

CSt-g-DMC 的快速制备与结构表征 及其絮凝性能分析

曩珊珊¹, 石海信^{1,2*}, 王爱荣², 王梓民², 何强¹, 王锋²

(1. 广西大学化学化工学院, 广西南宁 530004; 2. 北部湾大学石油与化工学院, 广西钦州 535011)

摘要:以玉米淀粉(CSt)为原料, 甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DMC)为阳离子单体, 采用过硫酸铵-热双引发体系快速制备淀粉接枝共聚物 CSt-g-DMC。通过单因素实验优化得到较佳制备工艺: DMC 质量分数为 12%、温度为 110℃、反应时间为 30 min。利用 FT-IR、XRD、SEM 和 TGA-FTIR 对产物结构进行表征。结果表明, CSt 已成功接枝 DMC, 产物是无定形态的多孔物; 在氮气保护的受热过程中, 产物所接入的 DMC 基团能稳定至 214℃; 对于质量浓度为 500 mg/L 的高岭土悬浮液, 当 CSt-g-DMC 质量浓度为 4.0 mg/L 时絮凝效果最好。

关键词:玉米淀粉; 甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵; 接枝共聚; 结构表征; 阳离子絮凝剂

中图分类号: TQ085

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2020)06-0155-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2020.06.032

Rapid preparation and structure characterization of CSt-g-DMC and analysis on its flocculation performance

CUAN Shan-shan¹, SHI Hai-xin^{1,2*}, WANG Ai-rong², WANG Zi-min², HE Qiang¹, WANG Feng²

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. College of Petroleum and Chemical Engineering, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China)

Abstract: Starch graft copolymer (CSt-g-DMC) is prepared by using corn starch (CSt) as raw material, and methacryloxyethyl trimethyl ammonium chloride (DMC) as cationic monomer. Polymerization is initiated by using ammonium persulfate-heat as a double initiator system. Through single factor experiment, the optimum preparation process is obtained as follows: the mass fraction of DMC is 12%, temperature maintains at 110℃, and reaction lasts for 30 min. The structure of the product is characterized by FT-IR, XRD, SEM and TGA-FTIR. It is shown that DMC has successfully grafted onto CSt, and the product is an amorphous porous material. During the heating process protected in nitrogen atmosphere, DMC group of the product remains thermal stable under 214℃. For kaolin suspension with a mass volume concentration of 500 mg·L⁻¹, the flocculation effect will be the best when the dosage of CSt-g-DMC is 4.0 mg·L⁻¹.

Key words: corn starch; methacryloxyethyl trimethyl ammonium chloride; grafting copolymerization; structure characterization; cationic flocculant

絮凝剂广泛应用于工业和生活废(污)水处理中^[1], 根据所含絮凝基团的电性可分为阳离子型、阴离子型、非离子型和两性型^[2]。甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DMC)是常用的阳离子单体之一, 由其制备的淀粉基共聚物具有相对分子质量可控、阳离子度可调、稳定性高、水溶性好等优点^[3-4]。但是, 由于 DMC 不够活泼, 难以制备高接枝率与高相对分子质量产品。学者们采用辐射法^[5]或反相乳液法^[6]制备了 DMC 接枝淀粉共聚物, 而这些方法要么需要辐射源, 要么需要构建反相乳液体系, 难以达到安全高效及绿色化的工业要求。针对存在的问题, 笔者通过探索过硫酸铵-热双引发淀粉接枝

DMC, 对产物结构与性能进行分析, 旨在为 CSt-g-DMC 快速制备及应用提供依据。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

玉米淀粉(CSt), 吉林中粮生化能源销售有限公司生产; 无水乙醇, AR, 成都市科隆化学品有限公司生产; 甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DMC), 工业级, 山东西亚化学工业有限公司生产; *N,N'*-亚甲基双丙烯酰胺(NMBA)、高岭土, 均为 CP, 国药集团化学试剂公司生产; 过硫酸铵, AR, 广东省化学试剂工程技术研究开发中心生产。

收稿日期: 2019-08-11; 修回日期: 2020-04-08

基金项目: 广西高校高水平创新团队及卓越学者计划项目(桂教人[2016]42号); 广西科技基地和人才专项项目(桂科 AD17195069)

