

文章编号:1000-4092(2022)02-281-07

纳米微球在岩石矿物表面的静态吸附规律*

姜旭^{1,2},陈军斌^{1,2},张狄杰³,曹毅^{1,2},孙晨^{1,2}

(1. 西安石油大学石油工程学院,陕西 西安 710065;2. 陕西省油气井及储层渗流与岩石力学重点实验室,陕西 西安 710065;3. 中国石油青海油田勘探事业部,甘肃 敦煌 736202)

摘要:纳米微球调驱技术已被广泛应用于低渗透油藏开发过程。为开展纳米微球在岩石矿物表面的吸附作用机理研究,需定量表征矿物种类对微球在其表面吸附量的影响。首先,运用淀粉-碘化镉法标定纳米微球乳液的浓度,进而分别实现了微球在单组分矿物表面和多组分矿物表面吸附量的测定。随后,在所测单组分矿物表面的微球吸附量基础上按照岩石矿物的相对含量进行加权叠加,得到多组分矿物表面微球吸附量的预测值。结果表明,纳米微球在不同矿物表面的静态吸附量差异较大。黏土矿物对微球的吸附能力普遍强于非黏土矿物。对微球吸附能力最强的为高岭石,比吸附能力最弱的石英强14.75倍。微球在钾长石表面的吸附量变化值分别是在钠长石和石英表面的1.96倍和8.42倍。对于多组分矿物表面的微球吸附量,加权叠加方法预测值与实验测定值的相对误差在3%以内。基于纳米微球在孔隙通道运移时的固液界面吸附现象,分析认为孔隙壁面上的黏土矿物强化了微球的吸附作用,有利于改变孔隙半径,实现在不完全封堵条件下的部分液流转向。

关键词:纳米微球;黏土矿物;静态吸附量;液流转向

文献标识码:A DOI:10.19346/j.cnki.1000-4092.2022.02.016

中图分类号:TE357.46

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



微球调驱技术在低渗透油藏开发过程中得到广泛应用^[1]。目前,微球调驱机理的研究主要聚焦于微球粒径与孔喉匹配理论^[2-3],对其解释多集中于微球对孔隙的封堵作用扩大注入水波及体积^[4]。JCP-1纳米微球因其尺寸小、分散性好、弹性强、易达地层深部,在深部调驱现场应用中的效果显著^[5-6],并得到粒径越小,调驱效果越好的规律性认识^[7-8]。其类似产品的矿场试验结果与该认识具有一致性,这与微球-孔喉匹配理论存在一定程度的矛盾。张金元^[9]、赵文景^[10]认为小粒径微球在岩石孔隙中滞留引起阻力效应,进而实现部分液流转向,从而有利于微球调驱。现场应用中亟需明确JCP-1

纳米微球在岩石矿物表面的吸附规律,指导微球在注采液中的定量检测和浓度设计^[11]。这对下一步开展纳米微球在地层孔隙壁面的吸附、运移规律及调驱机理研究至关重要。

本文拟采用淀粉-碘化镉法实现JCP-1纳米微球的浓度标定^[12-13]。在此基础上,量化研究JCP-1纳米微球在7种单组分矿物表面的静态吸附规律。然后,沿两种不同测量路径进行多组分矿物表面的微球吸附量测定。(1)通过实验直接测定微球在多组分矿物表面的吸附量;(2)依据微球在7种单组分矿物表面的吸附量,参照岩石矿物相对含量进行加权叠加,间接获得多组分矿物表面的微球吸附量。

* 收稿日期:2021-12-16;修回日期:2022-03-01。

基金项目:陕西省自然科学基金面上项目“纳米聚合物微球在孔喉内壁附着沉积机理及运移分流机制”(项目编号2021JM-408),陕西省博士后基金一等资助“不同介质在致密油藏基质中对原油的排驱机理及数值模拟研究”(项目编号2018BSHYDZZ53),西安石油大学研究生创新与实践能力的培养项目(项目编号YCS19213075)。

作者简介:姜旭(1996—),男,西安石油大学油气田开发工程专业在读硕士研究生(2019—),从事低渗透油藏提高采收率研究,通讯地址:710065 陕西省西安市雁塔区电子二路东段18号西安石油大学石油工程学院,E-mail:jiang-zi-xu@qq.com。陈军斌(1963—),男,教授,博士生导师,本文通讯联系人,从事渗流力学及油气特种增产技术研究工作,通讯地址:710065 陕西省西安市雁塔区电子二路东段18号西安石油大学石油工程学院,E-mail:chenjbxu@126.com。

