

# SiO<sub>2</sub> 微纳颗粒对凝胶堵剂耐温性能提升的研究

伍亚军<sup>1,2</sup>, 马清杰<sup>1,2</sup>, 吴贝贝<sup>1,2</sup>, 亢智<sup>1,2</sup>, 李生林<sup>1,2</sup>, 王秋莲<sup>3</sup>, 谭陆西<sup>3\*</sup>

(1. 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司, 新疆 乌鲁木齐 830011;

2. 中国石油化工集团公司碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011;

3. 重庆大学化学化工学院, 重庆 401331)

**摘要:**聚丙烯酰胺(PAM)体系水凝胶是采油中常用的堵水调剖试剂,无机微纳颗粒的引入常用于提升PAM体系水凝胶的机械性能,但其引入对凝胶耐温性能的影响则鲜有讨论。为了探索无机微纳颗粒粒径对凝胶堵剂耐温性能的影响,引入5种粒径分别为15 nm、30 nm、100 nm、1 μm、10 μm的SiO<sub>2</sub>微纳颗粒并研究其对PAM凝胶高温老化前后的弹性模量、黏性模量和拉伸强度等性质的影响。结果表明,随着SiO<sub>2</sub>粒径的减小,凝胶耐温性能呈先增加后减小的趋势;SiO<sub>2</sub>颗粒粒径为30 nm时,凝胶的强度和耐温性能最好;与不含SiO<sub>2</sub>颗粒的凝胶相比,高温老化前含粒径30 nm SiO<sub>2</sub>颗粒的凝胶的储能模量高约2.1倍、拉伸强度高约4.6倍、同等应变下压缩所需应力更高;高温老化后含粒径30 nm SiO<sub>2</sub>颗粒的凝胶储能模量高约1.9倍、拉伸强度高约3.3倍、同等应变下压缩所需应力更高。SEM扫描电镜结果表明,SiO<sub>2</sub>颗粒粒径减小、比表面积增大,单位体积凝胶中微纳颗粒表面羟基与PAM中酰胺基形成的氢键链接越多,因此强度越高,耐温性随之提升;但粒径过小时颗粒分散性差,易于团聚,会使得上述效应减弱,因此凝胶机械强度和耐温性能下降。

**关键词:**凝胶; SiO<sub>2</sub>; 粒径; 耐温; 强度

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)S1-0264-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S1.048

## Study on enhancing temperature resistance of gel plugging agent by SiO<sub>2</sub> micro-nano particles

WU Ya-jun<sup>1,2</sup>, MA Qing-jie<sup>1,2</sup>, WU Bei-bei<sup>1,2</sup>, KANG Zhi<sup>1,2</sup>, LI Sheng-lin<sup>1,2</sup>,  
WANG Qiu-lian<sup>3</sup>, TAN Lu-xi<sup>3\*</sup>

(1. Sinopec Northwest Oilfield Branch Company, Urumqi 830011, China; 2. Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery in Carbonate Fractured-cave Oil Reservoir, Sinopec Group, Urumqi 830011, China; 3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** Polyacrylamide (PAM) system hydrogels are commonly used as water plugging and conditioning reagents in oil recovery. In order to explore the effect of the particle size of inorganic micro-nano particles on the temperature resistance of gel plugging agent, five kinds of SiO<sub>2</sub> micro-nano particles with sizes of 15 nm, 30 nm, 100 nm, 1 μm, and 10 μm are respectively added, and their effect on elastic modulus, viscous modulus and tensile strength of PAM gels before and after the high-temperature aging are evaluated. Results show that with the decreasing particle size of SiO<sub>2</sub>, the temperature resistance of the gels increases firstly and decreases then. Both the strength and temperature resistance of the gels reach the best when SiO<sub>2</sub> particle size is 30 nm. Compared with the gels without SiO<sub>2</sub> particles, before high-temperature aging, the storage modulus of the gels containing 30 nm SiO<sub>2</sub> particles is about 2.1 times higher, and the tensile strength is about 4.6 times higher, and the stress required for compression is higher under the same strain; After high-temperature aging, the energy storage modulus of the gels containing 30 nm SiO<sub>2</sub> particles is about 1.9 times higher, the tensile strength is about 3.3 times higher, and the stress required for compression is higher under the same strain. SEM results show that as the particle size of SiO<sub>2</sub> particles decreases, their specific surface area becomes larger, and more hydrogen bonding links form between hydroxyl groups on the surface of the nanoparticles per unit volume of the gels and amide group of PAM. Therefore, the strength is higher, and the temperature resistance is improved. But if the size is too small, the dispersion of particles is poor and it is easy to agglomerate, which will weaken the above effects, and lead to drops in mechanical strength and temperature resistance of the gels.

