



阳离子型聚丙烯酰胺的合成及其在纸张上的应用

吴茜¹,梁福根²,李相²,姚胜²,杨淑娟^{1,3},张勇^{1,3}

(1. 浙江理工大学纺织科学与工程学院,杭州 310018;2. 浙江传化华洋化工有限公司,杭州 311231;

3. 浙江理工大学象山针织研究所有限公司,宁波 315000)

摘要:为解决废纸浆成纸物理性能差的问题,以N,N-二甲基丙烯酰胺(N,N dimethylacrylamide,DMAA)为支化交联剂、甲基丙烯磺酸钠(Sodium methylpropenesulfonate,SMAS)为链转移剂、过硫酸铵(Ammonium persulfate,APS)为引发剂、亚硫酸钠为终止剂、甲基丙烯酸二甲氨基乙酯(Dimethylaminoethyl methacrylate,DM)为阳离子单体,通过水溶液聚合合成了具有絮凝性能的阳离子型聚丙烯酰胺(Cationic polyacrylamide,CPAM)分散液;分析不同用量的支化交联剂、链转移剂、引发剂、单体以及单体溶液pH值对CPAM分散液性能的影响,从而优化了CPAM的相对分子质量与黏度性能;以CPAM为絮凝剂,通过抄片实验制备纸张,分析CPAM分散液的絮凝性对纸张物理性能的影响。结果表明:当支化交联剂的质量分数为3.2%、链转移剂的质量分数为0.8%、引发剂的质量分数为0.47%、单体质量分数为25%、单体溶液pH值为3、通氮体积分数为60%时,CPAM分散液的性能最佳;将CPAM分散液应用于废纸浆的纸张抄造,当添加的CPAM分散液的质量分数为0.6%时,纸张的耐破值达到了2.14 kPa·m²/g,内结合强度为160.5 J/m²,分别较空白样提升了30.5%和59.5%,显著提高了纸张的强度。该研究所制备的CPAM分散液在造纸工业中具有极大的应用潜力,同时也为用于废纸浆成纸的CPAM性能研究提供了理论参考。

关键词: 阳离子型聚丙烯酰胺;水溶液聚合;相对分子质量;黏度;纸张强度

中图分类号: TS79

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2025)07-0443-08

引用格式: 吴茜,梁福根,李相,等. 阳离子型聚丙烯酰胺的合成及其在纸张上的应用[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2025,53(4):443-450.

Reference Format: WU Qian, LIANG Fugen, LI Xiang, et al. Synthesis of cationic polyacrylamide and its application in paper[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2025, 53(4): 443-450.

Synthesis of cationic polyacrylamide and its application in paper

WU Qian¹, LIANG Fugen², LI Xiang², YAO Sheng², YANG Shujuan^{1,3}, ZHANG Yong^{1,3}

(1. School of Textile Science and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018,

China; 2. Zhejiang Transfar Whyyon Chemical Co., Ltd., Hangzhou 311231, China;

3. Zhejiang Sci-Tech University Xiangshan Knitting Research Institute Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

Abstract: To solve the problem of poor physical properties of waste pulp-based paper, N,N-Dimethyl acrylamide (DMAA) was used as a branched crosslinking agent, sodium methacryloysulfonate (SMAS) as a chain transfer agent, ammonium persulfate (APS) as an initiator, sodium sulfite as a terminator, methacryloyldimethylamine ethyl ester (DM) as a cationic monomer, and cationic polyacrylamide (CPAM) dispersion was prepared by aqueous solution polymerization. The effects of different amounts of branched crosslinking agents, chain transfer agents, initiators, monomers, and monomer solution pH values on the performance of the CPAM dispersion were analyzed, and the relative molecular weight and viscosity properties of CPAM were optimized. With CPAM as flocculant, the paper was prepared by the

收稿日期: 2024-06-26 网络出版日期: 2024-10-22

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2021C03160); 浙江理工大学科研启动基金(21202297-Y)

作者简介: 吴茜(1999—),女,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事纸张化学助剂等方面的研究。

通信作者: 张勇, E-mail: zhangyong@zstu.edu.cn

paper-making experiment, and the influence of the flocculation of the CPAM dispersion on the physical properties of the paper was analyzed. The results show that when the quality fraction of the branched crosslinking agent, the chain transfer agent, the initiator and monomer was 3.2%, 0.8%, 0.47% and 25%, respectively, the monomer solution pH was 3, and the nitrogen gas flow rate was 60%, the performance of the CPAM dispersion was best. At the same time, the dispersion was applied to the paper making of waste paper pulp. When the mass fraction of the CPAM dispersion was 0.6%, the bursting strength of the paper reached $2.14 \text{ kPa} \cdot \text{m}^2/\text{g}$, the internal bonding strength was 160.5 J/m^2 , which were respectively raised by 30.5% and 59.5% compared with the blank sample. The CPAM dispersion prepared herein has great application potential in the paper-making industry, and also provides theoretical reference for the performance study of CPAM for waste pulp paper.