最后,对上述两种测量路径所得结果进行对比验证,评价第2条测量路径的可靠性。重点研究岩石矿物种类对微球在岩石矿物表面静态吸附量的影响,评价不同岩石矿物对该型微球的吸附能力,对进一步研究纳米微球在孔喉内壁附着沉积机理及运移分流机制具有重要意义。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

JCP-1 纳米微球,产品标注粒径为 100 nm,主要成分为丙烯酰胺(AM)、2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸(AMPS)、司盘 80 和吐温 40 等非离子型表面活性剂、白油、交联剂 *N,N*-亚甲基双丙烯酰胺、偶氮二异丁腈(AIBN),取自长庆油田;三水合醋酸钠、十八水合硫酸铝,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;淀粉-碘化镉标准液,厦门海标科技有限公司;饱和溴水,天津市大茂化学试剂厂;甲酸钠,分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;氯化钙、氯化钠,分析纯,沈阳市新化试剂厂;高岭石,2.5 μm (6000 目),榆林蒲百高岭石有限责任公司;蒙脱石,9 μm (1500 目),灵寿县恒昌矿产品加工厂;绿泥石,10 μm (1250 目),海城赫泰粉体科技有限公司;伊利石,18 μm (800 目),任县华康非金属矿产品加工厂;钠长石、钾长石,44 μm (325 目),灵寿县泓耀矿产品加工厂;石英,44 μm ,灵寿县盛泰矿产品加工厂;模拟地层水,矿化度 14 707 mg/L,pH 值 7.31,离子组成(单位 mg/L)为: K^+ 2643、 Na^+ 2711、 Ca^{2+} 241、 Mg^{2+} 42、 Ba^{2+} 55、 Sr^{2+} 61、 HCO_3^- 313、 Cl^- 8641。

UV-3600 型紫外分光光度计,日本岛津公司;KQ-250E 型超声波清洗器,昆山舒美超声波清洗器厂;SLJ-10000 型高速离心机,南通华兴石油仪器有限公司;pH818 型 pH 值检测仪,温度量程 0~60 $^{\circ}\text{C}$,希玛仪表集团有限公司。

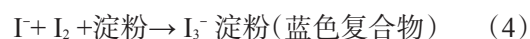
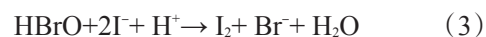
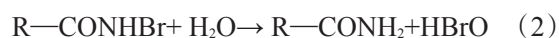
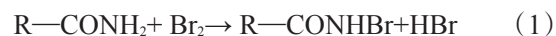
1.2 实验原理与方法

1.2.1 实验原理

(1) 淀粉-碘化镉法

用淀粉-碘化镉法测定微球浓度的原理为霍夫曼重排的第一步反应。溴与酰胺基作用生成 *N*-溴代酰胺。该化合物水解产生次溴酸,相互间保持平衡,次溴酸能定量地将碘离子氧化成碘单质。因此,即使酰胺基在低浓度时,仍能以淀粉-碘化物形

式进行有效测定。反应式如下:



过量的溴可用甲酸钠还原,生成的淀粉碘化物这种具有特征蓝色的复合物在特定波长附近有特征吸收。

(2) 静态吸附量计算公式

微球吸附量的测定过程本质上是微球乳液在其与岩石矿物组成的体系中发生吸附与沉降,即微球吸附于岩石矿物表面并随矿物的沉降而沉降,使上部悬浮体中微球数量减少,从而可以计算吸附量^[14]。在此过程中,若同时发生微球的自身沉降将导致吸附量测定误差。因而,需要确保分散于上部悬浮体中的微球在整个测试过程中不发生沉降。本实验中所用的 JCP-1 纳米微球乳液属于单分散乳液,粒径分布集中于 100 nm 左右,且体系透明、流动性好。在 100 g(100 倍的重力加速度)的离心加速度下持续离心 5 min,不出现分层现象。可以认为 JCP-1 纳米微球不发生自身沉降,对吸附量测定结果的影响有限,可保证实验所测得静态吸附量的精确性。由式(5)计算微球在矿物表面的静态吸附量(Γ)。

$$\Gamma = \frac{(c_0 - c)V}{m \times 1000} \quad (5)$$

其中, c_0 、 c —微球乳液吸附前后的质量浓度,mg/L; V —纳米微球乳液的总体积,mL; m —岩石矿物的总质量,g。

1.2.2 实验方法

淀粉-碘化镉法可实现微球乳液中聚丙烯酰胺及其衍生物含量的测定。通过混合体系内微球吸附前后的含量差异可测得岩石矿物表面的静态吸附量,进而实现微球在矿物表面吸附能力的定量化表征。