**Key words:** gel; SiO<sub>2</sub>; particle size; temperature resistance; strength

随着注水开发的深入以及注采方案的调整,油田综合含水量在不断增加,注入水会沿着裂缝通道窜流,造成油井易爆性水淹<sup>[1-5]</sup>。针对这一问题,传

统的聚丙烯酰胺(PAM)体系水凝胶是调堵领域应用最为普遍的材料,然而其耐温性不高,高温下易分解,仅能适用于85℃以下的油藏<sup>[6-11]</sup>。因此,提高

收稿日期:2024-02-28;修回日期:2024-06-18

作者简介:伍亚军(1983-),男,硕士,工程师,研究方向为油田化学及提高采收率技术,wuyaj.xbsj@sinopec.com;谭陆西(1985-),男,博士,副研究员,博士生导师,研究方向为化工高分子材料,通讯联系人,tanluxi@cqu.edu.cn。

PAM 体系水凝胶的耐温性是拓展其应用的关键。

近年来,研究人员在 PAM 体系水凝胶中添加纳米 SiO<sub>2</sub>、纳米锂皂土、纳米粉煤灰等无机颗粒,凝胶的机械强度显著提高<sup>[12-15]</sup>。Amir 等<sup>[14]</sup>研究了不同质量分数的粒径 5 nm SiO<sub>2</sub> 颗粒对 PAM 凝胶强度的影响,结果表明,所填充 SiO<sub>2</sub> 颗粒越多,储能模量越大;汪成<sup>[15]</sup>研究了不同质量分数的粒径 20 nm SiO<sub>2</sub> 颗粒对 PAM 凝胶强度的影响,其结果与 Amir 等人的研究结果一致,但均未对引入无机微纳颗粒的 PAM 凝胶耐温性能进行测试,且两者所用 SiO<sub>2</sub> 颗粒粒径不同,少有文献对颗粒粒径对 PAM 体系水凝胶的强度和耐温性影响进行研究。本文从 SiO<sub>2</sub> 微纳颗粒的尺寸效应入手,研究了不同粒径 SiO<sub>2</sub> 颗粒对 PAM 体系水凝胶的耐温性的影响,为选择合适粒径的 SiO<sub>2</sub> 颗粒提高凝胶强度和耐温性提供参考。

## 1 试剂与仪器

### 1.1 实验试剂

丙烯酰胺(AM),试剂级,上海麦克林生化科技有限公司;过硫酸钾(KPS),试剂级,上海麦克林生化科技有限公司;聚丙烯酸钠(PAA-Na,平均相对分子量 140 000),试剂级,上海麦克林生化科技有限公司;SiO<sub>2</sub>(粒径 15 nm、30 nm、100 nm、1 μm、10 μm),市售商品,比斯利新材料有限公司。

### 1.2 实验仪器

Nicolet iS50 傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR),美国赛默飞世尔科技有限公司;TM-4000 Plus 台式扫描电子显微镜,日本日立公司;Andon paar MCR102 流变仪,奥地利安东帕公司;DMA850 动态热机械分析仪,美国 TA 仪器公司;E44.104 微机控制电子万能试验机,美特斯工业系统(中国有限公司)。

