

· 研究论文 ·

功能化二氧化硅基土壤抗水蚀材料的制备及性能

刘晓梅^{1†} 王伟强^{1†} 詹天军² 张振师³ 彭怀午³ 雷自强^{1*}

¹西北师范大学 生态功能高分子材料教育部重点实验室 甘肃省高分子材料重点实验室
化学化工学院 兰州 730070)

²甘肃民勤连古城国家级自然保护区管护中心 民勤 733300)

³中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司 西安 710065)

摘要: 用 3-氨基丙基三乙氧基硅烷 (APTES)、衣康酸、丙烯酸酐 (C₆H₆O₃)、1-乙基-(3-二甲氨基丙基)碳酰二亚胺 (EDC) 及 *N*-羟基丁二酰亚胺 (NHS) 对纳米二氧化硅 (SiO₂) 进行改性, 再以丙烯酸、丙烯酰胺为单体, 过硫酸铵 (APS) 为引发剂, 通过自由基聚合法制备了聚合物材料 P(mSiO₂-co-AA-co-AM)。利用傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR)、扫描电子显微镜 (SEM)、激光散射纳米粒度仪对其结构与形貌进行了表征。通过将 P(mSiO₂-co-AA-co-AM) 添加到黄土以及红土中, 分别考察了抗水蚀性能、抗压强度和保水性。结果表明, 当添加 0.50 wt% 的 P(mSiO₂-co-AA-co-AM) 后, 红土的抗冲刷时间提高了 24.9 倍, 水蚀率从 400 %/h 降低到了 16.00 %/h。抗压强度提高了 8.7 倍。在黄土中添加 0.5 wt% 该材料, 抗冲刷时间为 200 h, 是黄土抗冲刷时间的 2400 倍, 黄土的抗压强度提高了 13 倍, 保水率提高了 3.0 倍。室外燕麦种植实验结果表明, P(mSiO₂-co-AA-co-AM) 乳液不会对燕麦的发芽生长产生不利影响。

关键词: 水土保持; 聚合物材料; 纳米二氧化硅; 抗水蚀; 抗压强度

Preparation and Properties of Functionalized Silica-based Soil Water Erosion Resistant Materials

LIU Xiao-mei^{1†}, WANG Wei-qiang^{1†}, ZHAN Tian-jun², ZHANG Zhen-shi³, PENG Huai-wu³, LEI Zi-qiang^{1*}

¹Key Laboratory of Eco-Functional Polymer Materials, Ministry of Education, Key Laboratory of Polymer Materials of Gansu Province, College of Chemistry and Chemical Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070)

²Gansu Minqin Lian Gucheng National Nature Reserve Management and Protection Center, Minqin 733300)

³Northwest Engineering Company Limited, Power China, Xi'an 710065)

Abstract: Nano-silica (SiO₂) was modified using 3-aminopropyltriethoxysilane (APTES), itaconic acid, acrylic anhydride (C₆H₆O₃), 1-ethyl-(3-dimethylaminopropyl) carbodiimide (EDC), and *N*-hydroxysuccinimide (NHS). Subsequently, a P(mSiO₂-co-AA-co-AM) emulsion was prepared *via* free radical polymerization using acrylic acid and acrylamide as monomers and ammonium persulfate (APS) as the initiator. The structure and morphology of the emulsion were characterized using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM), and particle size analysis. The anti-water erosion performance, compressive strength, and water retention properties were evaluated by incorporating the P(mSiO₂-co-

2025-10-09 收稿, 2025-11-28 录用, 2026-01-12 网络出版

基金项目: 国家自然科学基金联合创新重点项目(项目号 U23A20582), 2023 年甘肃省高校产业支撑计划项目(项目号 2023CYZC-17), 2024 年高校科研创新平台重大培育项目(项目号 2024CXPT-10), 国家重点研发计划项目(项目号 2022YFB4202100), 西北勘测设计研究院有限公司重大科技项目(项目号 XBY-XNY-2023-02), 西北师范大学 2025 年度青年教师科研能力提升计划项目(项目号 NWNLU-LKQN2025-03)

[†] 共同第一作者

* 通信联系人: 雷自强, E-mail: leizq@nwnu.edu.cn

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2025.25.293

AA-co-AM) emulsion into loess and red soils. The results indicated that with the addition of 0.50 wt% P(mSiO₂-co-AA-co-AM) emulsion, the anti-scour time of red soil increased by 24.9 times, whereas the water erosion rate decreased from 400 %/h to 16.00 %/h. The compressive strength was enhanced by 8.7 times. For loess treated with 0.5% of the material, the anti-scour time reached 200 h, which is 2400 times longer than that of loess. The compressive strength of the loess increased by 13 times, and the water retention rate improved by 3.0 times. Outdoor oat cultivation experiments demonstrated that the P(mSiO₂-co-AA-co-AM) emulsion did not adversely affect oat germination and growth.

Keywords: Water and soil conservation; Polymer materials; Nano-silica; Water erosion resistance; Compressive strength

引用: 刘晓梅, 王伟强, 詹天军, 张振师, 彭怀午, 雷自强. 功能化二氧化硅基土壤抗水蚀材料的制备及性能. 高分子通报, 2026, 39(2), 270–279.

Citation: Liu, X. M.; Wang, W. Q.; Zhan, T. J.; Zhang, Z. S.; Peng, H. W.; Lei, Z. Q. Preparation and properties of functionalized silica-based soil water erosion resistant materials. *Polym. Bull.* (in Chinese), 2026, 39(2), 270–279.