Key words: cationic polyacrylamide; aqueous solution polymerization; molecular weight; viscosity; paper strength

0 引 言

废纸浆,也称再生浆,是由多种不同品种和性质的废纸与纸板加工而成^[1]。在中国,废纸回收量与回收率均呈现出逐年增长的态势。从纸浆细分市场的供给结构来看,废纸浆占据了约 70% 的市场份额,成为主流原料。尽管废纸浆的回收利用市场潜力巨大,但其回收再利用所面临的挑战不容忽视,如废纸纤维较短、机械性能欠佳,这些问题直接导致所制备纸张产品的强度性能不佳。因此,通过提升废纸浆所制纸张的物理性能满足市场对高品质纸张的需求显得非常重要。

聚丙烯酰胺(Polyacrylamide, PAM)作为一种水溶性高分子化学物,因其广泛的适用性而在造纸、采油、选矿、纺织、环保、黏合剂及皮革复鞣剂等多个领域中占据重要地位^[2]。在众多制备方法中,水溶性聚合法凭借其工艺简单、聚合转化率高且对环境友好的特点,成为制备 PAM 的主流方法^[3]。该方法通常以水作为反应介质,反应过程易于控制且制作成本相对较低。通过水溶液聚合法制备的阳离子型聚丙烯酰胺(Cationic polyacrylamide, CPAM),以乳液形态存在,展现出优异的水分散性。这一特性使得 CPAM 在无需任何后续处理的情况下即可直接使用,从而简化了工艺流程,并显著提升了成纸性和纸张质量^[4]。

CPAM 的分子链含有带正电荷基团的阳离子,这些基团能够中和纸浆带中负电荷的纤维和填料颗粒,从而促进纸纤维之间的结合。通过这种方式,PAM 能有效地聚集和絮凝这些颗粒,形成较大的絮凝体,进而提升纸浆的沉降和脱水性能^[5]。另外,CPAM 具有较好的耐酸性,可以在酸性及中性条件

下进行有效的施胶操作^[6]。然而,CPAM 在实际应用中仍存在分子质量低、黏度低、溶解度不佳及絮凝效果不理想等问题,这些问题严重限制了聚丙烯酰胺类纸张助剂的应用范围。针对以上问题,研究人员从原料、制备工艺等方面出发优化 CPAM 的性能。闫君芝等^[7]以丙烯酰胺(Acrylamide, AM)为原料,聚甲基丙烯酸酯氧乙基三甲基氯化(Poly(methyl methacrylate) triethylene glycol trimethyl ether, PDMC)为稳定分散剂,在偶氮二异丁氰和四甲基乙二胺(Tetramethylethylenediamine, TEMED)的作用下,链接阳离子单体甲基丙烯酸酯氧乙基三甲基氯化铵(Methylacryloxyethyl trimethyl ammonium chloride, DMC)和甲基丙烯酸酯氧乙基苄基二甲基氯化铵(Methylacryloxyethylbenzyl dimethyl ammonium chloride, MB-DAC),使 CPAM 的絮凝效果提升了 15%~20%。邓敏等^[8]通过调控季铵化反应的时间和温度,以二甲氨基甲醇和溴乙烷为原料,成功制备了絮凝率为 24.67% 的 CPAM 絮凝剂,同时发现提高阳离子度和 CPAM 的用量有利于提高絮凝剂的性能。以上研究虽然在提高 CPAM 的性能、优化 CPAM 的制备工艺方面具有一定的参考价值,但如何获得性能优异和高稳定性的 CPAM 仍然是一个挑战。

为推动 CPAM 在纸张行业的广泛应用,本文采用水溶液聚合法,以 N,N 二甲基丙烯酰胺(N,N dimethylacrylamide, DMAA)为酯化交联剂,甲基丙烯磺酸钠(Sodium methylpropenesulfonate, SMAS)为链转移剂,甲基丙烯酸二甲氨基乙酯(Dimethylaminoethyl methacrylate, DM)为阳离子单体,过硫酸铵(Ammonium persulfate, APS)为引发剂,合成 CPAM 分散液;探讨不同用量的支

化交联剂、链转移剂、引发剂、单体以及单体溶液 pH 值对 CPAM 的性能的影响;在此基础上,将其应用于废纸浆抄纸中,探讨其对纸张性能的影响规律。本文旨在合成出相对分子质量与黏度性能优异的 CPAM,为其在废纸浆成纸的实际应用提供参考。

1 实验部分

1.1 实验材料与设备

主要材料:丙烯酰胺(AM)和硫酸铝购自宁波先安化工有限公司,甲基丙烯酸二甲氨基乙酯(DM)购自临淄金茵化工有限公司,N,N-二甲基丙烯酰胺(DMAA)、甲基丙烯磺酸钠和过硫酸铵(APS)均购自上海麦克林生化科技股份有限公司,乙二醇四乙酸二钠、稀硫酸、亚硫酸钠和依康酸(IA)均购自阿拉丁试剂(上海)有限公司,废纸浆均取自海盐的山鹰纸业车间浆池的湿浆。

仪器设备:黏度计(DV2TLVTJ0,阿美特克商贸上海有限公司);超高效液相色谱仪(UPLC H-Class,美国 Waters 公司);电脑测控耐破度仪(DCP-NPY-1200,四川长江造纸仪器有限责任公司);电脑测控内结合强度仪(DCP-NJH1000,四川长江造纸仪器有限责任公司);抄片机(TSF1,德国 Sumet-Messtechnik);压光机(S-CA5.250,德国 Sumet-Messtechnik);蠕动泵驱动器(BT100-1F,保定兰格恒流泵有限公司);核磁共振谱仪(Bruker AVANCE III-400 MHz,德国 Bruker 公司)。