## 2 实验方法

### 2.1 凝胶的制备

量取 100 mL 清水,加入 2 g SiO<sub>2</sub> 颗粒在 500 rad/min 转速下磁力搅拌 2 h,依次加入 6 g 丙烯酰胺(AM)、0.06 g 过硫酸钾(KPS),搅拌至完全溶解,均匀缓慢加入 1 g 分散剂聚丙烯酸钠(PAA-Na),搅拌至完全溶解,在 300 rad/min 转速下磁力搅拌 30 min。将配置的溶液置于 70℃ 的烘箱中,反应 24 h 后得到含 SiO<sub>2</sub> 颗粒的凝胶。

### 2.2 凝胶性能测试及表征

凝胶的化学键结构使用 FT-IR 光谱仪分析。凝胶形貌使用台式扫描电子显微镜观察。凝胶的拉

伸强度使用万能试验机测定。凝胶的压缩性能使用动态热机械仪测定。凝胶的黏弹性使用流变仪进行测定,振荡频率 1 Hz,扫描时间范围 0~200 s。凝胶耐温测定方法:凝胶在 70℃ 成胶后,在 100℃ 烘箱中高温老化 7 d,7 d 后取出凝胶,测试其性能。

## 3 结果与分析

### 3.1 SiO<sub>2</sub> 微纳颗粒对凝胶高温老化前后黏弹性的影响

为系统研究 SiO<sub>2</sub> 颗粒粒径对 PAM 凝胶黏弹性的影响规律,凝胶制备的过程中,所有组分的用量相同,仅改变加入 SiO<sub>2</sub> 颗粒的粒径,并设置未添加 SiO<sub>2</sub> 颗粒的凝胶作为不同粒径 SiO<sub>2</sub> 颗粒对凝胶性能提升的对照组。根据加入凝胶中的 SiO<sub>2</sub> 颗粒粒径不同进行编号,分别为 AS-0、AS-1、AS-2、AS-3、AS-4、AS-5,对应未添加 SiO<sub>2</sub> 颗粒的凝胶、含粒径 10 μm SiO<sub>2</sub> 颗粒的凝胶、含粒径 1 μm SiO<sub>2</sub> 颗粒的凝胶、含粒径 100 nm SiO<sub>2</sub> 颗粒的凝胶、含粒径 30 nm SiO<sub>2</sub> 颗粒的凝胶、含粒径 15 nm SiO<sub>2</sub> 颗粒的凝胶。

高温老化前,含不同粒径 SiO<sub>2</sub> 颗粒的凝胶黏弹性测试结果如图 1 所示。凝胶储能模量( $G'$ )表征凝胶弹性的大小,损耗模量( $G''$ )表征凝胶黏性的大小,储能模量大于损耗模量,则凝胶表现为弹性固体;反之,则为黏性液体。由图 1 可知,储能模量均大于损耗模量,凝胶皆为弹性固体。加入 SiO<sub>2</sub> 颗粒后,凝胶的储能模量均得到提升,AS-2、AS-3、AS-4、AS-5 的储能模量的提升效果较为显著,其中,AS-4 的储能模量最大,是 AS-0 的 2.1 倍,是 AS-1 的 1.9 倍。随 SiO<sub>2</sub> 颗粒粒径的减小,储能模量先增大后减小,但皆大于未加入 SiO<sub>2</sub> 颗粒的凝胶。由此可见, SiO<sub>2</sub> 颗粒的加入提升了凝胶的强度,粒径越小,所能与酰胺基团形成氢键相互作用力的位点越多,储能模量越大,但当粒径过小时, SiO<sub>2</sub> 易团聚,反而不利于氢键的形成。