作者简介: 曩珊珊(1994-), 女, 硕士研究生, 主要从事天然产物开发与利用研究, 1600886766@qq.com; 石海信(1962-), 男, 硕士, 教授, 硕士生导师, 主要从事功能高分子材料研究, 通讯联系人, shihaixin2006@163.com。

AUY120 分析天平,日本 Shimadzu 生产;BPZ-6090Lc 真空干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司生产;JY-1S 恒温搅拌油浴锅,常州市天竞实验仪器厂生产;IRAffinity-1 傅里叶变换红外光谱仪,日本 Shimadzu 生产;S-3400N 扫描电镜,日本 Hitachi 生产;D8 Advance X-射线衍射仪,德国 Bruker 生产;Frontier-TGA4000 热重-红外联用仪,美国 PerkinElmer 生产;722E 可见分光光度计,上海光谱仪器有限公司生产;NJ-160A 水泥净浆搅拌机,无锡市锡仪建材仪器厂生产;Zetasizer Nano-ZS90 纳米粒度及 Zeta 电位分析仪,英国 Malvern 生产。

1.2 实验方法

1.2.1 CSt-g-DMC 制备方法

称取 5 g CSt 并溶于去离子水中配成质量分数为 6% 淀粉乳,置于 85℃ 水浴中磁力搅拌糊化 30 min,冷却至 60℃,用水将适量 DMC 溶解后加入到淀粉糊液中,搅拌 5 min,用氢氧化钠调糊液至中性。依次用 5 g 水将 0.01 g 交联剂 NMBA 和 0.5 g 引发剂过硫酸铵溶解后加到糊液中,搅匀后静置 10 min,再倾倒至不锈钢盘中,置于烘箱中反应至规定时间,得接枝共聚粗产品。将粗产品剪碎,用无水乙醇浸泡 4 h,重复 3~5 次,最后一次浸泡 12 h,除去杂质,最后将产品置于 50℃ 真空干燥箱中烘至恒重,得纯产品。计算接枝率(GR)与接枝效率(GE)^[7]:

$$GR = [(W_1 - W_0)/W_0] \times 100\% \quad (1)$$

$$GE = [(W_1 - W_0)/W_2] \times 100\% \quad (2)$$

式中: W_0 为 CSt 质量, g; W_1 为纯接枝淀粉质量, g; W_2 为 DMC 质量, g。

1.2.2 结构表征方法

(1) FT-IR 分析。采用 KBr 压片法,扫描速度为 17 次/s,扫描波数为 400~4 000 cm^{-1} 。

(2) 颗粒形貌分析。对经真空喷金处理的样品进行颗粒形貌分析,加速电压为 5 kV,放大 3 000 倍。

(3) 结晶分析。使用 Cu 靶,管电压为 40 kV,管电流为 15 mA, 2θ 扫描范围为 3~70°,扫描速率为 10°/min。

1.3 热特性测试方法

称量 15 mg 样品置于 TGA-FTIR 联用仪中, TGA 参数:30~600℃,升温速率为 10℃/min; FT-IR 参数:扫描次数为 17 次/s,扫描范围为 4 000~400 cm^{-1} ,链接管道及红外样品池温度为 280℃,温度每升高 10℃ 进行 1 次红外扫描。

1.4 絮凝性能实验方法

将 500 mg 高岭土粉末放入 1 L 自来水中,在

200 r/min 下搅拌 5 min,再于 100 r/min 搅拌 7 min,静置 30 min,得到质量浓度为 500 mg/L 高岭土悬浮液。量取 100 mL 悬浮液,加入絮凝剂,然后于 200 r/min 搅拌 5 min,再于 100 r/min 搅拌 7 min,静置 30 min,测试上清液透光率(波长 550 nm)与 Zeta 电位。

