文章编号:1000-4092(2020)01-133-05

2-D智能纳米黑卡微观驱油机理可视化实验*

吴伟鹏[1,2],侯吉瑞[1,2],屈　鸣[1,2],闻宇晨[1,2],梁　拓[1,2],杨景斌[1,2],赵梦丹[1,2]

(1.中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院,北京102249;2.中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室,北京102249)

摘要:由中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院自主研发的2-D智能纳米黑卡是一种具有尺寸小、比表面积大等优势的片状纳米材料(尺寸为80×60×1.2 nm,比表面积约57 m^2/g)。本文使用不同孔隙度、渗透率的二维可视化模型,进行2-D智能纳米黑卡微观驱替可视化实验。通过分析岩心渗透率、颗粒浓度和注入速率等因素对驱油效果的影响,研究在微观条件下该纳米材料的微观渗流机理和运移规律。研究表明,该材料具有优异的亲水亲油平衡性,能够改变岩石表面润湿性,在两相界面产生楔形渗透压,形成微观回旋流,相对于以往如SiO_2等球型纳米颗粒,具有更大的表面接触性。2-D智能纳米黑卡可有效驱替地层剩余油,剥离微小孔喉壁面上的油膜,扩大低渗层波及体积,提高原油采收率。图38参22

关键词:2-D智能纳米黑卡;二维模型驱油;润湿反转;微观回旋流;楔形渗透

中图分类号:TE357　　**文献标识码**:A　　DOI:10.19346/j.cnki.1000-4092.2020.01.023

0　前言

随着近几十年来油气田的大规模开采,越来越多的提高采收率工艺被不断开发优化并投入现场使用,其中,以聚合物驱和复合化学驱为主的提高原油采收率技术应用最广[1-5]。但是,长期的化学驱开发以及多轮次调剖造成油田含水率升高,使得采收率提高的难度越来越大[6-8],此外,复合驱化学剂的吸附也会直接影响驱油效率。基于此,中国石油经济技术研究院(ETRI)石油科技研究所创新与发展研究团队提出未来十年最具潜力的15项油气勘探开发新技术,其中明确提出了纳米智能化学驱油技术有望成为提高采收率颠覆性战略阶梯技术,该技术广泛适用于各种类型油藏,具有广阔的前景应用[9-10]。

纳米技术是新兴发展起来的前沿科学技术,纳米材料的尺寸一般在1～100 nm,纳米材料独特的小尺寸、高比表面、量子效应等特点,使纳米材料在很多领域都具有广泛的应用前景[11-12]。早在20世纪60年代中期纳米材料就被应用于驱油微乳液中,随着后来纳米黏弹性表面活性剂技术、微-纳米颗粒封堵技术、纳米降压增注技术、MD膜技术及聚硅纳米增注技术等在国内外的相继发展,相比传统的化学驱油提高原油采收率技术,改性的纳米粒子分散体系用于化学驱油具有良好的增产、增注效果[13-18]。张宗勋、王维等[19-20]研究发现,纳米SiO_2材料的亲水性较高,通过吸附在岩石壁面可使岩石发生润湿反转为中性润湿或者水湿[21-22],提高驱油效率;但其颗粒状的形态无法实现纳米材料的最大功效。中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院自主研发了适用于油田开发的微观形状类似于卡片的片状纳米材料——2-D智能纳米黑卡。为了能够更好地研究2-D智能纳米黑卡在微观下的驱油效果,采用CT扫描与激光刻蚀技术制作了不同孔隙度和渗透率的二维可视化油藏物理模型,通过不同渗透率的模型实验研究在驱替过程中纳米级黑卡的运

* 收稿日期:2019-05-21;修回日期:2019-05-28。

作者简介:吴伟鹏(1990-),男,中国石油大学(北京)油气田开发工程专业在读博士研究生(2019-),主要从事2D纳米片(黑卡)的研究,E-mail:6926443900@qq.com。屈鸣(1988-),男,中国石油大学(北京) 油气田开发工程专业在读博士研究生(2016-),主要从事泡沫驱、2D纳米片(黑卡)的研究,通讯地址:102249 北京市昌平区中国石油大学(北京),E-mail:1074329732@qq.com。

