

文章编号:1674-2869(2019)04-0360-06

# 插层麦饭石复合高吸水树脂的合成及表征

胡茜,余训民\*

武汉工程大学化学与环境工程学院,湖北 武汉 430205

**摘要:**以麦饭石(MDS)、丙烯酸(AA)、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)和羧甲基纤维素(CMC)为原料,采用微波辐射法制备(AA-AMPS-CMC)/MDS高吸水树脂。通过X射线衍射、傅里叶红外光谱、扫描电子显微镜等方法对树脂的结构和形貌进行了表征,并探讨了麦饭石、引发剂、交联剂的质量分数、单体配比、中和度、微波功率对吸水倍率的影响。结果表明:麦饭石和有机单体之间发生了插层复合反应形成高吸水树脂;在最佳合成条件下,树脂在去离子水和生理盐水中的吸水倍率分别为1 169 g/g和80 g/g,与未加入MDS的树脂相比,吸水倍率分别提高了73%和46%,这表明在体系中适量引入MDS显著提高了树脂的吸水性能;另外在较高温度下,树脂也显示出了良好的保水性能。

**关键词:**微波辐射;复合高吸水树脂;麦饭石;羧甲基纤维素;2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸

**中图分类号:**TQ325.7 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2019.04.011

## Superabsorbent Resin Synthesized with Intercalated Medicinal Stone and Its Characterizations

HU Xi, YU Xunmin\*

School of Chemical and Environmental Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

**Abstract:** Superabsorbent resins were prepared under microwave irradiation with aqueous mixtures of medicinal stone (MDS), acroleic acid, 2-acrylamido-2-methylpropanesulfo-nic acid, and carboxymethyl cellulose. The structure and morphology of the resin were characterized by X-ray diffraction, Fourier infrared spectroscopy and scanning electron microscopy. The effects of the mass fraction of medicinal stone, initiator and crosslinking agent, monomer ratio, neutralization degree and microwave power on water absorption were also investigated. The results show that the superabsorbent resin is prepared via intercalation reaction of medicinal stone with organic monomers. Under the optimized conditions, the water absorption capacity of superabsorbent resin is 1 169 g/g in the deionized water and 80 g/g in normal saline. Compared with the resin without MDS, the water absorption increases by 73% and 46%, respectively, indicating that the appropriate amount of MDS could significantly improve the water absorption of the resin. In addition, the resin also shows good water retention performance at higher temperatures.

**Keywords:** microwave irradiation; superabsorbent resin; medicinal stone; acidcarboxymethyl cellulose; 2-acrylamido-2-methylpropanesulfo-nic acid

高吸水树脂(superabsorbent resin, SAR)是一种具有三维网络结构的功能型高分子材料,已广泛应用于医疗卫生、农林园艺、土木建筑、石油化

工、环境保护等各个领域<sup>[1-5]</sup>。近年来,多种单体被用于高吸水性材料的生产,大多数商业产品均以聚丙烯酸酯为基础<sup>[6]</sup>,而该类树脂普遍存在凝胶强

收稿日期:2019-01-03

基金项目:国家自然科学基金(51203127)

作者简介:胡茜,硕士研究生。E-mail:291310121@qq.com

\*通讯作者:余训民,教授。E-mail:1184292710@qq.com

引文格式:胡茜,余训民.插层麦饭石复合高吸水树脂的合成及表征[J].武汉工程大学学报,2019,41(4):360-365.

度低、耐盐性差、难降解和生产成本高等问题<sup>[7]</sup>。

为解决上述问题,将无机矿物引入到聚合物基体中来改善SAR的综合性能及降低生产成本<sup>[8-9]</sup>。目前常见的用于制备SAR的无机矿物包括海高岭土<sup>[10]</sup>、海泡石<sup>[11]</sup>、蒙脱土<sup>[12]</sup>和凹凸棒<sup>[13]</sup>等。除了以上提到的黏土矿物以外,孙宾宾等<sup>[14]</sup>提出了用麦饭石(medicinal stone, MDS)复合合成SAR。MDS在我国资源丰富,是一种含硅氧链的镁铝硅酸盐黏土矿物,内部结构具有独特的蜂窝状孔洞结构,内单位表面积非常大,表现出良好的溶出性、矿化性、生物活性和吸附性等<sup>[15-17]</sup>。MDS在医疗、食品、环境和农林业等领域应用广泛,而在制备复合材料方面的研究鲜有报道。羧甲基纤维素(carboxymethyl cellulose, CMC)可作为制备环保吸水材料的基质,具有可溶性、无毒、环境友好、可生物降解、抗盐性强、易得等优点<sup>[18]</sup>,近年来也成为SAR的研究热点。