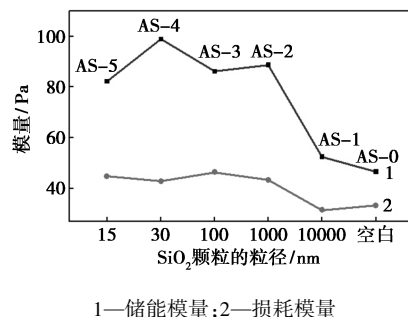


图 1 高温老化前凝胶黏弹性曲线

高温老化前,含不同粒径 SiO<sub>2</sub> 颗粒的凝胶的损耗因数变化如图 2 所示。损耗因素  $\tan \delta$  为损耗模量和储能模量的比值,其大小反映凝胶黏弹性大小。若  $\tan \delta < 1$ ,凝胶弹性占主导,为弹性固体,数值越小,弹性越强;反之, $\tan \delta > 1$ ,凝胶粘性占主导,为粘性液体,数值越大,粘性越大。由图 2 可知, $\tan \delta$  均小于 1,皆为弹性固体,其中,AS-0 的黏性最大,AS-4 的弹性最大,AS-2、AS-3、AS-4、AS-5 的损耗因数接近,在 0.5 上下波动,具有相似的黏弹性。

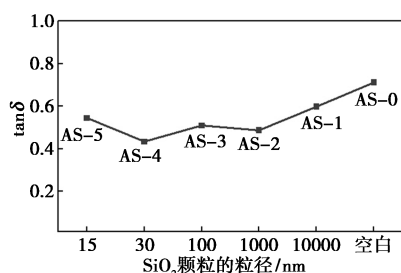
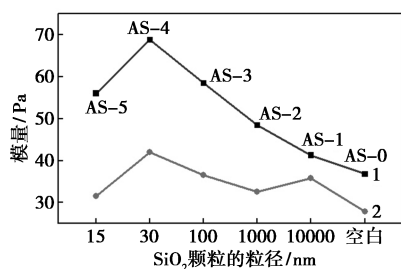


图 2 高温老化前凝胶的损耗因数曲线

高温老化后,含不同粒径 SiO<sub>2</sub> 颗粒的凝胶的黏弹性测试结果如图 3 所示。随着粒径的减小,储能模量先增加后减小,其中,AS-4 的储能模量最大,是 AS-0 的 1.9 倍,是 AS-1 的 1.7 倍。高温老化后,模量损失如图 4 所示,AS-0 与 AS-1 的模量损失接近,综合高温老化前后的模量大小,粒径 10  $\mu\text{m}$  SiO<sub>2</sub> 颗粒对凝胶性能的提升几乎不起作用,我们推测,粒径 10  $\mu\text{m}$  SiO<sub>2</sub> 颗粒直接分布于凝胶中,虽有助于凝胶三维结构的形成,但粒径 10  $\mu\text{m}$  SiO<sub>2</sub> 颗粒的比表面积小,不利于氢键的形成,两者的模量损失虽较其他凝胶的模量损失小,但其初始成胶时自身模量也较小。高温老化前 AS-2 与 AS-3 的储能模量接近,但高温老化后,AS-2 模量损失严重,而 AS-3、AS-4、AS-5 模量损失接近,表明 AS-3、AS-4、AS-5 中的 SiO<sub>2</sub> 颗粒对凝胶性能提升的作用原理相同,具有类似的效果,而 AS-2 由于 SiO<sub>2</sub> 颗粒粒径相对较大,不利于氢键的稳定,故而损耗较大。



1—储能模量;2—损耗模量

图 3 高温老化后的凝胶的黏弹性曲线

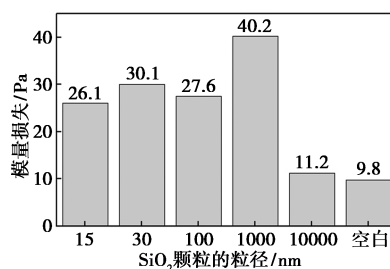


图 4 高温老化后凝胶的模量损失图

高温老化后,含不同粒径 SiO<sub>2</sub> 颗粒的凝胶的损耗因数变化如图 5 所示。高温老化后,凝胶的损耗因数都增加,表明凝胶弹性降低,粘性增加。AS-0 和 AS-1 的损耗因数最大,随着粒径的减小,损耗因数越小,弹性越大,即粒径越小对凝胶弹性保持越好,耐温性的提升越好。

