

荧光聚丙烯酰胺纳米微球的制备与性能研究

米楚¹, 赖小娟^{1*}, 冯小龙², 王丽敏³, 汤智强¹, 柳小虎¹

(1. 陕西科技大学, 陕西 西安 710021; 2. 陕西延长石油(集团)有限责任公司延长气田采气五厂, 陕西 延安 718500; 3. 长庆油田分公司第三采油厂, 宁夏 银川 750000)

摘要:为考察微球在油藏中的分布规律,以烯丙基荧光素(Flu)为荧光单体,2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸(AMPS)为耐高温耐盐单体,通过反相微乳液聚合法与丙烯酰胺(AM)发生共聚反应合成一种油田用聚丙烯酰胺荧光纳米微球 p(AM-AMPS-Flu)。利用红外光谱、电镜测试和激光粒度仪、荧光分光光度计对荧光微球的微观结构与荧光特性进行表征,同时采用岩心驱替实验装置对荧光微球的封堵效果进行评价。结果表明,该荧光微球质量浓度和相对荧光强度间呈正向线性关系。同时该荧光微球在不同停留时间、温度、pH、金属盐离子及油田化学剂下均具备稳固的荧光特性,表现出良好的耐温、耐盐、耐酸碱性和优异的配伍性。该荧光微球与普通聚丙烯酰胺微球相比具有良好的注入性和封堵能力,注入量为0.5%时封堵率可达88.67%。

关键词: 烯丙基荧光素;反相微乳液聚合;荧光纳米微球;耐高温耐盐;油田示踪

中图分类号: TE39;O633

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2023)01-0169-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.01.030

Preparation and properties of fluorescent polyacrylamide nano microspheres

MI Chu¹, LAI Xiao-juan^{1*}, FENG Xiao-long², WANG Li-min³, TANG Zhi-qiang¹, LIU Xiao-hu¹

(1. Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China;

2. The No.5 Gas Production Plant, Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Yan'an 718500, China;

3. The Third Oil Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Yinchuan 750000, China)

Abstract: In order to clarify the distribution of microspheres in the oil reservoir, p(AM-AMPS-Flu), a kind of polyacrylamide fluorescent nano microspheres for oilfield, is synthesized through inverse microemulsion polymerization method with acrylamide as monomer, allyl fluorescein as fluorescent monomer and 2-acrylamido-2-methyl propane sulfonic acid as temperature-resistant and salt-tolerant monomer. The microstructure and fluorescence characteristics of the obtained microspheres are characterized by means of infrared spectroscopy, electron microscopic test, laser particle size analyzer and fluorescence spectrophotometer, and the plugging effect of the microspheres is evaluated by using core displacement experiment device. The results show that there is a positive linear relationship between the mass concentration of the microspheres and the relative fluorescence intensity. These fluorescent microspheres have stable fluorescence characteristics under different residence time, temperature, pH, metal salt ions and oilfield chemicals, showing good temperature resistance, salt resistance, acid and alkali resistance and excellent compatibility. Compared with ordinary polyacrylamide microspheres, the synthesized microspheres have better injection and plugging abilities, with a plugging rate of 88.67% when the injection amount is 0.5%.

Key words: allyl fluorescein; inverse microemulsion polymerization; fluorescent nano microspheres; temperature resistance and salt tolerance; oilfield tracer

聚丙烯酰胺(AM)为主要单体合成的功能性聚合物微球遇水膨胀后作用于孔喉和裂隙之间,可达到减少产水量和提高油田采收率的目的^[1-2]。因其具有亲水性强、生物相容性好、易于表面功能化和非特异吸附等特点^[3-4],使得聚丙烯酰胺微球工艺作为一种新型的油藏开发调驱堵水工艺,成功运用于低渗透油藏的研究中^[5-6]。但该类聚合物微球在实际注入油田地层时面临着诸多问题,特别与其他聚丙烯酰胺类溶液一起用作调剖体系时,无法将其从采