移规律和微观渗流机理，实现了对实际储层中孔、缝、洞分布的精准刻画，为该纳米材料在矿场试验中的应用提供了有效的理论参考价值。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

2-D智能纳米黑卡，由中国石油大学（北京）非常规油气科学技术研究院自主研发，实物见图1，SEM图像如图2所示，尺寸在80×60×1.2 nm左右，比表面积为57 m^2/g；实验用模拟油由液体石蜡和煤油按一定比例配制而成，密度0.845 g/cm^3，黏度25 mPa·s（20℃），并使用苏丹红将模拟油染成红色以便于观察可视化实验效果。实验用水为大庆油田模拟地层水，矿化度为7129.06 mg/L，主要离子质量浓度（单位mg/L）：Ca^{2+} 14.85、Mg^{2+} 7.48、K^{+}+Na^{+} 2428.01、CO_3^{2-} 197.66、HCO_3^{-} 2160.08、Cl^{-} 2266.88、SO_4^{2-} 54.10。

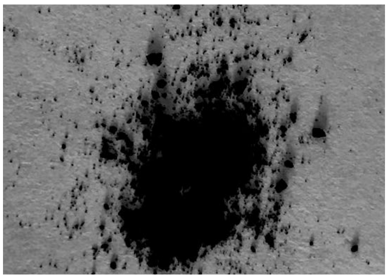


图1 2-D智能纳米黑卡实物图

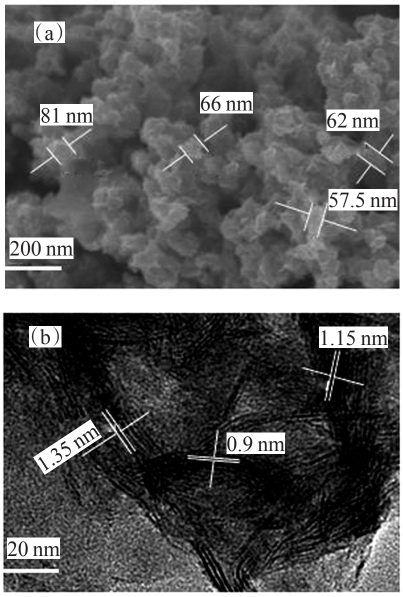


图2 2-D智能纳米黑卡SEM图像

渗透率分别为25×10^{-3} μm^2和2500×10^{-3} μm^2的两组不同渗透率模型（外观尺寸：50 mm×30 mm×10 mm）；3个中间容器分别装有黑卡溶液、模拟地层水和实验用模拟油，实验用微量注射泵1台，ZEISS光学显微镜（德国Carl Zeiss公司）以及图像采集系统（图3）。

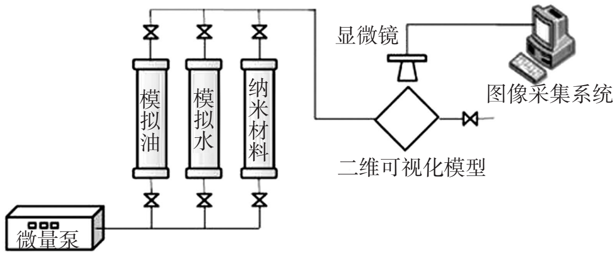


图3 微观可视化驱油实验流程

1.2 实验方法

使用2-D智能纳米黑卡体系开展二维可视化物理模型驱油实验，通过ZIESS光学显微镜良好的微观辨识性以及后端图像采集系统，将驱油过程实时传输到计算机上，观察并拍摄2-D智能纳米黑卡体系在二维可视化物理模型内的运移全过程，采用动态分析法评价渗透率、注入速度、颗粒浓度对2-D智能纳米黑卡体系驱油效果的影响，并研究分析2-D智能纳米黑卡体系的微观驱油机理。