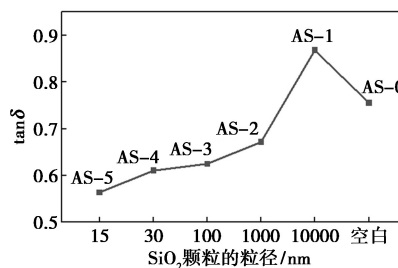
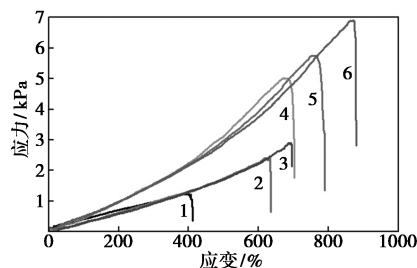


图 5 高温老化后凝胶的损耗因数曲线

### 3.2 SiO<sub>2</sub> 微纳颗粒对凝胶高温老化前后拉伸性能的影响

高温老化前,含不同粒径 SiO<sub>2</sub> 颗粒的凝胶的拉伸测试结果如图 6 所示,由图 6 可知,AS-5 的拉伸应变可达 877%,断裂应力为 6.4 kPa;AS-4 拉伸应变可达 774%,断裂应力为 5.5 kPa;AS-3 拉伸应变可达 680%,断裂应力为 5.0 kPa;AS-2 的拉伸应变可达 677%,断裂应力为 2.8 kPa;AS-1 的拉伸应变可达 631%,断裂应力为 2.5 kPa;AS-0 拉伸应变可达 406%,断裂应力为 1.2 kPa。由此可见, SiO<sub>2</sub> 的加入增加了凝胶的交联密度,使得拉伸性能提高, SiO<sub>2</sub> 粒径越小凝胶拉伸应变和断裂应力越大。

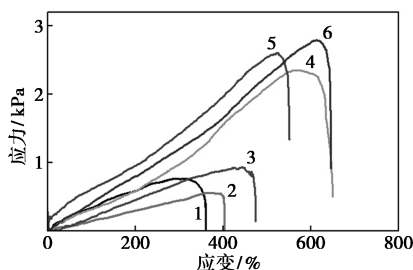


1—AS-0;2—AS-1;3—AS-2;4—AS-3;5—AS-4;6—AS-5

图 6 高温老化前凝胶拉伸应力-应变曲线

高温老化后,含不同粒径 SiO<sub>2</sub> 颗粒的凝胶的拉

伸测试结果如图7所示,由图7可知,AS-5拉伸应变可达630%,断裂应力为2.7 kPa;AS-4拉伸应变可达526%,断裂应力为2.6 kPa;AS-3拉伸应变可达624%,断裂应力为2.2 kPa;AS-2拉伸应变可达470%,断裂应力为0.93 kPa;AS-1拉伸应变可达400%,断裂应力为0.55 kPa;AS-0拉伸应变可达363%,断裂应力为0.8 kPa。高温老化后,拉伸应力和断裂应变减小,粒径越小断裂应力越大,由此可见,SiO<sub>2</sub>的加入有利于保持耐温过程中拉伸性能的保持,粒径越小性能保持越好。