出液中区分出来,难以准确计算聚丙烯酰胺微球的浓度并用于聚合物微球调驱体系指导室内评价及矿场试验^[7-8]。

荧光聚合物微球在紫外光辐射下具有发光性能,因此可通过其荧光特性检测出采出液中的聚合物微球含量^[9],近年来在油田生产方面的应用受到持续关注^[10-11]。胡雷雷等^[12]以丙烯酰氧基荧光素和丙烯酰胺为单体,采用反向微乳液聚合法合成了一种粒径为20 μm的荧光微球,证明了在pH为

收稿日期:2022-06-02;修回日期:2022-10-30

基金项目:陕西省重点研发计划(2021GY-142);陕西省国际科技合作项目(2020KW-025);西安市科技计划项目(21XJZZ0004);陕西省教育厅服务地方专项项目(21JC005)

作者简介:米楚(1998-),女,硕士研究生,研究方向为油田化学品,1401309101@qq.com;赖小娟(1984-),女,博士,教授,研究方向为功能高分子材料和油田化学品,通讯联系人,laixiaojuan@sust.edu.cn。

8.0~10.0 范围内且含有金属离子的水溶液中荧光性能稳定,该荧光微球只适用于弱碱性环境中。Yang 等^[13]以罗丹明 B 为荧光单体,采用反相悬浮聚合法与丙烯酰胺合成了一种粒径为 120 μm 的荧光微球,该微球在 pH 为 3.0~10.0 的含金属离子溶液中具有稳定的荧光性能。但以上 2 种微球都普遍存在热稳定性较差的问题。且普通的荧光示踪微球的抗金属盐离子干扰能力较差。

针对上述问题,笔者在常规聚丙烯酰胺类微球中引入荧光性能优良的功能单体烯丙基荧光素(Flu)^[14],以及具有耐温耐盐性能的功能单体 2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸(AMPS)^[15],采用反相乳液聚合的方法制备了一种油田用聚丙烯酰胺荧光纳米微球 p(AM-AMPS-Flu),并对该荧光纳米微球的微观结构、荧光特性和封堵效果进行测试。同时与聚丙烯酰胺空白微球进行对比,考察不同静置时间、温度、pH、金属盐离子、矿化度以及油田化学剂对聚合物荧光微球荧光特性的影响。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

AM、AMPS、*N,N'*-亚甲基双丙烯酰胺(MBA)、失水山梨醇单油酸酯聚氧乙烯醚(Tween-80)、山梨醇酐油酸酯(Span-80)、白油、过硫酸铵(APS)、氢氧化钠、亚硫酸氢钠、无水乙醇,均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司生产;烯丙基荧光素,自制^[16]。

VECTOR-22 傅里叶红外光谱仪,德国 Bruker 公司生产;S4800 场发射扫描电镜(SEM),日本理学生产;透射电子显微镜(TEM),美国 FEI 生产;BT-9300Z 激光粒度仪,英国 Malvern 公司生产;F-4600 型荧光分光光度计,日本日立生产;LDY-50 型岩心驱替实验装置,江苏海安石油科研仪器有限公司生产。

1.2 聚丙烯酰胺荧光纳米微球制备

依次称取 46.20 g 白油、23.10 g Span-80 和 11.50 g Tween-80,搅拌均匀至完全分散得到油相。再依次称取 27.05 g AM、11.50 g AMPS、0.20 g MBA、0.04 g APS、0.04 g 烯丙基荧光素和 23 mL 蒸馏水搅拌使其充分溶解,调节 pH 至中性得到水相。将油水两相混合加入到反应釜中,继续搅拌乳化 30 min,再通氮气搅拌 30 min,加入 0.08 g NaHSO₃ 水溶液引发聚合,于 50℃ 下反应 4 h,使其白色乳液变为淡黄色,自然冷却后停止搅拌。用无水乙醇充分洗涤所得微球,将沉淀于 50℃ 真空干燥 12 h,获得聚丙烯酰胺荧光微球 p(AM-AMPS-Flu)。使用