土壤侵蚀引发的水土流失是当前生态系统面临的重大威胁。数据显示,全球约33%的耕地出现严重退化,土地荒漠化等问题日益显著^[1]。土壤侵蚀主要指土壤颗粒在水力、风力、冻融等外营力作用下的剥离、搬运与沉积过程^[2,3]。我国黄土高原地区以风蚀地貌和黄土地貌为特征^[4],该区域干旱少雨,降雨集中且时空分布不均^[5],加之黄土易被水流侵蚀,致使水土流失问题尤为突出。水土流失破坏土壤结构,导致肥力下降、板结加剧及耕地质量降低^[6],进而影响作物生长,威胁粮食安全。同时,大量泥沙进入河道,造成淤积和湖泊萎缩,加剧洪涝灾害风险^[7]。近年来,通过生物、工程和管理措施的综合治理,黄土高原水土流失状况有所缓解,但由于该地区地形复杂、自然环境恶劣,现有措施仍存在一定局限性,长远治理面临挑战。

化学治理措施作为治理土壤侵蚀造成水土流失问题的重点,合成有机高分子聚合物可以在水土流失治理中起到很好的效果。其中,合成有机高分子聚合物能有效促进土壤微颗粒间交联缠绕^[8],并通过其黏性在颗粒表面形成胶结结构^[9],提高抗侵蚀能力,改善土壤通气性与保水性,利于植物生长^[10]。纳米二氧化硅作为一种无机材料,具有粒径小、比表面积大等特点^[11,12],可通过物理吸附与化学键合作用强化土壤团聚体结构。其表面丰富的硅羟基活性高^[13],也为材料改性及功能化提供了可能。此外,二氧化硅纳米颗粒可填充土壤孔隙,与土壤颗粒通过物理缠结提高材料-土壤复合体的稳定性,其还可以和土壤进行

锚固,再加上与有机物聚合链可以形成交联网络,是消除土壤易水蚀的关键因素,可降低土壤水蚀率,同时提升保水性能。

基于上述研究背景,本研究通过功能化纳米二氧化硅与丙烯酸、丙烯酰胺共聚,制备了P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液,并对合成条件进行了优化。采用傅里叶变换红外光谱(FTIR)、扫描电子显微镜(SEM)和粒径分析等方法对其结构形貌进行表征。通过构建土壤抗水蚀模型,考察了该乳液材料的抗水蚀性能、抗压强度、保水性能以及其对燕麦种子发芽的影响。

1 实验部分

1.1 原料

二氧化硅(SiO₂, 30 nm)、过硫酸铵(APS, 分析纯),均购于上海麦克林生化科技有限公司;3-氨基丙基三乙氧基硅烷(APTES)、衣康酸、丙烯酸酐(C₆H₆O₃, 化学纯)、1-乙基-(3-二甲基氨基丙基)碳酰二亚胺(EDC, 分析纯)、N-羟基丁二酰亚胺(NHS, 分析纯),均购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司;丙烯酸(AA, 分析纯),购于天津市大茂化学试剂厂;丙烯酰胺(APS)、黄土、红土,购于甘肃兰州新区;蒸馏水,实验室自制。

1.2 功能性聚合物单体的合成

将4 g纳米二氧化硅颗粒加入100 mL的乙醇中,随后加入0.2 mL的APTES(其重量为二氧化硅重量的5%)。将上述体系超声搅拌30 min,接着在70 °C下磁力搅拌2 h。经离心干燥后,得到氨基化的二氧化硅。将1 g氨基化的二氧化硅、

0.7 g EDC和0.3 g NHS分散于50 mL的乙醇中,然后,将0.5 mL的衣康酸加入反应体系中,在室温下磁力搅拌72 h,反应结束后,进行离心处理,并用乙醇清洗3次,之后,在45 °C烘箱干燥24 h处理,得到功能化单体(mSiO₂)。

1.3 P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液的合成

取适量mSiO₂置于带有搅拌装置的25 mL四颈烧瓶中,然后加入60 mL蒸馏水作为溶剂。在70 °C的恒温条件下,机械搅拌40 min,然后加入一定量的引发剂APS,反应20 min后,降温至50 °C,缓慢加入40%中和度的丙烯酸(AA)和丙烯酰胺,升高温度至70 °C,在此温度下反应3 h,得到P(mSiO₂-co-AA-co-AM)。

1.4 土壤高分子抗水蚀试样模型的制备

称取黄土和红土各100 g,然后将其加入500 mL的烧杯中,将合成的高分子乳液(0.1 wt%、0.2 wt%、0.3 wt%、0.4 wt%、0.5 wt%)加入装有红土和黄土的烧杯中。在300 r/min转速下持续搅拌25 min,使得加入的高分子乳液可以与土壤完全混合均匀,然后压制成圆饼状置于室温环境下进行干燥,待其质量恒定时得到土壤高分子抗水蚀试样模型(直径5 cm,高度1.5 cm)。

1.5 P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液的性能

1.5.1 黏度测试

P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液的黏度测试条件为:室温环境下使用NDJ-1S型数字显示黏度计的1号转子在30 r/min转速下对P(mAl(OH)₃-co-AA)乳液的黏度进行测定。在玻璃表面皿中准确称取一定质量的P(mAl(OH)₃-co-AA)乳液,将其置于60 °C的烘箱中进行干燥,待玻璃表面皿中的样品质量恒定时得到乳液的固含量,由公式(1)计算乳液的固含量(NV):

$$NV = (m_2/m_1) \times 100\% \quad (1)$$

式中, m_1 和 m_2 分别为乳液的初始质量和恒重时的质量,单位g。

1.5.2 抗水蚀性能测试

在室温环境下,用组装的微喷头设备模拟降雨条件,进行P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液的抗水蚀性能测试,控制微喷头的出水量为25 mL/s。用带有坡度的钢槽来模拟自然条件下的坡面地形,钢槽的坡度为15°,底部到边缘的高度为10 cm,钢槽坡面下方设置塑料盒,收集被水流冲刷下来的土壤。在微型喷头下放置制备好的土壤高分子