1.2 CPAM 分散液的制备

将装有 120 mL 去离子水和 0.08 g 的乙二醇四乙酸二钠的玻璃反应釜加热,升温至 83 ℃,搅拌,同时通入氮气;反应釜温度稳定在 90 ℃后,开始滴加引发剂溶液(0.04 g APS 溶于 15 mL 去离子水),控制滴加时间为 150 min;在引发剂溶液滴加 15 min 后,开始滴加单体溶液(先加入 110.00 g 的 AM 水溶液、0.24 g DMAA 和 0.25 g SMAS,再加入 8.00 g 的 30%稀硫酸和 6.30 g DM),控制滴加时间为 135 min;引发剂溶液和单体溶液同时滴加完毕后,每隔 30 min 向反应釜中加入溶液(0.10 g APS 溶于 5.00 g 去离子水),重复操作 2 次;观察反应釜内部情况,并在适当时机加入终止剂溶液(0.30 g 亚硫酸钠溶于 80 mL 去离子水)终止反应,以获取 CPAM 分散液样品。

1.3 抄片实验

按照《纸和纸板定量的测定》(GB/T 451.2—

2002),设置纸张定量 80 g/m²,将废纸浆料浸湿后打浆,计算好纸浆的质量分数为 2.2%时所需湿浆和水的质量,将湿浆和水放入解离器,经过解离器疏解后取出纸浆,分浆后在 40 ℃水中恒温保存 2 h。正式抄纸前,先配制质量分数 1%的 CPAM 分散液,使其抄纸过程中处于搅拌状态,添加顺序依次为:在搅拌 1.0 min 后加入硫酸铝,搅拌 2.0 min 后加入质量分数为 0.3%(相较于浆液)的 CPAM 分散液,搅拌 3.0 min 后,加入白水使纸浆质量分数稀释至 1%,3.5 min 停止搅拌,放入抄片机抄造。抄好的纸先放入压片机中压片 1.5 min,取出放入 105 ℃鼓式干燥器中烘干,烘干后放入恒温恒湿室 18.0 h,裁剪后备用。因为 CPAM 的添加量会直接影响纸张的强度性能,所以通过调控 CPAM 添加量的质量分数(分别为 0.15%、0.3%、0.45%、0.6%、0.75%、0.9%)来讨论并得出 CPAM 的最佳添加量。

1.4 结构与性能表征

1.4.1 黏度测试

将 CPAM 分散液放入恒温水浴锅内,25 ℃恒温 4.0 h,使其均匀分散;取出后用黏度计测试分散体的黏度。

1.4.2 相对分子质量分析

通过凝胶渗透色谱法可以测出聚合物的相对分子质量、相对分子质量分布以及分子尺寸等。利用乙酸乙酸钠溶液稀释高黏聚合物 CPAM 分散液,然后放入超高效液相色谱仪测试进行测试分析,具体方法参考文献[9]。

1.4.3 化学结构分析

用傅里叶变换红外光谱仪扫描经过烘干提纯后的 CPAM 分散液,检测范围为 4000~600 cm⁻¹,绘制出红外特征光谱图;利用有机剂 D₂O 溶解 10 mg 的 CPAM 分散液,通过核磁共振波谱仪检测¹H NMR 光谱,分析丙烯酰胺聚合物的化学组成和结构。

1.4.4 耐破性能测试

按照《纸耐破度的测定》(GB/T 454—2002),使用电脑测控耐破度仪测试纸张耐破值,测量位置需均匀地分散在纸张表面,每张纸样测试 10 次后取平均值。

1.4.5 内结合强度(IB)

按照《纸和纸板内结合强度的测定(Scott 型)》(GB/T 26203—2023),使用电脑测控内结合强度仪测试纸张内结合强度,每张纸样测试 10 次后取平均值。

2 结果与讨论

2.1 CPAM 的性能分析

2.1.1 CPAM 分散液的结构分析

CPAM 分散液的红外光谱图如图 1 所示。从图 1 可知:在 3335 cm^{-1} 和 3187 cm^{-1} 处出现了两个吸收较强的双峰,均由丙烯酰胺分子中酰胺基($-\text{CONH}_2$)中 $\text{N}-\text{H}$ 的伸缩振动引起的; 2921 cm^{-1} 处出现一个吸收峰,而 2853 cm^{-1} 处则出现了一个肩峰,这两个吸收峰是由 AM 分子中亚甲基中 $\text{C}-\text{H}$ 的伸缩振动引起的; 1645 cm^{-1} 和 1600 cm^{-1} 处存在明显的吸收峰,这些峰分别与酰胺基($-\text{CONH}_2$)中 $\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动和 $\text{N}-\text{H}$ 弯曲振动相对应; 1115 cm^{-1} 处为 DM 中 $\text{C}-\text{N}$ 伸缩振动, 1183 cm^{-1} 处的峰为酯基上的 $\text{C}-\text{O}$ 特征吸收峰^[10]。由以上结果可知,AM 和阳离子单体 DM 的特征吸收峰皆出现在样品的 FT-IR 光谱中。