实验过程中首先需筛选出缓冲液的最佳 pH 值、待测液的最佳测试波长。然后,测量给定浓度微球乳液的吸光度,根据朗伯比尔定律绘制微球乳液浓度-吸光度标准曲线^[15],最后用分光光度计测量矿物-微球充分吸附后稀释液的吸光度,比照微球乳液浓度-吸光度标准曲线便可得出相应浓度。

将获得的浓度值代入式(5),可得到微球在不同岩石矿物表面的静态吸附量。

1.3 实验步骤

1.3.1 最佳测试波长的优选

(1)在 50 mL 容量瓶中依次加入 5 mL 醋酸钠缓冲溶液(pH 值为 4)、25 mL JCP-1 微球系列标准液中的某一浓度标准液、5 mL 蒸馏水,3 者混合均匀后,加入 1 mL 饱和溴水,超声分散 10 min 后加入 3 mL 甲酸钠溶液(由 10 g 甲酸钠溶于 1000 mL 蒸馏水配制而成),再超声分散 10 min 后加入 5 mL 淀粉-碘化镉溶液,蒸馏水稀释至刻度线。(2)将步骤(1)中配制好的微球乳液体系恒温(45 °C)静置 60 s 后,采用分光光度计测量不同波长(范围 450~700 nm)、不同质量浓度(20~80 mg/L)JCP-1 纳米微球乳液的吸光度,绘制吸光度-波长曲线,优选最佳测试波长。

1.3.2 缓冲液 pH 值的优选

(1)醋酸钠缓冲溶液的配制。称取 3 份 25 g 的三水合醋酸钠,分别溶于 800 mL 蒸馏水中,然后各自加入 0.5 g 水合硫酸铝,再用醋酸分别调节 pH 值至 3.0、4.0、5.0,分别稀释到 1000 mL 备用。(2)在 50 mL 容量瓶中依次加入 5 mL 缓冲溶液、25 mL JCP-1 微球系列标准液(10~40 mg/L)中的某一浓度标准液、5 mL 蒸馏水,混合均匀后,加入 1 mL 饱和溴水。超声分散 10 min 后加入 3 mL 甲酸钠溶液,再超声分散 10 min 后加入 5 mL 淀粉-碘化镉溶液,用蒸馏水稀释到刻度线。(3)45 °C 下静置 60 s 后,用分光光度计测量在最佳测试波长(580 nm)附近不同浓度 JCP-1 纳米微球体系的吸光度,并记录。(4)测量缓冲液 pH 值分别为 3.0、4.0、5.0 时的吸光度值。

1.3.3 微球乳液浓度-吸光度标准曲线的绘制

配制 100 mg/L JCP-1 微球标准液,陈化 24 h 后稀释成 5~120 mg/L 的 JCP-1 微球系列标准液(质量浓度间隔为 5 mg/L)。在 1.3.1 节中优选出的最佳测试波长处测量不同质量浓度(5~120 mg/L)JCP-1 微球系列标准液的吸光度值,缓冲液 pH 值为优选值、温度 45 °C。根据所得数据绘制浓度-吸光度标准曲线,通过拟合得出浓度-吸光度关系式。

1.3.4 微球在岩石矿物表面静态吸附量的测定

(1)按照不同组合方式将 25 mL 不同质量浓度(200~3000 mg/L)的 JCP-1 纳米微球体系与 6 g 不同的岩石矿物组合(高岭石、蒙脱石、伊利石、绿泥

