,继续引发聚合反应,使反应进行得较为平缓,链增长可以均匀有序进行,因此,制备出的PDA特性粘度更高。而在传统稳定光强和单一引发剂的反应中,自由基只能受控于初始光强和引发剂浓度,并不能够将自由基的产生控制在反应的不同阶段,因此,当初始浓度自由基浓度较高时,会提高链终止速度,降低特性粘度,若初始自由基浓度控制较低,可能导致聚合反应进行不完全,产物的特性粘度也较低。另外一方面,在恒定光强的光引发聚合反应中,不同位置的光强不同,因此,产生的自由基浓度也不同,聚合反应无法均匀、统一地进行,产生从边缘至中心反应速度依次降低的问题,聚合产物的平均特性粘度也因此而降低。在复合光引发反应体系中,尽管也会产生上述现象,但在第二阶段高光强紫外灯照射下,反应区域中心位置的光强得到提升,该部分的聚合反应进行得更彻底,达到不同反应位置聚合反应进行得更统一的效果,平均特性粘度相对于恒定光强反应条件下更高。

2.1.3  $m_{AM}:m_{DMDAAC}$  对PDA特性粘度影响 PDA絮凝效率除受到特性粘度的影响外,还受到其阳离子度的影响,一般阳离子度越高,则PDA的电中和性能越好,越容易取得好的絮凝效果<sup>[12]</sup>,因此,研究了 $m_{AM}:m_{DMDAAC}$ 对于PDA特性粘度的影响。由图4可知,PDA的特性粘度随着 $m_{AM}:m_{DMDAAC}$ 的降低呈现出先升高再降低的趋势,出现这一现象与AM单体和DMDAAC单体的聚合特性相关。已有研究显示,在水溶液聚合反应中,AM和DMDAAC的竞聚率分别为 $r_{AM}=6.11$ 和 $r_{DMDAAC}=0.14$ ,即AM在反应中具有极高的反应活性,而DMDAAC的反应活性远低于AM<sup>[13]</sup>。当反应体系中AM含量较高时,由于其聚合活性很高,反应速率过快,导致反应体系

中短时间内积聚大量的热,易产生链转移和链终止反应,产生特性粘度较低的现象。但是,当反应体系中DMDAAC含量较高时,由于其反应活性较低,难以聚合形成特性粘度较高的PDA。由图4可知,当 $m_{AM}:m_{DMDAAC}=8:2$ 时,PDA特性粘度最高。

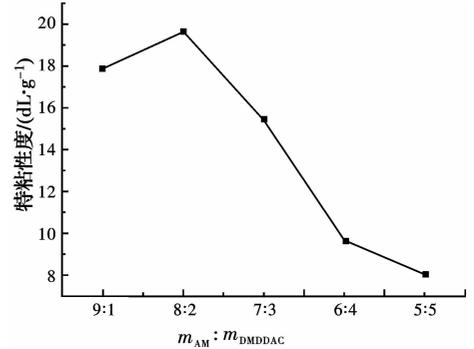


图4  $m_{AM}:m_{DMDAAC}$ 对PDA特性粘度影响

Fig. 4 Effect of  $m_{AM}:m_{DMDAAC}$  on the intrinsic viscosity of PDA

由上述自由基聚合反应机理可知,单体总质量分数会影响聚合反应的持续进行,进而影响到产物特性粘度<sup>[11]</sup>,因此,探究了单体总质量分数对PDA特性粘度的影响。由图5可知,PDA的特性粘度随着单体总质量分数的增加,呈现出先升高后降低的趋势,并且,当单体总质量分数为20%时,制备得到的PDA特性粘度最高。这是因为:在单体总质量分数较低的情况下,单体与活性自由基的碰撞概率降低,因而影响了分子链的产生和增长,同时降低了聚合反应的速率,因此,聚合产物的特性粘度较低;而当单体总质量分数过高时,单体与活性自由基之间接触碰撞的概率明显上升,导致聚合反应的速率加快,产生的聚合反应热无法及时散去,易产生链转移和链终止反应,降低聚合产物的特性粘度。此外,单体总质量分数过高还会导致的聚合产物分子结构严重的交联支化,使其在水中的溶解度降低,故制备实验中,单体总质量分数取20%为宜,此时PDA特性粘度达到了19.60 dL/g。