1.5 数据统计分析

所得数据用 Excel 分析,并采用 Origin 2016 绘图。

2 结果与讨论

2.1 CSt-g-DMC 单因素制备结果与分析

2.1.1 单体质量分数

在淀粉乳质量分数 6%、反应温度 120℃、反应时间 30 min 的条件下,单体质量分数对 GR 及 GE 的影响如图 1 所示。

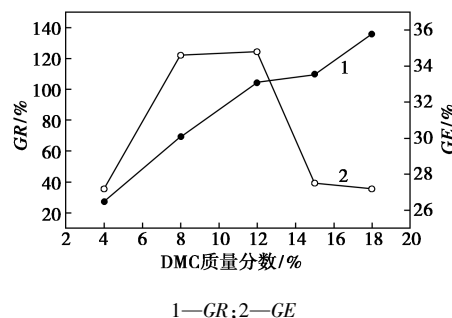


图 1 单体质量分数对 GR 与 GE 的影响

由图 1 可知,随着 DMC 质量分数增加, GR 呈增大趋势, GE 却先增后降。这是因为随着单体质量分数增加,单体与淀粉分子链—OH 发生碰撞,接枝共聚机会增大。在单体质量分数为 12% 时 GE 达最大值;继续增大单体质量分数,由于淀粉分子链上活性点逐渐被接枝支链占据,接枝支链上季铵基团静电斥力及空间位阻遏制了反应物之间碰撞,使接枝效率下降^[8]。从 GR 与 GE 均较优的角度考虑,单体的最佳质量分数为 12%。

2.1.2 反应温度

在淀粉乳质量分数 6%、DMC 质量分数 12%、反应时间 30 min 的条件下,反应温度对 GR 与 GE 的影响如图 2 所示。

由图 2 可知,随着反应温度的升高, GR 与 GE 增加,在 110℃ 时 GR 与 GE 达到峰值;超过 110℃ 后, GR 与 GE 又开始下降。这是因为 DMC 与淀粉的快速接枝为引发剂与热双引发体系,要达到快速接枝,在短时间内产生充足的自由基是关键,温度升

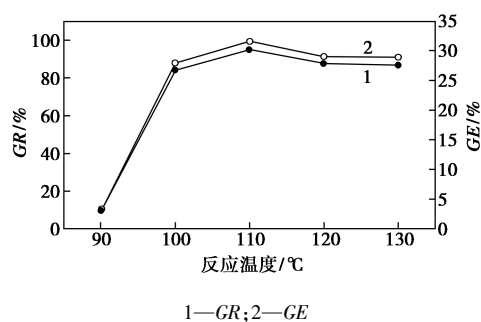


图2 反应温度对GR与GE的影响

高有利于淀粉和单体形成较多自由基,促进共聚反应链增长;但当温度超过110℃后,过多的初生态自由基可使均聚速率超过共聚速率,也使链终止变得活跃^[9]。因此,最佳反应温度为110℃。

2.1.3 反应时间

在淀粉乳质量分数6%、DMC质量分数12%、反应温度110℃的条件下,反应时间对GR与GE的影响如图3所示。

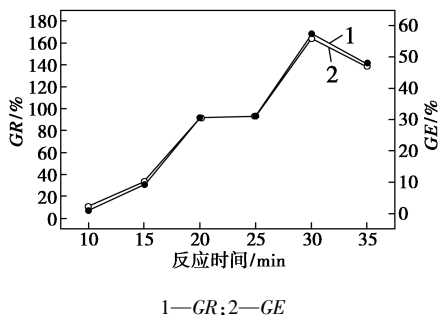


图3 反应时间对GR与GE的影响

由图3可知,随着反应时间的增加,GR与GE均呈增大趋势,当时间超过30 min后,由于接枝共聚物的生成,体系黏稠度增加,阻碍了反应物之间扩散接触,且共聚反应已趋平衡,再增加反应时间,会使已接枝共聚物在一定程度上因高温而发生断裂^[10],造成GR与GE下降。因此最佳反应时间为30 min。

在DMC质量分数为12%、反应温度为110℃、反应时间为30 min条件下,重复3次实验,所得产品 $GR = (169.6 \pm 2.5)\%$ 、 $GE = (56.5 \pm 0.8)\%$,证明过硫酸铵-热双引发聚合工艺可快速制备CSt-g-DMC。利用较佳工艺条件对淀粉只进行糊化及热处理制备空白样品BSt,并与较佳工艺所得CSt-g-DMC以及CSt一起进行对比分析。