石、石英、钠长石、钾长石)充分混合,在水浴恒温 45 °C(模拟地层温度)下超声分散 10 min,使微球与固相矿物细颗粒充分吸附达到平衡。(2)用高速离心机在 4000 r/min 进行固液分离约 30 min,多次取上清液累计至 25 mL,测定分离后剩余的微球浓度。(3)在 50 mL 容量瓶中依次加入 5 mL 缓冲溶液、25 mL 充分吸附并进行固液分离后的上清液体系、5 mL 蒸馏水,混合均匀后,加入 1 mL 饱和溴水。超声分散 10 min 后加入 3 mL 甲酸钠溶液,超声分散 10 min 后加入 5 mL 淀粉-碘化镉溶液,用蒸馏水稀释至刻度线,制得待测液。(4)45 °C 下静置 10 min 后,用分光光度计在实验确定的最佳波长处以蒸馏水作为参比液测量吸光度,对应于浓度-吸光度标准曲线查找其浓度值。(5)按式(5)计算出静态吸附量。

2 结果与讨论

2.1 测试波长的优选

由图 1 可见,不同浓度 JCP-1 纳米微球乳液的吸光度-波长曲线呈现较为一致的变化特征,吸光度均在波长 580 nm 附近达到极大值。在 580 nm 处,微球乳液浓度越高吸光度越大,说明微球乳液浓度和吸光度间存在对应关系。具有光学活性的基团未发生构型变化,在 JCP-1 微球乳液浓度的测定过程中发生了霍夫曼重排效应。经过一系列吸光度测量实验发现,吸光度测量峰值越凸出,相对误差越小,呈现出更高的稳定性、准确性。因此,最终确定 580 nm 为后续实验中的最佳测试波长。

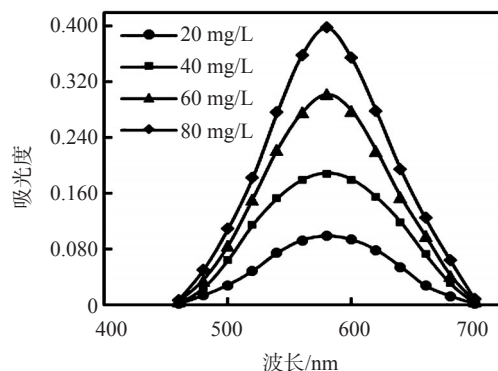


图 1 不同浓度 JCP-1 纳米微球溶液的吸光度-波长曲线

2.2 缓冲溶液 pH 值的优选

缓冲液 pH 值对 JCP-1 纳米微球乳液吸光度的影响见图 2。在不同浓度的 JCP-1 纳米微球体系中

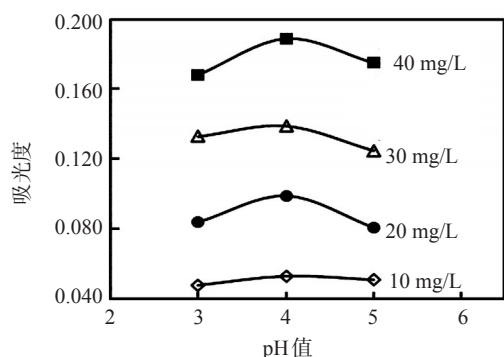


图2 缓冲液pH值对JCP-1纳米微球乳液吸光度的影响

加入pH值为3.0、4.0、5.0的缓冲溶液后,吸光度变化幅度不大。对比3种pH值下微球乳液的吸光度可见,在缓冲液pH值为4.0时,不同浓度JCP-1纳米微球乳液的吸光度值均最大。因此确定缓冲溶液的最佳pH值为4.0,以确保获得稳定性强、准确性高的吸光度测量值。