抗水蚀试样模型进行抗水蚀性能测试。单位时间水蚀率(E_t)由公式(2)得到:

$$E_t = (m_e - m_f)/(m_e \times t) \times 100\% \quad (2)$$

式中, m_e 是试样模型干燥状态时质量, m_f 是试样模型被水冲刷 t 时刻的质量,单位g; t 为冲刷时间,单位h。

1.5.3 抗压性能测试

采用微机控制管式压力试验装置对制备好的试样模型进行抗压强度测试。测试标准为:当试样模型的四周开始出现裂缝,记录下对应的测定数值。

1.5.4 保水性能测试

称取50.0 g红土置于100 mL的烧杯中,将2.00 wt%的P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液稀释后加入烧杯中,待乳液完全浸湿红土后,在不同的温度环境下(室温、35、45和60 °C)进行12 h的保水测试,每间隔1 h记录1次数值。保水率(w_r)由公式(3)计算:

$$w_r = (m_a - m_b)/m_c \times 100\% \quad (3)$$

式中, m_c 为加入的乳液/水的质量, m_a 为样品初始质量, m_b 为 t 时刻样品的质量,单位g。

称取50.0 g红土置于100 mL的烧杯中,分别在烧杯中加入稀释后的乳液(0 wt%、0.25 wt%、0.50 wt%、0.75 wt%、1.00 wt%、1.25 wt%及1.50 wt%),待乳液完全浸湿红土后,进行12 h的保水性能测定,每隔1 h记录一次重量(50 °C条件下)。保水率由公式(3)计算。

1.5.5 燕麦种植实验

在4个塑料盒中各取6 kg的黄土,在距离土壤表面2 cm深度处种植燕麦,在4个种有燕麦的盒子中分别喷洒0 wt%、0.10 wt%、0.20 wt%、0.50 wt%的乳液稀释液,向每个盒中喷洒相同量的自来水,在自然环境下记录燕麦生长情况。

1.6 P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液的表征

将干燥后的P(mAl(OH)₃-co-AA)乳液粉碎并过筛以提取均匀的样品粉末,使用KBr压片法(样品与KBr质量比为1:100)制备测试试样,采用傅里叶变换红外光谱仪(型号FTS-3000,美国Digilab仪器公司,波数范围4000~400 cm⁻¹,扫描次数16次)对二氧化硅、改性二氧化硅、衣康酸和P(mSiO₂-co-AA-co-AM)的结构进行表征。采用扫描电子显微镜(SEM,型号ULTRApplus,德国蔡司仪器有限公司)对土壤以及土壤抗水蚀试样模型的微观结构进行表征。将样品干燥至恒重后研磨成粉末

状,用200目的筛子过筛后,采用激光散射纳米粒度仪(型号LA-960,日本Horiba Scientific)对样品进行粒径分布测试。

2 结果与讨论

2.1 合成条件对P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液黏度的影响

2.1.1 mSiO₂含量的影响

改性二氧化硅对P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液黏度的影响如图1(a)所示,由图可知,随着改性二氧化硅含量的增加,P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液的黏度呈现升高的趋势,当改性二氧化硅质量分数超过0.4%时,乳液黏度开始下降。当改性二氧化硅质量分数超过0.6%时,在质量分数0.6%~0.8%范围内,黏度又呈现上升趋势。当改性二氧化硅质量分数超过0.8%时,在质量分数0.8%~1.0%范围内,乳液黏度又开始下降。因此,当改性二氧化硅质量分数为0.4%时,P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液黏度最优。这可能归因于氨基化二氧化硅在酸性条件下,与丙烯酸的一COO⁻形成强静电相互作用,同时与丙烯酰胺的C=O形成氢键,这双重作用显著增强聚合物网络交联度,导致乳液黏度增加^[14,15]。然而,当含量过高会提高聚合物网络结构致密,降低乳液的黏度。

2.1.2 AA/AM的影响

AA/AM对P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液黏度的影响如图1(b)所示,在1/4~2/1范围内,随着AA/AM质量比例增加,P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液黏度呈现先升高后降低的趋势,当AA/AM比例超过2/1时,P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液黏度又呈现上升的趋势。这主要是因为丙烯酸(AA)的玻璃转化温度较高,为硬质单体^[16],当丙烯酸含量较低时,丙烯酸可以提高聚合物的内聚力^[14],可以使得聚合物乳液的黏度增加,但是,由于丙烯酸为硬质单体,随着其含量的持续增大,会提升聚合物的硬度,导致其黏度降低。因此,从实验结果来看,当AA/AM的比例为1:1时,P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液黏度最高。

2.1.3 APS含量的影响

APS含量对P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液黏度的影响如图1(c)所示,当APS质量分数在0.6%~0.8%范围内时,乳液黏度不断增加。在质量分数0.8%~1.0%范围内时,当加入反应的APS质量分

数大于0.8%时,引发剂含量的不断持续增加,乳液黏度随之降低。当APS质量分数大于1.0%时,聚合物乳液黏度呈现先升高后降低趋势。这是因为APS在整个反应体系中为引发剂,通过在反应过程中产生自由基来诱导反应的发生。当APS的含量较低时,在化学反应中产生的活性自由基非常少^[17],导致反应无法彻底完成,但是随着APS含量的增加,产生的初级自由基逐渐增多,初级自由基会引发聚合反应中共聚单体形成更多的单体活性自由基,从而导致反应速率加快^[18],从而使得乳液的黏度逐渐增加。但是当APS含量过高时,会产生过多的自由基,活性中心增多^[19],导致P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液黏度降低。

2.1.4 中和度的影响

中和度对P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液的影响如图1(d)所示,当AA中和度在10%~20%之间,随着中和度的增加,P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液黏度与中和度成正比例,P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液呈现上升趋势;当中和度在20%~30%时,在中和度不断增大的情况下,P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液黏度呈现先下降后升高的趋势。当中和度在30%~40%时,在中和度不断增大的情况下,P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液黏度呈现逐渐上升趋势。在中和度大于40%时,P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液黏度开始缓慢降低。这主要是因为随着中和度的增加,更多的丙烯酸单体(AA)转化为羧酸钠盐,合成的乳液中包含一COONa,由于一COONa更具有亲水性^[20],因此导致乳液黏度升高。但是当中和度过大时,反应过程中生成的过多的羧酸钠盐会促使低聚物的生成,导致乳液黏度降低。因此,合成乳液的最佳中和度为40%。

2.1.5 温度的影响

温度对P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液黏度的影响如图1(e)所示,在60~70℃,随着温度的持续升高,乳液的黏度呈现先上升趋势后降低的趋势,但是当温度超过70℃时,随着温度的升高,乳液的黏度呈现下降趋势。这主要是随着温度的升高导致分子热运动加剧,使得活性中心增多,增加了链引发和链增长的速率^[21]。但是达到70℃以上,自由基向链转移速率加快^[22],导致乳液的黏度降低,因此,合成乳液的最佳温度为70℃。