2.2 结构表征

2.2.1 红外光谱分析

样品CSt、BSt与CSt-g-DMC的FT-IR谱图如

图4所示。

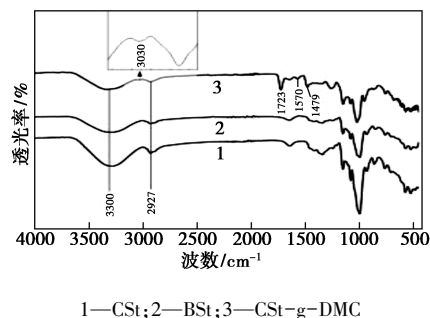


图4 CSt、BSt与CSt-g-DMC的FT-IR图

由图4可知,BSt与CSt红外光谱相似,说明快速制备所涉及的糊化-热处理工艺并未在淀粉分子中引入新基团,而CSt-g-DMC除了出现淀粉吸收峰(3300 cm^{-1} -OH、2927 cm^{-1} -CH₂)外,在3030 cm^{-1} 出现季铵阳离子结构单元中-CH₃峰,1723 cm^{-1} 处为-C=O峰,1570 cm^{-1} 处为-C=O峰,1479 cm^{-1} 处-CH₂N⁺(CH₃)₃亚甲基峰^[11]。

2.2.2 结晶结构分析

样品的XRD图谱如图5所示。

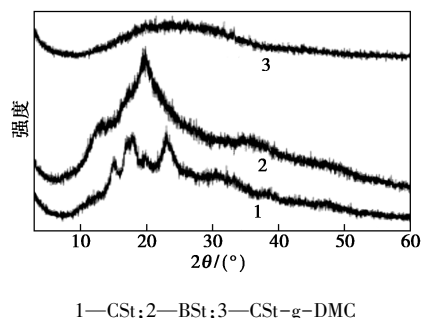


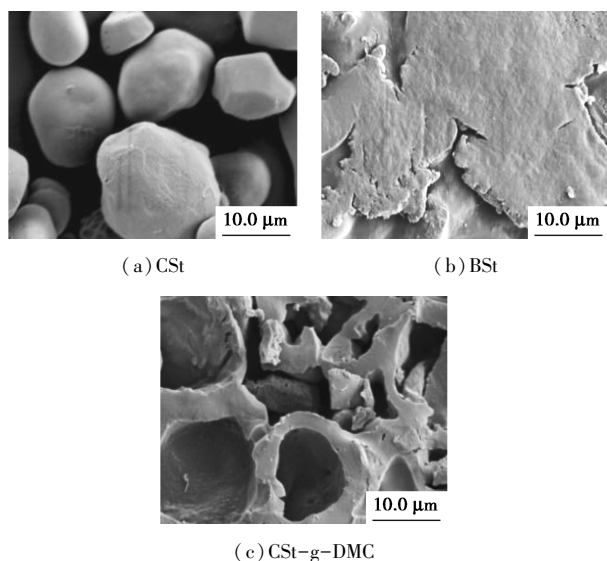
图5 CSt、BSt与CSt-g-DMC的XRD图谱

从图5可知,CSt在2θ为15.1、17.2、17.9°与23.0°有结晶峰,属A型结晶结构^[12];BSt在13.2°出现弱衍射峰,在19.7°出现尖锐衍射峰;与CSt和BSt相比,CSt-g-DMC仅在23.7°出现弥散峰,表明糊化态下过硫酸铵-热双引发接枝共聚破坏了淀粉结晶结构,产物呈无定形结构。

2.2.3 颗粒形貌分析

CSt、BSt与CSt-g-DMC的SEM图如图6所示。

由图6可以看出,CSt颗粒较为光滑;BSt颗粒相互粘团结团;CSt-g-DMC颗粒与CSt及BSt均不同,呈多孔网状结构,可以推断在过硫酸铵-热双引发过程中,淀粉分子链中的直链和支链均已打开发生阳离子化接枝共聚反应,从而在表面及内部形成孔洞、凹槽和空隙,这种微观形貌有利于将悬浮阴离子颗粒物通过网络及孔道进入聚合物内部,从而被