本研究采用微波辐射法,利用MDS独特的结构,在MDS晶层中插入丙烯酸(acroleic acid, AA)、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(2-acrylamido-2-methylpropanesulfo-nic acid, AMPS)和CMC制备出(AA-AMPS-CMC)/MDS插层型复合SAR。探讨了适宜的合成条件,以及在较高温度下树脂的保水性能,并用X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)仪、傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectrum, FT-IR)仪和扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)对树脂的结构进行了表征。

## 1 实验部分

### 1.1 主要试剂与仪器

AA、CMC、氢氧化钠(分析纯,国药集团); AMPS(分析纯,上海麦克林生化科技有限公司); *N,N'*-亚甲基双丙烯酰胺(*N,N'*-methylene-bis-acrylamide, NMBA)(分析纯,天津大茂化学试剂厂); 过硫酸钾(postassium persulfate, KPS)(分析纯,北联精细化学品); 无水乙醇(分析纯,北联精细化学品); MDS粉(石家庄灿烂矿产品贸易有限公司)。

微波反应器(WBFY-201型,郑州卓成仪器科技有限公司); XRD仪(D8-Advance,德国Bruker公司); FT-IR仪(Nicolet-6700型,美国赛默飞世尔科技公司); SEM(JSM-5510LV型,日本电子)。

### 1.2 (AA-AMPS-CMC)/MDS树脂的制备

准确称取一定量的AMPS、CMC和MDS于250 mL圆底烧瓶中,加入计量去离子水搅拌至其溶解。在冰水浴的条件下,用质量分数为20%的

NaOH中和AA并将其移入烧瓶中,再向其中加入适量的引发剂KPS和交联剂NMBA,充分搅拌混合均匀,把单口烧瓶快速放入具有冷凝装置的微波反应器中,开启反应器,设置反应功率,反应60 s后得无色透明胶体,将无色透明胶体置于真空干燥烘箱中于80 ℃烘干至恒重,粉碎后收集0.15~0.25 mm粒径下的产物,即得复合型(AA-AMPS-CMC)/MDS树脂。

### 1.3 性能测定及表征

1.3.1 树脂吸水倍率的测定 取一定质量( $m_1$ )干燥树脂,加入去离子水或质量分数为0.9%的NaCl溶液在室温下浸泡,使树脂达到吸附平衡后用滤布过滤,过滤后准确称量凝胶质量( $m_2$ )。树脂的吸水倍率按式(1)进行计算。

$$\eta_{WA}=(m_2-m_1)/m_1 \tag{1}$$

1.3.2 树脂的保水率测定 将吸附饱和的树脂样品敞口放置于30、60、90 ℃的恒温烘箱中,一定时间间隔后取出准确称量样品的质量( $m_3$ ),保水率按式(2)进行计算。

$$\eta_{WR}=m_3/m_2\times 100 \tag{2}$$

1.3.3 树脂的结构表征 使用XRD仪对树脂晶体结构进行表征。采用FT-IR仪分析树脂结构,样品采用KBr压片,扫描范围500~4 000  $\text{cm}^{-1}$ 。采用SEM对树脂的表面形态进行分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 XRD表征

图1为MDS和(AA-AMPS-CMC)/MDS的XRD图。由图1可知,MDS在衍射角 $2\theta$ 为26.6°和27.9°附近出现特征峰值;(AA-AMPS-CMC)/MDS在衍射角 $2\theta$ 为26.5°出现了特征峰值,对比MDS的XRD图中的特征峰,整体发生了左移,由26.6°和27.9°减小为26.5°。根据Bragg衍射方程 $2d\sin\theta=n\lambda$ (其中 $d$ 为麦饭石的晶面间距, $\theta$ 为入射角, $\lambda$ 为入射X射线的波长, $n$ 为衍射级数),可以计算出层间距由0.319 nm增大到0.336 nm,这说明有机单体插层入MDS层间,增大了MDS的层间距,形成插层型复合SAR<sup>[19-21]</sup>。