上述方法,不加入烯丙基荧光素制得聚丙烯酰胺空白微球 p(AM-AMPS) 作为对照。聚丙烯酰胺荧光微球合成路线如图 1 所示。

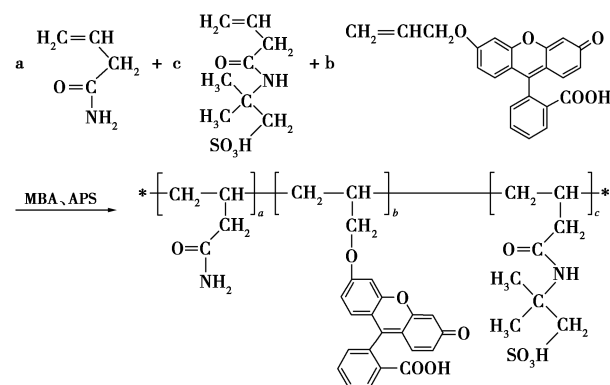


图 1 聚丙烯酰胺荧光微球 p(AM-AMPS-Flu) 的合成路线

1.3 结构表征与性能评价

1.3.1 红外光谱表征

利用红外光谱仪(KBr 压片)表征荧光单体、聚丙烯酰胺荧光微球和空白微球的分子结构,并对比分析其特征吸收峰差异。

1.3.2 粒径表征

利用激光粒度仪测试合成产物聚丙烯酰胺荧光微球的粒径分布,同时与空白微球的粒径分布进行比较。

1.3.3 电镜测试

将制备的荧光微球样品用液氮冷冻干燥,利用 SEM、TEM 观察荧光微球的颗粒大小和微观形貌。

1.3.4 荧光特性分析

配制 0.2 g/L 的荧光微球水分散液,用荧光分光光度计测试荧光微球和荧光单体在一定激发波长下的荧光发射光谱,分析其荧光特性。同时采用去离子水配置质量浓度为 0.1~1 g/L 的荧光微球分散水溶液,建立荧光微球质量浓度与相对荧光强度之间的关系曲线。

(1) 采用去离子水配制 1 g/L 的荧光微球水分散液,在自然条件下放置 0、5、10、15、20、25、30 d,取上层清液测试荧光强度,分析荧光微球的悬浮稳定性。

(2) 采用去离子水配制 1 g/L 的荧光微球水分散液,密闭放置恒温烘箱中 24 h 后冷却至室温,测试在常温、40、50、60、70、90、120℃ 时的荧光强度,分析荧光微球的热稳定性。

(3) 采用去离子水配制 1 g/L 的荧光微球水分散液,通过 HCl 和 NaOH 调节溶液 pH 为 3~12,测

试其荧光强度,分析荧光微球的耐酸碱性。

(4)采用 NaCl、KCl、CaCl₂、MgSO₄、FeCl₃ 分别配置浓度为 0.1 mol/L 的水溶液,同时分别配置质量浓度为 1 000、3 000、5 000、7 000、10 000 mg/L 的盐溶液,用于配置 1 g/L 荧光微球水分散液,测试其荧光强度,分析荧光微球的耐盐性。

(5)由于现场应用中还存在其他助剂的影响,因此对荧光微球的配伍性进行分析。

1.3.5 渗流特性

按照《SY/T 5862—2020 驱油用聚合物技术要求》标准中所述的测试方法对合成的荧光微球和空白微球进行注入性能分析。将实验室自备岩心抽真空,并采用模拟地层水饱和。采用岩心驱替实验装置进行实验。计算阻力系数 R_f 、残余阻力系数 R_{ff} 和封堵率^[17-18]:

$$R_f = \Delta p_p / \Delta p_{wi} \quad (1)$$

$$R_{ff} = \Delta p_{wa} / \Delta p_{wi} \quad (2)$$

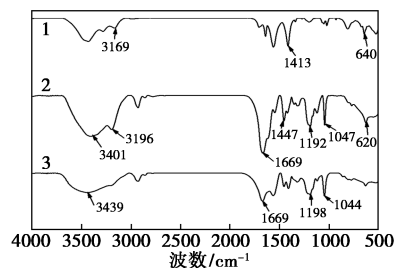
$$R_{\text{封堵}} = 1 - 1/R_{ff} \quad (3)$$