(a) CSt

(b) BSt

(c) CSt-g-DMC

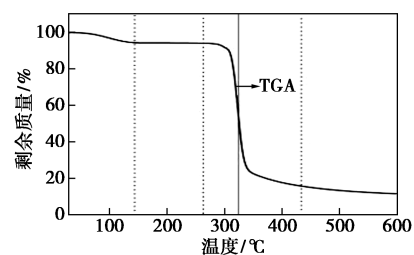
图 6 CSt、BSt 与 CSt-g-DMC 的 SEM 照片

聚合物阳离子基团电性吸附或架桥而形成大颗粒凝沉下来。

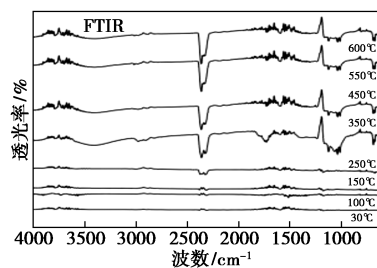
2.3 CSt-g-DMC 热行为分析

CSt、BSt 与 CSt-g-DMC 的 TGA 和 FT-IR 谱图如图 7 所示。

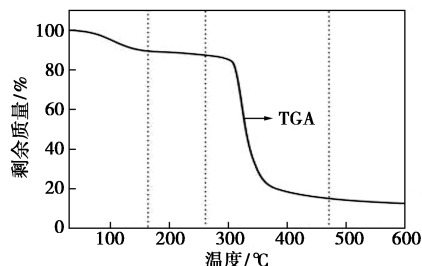
由图 7(a)、图 7(b) 中可以看出, 30~143℃ 缓慢失水 5.5%, 此温度段 100℃ 的 FT-IR 出现 H₂O 吸收峰(1 350~1 560 cm⁻¹ 及 3 500~3 650 cm⁻¹)^[13]; 262~433℃ 失重 77.5%, 此温度段 350℃ FT-IR: 678 cm⁻¹ 处为 Ar-H, 1 013~1 130 cm⁻¹ 处为 C-O-C, 1 724 cm⁻¹ 处为 C=O, 2 300~2 380 cm⁻¹ 处为 O=C=O, 2 889~2 973 cm⁻¹ 处为 -CH, 3 240~3 600 cm⁻¹ 处为 -OH, 说明 CSt 快速热解生成烃、芳烃、CO₂、醇类等物质; 433~600℃ 缓慢失重 4.6%, 此温度段 550℃ FT-IR: 与 350℃ 吸收峰不同的是 1 724 cm⁻¹ 处 C=O 未见, 1 523~1 683 cm⁻¹ 处 C=C 变强, 说明高温段 CSt 仍发生 C、O、H 之间键断裂, 至 600℃ 质量分数为 11.6%, 残余无定形炭。由图 7(c)、图 7(d) 中可以看出, 30~164℃ 缓慢失重 10.5%, 此温度段 100℃ FT-IR 证明水及醛类: 1 373~1 555 cm⁻¹ 处为 H₂O、1 618~1 871 cm⁻¹ 处为 -C=O、3 493~3 900 cm⁻¹ 处为 H₂O; 260~471℃ 迅速失重 72.7%, 此温度段 350℃ FT-IR: 922~1 135 cm⁻¹ 处为 C-O-C, 1 238~1 405 cm⁻¹ 处为 C-O, 1 728 cm⁻¹ 处为 C=O, 2 306~2 361 cm⁻¹ 处为 O=C=O, 2 891~2 978 cm⁻¹ 处为 -CH, 3 340~3 480 cm⁻¹ 处为 -OH, 说明逸出了 CO₂、烃类、醚类、醇类等物质; 471~600℃ 缓慢失重 2.2%, 此段红外峰与 350℃ 类似, 说明 BSt 残留物持续不断分解, 至