## 2.2 PDA结构表征

2.2.1 PDA的<sup>1</sup>H-NMR表征 如图6所示,在<sup>1</sup>H NMR图谱中, $\delta=1.55$  ppm处的吸收峰对应的是PDA分子主链上AM和DMDAAC单元上一 $\text{CH}_2$ —中的质子; $\delta=2.11$  ppm处的吸收峰主要是由PDA分子主链上AM单元中— $\text{CH}$ —上的质子产生;而PDA分子主链上DMDAAC单元中,结构— $\text{CH}$ —中的质子则出现在<sup>1</sup>H NMR图谱中 $\delta=2.55$  ppm处;DMDAAC单元中— $\text{CH}_3$ —上的质子则出现在<sup>1</sup>H NMR图谱中 $\delta=2.91$  ppm和 $\delta=3.12$

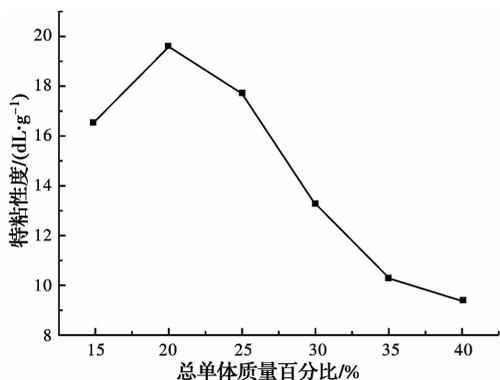


图 5 总单体质量百分比对 PDA 特性粘度影响

Fig. 5 Effect of total monomer mass percentage on the intrinsic viscosity of PDA

ppm 处;  $\delta = 3.79$  ppm 处的吸收峰是由 DMDAAC 单元五元环当中  $-\text{CH}_2-$  中的质子产生的<sup>[1]</sup>。由图 6 和上述结果可知, PDA 是 AM 与 DMDAAC 的共聚产物。

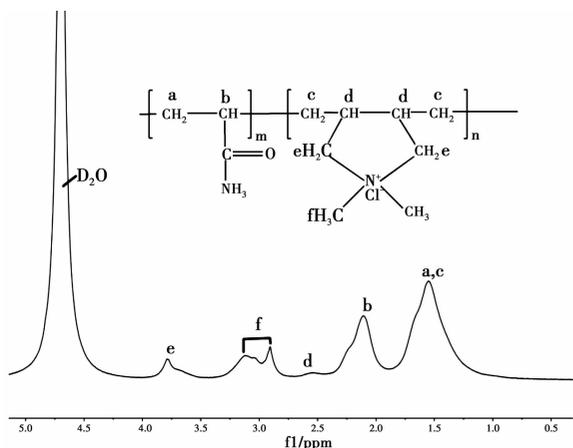


图 6 PDA 的核磁共振氢谱图谱

Fig. 6 proton nuclear magnetic resonance spectroscopy spectra of PDA

2.2.2 PDA 的红外光谱分析 由图 7 可知, 位于  $3\,446\text{ cm}^{-1}$  和  $3\,419\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰对应的是 AM 单元酰胺基中  $-\text{NH}_2$  的伸缩振动峰, 位于  $2\,942\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰归属于 DMDAAC 单元中  $-\text{CH}_3$  的伸缩振动峰,  $1\,657\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰对应于 AM 单元酰胺基中  $-\text{NH}_2$  的伸缩振动峰, 位于  $1\,450\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰为  $-\text{CH}_3$ 、 $-\text{CH}_2-$  中 C-H 的伸缩振动峰, 位于  $1\,120\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰对应于 DMDAAC 单元五元环中的 C-N 的特征吸收峰,  $952\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰对应于 DMDAAC 单元中的  $-\text{N}^+$ <sup>[14]</sup>。由红外光谱进一步证实通过复合光引发体系制备的 PDA 是由 AM 和 DMDAAC 共聚而成。