### 2.2 FT-IR表征

图2为AA、MDS、AMPS、CMC和(AA-AMPS-CMC)/MDS的FT-IR图。由图2可知,AA在1 704  $\text{cm}^{-1}$ 处为羧酸根的C=O的伸缩振动峰,1 243  $\text{cm}^{-1}$ 为C—O的伸缩振动峰,1 635  $\text{cm}^{-1}$ 为烯基C=C伸缩振动峰,1 434  $\text{cm}^{-1}$ 为C—H弯曲振动峰;MDS在3 446  $\text{cm}^{-1}$ 处为Si—OH氢键弯曲震动峰,1 035  $\text{cm}^{-1}$

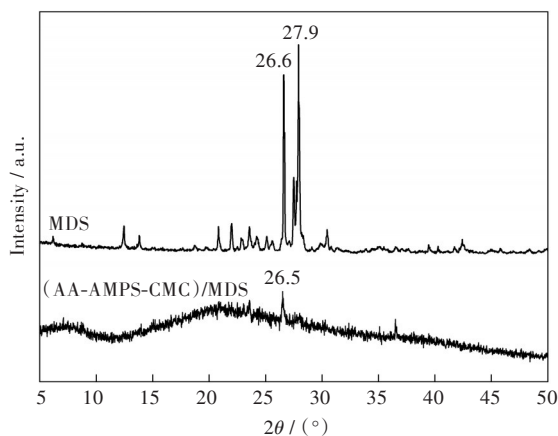


图1 MDS和(AA-AMPS-CMC)/MDS的XRD图

Fig. 1 XRD patterns of MDS and (AA-AMPS-CMC)/MDS

为Si—O—Si面内伸缩振动吸收峰,761  $\text{cm}^{-1}$ 处为Al—O面外弯曲振动吸收峰;AMPS在1 668  $\text{cm}^{-1}$ 处为C=O键反对称和对称伸缩振动,1 554  $\text{cm}^{-1}$ 处为酰胺基的N—H弯曲振动吸收峰,1 417  $\text{cm}^{-1}$ 处为C—H变形振动吸收峰,1 371  $\text{cm}^{-1}$ 处为C—N伸缩振动峰,1 245,1 081  $\text{cm}^{-1}$ 处为磺酸基中S=O键的对称和非对称伸缩振动,626  $\text{cm}^{-1}$ 处为C—S伸缩

振动峰;CMC在3 446  $\text{cm}^{-1}$ 处为O—H的伸缩振动吸收峰,2 921  $\text{cm}^{-1}$ 处为C—H键的伸缩振动吸收峰,在1 631,1 425  $\text{cm}^{-1}$ 处为C=O键的反对称和对称伸缩振动,1 328,1 066  $\text{cm}^{-1}$ 处为C—O—C键的伸缩振动和非伸缩振动吸收峰;(AA-AMPS-CMC)/MDS树脂在3 446  $\text{cm}^{-1}$ 处为O—H的伸缩振动吸收峰,2 937  $\text{cm}^{-1}$ 处为—CH<sub>2</sub>伸缩振动吸收峰,1 722,1 407  $\text{cm}^{-1}$ 处分别为—COOH中的C=O反对称伸缩振动峰和对称伸缩振动峰,1 623,1 454  $\text{cm}^{-1}$ 处分别为酰胺基中的C=O反对称伸缩振动峰和对称伸缩振动峰,1 187  $\text{cm}^{-1}$ 处为CMC中—C—O—C—伸缩振动峰,1 047,804  $\text{cm}^{-1}$ 处分别为Si—O、Al—O的伸缩振动峰。在聚合树脂曲线中包括了AA、AMPS、CMC的官能团特征吸收峰,且MDS在聚合树脂曲线上的3 446,1 035,761  $\text{cm}^{-1}$ 处吸收的O—H、Si—O—Si、和Al—O伸缩振动峰都有明显的减弱,表明MDS与AA、AMPS、CMC发生了共聚反应。