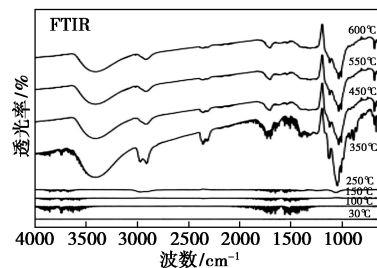
(a) CSt 的 TGA 曲线



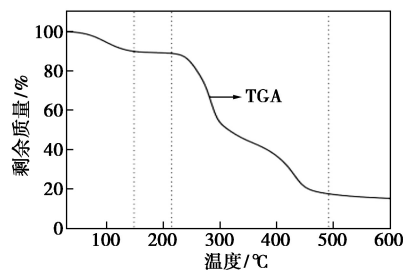
(b) CSt 的 FT-IR 图



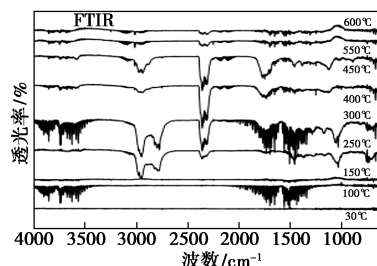
(c) BSt 的 TGA 曲线



(d) BSt 的 FT-IR 图



(e) CSt-g-DMC 的 TGA 曲线



(f) CSt-g-DMC 的 FT-IR 图

图 7 CSt、BSt 与 CSt-g-DMC 的 TGA 和 FT-IR 谱图

600℃ 残留无定形炭 12.6%。由图 7(e)、图 7(f) 中可以看出, CSt-g-DMC 热解温度 30~148℃ 缓慢失重 10.1%, 100℃ 时的 FT-IR 与 BSt 相似, 说明逸出水及醛类物质; 214~491℃ 阶梯式失重 72.5%, 300℃ FT-IR: 632~775 cm^{-1} 处为 $-\text{CH}$ 、 $-\text{NH}_2$; 1 021~1 065 cm^{-1} 处为 $-\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 、 $-\text{C}-\text{N}$; 1 334~1 557 cm^{-1} 处为 H_2O 、 $-\text{N}=\text{O}$; 1 661~1 833 cm^{-1} 处为 $-\text{C}=\text{O}$; 2 295~2 362 cm^{-1} 处为 $\text{O}=\text{C}=\text{O}$ 、 $-\text{C}\equiv\text{N}$; 2 780~2 973 cm^{-1} 处为 $-\text{CH}_3$ 、 CH_2 ; 3 540~3 910 cm^{-1} 处为 $-\text{NH}$ 、 $-\text{OH}$, 说明发生 C、O、N、H 相互间键的断裂、重整或内氧化, 逸出水、 CO_2 、烃、 NH_3 、 NO_x 、醛类等^[14]; 491~600℃ 缓慢失重 2.3%, 此温度段 550℃ FT-IR: 1 021~1 065 cm^{-1} 处为 $-\text{C}-\text{O}-$

C、 $-\text{C}-\text{N}$; 1 699~1 714 cm^{-1} 处为 $-\text{C}=\text{O}$; 2 295~2 392 cm^{-1} 处为 $\text{O}=\text{C}=\text{O}$; 2 884~3 138 cm^{-1} 处为 $-\text{CH}_3$ 、 $-\text{CH}_2$; 3 607~3 870 cm^{-1} 处为 $-\text{NH}$ 、 $-\text{OH}$, 表明高温段残余物继续热解形成 CO_2 、 H_2O 、 NH_3 、 NO_x 、烃、醛类等; 至 600℃ 残留无定形炭 15.1%。CSt、BSt 与 CSt-g-DMC 三者相比, CSt 快速失重起始温度较高, 但失重反应特别剧烈; BSt 快速热解温度与 CSt 基本相同, 但在低温段就发生了脱醛反应, 说明糊化及热处理可影响淀粉热稳定性; CSt-g-DMC 发生快速热解起始温度为 214℃, 且呈阶梯式降解, 证明 DMC 基团具有一定耐热性能。

2.4 絮凝性能分析

不同样品对高岭土悬浮液絮凝性能的影响如表 1 所示。

表 1 各样品对高岭土悬浮液透光率与 Zeta 电位影响

样品	参数	投加量/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)						
		0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	80.0
CSt	透光率/%	6.0±0.1 ^a	4.4±0.1 ^b	4.7±0.1 ^c	4.7±0.2 ^c	4.8±0.1 ^c	5.9±0.1 ^d	5.7±0.2 ^d
	Zeta 电位/mV	-23.00±0.08 ^a	-21.40±0.02 ^b	-21.61±0.02 ^c	-23.31±0.09 ^d	-23.69±0.04 ^e	-21.90±0.02 ^f	-23.59±0.02 ^g
BSt	透光率/%	6.0±0.1 ^a	5.3±0.1 ^a	5.6±0.1 ^b	5.3±0.2 ^b	5.7±0.1 ^c	5.6±0.2 ^c	5.0±0.2 ^d
	Zeta 电位/mV	-23.00±0.08 ^a	-19.01±0.07 ^b	-19.30±0.03 ^c	-20.01±0.06 ^d	-20.48±0.05 ^e	-21.30±0.01 ^f	-24.18±0.09 ^g
CSt-g-DMC	透光率/%	6.0±0.1 ^a	96.4±0.4 ^b	96.6±0.4 ^b	91.0±0.2 ^c	77.5±0.4 ^d	61.0±0.4 ^e	6.6±0.1 ^f
	Zeta 电位/mV	-23.00±0.08 ^a	-19.51±0.13 ^b	1.19±0.01 ^c	2.12±0.01 ^d	8.55±0.09 ^e	16.21±0.04 ^f	36.89±0.07 ^g