2.2.3 PDA 的差热-热重分析 通过热重分析图可

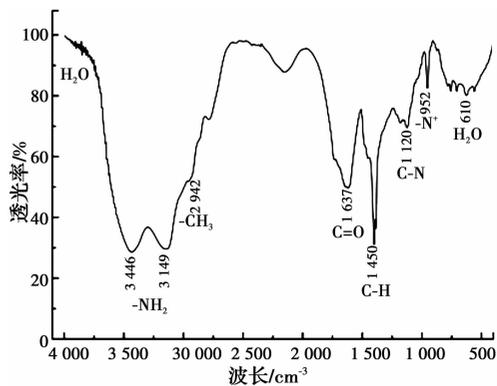


图 7 PDA 的红外光谱图

Fig. 7 Infrared spectra of PDA

以获知 PDA 的热稳定性。如图 8 所示, PDA 的第 1 个失重阶段在  $30\sim 220\text{ }^\circ\text{C}$ , 失重约  $19.2\%$ , 对应差热图中  $58\text{ }^\circ\text{C}$  处的吸热峰。这一阶段的失重是由聚合物亲水基团所吸收水分的蒸发产生, 因此产生一定的失重。第 2 个失重阶段出现在在  $220\sim 320\text{ }^\circ\text{C}$  范围内, 失重率约  $26.1\%$ , 对应于差热图中  $279.2\text{ }^\circ\text{C}$  处的吸热峰, 这一阶段的失重是由于 AM 和 DMDAAC 单元侧链的分解所产生的。通过图 8 可以看出, 这一阶段起始的温度为  $220\text{ }^\circ\text{C}$ , 即预示着 PDA 在此温度下才开始发生分解, 说明其具有良好的热温稳定性。PDA 的第 3 个失重阶段发生在  $320\text{ }^\circ\text{C}$  以上, 失重率约为  $41.9\%$ , 对应于差热图中  $382.4\text{ }^\circ\text{C}$  处的吸热峰, 这一阶段的失重产生于主链的分解<sup>[15]</sup>。

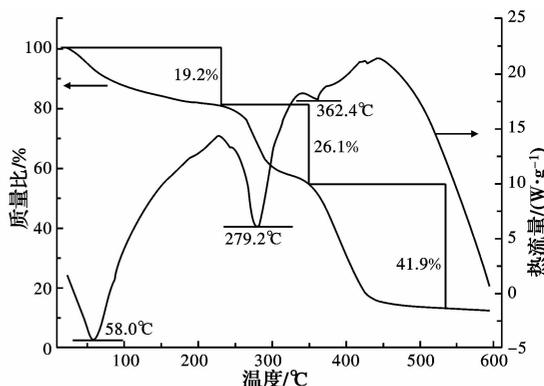


图 8 PDA 的热重分析图

Fig. 8 Thermogravimetric analysis of PDA

### 2.3 PDA 絮凝性能

如图 9 所示, 自制 PDA 和市售 CPAM 的上清液浑浊度均随着投加量的增加呈现出先下降再上升的趋势, 这一现象与已有研究相同<sup>[7]</sup>。当投加量较少时, 絮凝剂的吸附架桥能力和吸附电中和能力均不足以实现有效的絮凝, 因此, 随着絮凝剂投加量的增加, 其吸附架桥能力和电中和能力也将得以提升,

上清液的浑浊度呈现出下降的趋势。但是,絮凝剂投加量过多时,会使悬浮胶体表面重新带上正电,同时,絮凝剂之间的空间阻力也难以实现有效的絮凝,因此,此时投加量越多,絮凝效果越差。自制 PDA 和市售 CPAM 的最优投加量均为 6 mg/L,但由于自制 PDA 的特性黏度更高,吸附架桥性能更好,因此,其上清液浑浊度更低,表现出更优异的絮凝性能。这也预示着通过复合光引发体系制备出的 PDA 具有良好的市场应用前景。

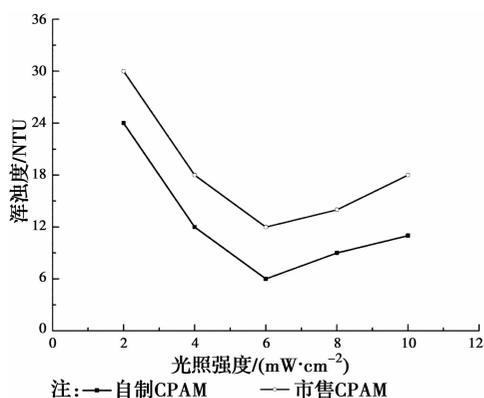


图9 投加量对自制 PDA 和市售 CPAM 上清液浑浊度影响

Fig. 9 Effect of dosage on supernatant turbidity of prepared PDA and bought CPAM

### 3 结论

1) 采用氧化还原-偶氮复合引发剂和紫外光强度由弱变强的复合紫外光引发体系制备 PDA, 该反应体系充分地利用了紫外光强度易于控制的优势, 可以达到维持反应体系一定浓度自由基的目的, 使得反应进行更为均匀、彻底, 提高了 PDA 的特性粘度。通过单因素实验, 确定了主要合成因素对 PDA 特性粘度的影响规律, 并得到合成的最优条件, 即当偶氮引发剂浓度为 0.3‰、0.4‰、紫外光强度先为 8.5 mW/cm<sup>2</sup> 再升高至 13 mW/cm<sup>2</sup>、 $m_{AM} : m_{DMDAAC}$  为 8:2、总单体质量为 20% 时, PDA 特性粘度最高, 达到了 19.60 dL/g。