2.1.6 溶剂的体积的影响

溶剂的体积对P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液

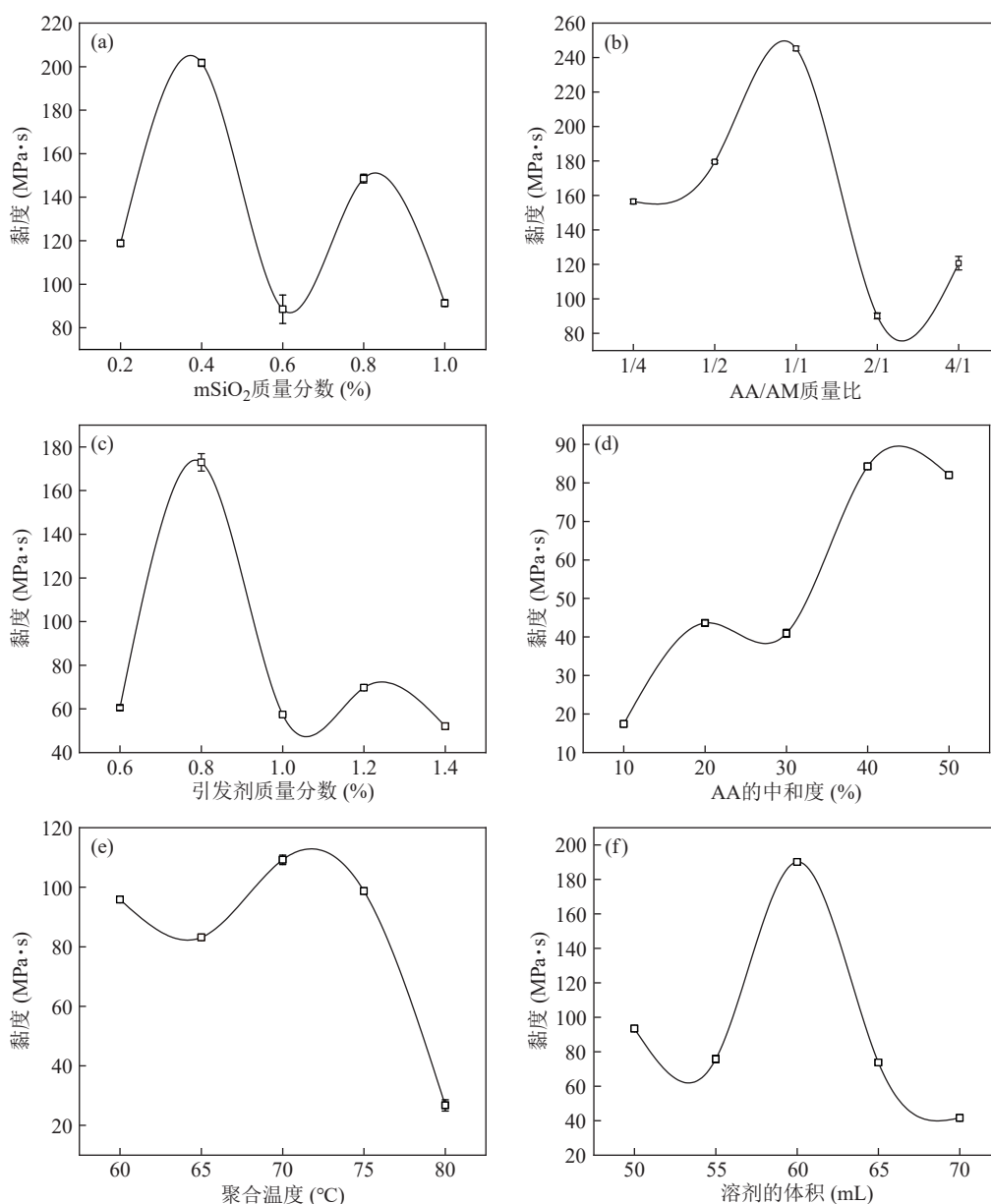


图1 合成条件对P(mSiO₂-co-AA-co-AM)黏度的影响:(a) mSiO₂含量;(b) AA/AM;(c) APS含量;(d)中和度;(e)聚合温度;(f)溶剂体积

Figure 1 The effect of synthesis conditions on viscosity of P(mSiO₂-co-AA-co-AM): mSiO₂ content (a), AA/AM content (b), APS content(c), ND of AA(d), polymerization temperature(e), total amount of water(f)

黏度的影响如图1(f)所示,当溶剂的体积在50~60 mL,随着溶剂体积的增加,乳液的黏度整体呈现先升高后降低的趋势。但是当溶剂体积超过60 mL时,P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液黏度呈现整体下降趋势,因此,合成乳液的最佳溶剂为60 mL。

2.2 P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液表征分析

2.2.1 FTIR分析

图2展示了SiO₂、mSiO₂、衣康酸、mSiO₂和衣康酸共聚物、AA、P(mSiO₂-co-AA-co-AM)的红外光谱图。在图2谱线a中,1112 cm⁻¹处的吸收峰

可归因于SiO₂中Si—OH的弯曲振动^[23];图2谱线b中,1365 cm⁻¹处的吸收峰为mSiO₂中C—H的弯曲振动^[24],2912 cm⁻¹处的吸收峰为一CH中C—H的伸缩振动^[24],3421 cm⁻¹处出现的一NH₂的不对称伸缩振动峰,表明硅烷偶联剂已成功与SiO₂发生反应^[25]。衣康酸的红外光谱(图2谱线c)中,1720 cm⁻¹对应衣康酸中羧基C=O的伸缩振动^[26]。改性氧化硅mSiO₂红外光谱(图2谱线d)中,1628 cm⁻¹对应不饱和双键C=C,这说明衣康酸已接枝到SiO₂表面。丙烯酸的红外光谱(图2