式中: Δp_{wi} 为开始水驱稳定时压差,MPa; Δp_p 为注聚合物溶液稳定时压差,MPa; Δp_{wa} 为后续水驱稳定时压差,MPa。

2 结果与讨论

2.1 红外光谱分析

荧光单体、聚丙烯酰胺荧光微球和空白微球的红外光谱图如图 2 所示。



1—Flu;2—AM-AMPS-Flu;3—AM-AMPS

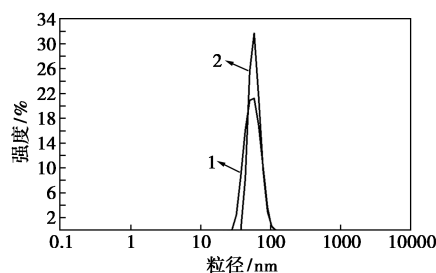
图 2 荧光单体、荧光微球和空白微球的红外谱图

由图 2 可知,1 614 cm⁻¹处是 AM 单体上双键的特征峰,荧光微球和空白微球的红外光谱图中没有此峰,表明 C=C 双键消失,AM 单体发生聚合反应。3 401 cm⁻¹附近的—NH₂ 不对称伸缩振动吸收峰和 1 669 cm⁻¹处的羰基 C=O 伸缩振动特征峰,证明聚合物微球中酰胺基团的存在;C=O 弯曲振动吸收峰从 1 614 cm⁻¹红移到 1 669 cm⁻¹,表明酰胺基团已经部分水解为羧基;1 192、1 047 cm⁻¹处的磺酸基

—SO₃ 伸缩振动吸收峰,表明单体 AMPS 与 AM 发生共聚。此外,荧光微球在 3 196 cm⁻¹处有荧光单体的芳烃 C—H 伸缩振动、1 447 cm⁻¹处的苯环骨架振动和 620 cm⁻¹处的芳香族氢外弯曲振动特征峰,表明荧光单体与 AM 和 AMPS 发生共聚。由于荧光单体加入量较少,因此荧光微球上荧光单体的其他特征峰相对较弱。

2.2 粒径测试

荧光微球和空白微球的粒径分布如图 3 所示。



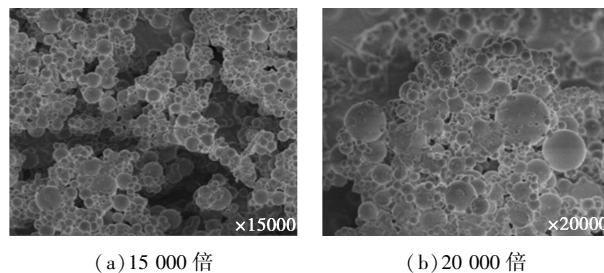
1—荧光微球;2—空白微球

图 3 荧光微球与空白微球的粒径分布

由图 3 可知,荧光微球粒径主要分布在 30~100 nm 之间,粒径分布范围较窄,平均粒径为 74.86 nm,属于纳米级微球。空白微球的平均粒径为 70.58 nm,与荧光微球的平均粒径相差不大,说明荧光单体的引入对荧光纳米微球的粒径基本没有影响。

2.3 形貌表征

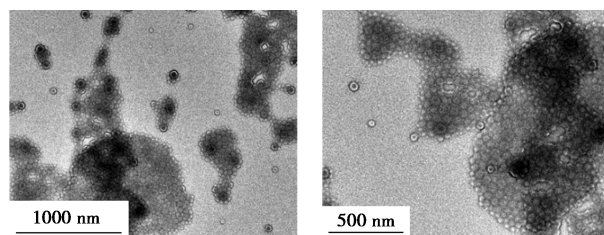
利用 SEM 和 TEM 观察荧光纳米微球颗粒大小和微观形态,结果如图 4、图 5 所示。