2) 通过 PDA 的核磁共振氢谱和红外光谱图表明, 该聚合物确实由 AM 和 DMDAAC 共聚而成。通过差热-热重分析得到复合光引发体系制备的 PDA 具有良好的热稳定性。

3) 自制 PDA 絮凝性能优于市售 CPAM, 预示着通过复合光引发体系制备的 PDA 具有较好的市场应用前景。

### 参考文献:

- [1] GUAN Q Q, ZHENG H L, ZHAI J, et al. Preparation, characterization, and flocculation performance of P (acrylamide-co-diallyldimethylammonium chloride) by UV-initiated template polymerization[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(13): 1-7.
- [2] LU X, XU Y H, SUN W Q, et al. UV-initiated synthesis of a novel chitosan-based flocculant with high flocculation efficiency for algal removal [J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 410-418.
- [3] 郑怀礼, 寿倩影, 李香, 等. 紫外光引发聚合 P(AM-MAPTAC) 及其响应面优化制备[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(1): 118-124.  
ZHENG H, B, SHOU Q, LI X, et al. Ultraviolet-initiated synthesis of P (AM-MAPTAC) and optimization of preparation conditions with response surface method[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(1): 118-124. (in Chinese)
- [4] 唐晓旻, 张世欣, 谢俊怡, 等. 超声波引发合成阳离子聚丙烯酰胺及其表征[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(4): 83-88.  
TANG X M, ZHANG S X, XIE J Y, et al. Ultrasonic initiated synthesis and characterization of cationic polyacrylamide [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(4): 83-88. (in Chinese)
- [5] 赵松梅, 刘昆元. 二甲基二烯丙基氯化铵/丙烯酰胺共聚物的合成[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2005, 32(4): 29-32.  
ZHAO S M, LIU K Y. Synthesis of copolymer of DMDAAC and AM [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2005, 32(4): 29-32. (in Chinese)
- [6] AGARWAL V, MCLEAN D, HORNE J, et al. Chemometric study of graft copolymerization of guar-g-(acrylamide-co-diallyl dimethylammonium chloride) [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2013, 127(5): 3970-3979.
- [7] GUAN Q Q, ZHENG H L, ZHAI J, et al. Effect of template on structure and properties of cationic polyacrylamide: Characterization and mechanism[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53(14): 5624-5635.
- [8] GUAN Q Q, ZHENG H L, XU J, et al. Effect of

charge density on structural characteristics of cationic polyacrylamide: Models based on reactivity ratio and characterization [J]. *Journal of Polymer Materials*, 2016, 33(2):365-377.

- [9] SEABROOK S A, GILBERT R G. Photo-initiated polymerization of acrylamide in water [J]. *Polymer*, 2007, 48(16): 4733-4741.
- [10] MA J Y, SHI J, DING H C, et al. Synthesis of cationic polyacrylamide by low-pressure UV initiation for turbidity water flocculation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 312:20-29.
- [11] ZHENG H L, SUN Y J, ZHU C J, et al. UV-initiated polymerization of hydrophobically associating cationic flocculants: Synthesis, characterization, and dewatering properties [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 234: 318-326.
- [12] MA J Y, FU K, JIANG L Y, et al. Flocculation performance of cationic polyacrylamide with high

cationic degree in humic acid synthetic water treatment and effect of kaolin particles [J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 181:201-212.

- [13] BI K Z, ZHANG Y J. Kinetic study of the polymerization of dimethyldiallylammonium chloride and acrylamide [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 125(2):1636-1641.
- [14] WANG L J, LI G D, ZHANG Y Q, et al. Synthesis and evaluation of P(AM-b-DADMAC) as fixative for dissolved and colloidal substances [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 130(6):4040-4046.
- [15] LI X, ZHENG H L, GAO B Y, et al. Optimized preparation of micro-block CPAM by response surface methodology and evaluation of dewatering performance [J]. *Rsc Advances*, 2017, 7(1):208-217.

(编辑 胡玲)