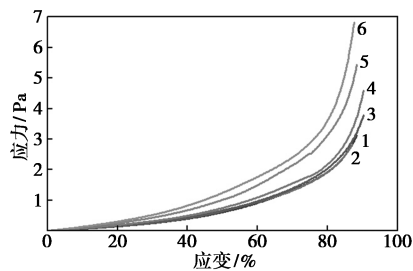


1—AS-0;2—AS-1;3—AS-2;4—AS-3;5—AS-4;6—AS-5

图7 高温老化后凝胶拉伸应力-应变曲线

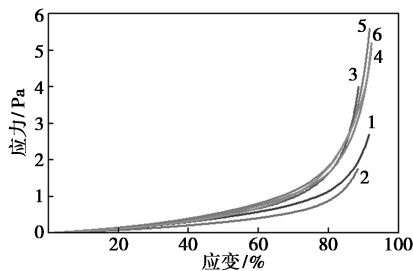
### 3.3 SiO<sub>2</sub>微纳颗粒对凝胶高温老化前后压缩性能的影响

高温老化前,含不同粒径SiO<sub>2</sub>颗粒的凝胶的压缩性测试结果如图8所示,由图8可知,SiO<sub>2</sub>颗粒粒径越小,凝胶压缩至同等应变所需应力越大,即SiO<sub>2</sub>的加入,增加了凝胶的刚性强度。高温老化后,含不同粒径SiO<sub>2</sub>颗粒的凝胶的压缩性测试结果如图9所



1—AS-0;2—AS-1;3—AS-2;4—AS-3;5—AS-4;6—AS-5

图8 高温老化前凝胶压缩应力-应变曲线



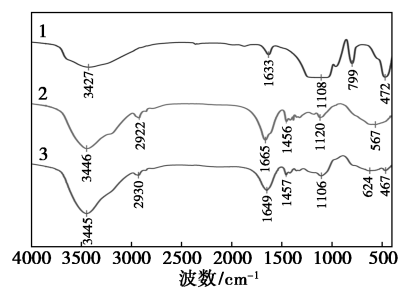
1—AS-0;2—AS-1;3—AS-2;4—AS-3;5—AS-4;6—AS-5

图9 高温老化后凝胶压缩应力-应变曲线

示,由图9可知,耐温测试后,凝胶的压缩强度有一定程度的降低,压缩至同等应变,含SiO<sub>2</sub>颗粒的凝胶所需应力越大,SiO<sub>2</sub>的加入增加了凝胶高温老化后的刚性强度。

### 3.4 SiO<sub>2</sub>颗粒对凝胶结构的影响

采用傅里叶红外光谱对凝胶样品的化学键结构进行分析,红外图谱如图10所示。在粒径15 nm SiO<sub>2</sub>颗粒的图谱中,3 427 cm<sup>-1</sup>和1 633 cm<sup>-1</sup>为SiO<sub>2</sub>表面O—H基团的特征吸收峰,1 108 cm<sup>-1</sup>和799 cm<sup>-1</sup>为Si—O—Si不对称和对称伸缩振动峰,472 cm<sup>-1</sup>为Si—O—Si弯曲振动峰。在AS-0的图谱中,3 446 cm<sup>-1</sup>为N—H基团的伸缩振动峰,2 992 cm<sup>-1</sup>为饱和C—H基团的伸缩振动峰,1 665 cm<sup>-1</sup>为C=O的伸缩振动峰,1 456 cm<sup>-1</sup>为亚甲基—CH<sub>2</sub>—的振动峰,1 120 cm<sup>-1</sup>为C—N伸缩振动峰。对比AS-5的图谱,1 106 cm<sup>-1</sup>和467 cm<sup>-1</sup>处出现SiO<sub>2</sub>的特征吸收峰,由于SiO<sub>2</sub>表面的O—H基团与聚丙烯酰胺的C=O基团形成氢键,SiO<sub>2</sub>表面结构发生变化<sup>[9,11]</sup>,使得799 cm<sup>-1</sup>处Si—O—Si对称伸缩振动峰发生改变,15 nm SiO<sub>2</sub>凝胶图谱中C=O基团的伸缩振动峰偏移至1 649 cm<sup>-1</sup>处,由此可见,SiO<sub>2</sub>表面O—H基团与聚丙烯酰胺C=O基团形成大量分子间氢键,进而使得SiO<sub>2</sub>成功交联嵌入聚合物凝胶中,达到物理交联的作用。