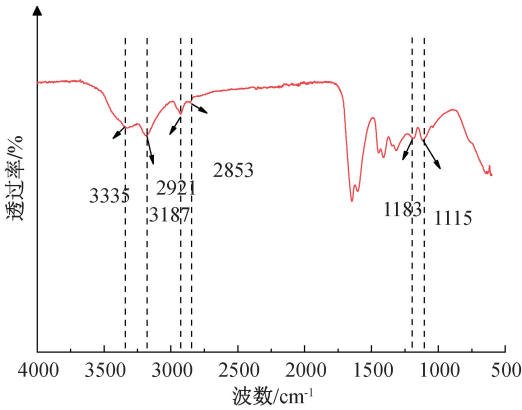


图 1 CPAM 分散液的红外光谱图

CPAM 的核磁共振波谱图如图 2 所示。从图 2 可知,化学位移 4.80 ppm 处对应的是溶剂 D_2O 的峰,a 处(1.57 ppm)的峰为丙烯酰胺碳双键打开后的吸收峰,b 处(2.11 ppm)的峰是 AM 中与酰胺基相连的亚甲基峰,f 处(1.10 ppm)的峰为 DM 链段上与碳碳双键相连的甲基氢原子的吸收峰,c 处(2.91 ppm)的峰是 DM 上与氮相连的两个甲基氢原子的吸收峰,化学位移 d 处(4.31 ppm)、e 处(3.44 ppm)分别是 DM 中 $-\text{O}-\text{CH}_2-$ 、 $-\text{CH}_2-\text{N}-$ 上氢的吸收峰^[11]。IR 和 ^1H MNMR 分析结果一致,表明 CPAM 是由 AM、DM 合成所得的聚合物^[12]。

2.1.2 CPAM 分散液与纤维作用分析

图 3 为添加与未添加 CPAM 分散液废纸纤维作用后纸张的 SEM 图像。图 3(a)表明:未加 CPAM 的纸张,纤维间结合松散,显示出较弱的连接。图 3(b)清晰地显示了 CPAM 附着于纸纤维之

间。纸张的强度是由纤维间的吸引力和化学键作用所形成的,尤其是氢键,其强度远超于范德华力,能显著提升纤维结合力^[13]。纤维间产生结合松散与紧密区别的原因可能是 CPAM 中的酰胺基与纤维中的羟基形成了氢键,因此增加了纤维间的结合点,进而增强了纤维与纤维间的作用力。

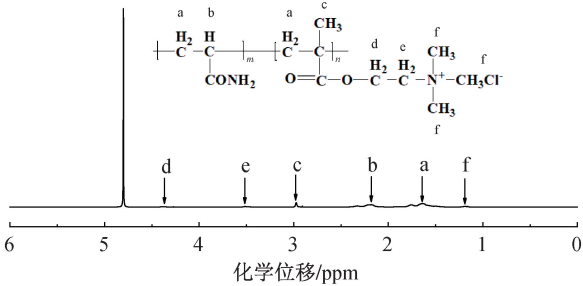
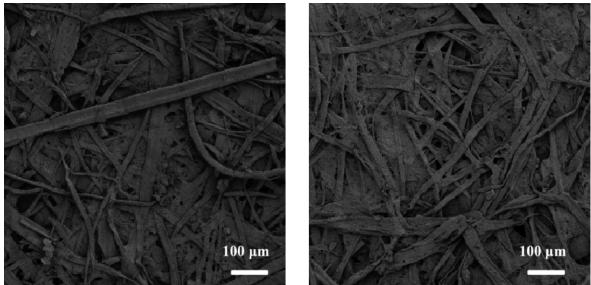


图 2 CPAM 的 ^1H 核磁共振波谱图



(a) 未添加 CPAM (b) 添加 CPAM

图 3 添加 CPAM 前后纸张表面微观形貌 SEM 图

2.2 反应条件对 CPAM 分散液及纸张性能的影响

将 CPAM 分散液的质量分数固定为 0.3% ,研究交联剂、链转移剂、引发剂的用量以及单体用量和单体溶液的 pH 值对 CPAM 分散液黏度与相对分子质量的调节作用。进一步分析不同添加量的 CPAM 分散液对废纸浆造纸性能的具体影响。通过综合研究,优化 CPAM 的聚合制备工艺参数,以达到最佳性能表现。

2.2.1 支化交联剂用量

不同交联剂用量下 CPAM 分散液性能和纸张强度的变化曲线如图 4 所示。从图 4(a)中可以看出:随着交联剂用量的增加,CPAM 的黏度和相对分子质量起初逐渐上升;但当 DMAA 质量分数超出 3.2% 时,两者均呈现下降趋势。这表明,适量 DMAA 能有效提升 CPAM 分散液的交联度和相对分子质量;然而,过量交联剂会导致分子链过长,超出分散系统的承受能力,进而影响 CPAM 的分散性,引发凝胶化现象^[14]。从图 4(b)可知:当交联剂质量分数为 3.2% 时,纸张的耐破值和内结合强度分别达到 $1.75\text{ kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ 和 $107.7\text{ J}/\text{m}^2$,相较于对照样品,耐破值提升了 12.3% ,内结合强度则提高了 20.7% 。