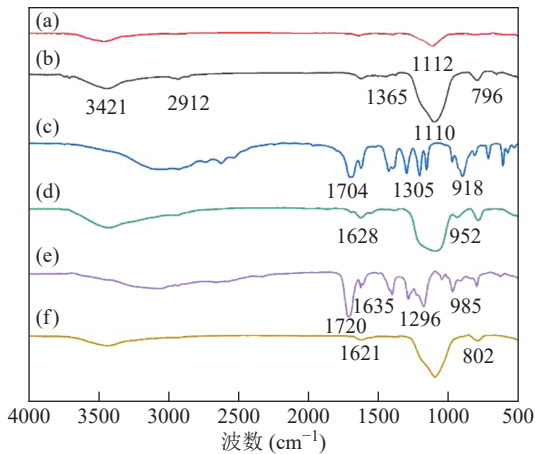


图2 (a) SiO_2 、(b) mSiO_2 、(c) 衣康酸、(d) mSiO_2 和衣康酸共聚物、(e) AA、(f) $\text{P}(\text{mSiO}_2\text{-co-AA-co-AM})$ 的FTIR图

Figure 2 FTIR spectra of SiO_2 (a), mSiO_2 (b), itaconic acid (c), mSiO_2 and itaconic acid copolymer (d), AA (e), $\text{P}(\text{mSiO}_2\text{-co-AA-co-AM})$ (f)

谱线e)中, 1720 cm^{-1} 处的吸收峰归属为羧基 $\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动, 而 1635 cm^{-1} 处的吸收峰则对应于分子中 $\text{C}=\text{C}$ 双键的伸缩振动^[27]。 $\text{P}(\text{mSiO}_2\text{-co-AA-co-AM})$ 的红外光谱(图2谱线f)中, $\text{C}=\text{C}$ 双键吸收峰消失, 表明乳液已成功合成。

2.2.2 SEM分析

图3(a)和图3(b)分别为改性前后 SiO_2 的SEM图。从图3(a)可以看出, SiO_2 的微观形貌呈现小球状, 分散性较差, 形成团聚体。改性后 SiO_2 的微观形貌变化(图3b)与改性前保持一致, 表明对二氧化硅的改性只是表面改性, 并未改变其微观结构。图4分别为红土、 $\text{P}(\text{mSiO}_2\text{-co-AA-co-AM})$ -红土、黄土、

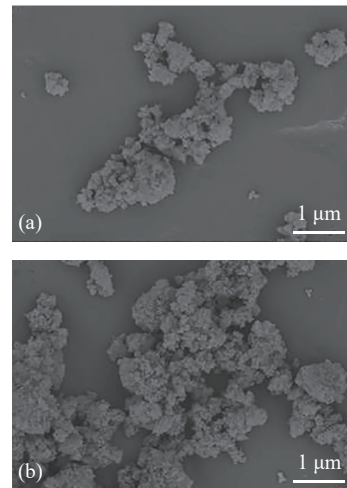


图3 改性前 SiO_2 (a) 和改性后 SiO_2 (b) 的SEM图

Figure 3 SEM images of unmodified SiO_2 (a) and modified mSiO_2 (b)

土和 $\text{P}(\text{mSiO}_2\text{-co-AA-co-AM})$ -黄土的SEM图。如图4(a)和图4(c)所示, 红土和黄土分布比较分散, 整体呈现片层状, 土壤颗粒之间的间隙比较大, 但是在添加了 $\text{P}(\text{mSiO}_2\text{-co-AA-co-AM})$ 乳液后, 土壤的微小颗粒被很好地团聚在一起, 形成较大的团聚体(图4b和图4d), 这主要得益于 $\text{P}(\text{mSiO}_2\text{-co-AA-co-AM})$ 乳液具有高分子链结构, 以及其末端具有亲水性的基团, 可以很好地与土壤表面结构发生化学反应, 将土壤之间的微小颗粒缠绕在一起, 形成大的团聚体以达到防治水土流失的作用。

2.2.3 粒径分析

图5为在红土和黄土中添加 $\text{P}(\text{mSiO}_2\text{-co-AA-co-AM})$ 后的粒径分布图。与纯红土和黄土的粒

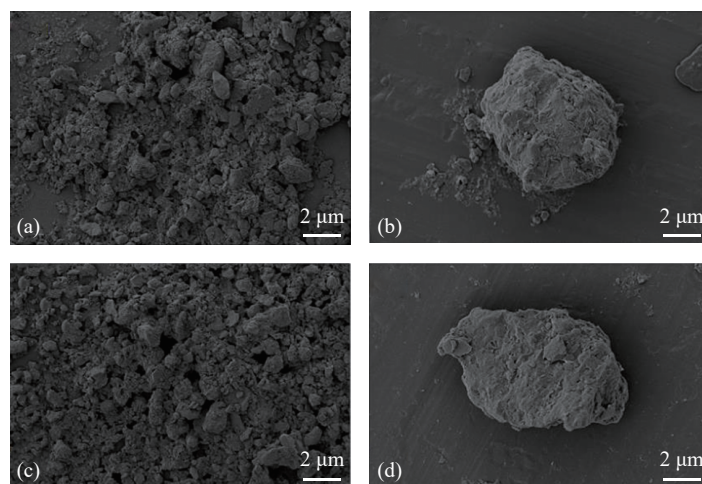


图4 红土(a)、 $\text{P}(\text{mSiO}_2\text{-co-AA-co-AM})$ -红土(b)、黄土(c)和 $\text{P}(\text{mSiO}_2\text{-co-AA-co-AM})$ -黄土(d)的SEM图

Figure 4 SEM images of laterite (a), $\text{P}(\text{mSiO}_2\text{-co-AA-co-AM})$ -laterite (b), loess (c) and $\text{P}(\text{mSiO}_2\text{-co-AA-co-AM})$ -loess (d)