1—15 nm SiO<sub>2</sub>;2—AS-0;3—AS-5

图10 凝胶红外图谱

### 3.5 SiO<sub>2</sub>微纳颗粒对凝胶微观网络结构的影响

图11为含不同粒径SiO<sub>2</sub>颗粒的凝胶在20 μm尺度下的网状结构图,图11(a)~图11(f)分别为AS-5、AS-4、AS-3、AS-2、AS-1、AS-0的凝胶结构图,图11(f)与图11(a)~图11(e)对比可以看出, SiO<sub>2</sub>的加入使得凝胶形成三维蜂窝结构,使得凝胶结构更加稳定。图11(a)~图11(e)对比可以看出, SiO<sub>2</sub>粒径越小越容易团聚,团聚不利于对凝胶强度的提升,故而,应选取合适的粒径范围,以使SiO<sub>2</sub>可提升凝胶强度,也可达到较好的分散效果。

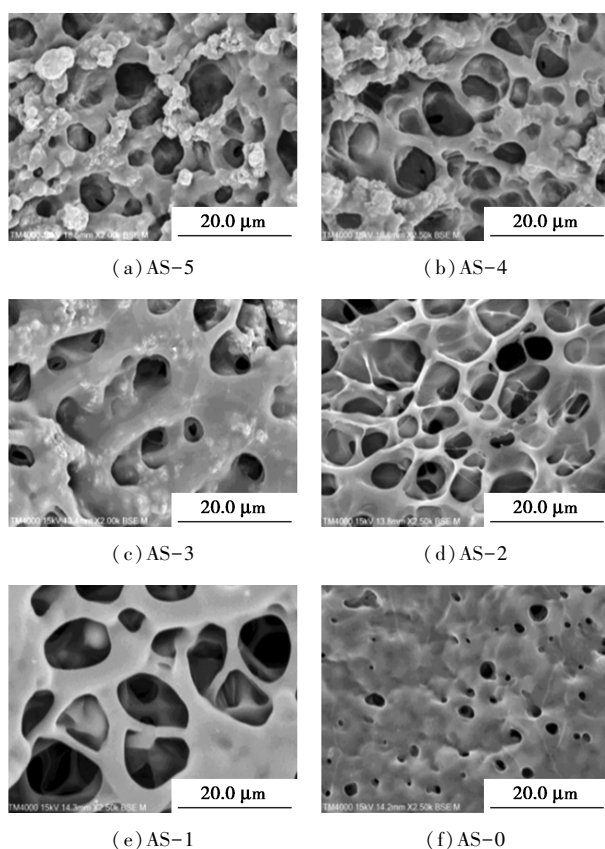


图 11 凝胶的 SEM 图

## 4 结论

研究不同粒径  $\text{SiO}_2$  颗粒对聚丙烯酰胺凝胶耐温性能的影响,并对凝胶进行了性能测试和结构表征,结论如下:

(1)向聚丙烯酰胺凝胶添加不同粒径的  $\text{SiO}_2$  颗粒后,凝胶的黏弹性、热稳定性、抗拉伸能力、抗压缩能力都有不同幅度的上升。FT-IR 分析表明,凝胶性能的提升来源于  $\text{SiO}_2$  颗粒表面羟基与酰胺基形成氢键的作用, $\text{SiO}_2$  颗粒充当了交联剂的功能,对凝胶结构起到支撑作用,从而提升了凝胶的强度和耐温性。