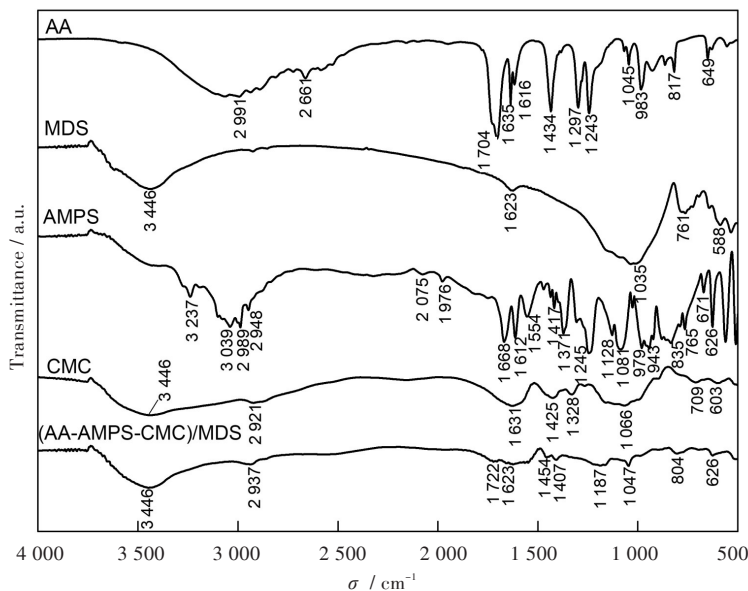


图2 AA、MDS、AMPS、CMC和(AA-AMPS-CMC)/MDS的FT-IR图

Fig. 2 FT-IR spectra of AA, MDS, AMPS, CMC and (AA-AMPS-CMC)/MDS

### 2.3 SEM表征

图3为MDS和(AA-AMPS-CMC)/MDS的SEM图。从图3(a)中可以看出MDS呈片层状结构,表面相对光滑,孔洞结构分布在层间,当有机单体插层到MDS层间时,形成树脂的表面形态如图3(b)所示,树脂表面粗糙程度明显增加,且布满了孔洞和层状空隙。结合XRD表征进一步说明有机单体插层进入MDS,改变了原本的层间距,树脂表面的孔洞结构数量增多且分布更加均匀,该结构增大

了表面积,有利于水进入树脂颗粒内部,从而提高SAR的吸水倍率。

### 2.4 合成条件对(AA-AMPS-CMC)/MDS树脂吸水倍率的影响

2.4.1 MDS的质量分数对树脂吸水倍率的影响 在固定 $m(\text{AA}):m(\text{AMPS}):m(\text{CMC})=10:2:0.3$ ,AA中和度( $N$ )为60%, $w(\text{KPS})=0.5\%$ (均以AA的质量为基准,下同), $w(\text{NMBA})=0.1\%$ ,微波功率( $P$ )为195 W,辐射时间( $t$ )为60 s,研究MDS质量分数对

树脂吸水性能的影响,实验结果见图4(a)。由图4(a)可知,在其它条件恒定时,随着MDS质量分数的增加,树脂的吸水倍率呈先增加后减小的趋势,在MDS质量分数为3%(相对于AA的质量分数,以下各参数同)时达到最大值。这是因为MDS内部的层状孔洞结构为有机单体提供了插入点

位。在MDS的质量分数较小时,MDS上的羟基官能团可与有机单体之间通过氢键形成物理交联点,使树脂网络密度增加,因而树脂的吸水倍率随着MDS的增加而增大。但当MDS的质量分数超过3%之后,大量的MDS参与聚合反应,使得树脂的交联密度增大,树脂中的可电离亲水性基团含