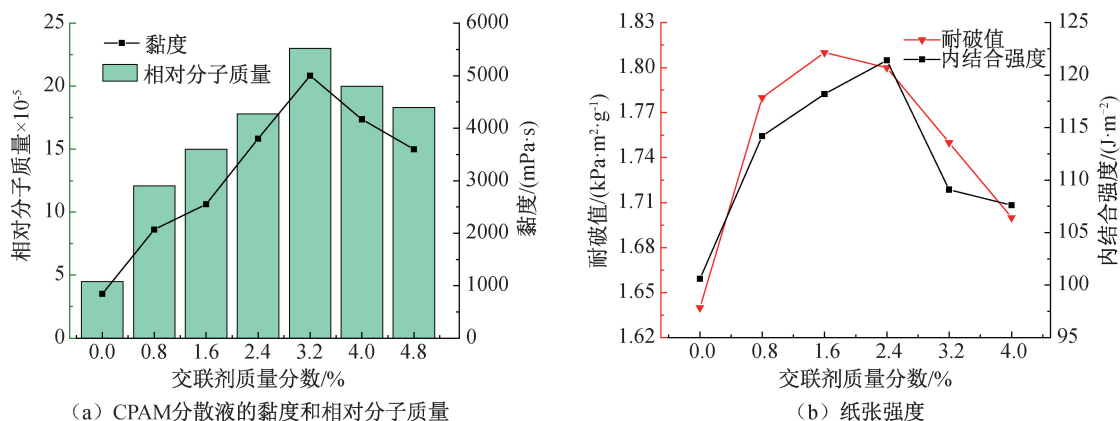


图 4 不同交联剂用量下 CPAM 分散液性能和纸张强度的变化曲线

2.2.2 链转移剂用量

不同链转移剂用量下 CPAM 分散液性能和纸张强度的变化曲线如图 5 所示。从图 5(a)中可以看出:随着链转移剂用量的增加,黏度逐步降低,而相对分子质量则先上升后再下降。这一现象是因为 SMAS 是一种带有双键的阴离子单体,具备优异的还原性能,容易与自由基发生反应,从而减少自由基数量,有效缩短聚合物链长,初期能提高 CPAM 分

散液的相对分子质量。然而,过量添加会降低反应体系的活性,导致相对分子质量下降。此外,过量的链转移剂还会促进链终止反应;纸张的耐破值和内结合力都随着链转移剂用量的增加先增大后减小,当链转移剂质量分数为 0.8% 时,达到最大值,分别为 $1.98 \text{ kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ 和 $132.7 \text{ J}/\text{m}^2$ 。因此,适宜的链转移剂用量可以确保合成的干强剂产品具有适当的相对分子质量和出色的应用效果。

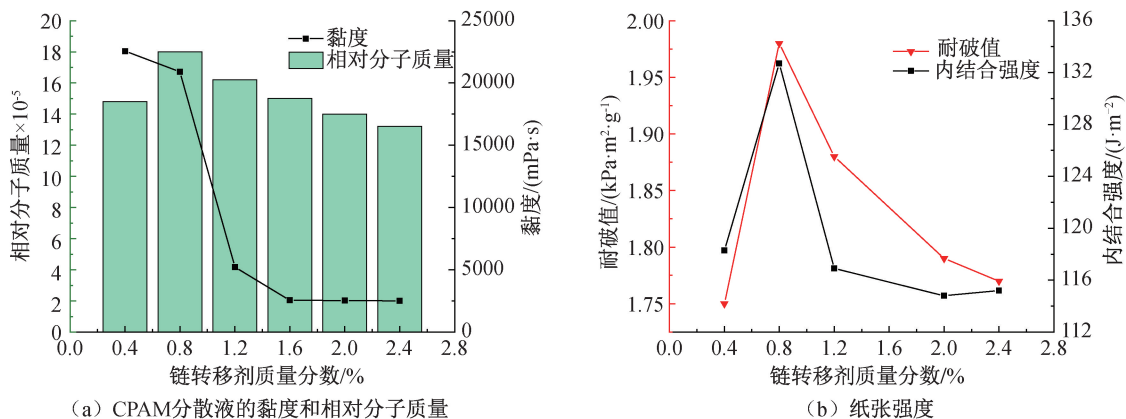


图 5 不同链转移剂用量下 CPAM 分散液性能和纸张强度的关系曲线

2.2.3 引发剂用量

不同引发剂用量下 CPAM 分散液性能和纸张强度的变化曲线如图 6 所示。引发剂的活跃性和使用量在 CPAM 的聚合过程中起着至关重要的作用。如果引发剂的用量不足,就无法产生足够数量的自由基来激发链引发反应;反之,用量过大,则会导致体系中自由基质量分数过高,进而缩短分子链,使聚合物分子量分布变宽^[15]。图 6 为引发剂的用量对 CPAM 分散液和纸张强度的影响。从图 6(a)可见:随着引发剂用量的增加,CPAM 分散液的相对分子质量和黏度先增大后减小。当引发剂质量分数低于 0.27% 时,聚合反应可能难以正常进行,或者反应时

间过长,无法有效促进自由基聚合;随着引发剂用量逐渐增多,体系内的活性中心数量也随之增多,使得更多的单体得以反应,分子链逐步扩展,单体转化率提升,CPAM 分散液的相对分子质量也随之提高;然而,当引发剂的质量分数超过 0.47% 时,可能导致自由基过度生成,引发聚合速度过快、温度迅速上升以及链终止速度加快等问题,进而使 CPAM 分散液分子链的长度缩短,相对分子质量和黏度均下降^[16]。图 6(b)表明:当引发剂质量分数为 0.47% 时,纸张的耐破值和内结合强度达到了最大值,分别为 $2.07 \text{ kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ 和为 $118.1 \text{ J}/\text{m}^2$,因此适当的引发剂用量对于优化聚合物产物的性能至关重要。