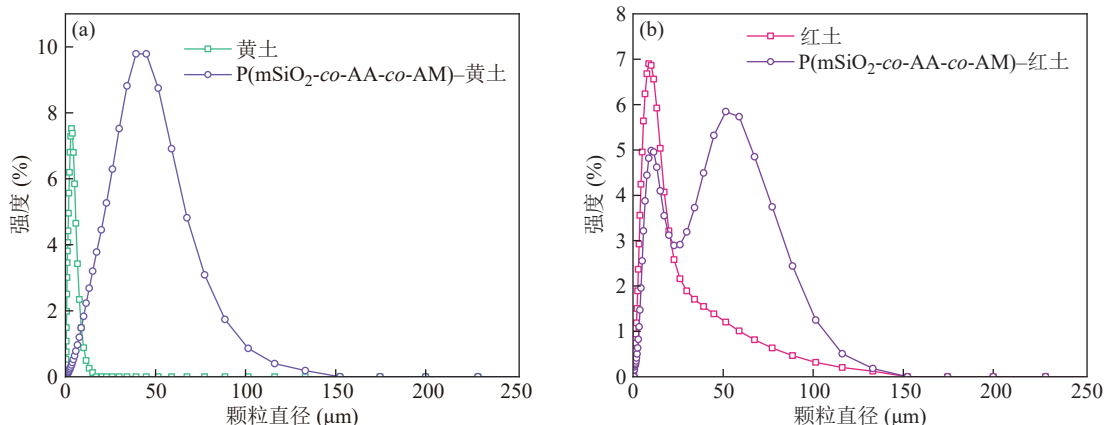


图5 粒径分布图: (a) P(mSiO₂-co-AA-co-AM)-黄土; (b) P(mSiO₂-co-AA-co-AM)-红土

Figure 5 Particle size distribution map: (a) P(mSiO₂-co-AA-co-AM)-loess, (b) P(mSiO₂-co-AA-co-AM)-laterite

径相比,添加P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液后,黄土的粒径从2.9 μm增加到34.5 μm,红土的粒径从13.1 μm增加27.8 μm。这是因为P(mSiO₂-co-AA-co-AM)中的金属氧化物可以起到很好的锚固作用,同时高分子长链可以将土壤微小颗粒缠绕、链接在一起,高分子链上的亲水基团也可以与土壤表面相互作用,促使土壤微小颗粒彼此之间形成较大的团聚体,使得土壤的平均粒径增大。

2.3 P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液性能

2.3.1 抗水蚀性能考察

图6为在黄土、红土中添加P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液后水蚀率的变化趋势图。如图6(a)所示,添加0 wt% P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液时,红土的抗冲刷时间仅为15 min,当添加0.50 wt%的P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液后,红土抗冲刷时间达到374 min,是未添加乳液的红土的24.9倍,水蚀率从400.0 %/h降低到了16.0 %/h。添加0 wt%

P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液时,黄土的抗冲刷时间仅为5 min,水蚀率为1200 %/h。当添加0.50 wt% P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液后,其抗冲刷时间为200 h,水蚀率下降到了0.01 %/h。对比图6(a)和图6(b)的结果可知,与添加P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液红土的抗冲刷时间相比较,P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液后,黄土的抗水蚀性能明显优于红土,这主要是因为红土具有一定程度的黏性,加之红土本身具有很好的吸水性,导致红土内部吸水过多造成坍塌。

2.3.2 抗压强性能考察

图7为P(mSiO₂-co-AA-co-AM)抗压强性能测试图。作为抗水蚀材料,抗压强度是衡量其性能的重要指标,因此,本实验中探究了在黄土和红土中添加不同量的P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液后土壤的抗压强度。如图7所示,红土的抗压强度为0.7 MPa,随着添加的P(mSiO₂-co-AA-co-

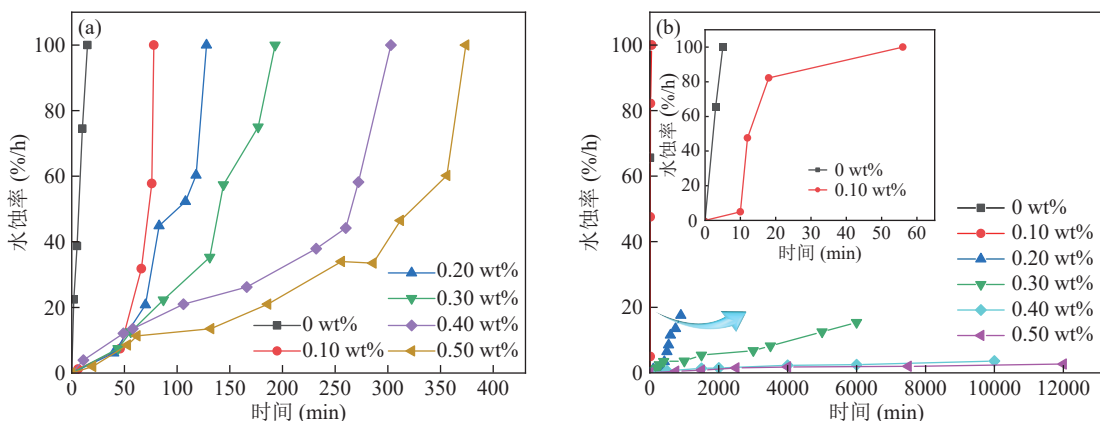


图6 P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液抗水蚀性能图: (a) P(mSiO₂-co-AA-co-AM)-红土; (b) P(mSiO₂-co-AA-co-AM)-黄土

Figure 6 Water corrosion resistance diagram of P(mSiO₂-co-AA-co-AM) emulsion: (a) P(mSiO₂-co-AA-co-AM)-laterite, (b) P(mSiO₂-co-AA-co-AM)-loess

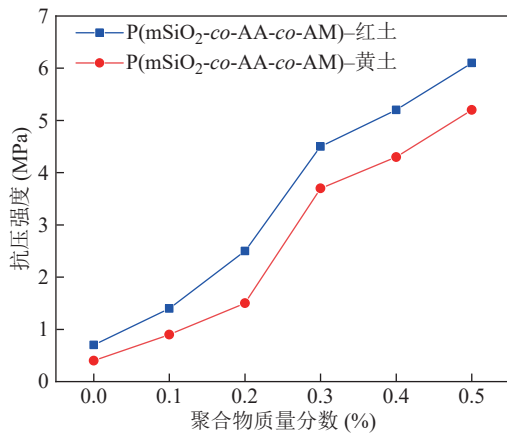


图7 P(mSiO₂-co-AA-co-AM) 抗压强性能测试

Figure 7 Compressive strength tests of the P(mSiO₂-co-AA-co-AM)