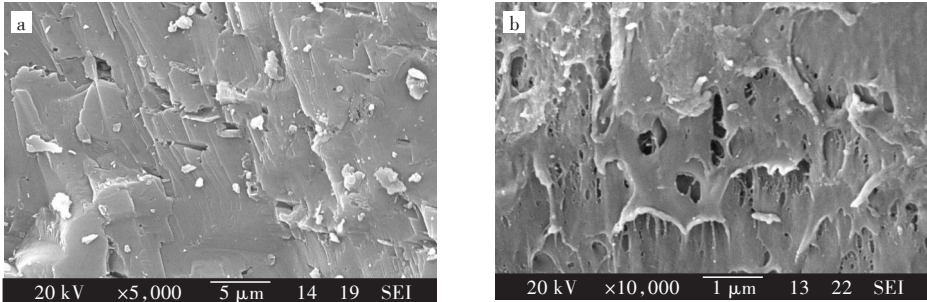


图3 SEM图:(a)MDS,(b)(AA-AMPS-CMC)/MDS

Fig. 3 SEM images:(a)MDS,(b)(AA-AMPS-CMC)/MDS

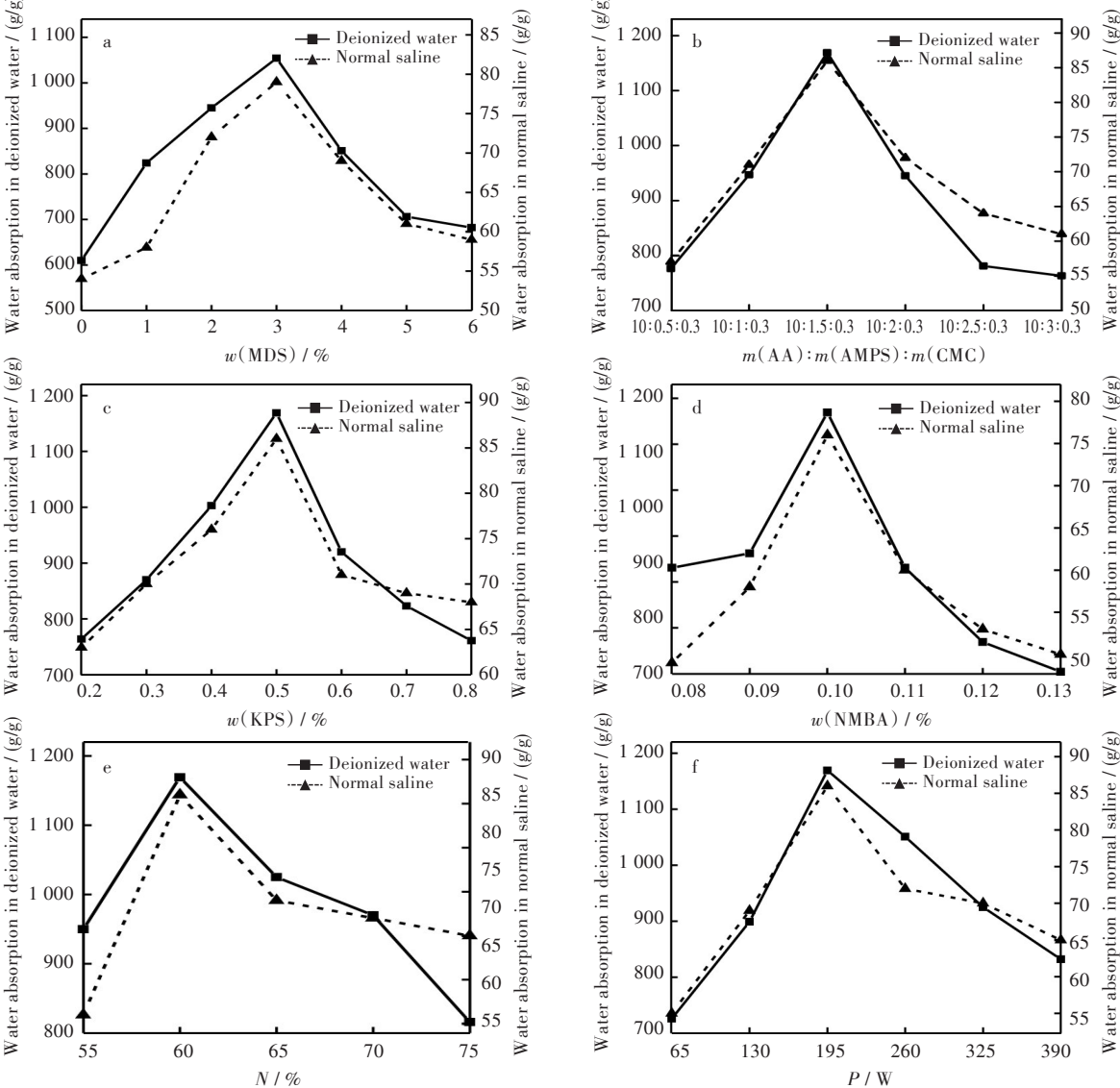


图4 影响(AA-AMPS-CMC)/MDS吸水倍率的因素:(a)MDS质量分数,(b)单体质量比,(c)引发剂KPS质量分数,(d)交联剂NMBA质量分数,(e)中和度,(f)微波功率

Fig. 4 Influencing factors of the water absorption ratio of (AA-AMPS-CMC)/MDS:(a) mass fraction of MDS, (b) monomer mass ratio, (c) mass fraction of initiator KPS, (d) mass fraction of crosslinker NMBA, (e) neutralization degree, (f) microwave power