注: ①数据为 $\bar{x}\pm\text{SD}$, $n=3$, 同一行中字母相同表示差异不显著 ($P<0.05$); ②用自来水配制 20.0 mg/L 的 CSt、BSt 与 CSt-g-DMC 的 Zeta 电位分别为 -7.26、-21.20、-8.44 mV 和 25.90 mV。

从表 1 中可以看出, 投加 CSt 或 BSt 的高岭土悬浮液透光率均较小, 表明其絮凝效果差; 从 Zeta 电位来看, 随着 CSt 及 BSt 质量浓度的增加, Zeta 电位绝对值增加, 说明 CSt 或 BSt 无法中和悬浮液负电荷, 悬浮液颗粒由于带同性电荷相斥而难以聚沉。而当 CSt-g-DMC 投加到悬浮液中, 随着质量浓度的增加, 透光率从低变高再变低, 在质量浓度为 4.0 mg/L 时透光率最大, Zeta 电位绝对值最小。这是因为 CSt-g-DMC 为阳离子絮凝剂, 对呈负电的高岭土悬浮液起到了电性中和作用, 同时, CSt-g-DMC 呈多孔的空间结构对悬浮颗粒起架桥吸附作用, 质量浓度超过 4.0 mg/L, 颗粒周围包裹了较多阳离子基团, 使悬浮颗粒从电中性转为带正电状态, 从而使絮凝效果变差。

3 结论

(1) 利用过硫酸铵-热双引发聚合工艺快速制备 CSt-g-DMC 的较佳工艺条件: DMC 质量分数为 12%、反应温度为 110℃、反应时间为 30 min。

(2) FT-IR 分析表明, CSt 与 DMC 发生了接枝共聚反应; XRD 与 SEM 分析结果表明, CSt-g-DMC 为无定形态的多孔网状物质。

(3) TGA-FTIR 分析表明, CSt-g-DMC 中接入的 DMC 基团可稳定至 214℃, 其热解方式为较平缓的阶梯式。

(4) 絮凝实验结果表明, CSt-g-DMC 为阳离子高分子絮凝剂, 当高岭土悬浮液质量浓度为 500 mg/L、CSt-g-DMC 质量浓度为 4.0 mg/L 时, 絮凝效果最好。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Chen L, Zhu H, Sun Y J, et al. Characterization and sludge dewatering performance evaluation of the photo-initiated cationic flocculant PDD[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2018, 93: 253-262.

(下转第 164 页)

电位如图 7 所示。

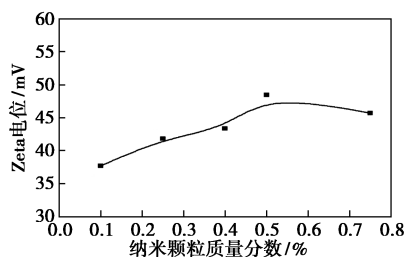


图 7 不同质量分数的二氧化硅纳米流体的 Zeta 电位变化曲线

从图 7 中可以看出,随着二氧化硅质量分数的增加,纳米流体的 Zeta 先增大后下降。也就是说在相同分散剂质量分数、超声功率和超声时间下,随着颗粒质量分数的增加,纳米流体的稳定性保持良好。说明颗粒质量分数的增加并没有使其稳定性立即变差,而是有一定的适应区间。当颗粒质量分数超过 0.75% 后,液体的稳定性开始下降,需要重新调整分散剂质量分数、超声功率和超声时间来保证其稳定性。