AM)乳液含量的升高,其抗压强度显著提高,当在红土中添加0.5 wt% P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液后,其抗压强度为6.1 MPa,抗压强度提高了8.7倍。黄土的抗压强度为0.4 MPa,当在黄土中添加0.5 wt% P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液后,其抗压强度为5.2 MPa,抗压强度提高了13倍。对比红土以及黄土的抗压强度测试结果来看,随着添加的P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液含量的增加,土壤的抗压强度显著提高,但是红土的抗压强度优于黄土的抗压强度。这主要是因为红土为黏土,可以和P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液可以更好地结合从而导致抗压强提升。

2.3.3 乳液保水性能考察

图8为P(mSiO₂-co-AA-co-AM)不同温度下的保水性能图。随着自然生态的恶化,植物生长面临着缺水问题。因此,作为抗水蚀材料应当具备减少水分蒸发、为植物生长提供更好的生长环

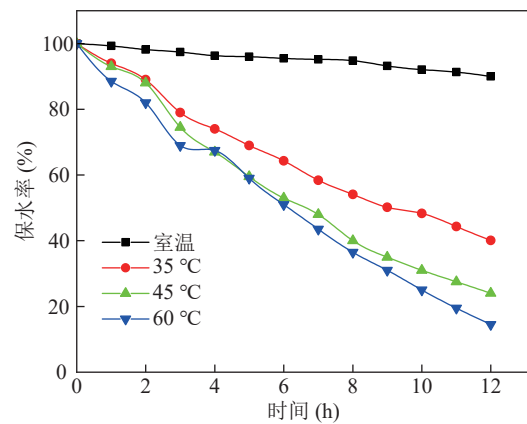


图8 P(mSiO₂-co-AA-co-AM) 不同温度下的保水性能

Figure 8 Water retention performance diagram of P(mSiO₂-co-AA-co-AM) at different temperatures

境的功能。如图8所示,为了探究在不同温度(室温、35、45、60 °C)下P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液保水性,在红土中添加2.0 wt% P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液后,土壤的保水性随着温度的升高呈现降低的趋势。整体来看,随着P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液添加量的不断增大,土壤的水分蒸发速率逐渐降低,在室温环境时,随着时间的延长,其保水率不断下降,但相比于在其他温度环境下,室温下的保水率下降趋势比较平缓,在12 h其保水率依然为90%,在35、45、60 °C环境下分别放置12 h后,其保水率分别为40%、24%和14.5%,说明该乳液的保水性能较好,可以在实际的环境治理中使用。

2.3.4 燕麦种植实验

图9为分别在黄土中喷洒不同含量的抗水蚀材料,初步观察了抗水蚀材料的实施对燕麦种子发芽情况的影响。从实验结果来看,将不同含量

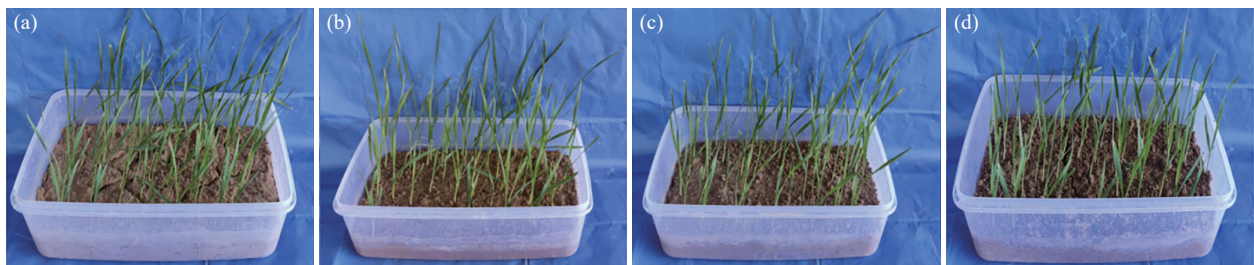


图9 种植30天发芽和生长情况:(a)无乳液(对照组);(b)添加0.10 wt%乳液实验组;(c)添加0.20 wt%乳液实验组;(d)添加0.50 wt%乳液实验组

Figure 9 Germination and growth after 30 days of planting: (a) no emulsion (control group); (b) experimental group supplemented with 0.10 wt% emulsion; (c) experimental group supplemented with 0.20 wt% emulsion; (d) experimental group supplemented with 0.50 wt% emulsion

的抗水蚀乳液P(mSiO₂-co-AA-co-AM)喷洒在含有燕麦种子的黄土中,燕麦种子均可发芽生长。随着乳液添加量的增加,种植燕麦的高度呈现上升趋势,当添加乳液质量分数为0.2%时,燕麦高度为29 cm,高于没有添加乳液时燕麦的生长高度26 cm。这说明通过实施制备的抗水蚀材料,对燕麦的生长不会造成明显不利影响,同时可以促进燕麦的生长,有望在水土流失治理中推广使用。

3 结论

通过自由基聚合构筑了P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液体系,系统考察其对土壤水蚀率的影响和保水性能。研究表明,该材料可以与土壤锚固、缠绕,并且提升土壤持水性能,消除土壤易水蚀的关键因素,提高其抗水蚀性能。其中,mSiO₂用量0.6 wt%、AA/AM质量配比1:1、APS用量1.0 wt%等为最优合成参数。通过在黄土中实施0.5 wt%的P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液后,抗冲刷时间200 h,是纯黄土抗冲刷时间的2400倍。在红土中添加0.5 wt%的P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液后,土壤抗冲刷时间为374 min,显著高于没有添加乳液时土壤的抗冲刷时间(15 min)。通过实施0.50 wt% P(mSiO₂-co-AA-co-AM)乳液后,黄土的抗压强度提升到了5.2 MPa,红土的抗压强度提升到了6.1 MPa。此外,通过燕麦种子种植实验结果表明,该乳液不会对燕麦的生长造成不利影响。因此,该乳液体系的构筑可为水土流失治理提供理论指导。