量降低,网络内外的渗透压差值减小,树脂的吸水倍率不断下降。由图4(a)还可知,MDS质量分数为3%的树脂与未添加MDS的树脂相比,在吸去离子水和吸生理盐水倍率上分别提高了73%和46%。这说明MDS的加入显著提高了树脂的吸水倍率。

**2.4.2 单体质量比对树脂吸水倍率的影响** 固定 $N=60\%$ , $w(\text{MDS})=3\%$ , $w(\text{KPS})=0.5\%$ , $w(\text{NMBA})=0.1\%$ , $P=195\text{ W}$ , $t=60\text{ s}$ ,研究单体质量比对树脂吸水性能的影响,实验结果见图4(b)。由图4(b)可知,在其它条件恒定时,随着AMPS用量的增加,树脂吸水倍率呈先增长后减少的趋势,在 $m(\text{AA}):m(\text{AMPS}):m(\text{CMC})=10:1.5:0.3$ 时达到最大值。这是因为AMPS分子链上含有亲水性好的磺酸根基团,随着AMPS用量的增加,树脂网络中的磺酸根基团含量会增加,使得高分子链上的电荷密度也增大,静电斥力增加,吸水倍率逐渐增大。但当反应体系中AMPS含量过高时,产生的自由基数量增多,使得树脂交联密度过大,在树脂溶胀过程中可以容纳水分子的空间也会随之减小,最终导致吸水倍率降低。

**2.4.3 引发剂KPS质量分数对树脂吸水倍率的影响** 固定 $m(\text{AA}):m(\text{AMPS}):m(\text{CMC})=10:1.5:0.3$ , $N=60\%$ , $w(\text{MDS})=3\%$ , $w(\text{NMBA})=0.1\%$ , $P=195\text{ W}$ , $t=60\text{ s}$ ,研究引发剂质量分数对树脂吸水性能的影响,实验结果见图4(c)。由图4(c)可知,在其它条件恒定时,随着KPS质量分数的增长,树脂吸水倍率呈先增长后减少的趋势,在KPS质量分数为0.5%时达到最大值。这是因为在KPS质量分数较小时,反应体系中产生的自由基较少,引发的单体共聚速率慢,交联度低,则树脂的吸水倍率较小。但当KPS质量分数过大时,反应体系中产生大量的自由基使树脂网络的交联密度过大,伴随着链反应的终止,树脂的吸水倍率减小。

**2.4.4 交联剂NMBA质量分数对树脂吸水倍率的影响** 固定 $m(\text{AA}):m(\text{AMPS}):m(\text{CMC})=10:1.5:0.3$ , $N=60\%$ , $w(\text{MDS})=3\%$ , $w(\text{KPS})=0.5\%$ , $P=195\text{ W}$ , $t=60\text{ s}$ ,研究交联剂质量分数对树脂吸水性能的影响,实验结果见图4(d)。由图4(d)可知,在其它条件恒定时,随着NMBA质量分数的增长,树脂吸水倍率呈先增长后减少的趋势,在NMBA质量分数为0.1%时达到最大值。这是因为交联剂与树脂网络的交联密度有密切的关系。当NMBA质量分数较小时,产生的交联点位少,使得树脂的交联密度较小,形成的三维网络结构不够理想,导致吸水倍率较低。而当NMBA质量分数超过0.1%时,形成

了高度交联的刚性结构,无法膨胀以保持大量的水分,导致吸水倍率降低<sup>[22]</sup>。

**2.4.5 中和度对树脂吸水倍率的影响** 固定 $m(\text{AA}):m(\text{AMPS}):m(\text{CMC})=10:1.5:0.3$ , $w(\text{MDS})=3\%$ , $w(\text{KPS})=0.5\%$ , $w(\text{NMBA})=0.1\%$ , $P=195\text{ W}$ , $t=60\text{ s}$ ,研究中和度对树脂吸水性能的影响,实验结果见图4(e)。由图4(e)可知,在其它条件恒定时,随着中和度的增加,树脂在去离子水和生理盐水中的吸水倍率均呈现先增大后减小的趋势,中和度在60%左右达到最大值。这是因为AA中和度的改变直接影响树脂中 $-\text{COOH}$ 与 $-\text{COONa}$ 的比例。在中和度过低时,溶液中 $-\text{COOH}$ 含量较高,聚合速率较快,且溶液酸性较强易引发AA的自聚,使树脂内部形成高度交联的网络结构,导致树脂的吸水倍率降低。当中和度过高时, $-\text{COOH}$ 含量过少,树脂的交联度过低,而溶液中 $\text{Na}^+$ 离子浓度相对较高,使得树脂的水溶性较高,吸水倍率降低。