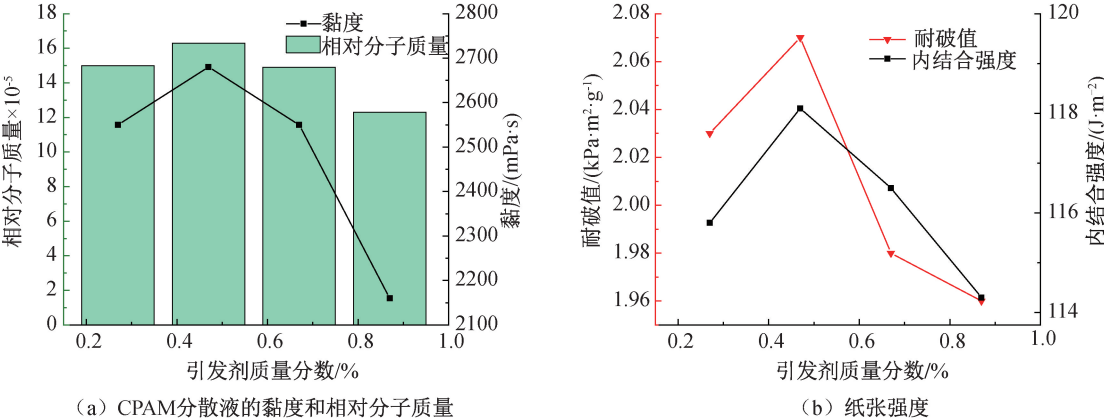


图 6 不同引发剂用量下 CPAM 分散液和纸张强度的关系曲线

2.2.4 单体溶液 pH 值

本文选用 DM 为阳离子单体,需在酸性环境中进行质子化。过强酸性会减少羧酸根离子,碱性条件则导致 DM 酯基水解。因此,聚合反应时 pH 值应适中,不宜超过 4。不同单体溶液 pH 值下 CPAM 分散液性能和纸张强度的变化曲线如图 7 所示。从图 7(a)可知,随着单体溶液 pH 值增大,样品的黏度和相对分子质量都呈现出升高的趋势,造

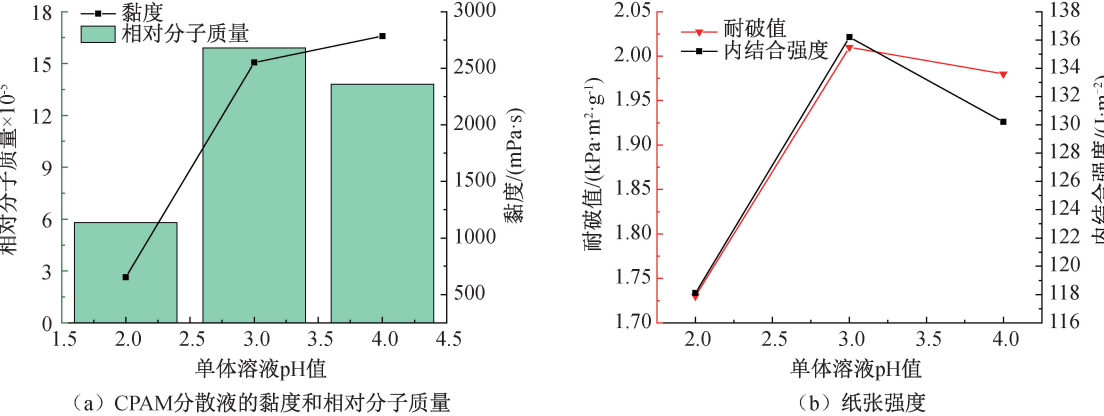


图 7 不同单体溶液 pH 值下 CPAM 分散液性能和纸张强度的关系曲线

2.2.5 单体用量

不同单体用量下 CPAM 分散液性能和纸张强度的变化曲线如图 8 所示。从图 8(a)可以看出,随着单体质量分数的增加,CPAM 分散液的相对分子质量与黏度均先增大后减小。低单体质量分数时,自由基数量少,聚合物的质量小且流动性好,因此黏度较低。随着单体质量分数提高,单体间碰撞增多,促进了聚合物分子链的增长,导致黏度和相对分子质量逐渐增大。然而,单体过量会导致反应体系温度骤升,热量难以及时散开,从而降低相对分子质量并影响溶解性,甚至出现凝胶现象^[17]。图 8(b)进一步表明,随着单体质量分数的增加,CPAM 分散液的相对分子质量变大,增强了对废纸浆的吸附力,提

成这一现象的原因是:在酸性条件下,大量的 H^+ 聚合物或其单体中的酰胺基团发生化学反应,导致带有正电荷的氮原子发生质子化。这种质子化使得自由基的活性随着 pH 值的降低而增加,从而更容易与其他分子发生反应,推动了化学反应的进行。从图 7(b)可以看出,当单体溶液 pH 值为 3 时,纸张性能最佳状态。这表明:聚合反应在此 pH 值下得到了优化,从而提高了纸张的强度性能。

升了纸张的强度^[18]。但当单体质量分数超过 30% 后,纸张强度明显下降。这是因为过多单体导致更多的自由基参与到反应,加速了聚合分子链的形成和终止,进而降低了 CPAM 分散液的相对分子质量,削弱了 CPAM 与纤维的结合力。

2.2.6 氮气用量

不同氮气用量下 CPAM 分散液性能和纸张强度的变化曲线如图 9 所示。从图 9(a)可见,随着氮气流量的逐渐增加,黏度和相对分子质量均呈缓慢上升趋势。这是因为氧气在自由基聚合反应中有强烈的抑制作用,与自由基反应生成活性较低的过氧自由基,消耗自由基^[19]。增加通氮气流可提高除氧率,有效降低氧气阻聚作用。