(a) 15 000 倍

(b) 20 000 倍

图 4 荧光纳米微球 SEM 图



(a) 2 700 倍

(b) 3 200 倍

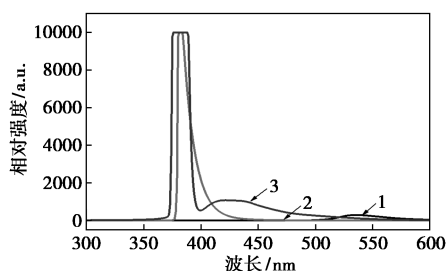
图 5 荧光纳米微球 TEM 图

由图 4、图 5 可知,通过反相乳液聚合法制备的荧光纳米微球样品的微观表面为球形,结构规整均匀,颗粒形状也比较光滑,且颗粒分布大部分以小粒径为主,极少数微球尺寸偏大,相对正常。表明荧光纳米微球中加入的各单体比例合理,保证了粒径的均一性。

2.4 荧光特性分析

2.4.1 光谱特征

荧光微球在紫外光照射下可以发出明显的蓝色荧光,空白微球无发光现象。荧光单体、荧光聚丙烯酰胺微球和空白微球的荧光光谱图如图 6 所示。



1—荧光单体;2—空白微球;3—荧光微球

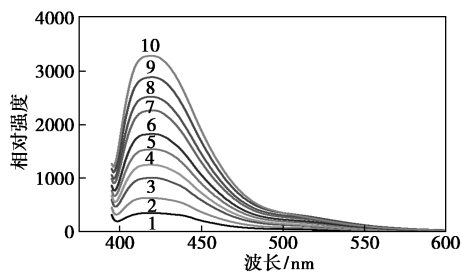
图 6 荧光微球、空白微球和荧光单体的荧光光谱

由图 6 可知,当采用 380 nm 的激发光激发时,荧光微球在 420 nm 出现较强荧光峰,荧光单体在 530 nm 左右出峰,荧光微球与荧光单体的发光波长具有明显不同,荧光微球水分散液的荧光光谱相对于荧光单体发生了蓝移,这是由于荧光单体参与共聚后以化学键的方式键合到微球中,使得荧光光谱发生了改变。与空白微球相比,荧光微球可作为有效的油田荧光示踪剂。

2.4.2 质量浓度的影响

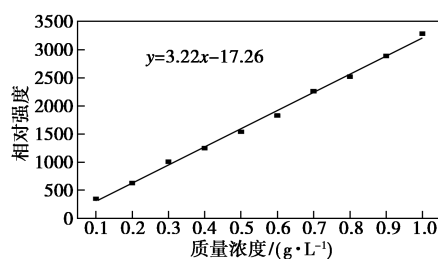
不同质量浓度荧光微球水分散液的荧光光谱图及荧光强度与浓度之间的关系如图 7 所示。

由图 7(a)可知,不同质量浓度的荧光微球均在 420 nm 左右处出现峰值。随着质量浓度的增加,荧



1—0.1 g/L;2—0.2 g/L;3—0.3 g/L;4—0.4 g/L;5—0.5 g/L;6—0.6 g/L;7—0.7 g/L;8—0.8 g/L;9—0.9 g/L;10—1.0 g/L

(a) 不同质量浓度荧光微球的荧光光谱图



(b) 荧光强度与质量浓度的关系

图 7 不同质量浓度荧光微球的荧光光谱图及荧光强度与质量浓度的关系

光微球的荧光强度也不断增强。由图 7(b)可知,经过线性拟合后,各质量浓度荧光微球在 420 nm 处的荧光强度与质量浓度之间呈线性关系。因此,可利用检测微球产出液的相对荧光强度来推算出荧光微球的质量浓度,不仅准确性高且操作方便,为油田采出液中荧光聚合物微球含量的测定提供了重要依据。