**2.4.6 微波功率对树脂吸水倍率的影响** 固定 $m(\text{AA}):m(\text{AMPS}):m(\text{CMC})=10:1.5:0.3$ , $N=60\%$ , $w(\text{MDS})=3\%$ , $w(\text{KPS})=0.5\%$ , $w(\text{NMBA})=0.1\%$ ,研究微波功率对树脂吸水性能的影响,实验结果见图4(f)。由图4(f)可知,在其它条件恒定时,随着微波功率的增加,树脂在去离子水和生理盐水中的吸水倍率均呈现先增大后减小的趋势,在微波功率195 W时达到最大值。这是因为在微波功率较低时,反应速率慢,产生的自由基较少,交联度差,吸水倍率低。而当微波功率过高时,不断增多的自由基在过高的微波辐射能量下产生暴聚,反应体系中会出现局部能量过高、产物变硬的情况,使吸水倍率降低。

## 2.5 (AA-AMPS-CMC)/MDS树脂的保水性能

图5是(AA-AMPS-CMC)/MDS树脂在30,60和90℃下在去离子水中达到饱和后的保水率和时间关系曲线。由图5可知,4 h后凝胶的保水率分别为97.48%、78.72%和51.08%。这说明一方面树脂的保水性能随着环境温度的升高逐渐降低,另一方面该树脂在较高温度下也表现出了良好的保水性能。这是因为水分子固定在聚合物的三维网状结构内,在较低温度时,体系提供的热能不够,则水分子热运动强度较低,内部水分不易挥发,所以在较低温度时凝胶的保水性能保持在一个较高的水平。但随着温度的升高,水分子的内能逐渐提升,热运动强度随之增大,水分子越容易挣脱网状结构的束缚,所以表现出凝胶在90℃条件下的保水性能较60℃和30℃时的低。

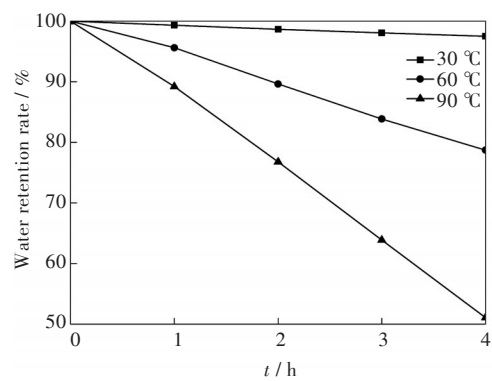


图5 不同温度下(AA-AMPS-CMC)/MDS的保水率  
Fig. 5 Water retention rate of (AA-AMPS-CMC)/MDS at different temperatures

3 结 语

1) 采用微波辐射方法制备了(AA-AMPS-CMC)/MDS复合SAR。实验结果显示最佳的反应条件为: $m(\text{AA}):m(\text{AMPS}):m(\text{CMC})=10:1.5:0.3$ , $w(\text{MDS})=3\%$ , $N=60\%$ , $w(\text{KPS})=0.5\%$ , $w(\text{NMBA})=0.1\%$ , $P=195\text{ W}$ , $t=60\text{ s}$ ,在此条件下树脂在去离子水和NaCl溶液中的吸水倍率分别为1 169 g/g和80 g/g。在体系中适量引入MDS可以显著提高树脂的吸水倍率及改善树脂的耐盐性能。

2) XRD、FT-IR和SEM结果显示有机单体和MDS之间发生了插层聚合反应,有机单体插入到MDS层间形成插层型复合SAR。

3) 在30、60和90 °C下,4 h后聚合物保水率分别为97.48%、78.72%、51.08%,说明树脂在较高温度下具备良好的保水性能。

参考文献

[1] YANG Y F, WAN L S, XU Z K. Surface hydrophilization of microporous polypropylene membrane by the interfacial crosslinking of polyethyleneimine [J]. Journal of Membrane Science, 2009, 337(1/2): 70–80.