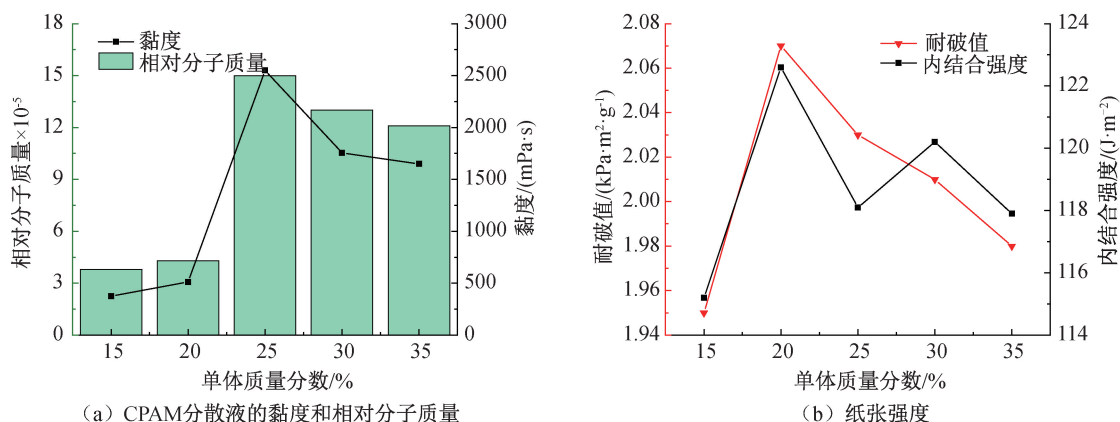


图 8 不同单体用量对 CPAM 分散液和纸张强度的关系曲线

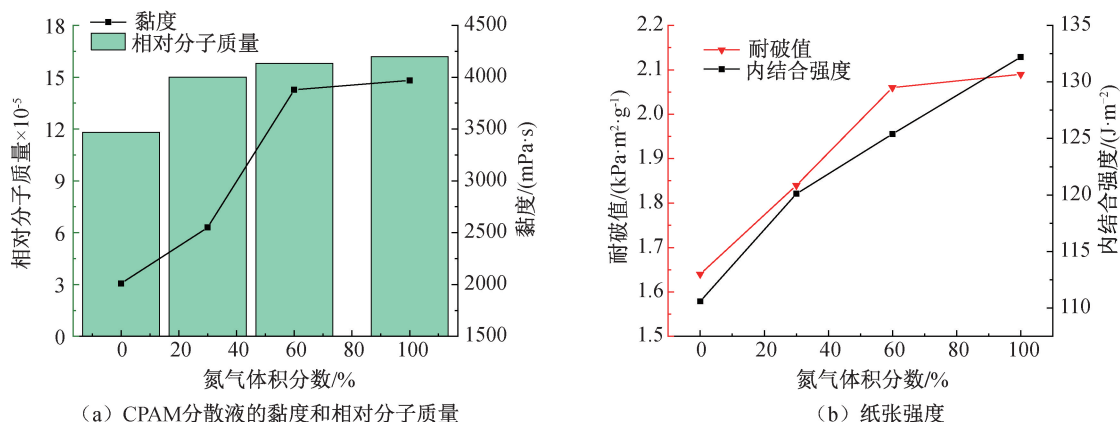


图 9 不同氮气用量 CPAM 分散液性能和纸张强度的关系曲线

2.2.7 CPAM 分散液添加量

不同 CPAM 添加量下纸张强度的变化曲线如图 10 所示。从图 10 可以看出,随着 CPAM 分散液的添加量增加,纸张强度性能呈现先增大后减小的趋势。当 CPAM 分散液质量分数为 0.6% 时,纸张的耐破性和内结合强度分别达到峰值 $2.14 \text{ kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ 和 $160.5 \text{ J}/\text{m}^2$,相较于空白样(耐破值 $1.64 \text{ kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$ 、内结合强度 $100.6 \text{ J}/\text{m}^2$)提升了 30.5% 和 59.5%。CPAM 带有阳离子基团,能与带负电的小纸纤维和填料聚集,形成团块并沉积在纤维表面,从而显著提高浆料的保留率^[13]。然而,当添加量超过 0.6% 时,由于阳离子间产生电荷互斥及增强相互作用力,使得 CPAM 分子更易聚集成大团,从而减少对废纸浆颗粒的吸附量,并最终降低纸张强度^[20]。因此,合理控制 CPAM 分散液的添加量是优化纸张强度性能的关键。

3 结 论

本文选用 DMAA 为支化交联剂,SMAS 为链转移剂,APS 作为引发剂,DM 作为阳离子单体参与聚合。反应过程中,通过亚硫酸钠有效控制反应

进程。通过水溶液聚合法,成功制备了具有良好黏度和相对分子质量的 CPAM 分散液,并将其应用于废纸浆的纸张抄造过程,观察 CPAM 分散液性能对纸张的强度的影响。得到主要研究结论如下:

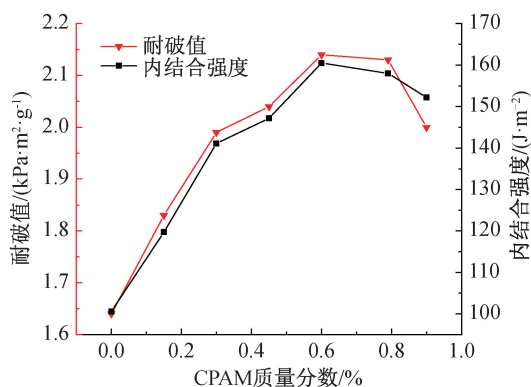


图 10 不同质量分数 CPAM 分散液用量与纸张强度的关系曲线

a)链转移剂、引发剂和单体用量等关键因素的变化对 CPAM 分散液的相对分子质量和黏度产生显著影响。经过一系列实验优化,确定了最佳工艺配方:支化交联剂用量为 3.2%、链转移剂用量为 0.8%、引发剂用量为 0.47%、单体质量分数为