2.4.3 悬浮稳定性

不同停留时间下荧光微球的荧光强度如图 8 所示。

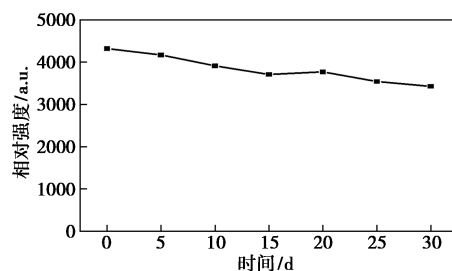


图 8 不同停留时间下荧光微球的荧光强度

由图 8 可知,随着停留时间的增长,荧光微球的荧光强度逐渐减弱,但在 30d 后仍显示出较高的荧光强度。这是因为功能单体 AMPS 在参与交联共聚过程中引入具有较强亲水性的磺酸基团,从而使荧光微球可以很好地悬浮在水溶液中,因此荧光微球具有良好的悬浮稳定性。

2.4.4 热稳定性

不同温度下荧光微球的相对荧光强度如图 9 所示。

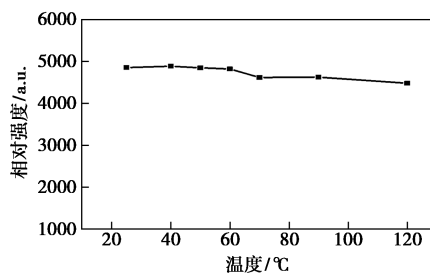


图 9 不同温度下荧光微球的荧光强度

由图 9 可知,随着温度的升高,荧光微球的荧光强度基本维持恒定,在 120℃ 下仍具有较高的荧光强度。这是由于微球共聚过程中引入了具有较强亲水性的耐温单体 AMPS,AMPS 作为一种长链烷基单体可与分子主链之间发生相互缠结,同时在 MBA 的交联作用下,形成空间网状构型,使得荧光微球具有稳固的分子结构。因此荧光微球能稳定分散在水中且具备良好的热稳定性。

2.4.5 耐酸性

pH 对荧光微球荧光强度的影响如图 10 所示。

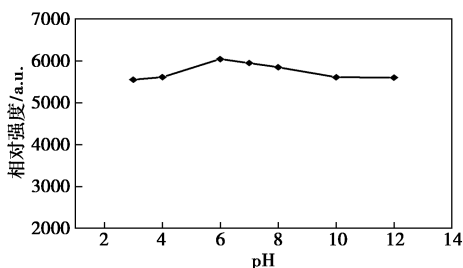


图 10 pH 对荧光微球荧光强度的影响

由图 10 可知,随着溶液 pH 的升高,荧光微球的荧光强度基本维持恒定,无论在酸性还是碱性条件下都具有优异的荧光性能,具备良好的耐酸性。

2.4.6 耐盐性

荧光微球在各类金属离子盐溶液中的荧光强度如表 1 所示。荧光微球在不同浓度盐溶液中的荧光强度图 11 所示。

表 1 荧光微球在各类金属盐溶液中的荧光强度

样品	金属离子盐溶液					空白样
	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ³⁺	
相对强度	4893	5167	4826	4729	5061	5207

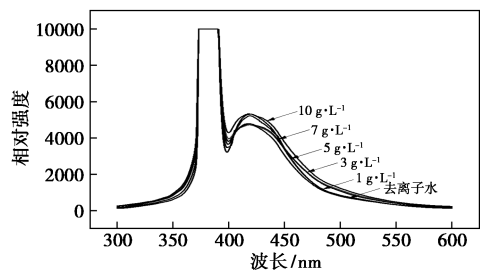


图 11 荧光微球在不同质量浓度盐溶液中的荧光强度

油田地下水中含有各种金属盐离子,水溶性的荧光单体会与其产生络合配位反应,进而影响荧光性能,导致荧光猝灭。由表 1、图 11 可知,Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Fe³⁺ 等金属盐离子对荧光微球的荧光性能基本没有干扰,且随盐溶液质量浓度的增大微球

荧光强度基本保持不变,在 10 g/L 的盐溶液中仍有优异的荧光特性。这是因为 AMPS 中的磺酸基团携带的负电荷与大多数金属阳离子可以相互作用,使得荧光微球能稳定分散于盐溶液中,具备良好的抗盐性。