[2] 程冬炳,余响林,余训民. 高吸水树脂在环境治理中的应用[J]. 武汉工程大学学报,2011,33(9): 20–25.

[3] 刘方方,齐秀峰,杜丛会,等. 微波技术在合成半纤维素高吸水树脂中的研究[J]. 高分子通报,2016(4): 88–94.

[4] 吴淑芳,陈循军,杜建军,等. 高吸水性树脂在农业生产中的应用研究进展[J]. 化工新型材料,2018,46(12): 247–251.

[5] 余训民,王术智,庄田,等. 反向悬浮法制备防潮性高吸水树脂[J]. 武汉工程大学学报,2015, 37(2): 10–13.

[6] TAMAS F, JUDIT B, ERZSEBRT T. Synthesis of carboxymethylcellulose/starch superabsorbent hydrogels by gamma-irradiation [J]. Chemistry Central Journal, 2017, 11(1): 46(1)–46(10).

[7] TALLY M, ATASSI Y. Synthesis and characterization of pH-sensitive superabsorbent hydrogels based on sodium alginate-g-poly (acrylic acid-co-acrylamide) obtained via an anionic surfactant micelle templating under microwave irradiation [J]. Polymer Bulletin, 2016, 73 (11): 3183–3208.

[8] 唐宏科,陈飞. 国内外有机-无机复合高吸水性树脂的研究进展[J]. 化工新型材料,2010,38(10): 18–24.

[9] NISPA S, NISARAT A, SUDA K. Superabsorbent polymer nanocomposites with surfactant-or acid-modified Ca-montmorillonite: synthesis and water absorbency[J]. Journal of Polymer Research, 2015, 22 (3): 31(1)–31(8).

[10] 刘立华,刘冬莲、沈玉龙,等. 聚丙烯酸钠/高岭土复合高吸水性树脂的制备及性能研究[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2017, 50(6): 79–84.

[11] 徐继红,陶俊,李忠,等. ST-g-PAMPS高吸水性树脂的微波合成与表征[J]. 化工新型材料,2015,43(6): 172–174.

[12] 谷庆风,宫峰,何培新. 有机蒙脱土/聚(丙烯酸-丙烯酰胺)高吸水性纳米复合材料的制备、性能及表征[J]. 胶体与聚合物, 2009, 27(3): 20–23.

[13] 陈宇,张柳,徐航. 有机改性凹凸棒土复合P(AA-co-AM)高吸水性树脂的制备及性能研究[J]. 塑料工业, 2015, 43(1): 84–88.

[14] 孙宾宾,杨博. 科研成果向教学资源转化一例——麦饭石复合高吸水树脂合成[J]. 广州化工, 2017, 45(4): 110–111, 121.

[15] 牛佳. 麦饭石的研究现状及发展展望[J]. 中山大学研究生学刊(自然科学、医学版), 2013, 34(2): 71–77.

[16] 王银叶,马育年,史艳娇. 活性麦饭石孔结构的探讨及应用[J]. 天津化工, 2003, 17(2): 7–9.

[17] 王维清,冯启明,袁昌来. 一种新型无机抗菌剂载体——麦饭石[J]. 中国矿业, 2005, 14(1): 41–44.

[18] 来水利,于金凤,陈昱声,等. 微波辐射下聚(AA-AM-AMPS)/海泡石复合高吸水性树脂的制备[J]. 陕西科技大学学报, 2015, 33(1): 74–78.

[19] 王海坤,王翠翠,邱祖民,等. CMC-AA-AM/PVA 半互穿网络高吸水树脂的制备与性能[J]. 南昌大学学报, 2017, 39(4): 315–319.

[20] 熊联明,夏亮亮,魏朝秀,等. 环氧树脂/有机蒙脱土复合材料的制备与力学性能研究[J]. 塑料工业, 2011, 39(5): 30–33.

[21] 李爱阳,蔡玲,蒋美丽,等. 复合吸附剂麦饭石-壳聚糖的制备及对 $\text{Zn}^{2+}$ 的吸附性能[J]. 材料保护, 2009, 42(3): 84–87.

[22] YU J, PAN Y P, LU Q F, et al. Synthesis and swelling behaviors of P(AMPS-co-AAc) superabsorbent hydrogel produced by glow-discharge electrolysis plasma[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2013, 33(1): 219–235.