2.3 标准曲线的绘制与误差检验

0~120 mg/L加量范围内JCP-1纳米微球乳液的浓度-吸光度标准曲线和关系式见图3。该曲线线性稳定,拟合结果良好。

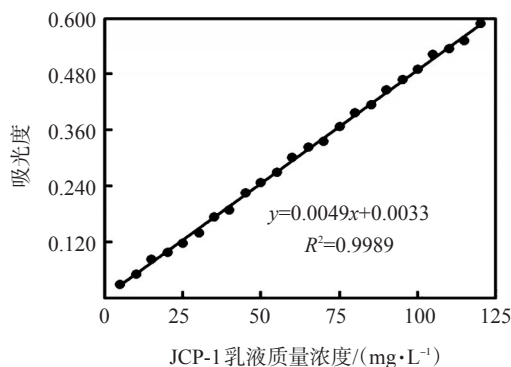


图3 JCP-1纳米微球乳液的浓度-吸光度标准曲线

所绘标准曲线对浓度标定的适用性取决于其测量精度是否在误差允许范围内。故需进行误差检验。首先,配制非标准溶液,稀释至浓度-吸光度标准曲线对应的浓度范围(0~120 mg/L)内,以蒸馏水作为参比液,测其吸光度。将浓度-吸光度关系式逆向计算出的吸光度预期值与不同初始浓度、不同稀释倍数下的吸光度实测值进行比较,计算相对误差,结果如表1所示。结果表明,浓度-吸光度标准曲线上各点的相对误差均在3%以内,因而该浓度-吸光度标准曲线适用于0~120 mg/L JCP-1微球乳液浓度的标定。

表1 纳米微球乳液的浓度-吸光度标准曲线适用性检验表

JCP-1微球质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	稀释倍数	稀释后的JCP-1微球质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	吸光度预期值	吸光度实测值	相对误差/%
300	15	20	0.099	0.101	2.02
300	6	50	0.247	0.241	2.43
300	3	100	0.492	0.503	2.24
500	25	20	0.099	0.098	1.01
500	10	50	0.247	0.251	1.62
500	5	100	0.492	0.487	1.02

2.4 单组分矿物表面微球吸附量的测定

从200 mg/L开始到3000 mg/L为止,选取不同初始浓度的JCP-1纳米微球乳液,按照JCP-1纳米微球与岩石矿物静态吸附量测定步骤,测定微球在单组分矿物表面的静态吸附量。由于该实验中微球初始浓度偏高,导致最终待测的上清液体系中微球的浓度远超出浓度-吸光度标准曲线的标定范围。实验发现,当将待测液稀释30倍时,可确保待测液浓度落在标准曲线的浓度标定范围内。根据实验所测数据绘制的微球静态吸附量随微球乳液初始浓度的变化曲线见图4。结果表明,JCP-1纳米微球在单组分矿物表面的静态吸附量随其初始浓度的增加呈现出不同的增长趋势,且吸附量差异较大。

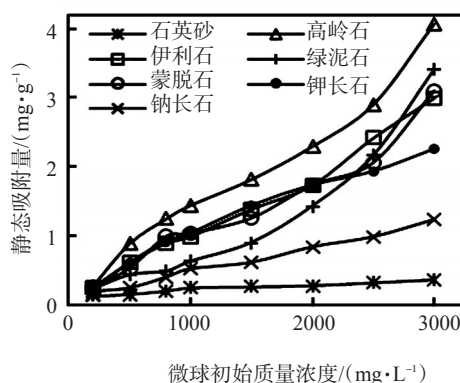


图4 JCP-1纳米微球在单组分矿物表面的吸附量随初始浓度的变化

为具体描述JCP-1微球在7种单组分矿物表面的静态吸附规律,根据图4中的数据计算得到由微球初始质量浓度变化(200~3000 mg/L)引起的吸附量变化如下。在黏土矿物中,由微球初始浓度变化引起的吸附量变化值(单位mg/g)由大到小分别为:高岭石(3.78)>绿泥石(3.17)>蒙脱石(2.84)>伊

利石(2.74)。而在非黏土矿物中,由微球浓度变化引起的吸附量变化值(单位 mg/g)由大到小分别为:钾长石(2.02) > 钠长石(1.03) > 石英(0.24)。微球在黏土矿物表面的吸附量变化值均大于其在非黏土矿物表面的吸附量变化值。所用的 7 种岩石矿物中,对微球吸附能力最强的是高岭石,吸附能力最弱的是石英,上述两种矿物表面的微球吸附量变化值相差 14.75 倍。若以初始浓度 500 mg/L 的等浓度间隔来比较,微球在黏土矿物表面的静态吸附增量随微球初始浓度的递增而增大,而在非黏土矿物表面的吸附增量相对稳定。微球在黏土矿物表面的吸附量递增速度整体上大于其在非黏土矿物表面的吸附量递增速度。钾长石表面的微球吸附量变化值分别是钠长石和石英表面微球吸附量变化值的 1.96 倍和 8.42 倍。钾长石对该型微球表现出较另两种非黏土矿物(钠长石、石英)更显著的吸附能力。