2.4.7 配伍性

不同油田化学剂对荧光纳米微球荧光强度的影响如图 12 所示。

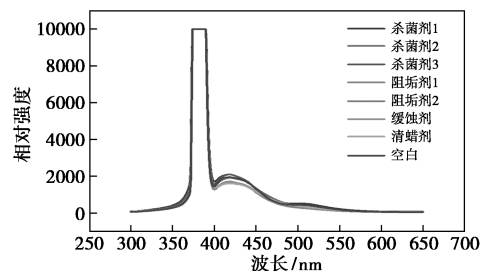
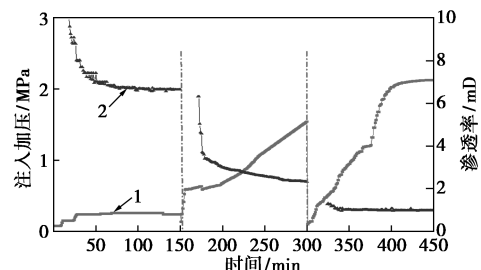


图 12 不同油田化学剂下荧光纳米微球的荧光强度

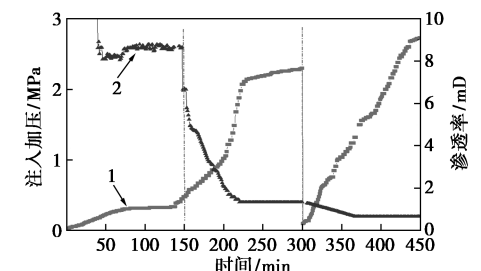
由图 12 可知,按照现场用量向荧光微球水分散液中加入杀菌剂、阻垢剂、缓蚀剂、清蜡剂后,对荧光微球的荧光强度几乎没有影响。同时将加入不同油田化学剂的荧光微球水分散液放置 72 h 后,观察并没有出现聚集沉积现象,表明该荧光纳米微球具有良好的配伍性。

2.5 封堵效果

荧光微球和空白微球的注入压力与渗透率的关系曲线如图 13 所示,根据岩心夹持器两端压差计算阻力系数、残余阻力系数和封堵率,结果如表 2 所示。



(a) 荧光微球



(b) 空白微球

1—注入压力;2—渗透率

图 13 荧光微球和空白微球渗透率测试

表 2 荧光微球和空白微球的调驱特征参数

样品	注入质量 分数/%	阻力系数 R_f	残余阻力 系数 R_{ff}	封堵率/ %
荧光微球	0.5	6.42	8.83	88.67
空白微球	0.5	6.76	8.03	87.55

由图 13 和表 2 可知,空白微球的后续注入水压力为 1.98 MPa,残余阻力系数为 8.03,封堵率为 87.55%;荧光微球的后续注入水压力为 2.12 MPa,残余阻力系数为 8.83,封堵率为 88.67%。荧光纳米微球与空白微球相比,在注入性和封堵效果上相差不多,仍具有良好的封堵性能。表明荧光纳米微球具备荧光特性的同时仍保持着优异的调驱性能。将其应用在现场试验中,不仅可以有效实现油田调驱,而且利用注入荧光微球前的现场采出液配置不同质量浓度的荧光微球水分散液,测试荧光强度并建立微球质量浓度与相对荧光强度的标准曲线,对注入荧光微球后的现场采出液进行荧光检测,可准确计算出采出液中微球的质量浓度。

3 结论

(1) 以烯丙基荧光素为荧光单体、AMPS 为耐温耐盐性功能单体,采用反相微乳液聚合法与 AM 共聚合成了一种粒径在 74.86 nm 左右的油田用聚丙烯酰胺荧光纳米微球。其粒径分布均匀、形貌规整,具有优异的发光性能。

(2) 功能单体 AMPS 的引入使得该聚丙烯酰胺荧光纳米微球具有优异的耐温抗盐性能。考察荧光微球的悬浮稳定性和耐酸碱性能。结果表明,微球在 120℃ 高温、pH 在 3~12 范围内、矿化度为 10 000 mg/L 以及含金属离子的水溶液中仍具有优异的荧光特性和配伍性。解决了普通的油田示踪剂热稳定性差和抗金属盐离子干扰能力差的问题。且该荧光微球分散水溶液的荧光强度与微球质量浓度间呈现正比例线性关系。可有效解决采出液中微球含量计算问题。