25%、单体溶液 pH 值为 3。优化后的 CPAM 分散液相对分子质量为 $6 \times 10^5 \sim 2.2 \times 10^6$ 。

b)通过模拟湿部的纸张抄造过程,将优化后的 CPAM 分散液应用于废纸浆中进行纸张抄造。当 CPAM 分散液的添加量为 0.6%时,纸张的耐破值达到了 $2.14 \text{ kPa} \cdot \text{m}^2/\text{g}$,内结合强度为 160.5 J/m^2 ,相较于空白样分别提升了 30.5%和 59.5%。

优化后的 CPAM 分散液在纸张增强方面效果显著,展示了其作为絮凝剂在造纸工业中的应用潜力。本文研究也可以为纸张应用的评价改进和 CPAM 分散液的合成工艺的优化提供参考。

参考文献:

[1] Quina M J, Pinheiro C T. Inorganic waste generated in kraft pulp mills: The transition from landfill to industrial applications [J]. Applied Sciences, 2020, 10(7): 2317.

[2] Ren B, Lv K, Min F F, et al. A new insight into the adsorption behavior of NPAM on kaolinite/water interface: Experimental and theoretical approach[J]. Fuel, 2021, 303: 121299.

[3] 惠泉, 刘福胜, 于丽明, 等. 阳离子聚丙烯酰胺合成工艺研究进展[J]. 化工生产与技术, 2007, 14(5):31-34.

[4] 孙玉龙, 聂颖恬, 杨磊, 等. 阳离子聚丙烯酰胺的合成与应用研究进展[J]. 安徽化工, 2016, 42(4):18-20.

[5] 马梁, 王佳慧, 韩露, 等. 聚丙烯酰胺的制备及研究现状[J]. 化工技术与开发, 2020, 49(11):39-42.

[6] Wang D B, Zheng Y Y, Deng Q, et al. Water-soluble synthetic polymers: their environmental emission relevant usage, transport and transformation, persistence, and toxicity [J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(16): 6387-6402.

[7] 闫君芝, 刘英, 马向荣, 等. 阳离子型聚丙烯酰胺的制备及应用 [J]. 甘肃科学学报, 2020, 32(6):46-49.

[8] 邓敏, 于立扬, 彭强. 超高分子量阳离子型聚丙烯酰胺合成及其絮凝性能研究[J]. 化学研究与应用, 2023, 35(3):654-661.

[9] Zhang Q, Wang Q C, Sun H, et al. Preparation and performances of a cationic modified polyacrylamide viscosity enhancer for water-based drilling fluids. Journal of Applied Polymer Science[J]. 2023, 140(12): e53644.

[10] 徐焱, 胡惠仁. AmPAM 纸张干强剂生产过程的温度控制[J]. 中国造纸, 2014, 33(12):19-24.

[11] Lourenço A F, Gamelas J A F, Sarmiento P, et al. A comprehensive study on nanocelluloses in papermaking: the influence of common additives on filler retention and paper strength [J]. Cellulose, 2020, 27(9): 5297-5309.

[12] Nguyen T H, Nguyen N T, Nguyen T T P, et al. Optimizing the conditions of cationic polyacrylamide inverse emulsion synthesis reaction to obtain high-molecular-weight polymers [J]. Polymers, 2022, 14(14): 2866.

[13] Zhang L F, Min F F, Chen J, et al. Study on flocculation performance and mechanism of cationic polyacrylamide on montmorillonite: Insights from experiments and molecular simulations[J]. Chemical Physics, 2024, 579: 112190.

[14] 郭光范, 曹孟菁, 张玉平. 枝化和疏水改性聚丙烯酰胺的合成及其性能[J]. 化学研究与应用, 2023, 35(7):1732-1738.

[15] Li X, Ju Y, Jia Y K, et al. Design of novel temperature-resistant and salt-tolerant acrylamide-based copolymers by aqueous dispersion polymerization[J]. Designed Monomers and Polymers, 2022, 25 (1): 220-230.

[16] 李昭滢, 杨旭, 杨杰, 等. 压裂液稠化剂两性聚丙烯酰胺的合成与性能评价[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(2):109-115.

[17] 刘建, 于建立, 吴文兵, 等. 超支化阳离子型聚丙烯酰胺絮凝剂的研制及应用[J]. 天津科技, 2023, 50(1):48-51.

[18] Yang Y C, Zhou K, Tian G P, et al. Feasibility of improving wastewater sludge dewaterability by combination of cationic polyacrylamide and synthetic fibers for resource utilization [J]. Separation and Purification Technology, 2023, 306: 122620.

[19] 刘洋, 陈兴锋, 周铜峰, 等. 氧气对 Unipol 聚丙烯工艺生产的影响及控制措施[J]. 化工技术与开发, 2023, 52(12):85-87.

[20] 王淑玲, 王明权, 谭颖, 等. 水分散型阳离子聚丙烯酰胺在造纸助留助滤体系中的应用[J]. 造纸化学品, 2015(2):32-34.

(责任编辑:张会巍)