2.5 多组分矿物表面微球吸附量的预测与验证

前期调研了典型油田各岩石矿物的相对含量^[16]:矿物组合 A 来源于姬塬油田^[17],矿物组合 B 来源于合水油田^[18],矿物组合 C 来源于华庆油田^[17]。依照各油田的矿物相对含量制成多组分矿物组合(表 2),在不同初始浓度下测定微球分别在矿物组合 A、B、C 表面的静态吸附量。

表 2 不同相对含量的多组分矿物组合

矿物	矿物组合 A		矿物组合 B		矿物组合 C	
	相对含量/ %	矿物质量/ g	相对含量/ %	矿物质量/ g	相对含量/ %	矿物质量/ g
高岭石	48.87	2.932	14.44	0.866	1.52	0.091
伊利石	21.84	1.310	57.34	3.440	65.69	3.941
绿泥石	29.29	1.757	28.22	1.693	32.79	1.967

这里采用两种测量路径来实现对多组分矿物表面的微球吸附量的测定。一是基于微球在多组分矿物表面的吸附量测定实验直接得到的实测值。二是基于微球在单组分矿物表面的吸附量,将不同矿物组合中的矿物相对含量作为权重进行加权计算,进而预测出微球在不同矿物组合表面的吸附量。简言之,不同相对含量的矿物组合表面的吸附量预测值是微球在单组分矿物表面的吸附量叠加,见式(6)。

$$\Gamma_p = \sum_{i=1}^n \Gamma_n \cdot \alpha_n \quad (6)$$

其中, Γ_p —吸附量预测值,mg/g; Γ_n —单组分矿物对微球的吸附量实测值,mg/g; α_n —各岩石矿物的相对含量,%。

由表 3 可见,预测值与实测值相近,说明不同类型矿物间的相互作用对微球在矿物表面吸附量的影响有限,且不同矿物组合对微球的吸附量近似等于各类矿物单独对微球吸附量的叠加。各类矿物对 JCP-1 纳米微球的吸附能力是由矿物自身单独发挥作用,与各矿物间的相互作用几乎无关。据此,在已知单组分矿物表面微球吸附量和矿物相对含量的情况下,可以直接预测微球在多组分矿物表面的吸附量,进而大大简化测定步骤。运用这一叠加预测方法,针对 JCP-1 纳米微球在岩石矿物表面吸附量的预测值与实测值的误差可控制在 3% 以内。

表 3 微球吸附量预测值与实测值的对比

初始质量 浓度/ (mg·L ⁻¹)	矿物组合 A 对微球的吸 附量/ (mg·g ⁻¹)		误差/ %	矿物组合 B 对微球的吸 附量/ (mg·g ⁻¹)		误差/ %	矿物组合 C 对微球的吸 附量/ (mg·g ⁻¹)		误差/ %
	预测 值	实测 值		预测 值	实测 值		预测 值	实测 值	
	1000	1.106	1.113	0.59	0.954	0.960	0.63	0.879	0.884
2000	1.918	1.963	2.27	1.728	1.734	0.32	1.642	1.657	0.91
3000	3.636	3.554	2.29	3.262	3.273	0.33	3.142	3.094	1.57

2.6 微球在岩石矿物表面吸附的差异分析

纳米微球在岩石矿物表面的静态吸附是微球分子与岩石矿物及其表面临近区域内分子间的几种作用力共同产生的吸附作用效果。各作用力对吸附作用效果的贡献程度也因矿物种类、微球类型、pH 值和微球浓度等因素的不同而不同。主要作用力包括静电力、共价键力、微球和岩石界面附近矿物间的氢键或非极性键力、微球分子间的范德华力等。实验结果表明,黏土矿物对 JCP-1 纳米微球的吸附能力强于非黏土矿物对其的吸附能力。

黏土矿物一般为层状硅酸盐结构。因结构疏松,比表面积大,所以吸附能力强。氢键、静电力与化学键合作用是纳米微球在黏土矿物表面的主要吸附机理。其中,氢键通常形成于纳米微球体系中“氨基基团”和黏土矿物表面的“自由羟基”之间。黏土矿物表面带负电荷,微球体系中的阴离子与黏