(2)含不同粒径  $\text{SiO}_2$  颗粒的凝胶中,含粒径 30 nm  $\text{SiO}_2$  颗粒的凝胶弹性模量最大,与不含  $\text{SiO}_2$  颗粒的凝胶相比,高温老化前,含粒径 30 nm  $\text{SiO}_2$  颗粒的凝胶的储能模量高约 2.1 倍,拉伸强度高约 4.6 倍;高温老化后,含粒径 30 nm  $\text{SiO}_2$  颗粒的凝胶储能模量高约 1.9 倍,拉伸强度高约 3.3 倍。随着  $\text{SiO}_2$  颗粒的粒径从 10  $\mu\text{m}$  降至 15 nm,凝胶的强度和耐温性呈现先增加后略有减小的趋势。

(3)从 SEM 图像可以看出, $\text{SiO}_2$  微纳颗粒的加

入使凝胶形成三维网状结构,增强了凝胶的强度和耐温性能,但纳米颗粒粒径越小越易团聚,分散不均匀会降低对强度和耐温性能的提升效果,通过研究发现, $\text{SiO}_2$  颗粒的粒径在 30 ~ 100 nm 范围内较为合适。

## 参考文献

- [1] 王建平,贾红娟,余小兵,等.微米级石墨粉增强堵水凝胶性能实验研究[J].钻采工艺,2022,45(5):123-127.
- [2] Zhang L,Nasir K,Chunsheng P.A new method of plugging the fracture to enhance oil production for fractured oil reservoir using gel particles and the HPAM/ $\text{Cr}^{3+}$  system[J].Polymers,2019;11(3):446.
- [3] Li C,Yi Q,Kejing G,*et al.* Experimental investigation of a novel nanocomposite particle gel for water shutoff treatment in mature oil-fields[J].ACS Omega,2022,7(10),8887-8895.
- [4] Bai B,Leng J,Wei M.A comprehensive review of in-situ polymer gel simulation for conformance control [J]. Petroleum Science, 2022,19(1):189-202.
- [5] Bai Y,Xiong C,Wei F,*et al.* Gelation study on a hydrophobically associating polymer/polyethyleneimine gel system for water shut-off treatment[J].Energy & Fuels,2015,29(2):447-458.
- [6] Ahmad A A,Suzylawati I,Abdullah S S.Study on strength and gelation time of polyacrylamide/polyethyleneimine composite gels reinforced with coal fly ash for water shut-off treatment[J].Journal of Applied Polymer Science,2015,132(5):41392.
- [7] 杨靖,张磊,蒲春生.高温裂缝性致密油藏深部调驱技术应用研究[J].钻采工艺,2018,41(1):42-45,4.
- [8] 王平美,罗健辉,林远平,等.低渗透裂缝油田长效智能深部调驱技术[J].油田化学,2018,35(2):252-256.
- [9] 郭锦棠,王美玉,张克明,等.高温油藏暂堵剂的制备与性能研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2019,52(1):1-6.
- [10] Zhang L,Pu C,Cui S,*et al.* Experimental study on a new type of water shutoff agent used in fractured low permeability reservoir[J]. Journal of Energy Resources Technology,2017,139(1):12907.
- [11] 秦义,张顶学,刘玉莉,等.缓膨耐盐性纳米复合凝胶颗粒的合成及性能研究[J].现代化工,2018,38(10):171-174.
- [12] 何绍群,柏永青,于田田,等.纳米硅藻土增强聚丙烯酰胺凝胶堵剂强度及耐温性[J].科学技术与工程,2018,18(29):65-71.
- [13] Xuechen T,Hongbin Y,Yongbo G,*et al.* Preparation of a micron-size silica-reinforced polymer microsphere and evaluation of its properties as a plugging agent[J].Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects,2018,547,8-18.
- [14] Amir Z,Saaid I M,Jan B M,*et al.* Weakened PAM/PEI polymer gel for oilfield water control: Remedy with silica nanoparticles [J]. Gels,2022,8(5),265.
- [15] 汪成.纳米二氧化硅对聚合物凝胶强度的影响[J].当代化工,2021,50(5):1086-1089.■