参考文献

- 李洁, 刘春芳. 气候变化下河西走廊生态系统健康时空变化及应对策略. 应用生态学报, 2025, 36(2), 537-546.
- 贾正雷. 土壤侵蚀机理与水土保持技术研究进展. 农业灾害研究, 2024, 14(8), 296-298.
- 雷自强. 土基材料及荒漠化防控. 北京: 科学出版社, 2020.
- 王埃平. 黄土高原生态修复与生态环境质量评价研究. 西安理工大学硕士学位论文, 2007.
- 杨波, 焦菊英, 马晓武, 赵文婷, 凌麒, 张昕晗, 王飞, 韩剑桥, 杜鹏飞, 丛佩娟, 刘政鸿, 陈昊, 戈文艳. 2022年黄土高原典型暴雨侵蚀及洪水灾害调查分析. 水土保持通报, 2022, 42(6), 1-13.
- 杨斌, 郭维红, 谭青媛, 陈浮, 刘希朝, 金贵. 高标准农田建设对耕地系统韧性的影响及其机制. 农业工程学报, 2025, 41(4), 269-278.
- 刘天山, 张耀南, 敏玉芳, 韩立欣, 康建芳, 张彩荷. 渭河干流甘肃段河岸线空间变化数据集(2008、2015、2022年). 中国科学数据, 2024, 9(1), 230-242.
- 付贵永, 肖杨, 史金权, 周航, 刘汉龙. 干湿循环下EICP联合黄原胶加固钙质粉土劣化特性试验研究. 岩土工程学报, 2024, 46(11), 2341-2351.
- Bagheri, P.; Gratchev, I.; Zolghadr, M.; Son, S.; Kim, J. M. Mitigation of soil erosion and enhancement of slope stability through the utilization of lignin biopolymer. *Polymers*, 2024, 16(9), 1300.
- Guo, G.; Kong, Y.; Xu, Y. Y.; Peng, X. Y.; Niu, M. T.; Zeng, G. R.; Ouyang, Z.; Liu, J.; Zhang, C.; Lin, J. Soil organic matter components and sesquioxides integrally regulate aggregate stability and size distribution under erosion and deposition conditions in Southern China. *J. Hydrol.*, 2024, 639, 131588.
- Mittal, H.; Mishra, S. B.; Mishra, A. K.; Kaith, B. S.; Jindal, R.; Kalia, S. Preparation of poly(acrylamide-co-acrylic acid)-grafted gum and its flocculation and biodegradation studies. *Carbohydr. Polym.*, 2013, 98(1), 397-404.
- 夏修建, 于永金, 齐奉忠, 李长坤, 徐璞, 刘慧婷. 固井用纳米材料及纳米复合材料研究进展. 油田化学, 2024, 41(4), 725-737.
- 魏庆渤. 纳米二氧化硅改性聚氯乙烯的研究. 河南大学硕士学位论文, 2019.
- Irmukhametova, G. S.; Fraser, B. J.; Keddie, J. L.; Mun, G. A.; Khutoryanskiy, V. V. Hydrogen-bonding-driven self-assembly of PEGylated organosilica nanoparticles with poly(acrylic acid) in aqueous solutions and in layer-by-layer deposition at solid surfaces. *Langmuir*, 2012, 28(1), 299-306.
- Naghavi, F.; Morsali, A.; Bozorgmehr, M. R. Molecular mechanism study of surface functionalization of silica nanoparticle as an anticancer drug nanocarrier in aqueous solution. *J. Mol. Liq.*, 2019, 282, 392-400.
- Baek, S. S.; Jang, S. H.; Hwang, S. H. Sustainable isosorbide-based transparent pressure-sensitive adhesives for optically clear adhesive and their adhesion performance. *Polym. Int.*, 2017, 66(12), 1834-1840.
- 杨凤红. 多功能高分子抗水蚀材料的制备及其性能. 西北师范大学硕士学位论文, 2023.
- 赵亚奇, 王佳慧, 李佳慧, 苏文聚. 少水/DMSO反应体系制备聚丙烯腈动力学研究. 化工新型材料, 2024, 52(11), 177-181.
- 郭朝阳. 紫外光引发水溶液聚合制备超高分子量阴离子聚丙烯酰胺. 中北大学硕士学位论文, 2024.
- Khanlari, S.; Dubé, M. A. Effect of pH on poly(acrylic acid) solution polymerization. *J. Macromol. Sci. Part A*, 2015, 52(8), 587-592.

- 21 李强. 聚合反应速率的影响因素. *中国氯碱*, **2023**(11), 15–18.
- 22 邓正东. 环氧型丙烯酸酯橡胶高温溶液聚合与本体聚合反应特性. 浙江大学硕士学位论文, **2023**.
- 23 Purcar, V.; Cinteza, O.; Donescu, D.; Bala, D.; Ghiurea, M.; Petcu, C.; Caprarescu, S. Surface modification of silica particles assisted by CO₂. *J. Supercrit. Fluids*, **2014**, 87, 34–39.
- 24 Karnati, S. R.; Oldham, D.; Fini, E. H.; Zhang, L. F. Application of surface-modified silica nanoparticles with dual silane coupling agents in bitumen for performance enhancement. *Constr. Build. Mater.*, **2020**, 244, 118324.
- 25 Hu, Y. J.; Zhang, J.; Huo, H.; Wang, Z.; Xu, X. Z.; Yang, Y. L.; Lin, K. F.; Fan, R. Q. One-pot synthesis of bimetallic metal–organic frameworks (MOFs) as acid–base bifunctional catalysts for tandem reaction. *Catal. Sci. Technol.*, **2020**, 10(2), 315–322.
- 26 Soto, D.; Urdaneta, J.; Pernia, K.; León, O.; Muñoz-Bonilla, A.; Fernández-García, M. Itaconic acid grafted starch hydrogels as metal remover: Capacity, selectivity and adsorption kinetics. *J. Polym. Environ.*, **2016**, 24(4), 343–355.
- 27 杨浩. 纳米SiO₂聚丙烯酰胺钻井液絮凝剂的制备及性能评价. 长江大学硕士学位论文, **2023**.