土矿物之间存在静电斥力。要使二者发生吸附则需克服两者之间的静电斥力。由于JCP-1纳米微球乳液中存在盐类电解质,可通过电中和作用产生吸附力,从而平衡阴离子与黏土矿物间的静电斥力,使斥力小于吸附力达到提高吸附量的目的。同时,电中和作用还可使黏土矿物表面结构发生变化,旋转半径减小,单位比表面积上的微球吸附量增加。因而,微球调驱研究中考虑黏土矿物吸附因素是必要的。

而非黏土矿物与JCP-1纳米微球之间以物理吸附为主。长石和石英是硅酸盐造岩矿物,岩石颗粒比表面积较小,提供的吸附点位较少,物理吸附能力也较弱。与长石相比,石英颗粒结构更为致密。因而在同等条件下,长石表面的微球吸附量大于石英表面的吸附量。石英吸附量最小、吸附能力也最弱。钾长石和钠长石在同一粒径(44 μm)下的比表面积(S_s)分别为5.746、3.381 m^2/g ,钾长石具有较大的比表面积,可提供更多的吸附接触点。因此,钾长石对微球的吸附能力强于钠长石。

以上分析表明:不同岩石矿物对纳米微球的吸附能力差异很大。黏土矿物具有较强的吸附能力,存在于岩石孔隙表面,加剧了微球运移过程中的固液界面吸附。当黏土矿物含量相对较高时,矿物在孔隙内壁的吸附势必引起孔隙内部结构的改变,尤其是对孔隙半径的改变。由于大孔径的孔隙渗流阻力远小于细小孔隙的渗流阻力,使得微球容易进入大孔径的孔隙中。在流体与岩石孔隙壁面相互作用力的作用下,微球吸附于大孔径的孔隙壁面,使孔隙半径减小,从而实现在不完全封堵条件下的部分液流转向。

3 结论

在JCP-1纳米微球浓度的测定过程中需以吸光度标定浓度,最佳测试波长为580 nm,缓冲液的最佳pH值为4。浓度-吸光度标准曲线上各点的相对误差均在3%以内,适用于0~120 mg/L JCP-1微球乳液浓度的标定。

随微球初始浓度的增加,微球在不同矿物表面的静态吸附量差异较大,且呈现出不同的增长趋势。微球在黏土矿物表面的吸附量变化值均大于其在非黏土矿物表面的吸附量变化值。实验所用7

种岩石矿物中,对JCP-1纳米微球吸附能力最强的为高岭石,吸附能力最弱的为石英。钾长石对该微球表现出较另两种非黏土矿物(钠长石、石英)更显著的吸附能力。

基于两种测量路径测定不同矿物组合表面的微球吸附量,分别获得实测值和预测值,二者误差仅在3%以内。既证实了叠加方法的可靠性,又说明不同类型矿物间的相互作用对微球在矿物表面吸附量的影响有限。将叠加方法运用于JCP-1纳米微球在多组分矿物表面吸附量的测定,可大大简化吸附量测定步骤。

JCP-1纳米微球在岩石矿物表面的静态吸附是微球分子与岩石矿物及其表面临近区域内分子间的几种作用力共同产生的吸附作用效果。微球在孔隙通道运移时存在固液界面吸附现象,微球因吸附作用而滞留于孔隙壁面可改变孔隙半径,从而有利于实现不完全封堵条件下的部分液流转向。

参考文献:

- [1] 赵华强, 彭勃. 聚合物微球在油田深部调驱技术中的研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(S2): 75-80.
- [2] 蒲万芬, 赵帅, 王亮亮, 等. 聚合物微球粒径与喉道匹配性研究[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(4): 100-105.
- [3] 孙焕泉, 曹绪龙, 李宗阳, 等. 基于储层孔喉匹配的非均相复合驱技术研究及矿场实践: 以胜坨油田一区沙二段1-3砂组聚合物驱后单元为例[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(5): 53-61.
- [4] 易萍, 周广卿, 王石头, 等. 纳米聚合物微球调驱封堵机理及现场试验[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2018, 33(3): 86-91.
- [5] ZHU W Y, LOU Y, LIU Q P, et al. Rheological modeling of dispersion system of nano/microsized polymer particles considering swelling behavior [J]. J Dispersion Sci Technol, 2016, 37(3): 407-414.
- [6] ZHOU W J, LU Y C, GAO C N, et al. Effects of flow pattern and pore size on immiscible continuous three-phase displacement [J]. Energ Fuel, 2013, 27(2): 717-724.
- [7] 赵文景, 赵鹏云, 杨海恩, 等. 基于毛细管模型的纳米聚合物微球深部调驱机理[J]. 断块油气田, 2020, 27(3): 355-359.
- [8] 赵文景, 陈军斌, 刘振, 等. 纳微米聚合物球调驱特性及封堵的几何约束[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2019, 34(6): 81-87.
- [9] 张金元. 低渗透油藏聚合物微球调驱机理及实验研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2019: 49-54.
- [10] 赵文景. 纳米聚合物微球动态运移机理研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2020: 56-60.