3 结论

(1) 分散剂种类及其质量分数对纳米颗粒的分散效果都有较大的影响。对于塔河油田,若采用氧化铝纳米流体,其分散剂的类型宜选用 SHP 分散剂,质量分数为 0.06%,流体的稳定性最好;二氧化硅和二氧化钛纳米流体宜选用 CTAB,质量分数为 0.125%,颗粒可以达到较好地分散效果。

(2) 超声分散法所提供的总能量对纳米流体的

稳定性有一定影响,而总能量与超声功率和超声时间相关。通过实验发现,超声功率对颗粒分散效果起主导作用。塔河油田水套炉若选择氧化铝纳米液体,超声功率应在 375~450 W 之间,此时颗粒的分散性最优;而二氧化硅和二氧化钛 2 种纳米液体的超声功率在 375 W 左右时,颗粒的分散性最优。

(3) 在同等条件下,颗粒质量分数的增加并没有使得纳米流体的稳定性即刻变差,而是有一定的适应范围。当颗粒质量分数超过 0.75% 后,液体的稳定性开始下降,此时则需要重新调整分散剂质量分数、超声功率和超声时间,以获得更加稳定的纳米液体。

参考文献

- [1] 蒲鹤.塔河油田集输设备效率检测及系统优化研究[D].成都:西南石油大学,2014.
- [2] Alexopoulos D I S, Hoffschmidt B. Concentrating receiver systems (solar power tower)[M].New York:Springer,2013:29-71.
- [3] 李强,宣益民.纳米流体对流换热的实验研究[J].工程热物学报,2002,23(6):721-723.
- [4] Wang B X,Zhou L P,Peng X F.A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,2003,46(14):2665-2672.
- [5] Ghadimi A, Saidur R, Metselaar H S C. A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer,2011,54(17):4051-4068.
- [6] 朱冬生,李新芳,王先菊,等.氧化铝-水纳米流体的制备及其分散性研究[J].化工新型材料,2007,35(9):45-47. ■
- [7] 唐莉,张跃军.聚甲基丙烯酸酯氧乙基三甲基氯化铵的合成[J].精细化工,2014,31(11):1324-1328,1375.
- [8] Wang J P, Yuan S J, Wang Y, et al. Synthesis, characterization and application of a novel starch-based flocculant with high flocculation and dewatering properties [J]. Water Research, 2013, 47(8): 2643-2648.
- [9] 汤月华,石婷婷,王晓广,等.⁶⁰Co- γ 共辐射阳离子接枝淀粉的制备[J].纺织学报,2009,30(7):65-68.
- [10] 韩运华,蒋薇,石磊.P(DMC-AM)阳离子高分子絮凝剂的制备[J].吉林化工学院学报,2012,29(11):9-12.
- [11] Jyothi A N, Sajeev M S, Moorthy S N, et al. Effect of graft-copolymerization with poly(acrylamide) on rheological and thermal properties of cassava starch[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 116(1): 337-346.
- [12] 贺蕾娟,逯毅,刘瑶,等.AM-DMC-SSS-淀粉的合成及性能评价[J].应用化工,2015,44(1):53-56.
- [13] 周智敏,颜学敏,赵庆美.羧甲基纤维素接枝 AM 和 DMC 制备高吸水性树脂研究[J].化学与生物工程,2009,26(5):60-62.
- [14] 李海花,高玉华,张利辉,等.阳离子型接枝淀粉的合成及其絮凝性能[J].化学研究与应用,2019,31(6):1179-1186.
- [15] 张宏伟,叶志雄,施建平.淀粉/Si/BA/DMC 共聚物的制备及应用研究[J].造纸科学与技术,2008,27(6):126-129.
- [16] Yang Q Y, Lu X X, Chen Y Z, et al. Fine structure, crystalline and physicochemical properties of waxy corn starch treated by ultrasound irradiation [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 51: 350-358.
- [17] Smal I M, Yu Q, Veneman R, et al. TG-FTIR measurement of CO₂-H₂O co-adsorption for CO₂ air capture sorbent screening [J]. Energy Procedia, 2014, 63: 6834-6841.
- [18] Nascimento A L C S, Parkes G M B, Ashton G P, et al. Thermal analysis in oxidative and pyrolysis conditions of alkaline earth metals picolates using the techniques: TG-DSC, DSC, MWTA, HSM and EGA (TG-DSC-FTIR and HSM-MS) [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2018, 135: 67-75. ■

(上接第 159 页)