(3) 聚丙烯酰胺荧光纳米微球与普通聚丙烯酰胺微球相比,具有同样优异的注入性和封堵效果,注入量为 0.5% 时封堵率可达 88.67%。将其应用于现场试验中不仅可以作为油田荧光示踪剂使用,还可以有效实现调驱,在油田的开采中具有较好的应用前景。

参考文献

- [1] Yao C J, Lei G L, Li L, *et al.* Selectivity of pore-scale elastic microspheres as a novel profile control and oil displacement agent [J]. *Energy & Fuels*, 2012, 26(8): 5092-5101.
- [2] Stephen G O, Jennifer C M, Chemical and isotopic tracers of the contribution of microbial gas in Devonian organic-rich shales and reservoir sandstones, northern Appalachian Basin [J]. *Applied Geochemistry*, 2010, 25(3): 456-471.
- [3] 吴义春, 高博, 侯信, 等. 功能性聚丙烯酰胺类微球的制备及应用 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2008, (6): 13-17.
- [4] 曹康丽, 史铁钧, 翟林峰, 等. 乙酸乙酯/乙醇混合溶液中分散聚合制备单分散亚微米级聚丙烯酰胺微球 [J]. *高等学校化学学报*, 2007, (1): 193-198.
- [5] Hua Z, Lin M Q, Guo J R, *et al.* Study on plugging performance of cross-linked polymer microspheres with reservoir pores [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, 105: 70-75.
- [6] 宋昭杰, 侯军刚, 赖小娟, 等. 新型互穿网络微球调驱剂的制备与性能评价 [J]. *现代化工*, 2022, 42(4): 173-176, 181.
- [7] 李妍, 侯吉瑞, 王香增, 等. 在线调驱复合体系评价及其长距离运移特征 [J]. *油田化学*, 2019, 36(4): 693-699.
- [8] 杜荣荣, 刘祥. 反相微乳液聚合制备聚丙烯酰胺类聚合物微球的研究进展 [J]. *化工进展*, 2015, 34(8): 3065-3074.
- [9] 顾菁华, 吴益锋. 低渗油田注水用荧光示踪剂评价及优选 [J]. *清洗世界*, 2019, 35(10): 17-18.
- [10] 康万利, 周博博, 杨红斌, 等. 油田调驱用聚合物微球的研究进展 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2020, 36(9): 173-180.
- [11] 马国锐, 李丹丹, 高仰刚, 等. 荧光聚合物微球示踪剂的合成与性能 [J]. *石油化工*, 2018, 47(5): 468-473.
- [12] 胡雷雷, 康万利, 季岩峰, 等. 丙烯酰氧基聚丙烯酰胺荧光微球的制备及性能 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2015, 31(10): 170-174.
- [13] Yang H B, Hu L L, Chen C, *et al.* Synthesis and plugging behavior of fluorescent polymer microspheres as a kind of conformance control agent in reservoirs [J]. *RSC Advances*, 2018, 8: 10478-10488.
- [14] 刘清浩, 郭金春, 冷嘉鹏, 等. 一步法制备羧基聚苯乙烯共聚荧光微球及其表征 [J]. *化工新型材料*, 2016, 44(1): 98-100.
- [15] 康万利, 胡雷雷, 杨润梅, 等. 含 AMPS 聚丙烯酰胺荧光微球制备及其性能研究 [J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(5): 212-215.
- [16] Brousmiche D W, Serin J M, Fréchet J M J, *et al.* Fluorescence resonance energy transfer in a novel two-photon absorbing system [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2003, 125(6): 1448-1449.
- [17] 国家能源局. SY/T 5862—2020, 驱油用聚合物技术要求 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2020-10-23.
- [18] 吕金龙, 王楠, 夏欢, 等. 高温高渗油藏堵水剂封堵效果实验研究 [J]. *当代化工*, 2019, 48(7): 1399-1404. ■