- [11] 薛芳芳, 马波, 初立国, 等. 注采液中纳米级聚合物微球的检测方法[J]. 油田化学, 2020, 37(1): 165-168.
- [12] 刘希, 伊卓, 胡晓娜, 等. 高温油藏聚合物驱采出液中聚丙烯酰胺浓度的测定[J]. 石油化工, 2021, 50(8): 783-787.
- [13] 刘立华, 刘会媛, 贾静娴, 等. 紫外分光光度法对聚丙烯类树脂吸附 Pb^{2+} 的效果研究[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2020, 53(6): 92-96.
- [14] 姜阿姣, 宋兆杰, 程婷婷, 等. 纳米颗粒在岩石表面吸附-脱附规律研究[J]. 石油科学通报, 2020, 5(1): 93-100.
- [15] 符扬洋, 邹剑, 张璐, 等. 渤海 SZ 36-1 油田注聚井聚合物吸附规律[J]. 油田化学, 2019, 36(4): 672-676.
- [16] 任大忠, 周兆华, 梁睿翔, 等. 致密砂岩气藏黏土矿物特征及其对储层性质的影响: 以鄂尔多斯盆地苏里格气田为例[J]. 岩性油气藏, 2019, 31(4): 42-53.
- [17] 任大忠, 孙卫, 屈雪峰, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长 6 储层成岩作用特征及孔隙度致密演化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(8): 2706-2714.
- [18] 曹江骏, 杨友运, 陈朝兵, 等. 致密砂岩储层骨架砂体构型特征: 以鄂尔多斯盆地合水地区延长组长 6 段砂体为例[J]. 沉积学报, 2019, 37(6): 1105-1116.

Static Adsorption of Nano-spheres on Mineral Surface in Liquid Phase

JIANG Xu^{1,2}, CHEN Junbin^{1,2}, ZHANG Dijie³, CAO Yi^{1,2}, SUN Chen^{1,2}

(1. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, P R of China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Seepage and Rock Mechanics of Oil and Gas Wells and Reservoirs, Xi'an, Shaanxi 710065, P R of China; 3. Qinghai Oilfield Exploration Department of CNPC, Dunhuang, Gansu 736202, P R of China)

Abstract: Nanospheres have been widely used in low permeability reservoir development. In order to study the adsorption mechanism of nano-spheres on rock and mineral surfaces, it is necessary to quantitatively characterize the influence of mineral types on the adsorption capacity of nano-spheres on rock and mineral surfaces. Firstly, starch-cadmium iodide method was used to calibrate the concentration of emulsion, and then the adsorption capacity of microspheres on the surface of single component mineral and multi-component mineral was determined. Then, based on the measured microsphere adsorption capacity on the surface of single component mineral, the predicted value of microsphere adsorption capacity on the surface of multi-component mineral was obtained by weighted superposition according to the relative content of rock minerals. The results showed that the static adsorption capacity of nanospheres on different mineral surfaces varied greatly. The adsorption capacity of clay mineral to microspheres was generally stronger than that of non-clay mineral. Kaolinite had the strongest adsorption capacity for microspheres, which was 14.75 times stronger than quartz. The adsorption capacity of microspheres on the surface of potash feldspar was 1.96 times and 8.42 times stronger than that on the surface of albite and quartz, respectively. For the adsorption capacity of microspheres on the surface of multi-component mineral, the relative error between predicted value and measured value by weighted superposition method was within 3%. Based on the adsorption phenomenon at solid-liquid interface during the migration of nano-spheres in pore channels, the analysis showed that the clay mineral on the pore wall could strengthen the adsorption of nano-spheres, which was beneficial to change the pore radius and realized partial liquid flow direction under the condition of incomplete plugging.

Keywords: nanosphere; clay mineral; static adsorption capacity; diversion of liquid flow