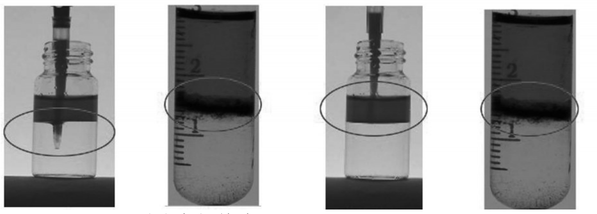
实验步骤如下：①将二维可视化物理模型抽真空后，饱和模拟油（经苏丹红染色的模拟油）并在20℃恒温条件下放置2 h；②按照实验方案，以50 μL/min（或500 μL/min）的恒定速率注入大庆油田模拟地层水，直至二维可视化微观物理模型中不再有模拟油被水驱替出来，整个微观驱油过程采用ZEISS光学显微镜及图像采集系统记录；③以50 μL/min（或500 μL/min）的恒定速率注入质量分数0.001%（或0.005%、0.01%）的2-D智能纳米黑卡体系，直至采出液中不再含油时停止；④清洗二维可视化微观物理模型。

2 结果与讨论

2.1 亲水亲油效果分析

将2-D智能纳米黑卡体系加入水油/水混合液中，通过仔细观察2-D智能纳米黑卡在油相水相不同界面的注入效果，分析2-D智能纳米黑卡对不同界面性能的影响，实验结果如图4所示。由图4可

知,无论2-D智能纳米黑卡从油相注入还是从水相注入,最终该体系都会吸附在油水界面上,改善油水界面性质。这是由于2-D智能纳米黑卡在油水界面间呈水包油微乳液形态,使得油水间原来的凹液面经水包油式微乳液填充,降低油水界面张力,转变成为平液面,2-D智能纳米黑卡亲水亲油基会在油水界面与油相水相形成稳定状态。



(a)水相滴入　(b)水相终态　(c)油相滴入　(d)油相终态

图4　2-D智能纳米黑卡亲水亲油性

2.2　岩心渗透率对驱油效果的影响

为了研究岩心渗透率对2-D智能纳米黑卡体系在二维可视化微观物理模型实验中驱油效果的影响,对渗透率为25×10^{-3}、2500×10^{-3} μm^{2}的两种模型水驱后以50 μL/min的注入速率注入质量分数为0.005%的2-D智能纳米黑卡体系,微观驱油实验结果如图5、6所示。由图5、图6可知,在相同浓度、相同注入速率下,2-D智能纳米黑卡体系对渗透率为25×10^{-3} μm^{2}的二维可视化微观物理模型的驱油效果高于它对渗透率为2500×10^{-3} μm^{2}的二维可视化微观物理模型的驱油效果。其原因是:与高渗透性岩心相比低渗岩心具有更高的比表面积,在低渗岩心中纳米片与油的接触时间更长,可以从孔隙表面驱替更多的油,提高原油采收率。因此,选取25×10^{-3}μm^{2}的低渗微观物理模型更有助于观察2-D智能纳米黑卡体系在多孔介质中的流动特征和驱油效果。

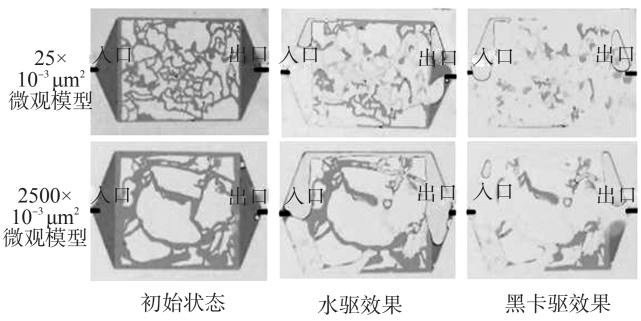


图5　不同渗透率微观驱油模拟实验

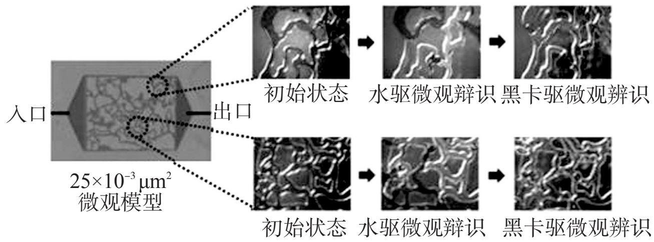


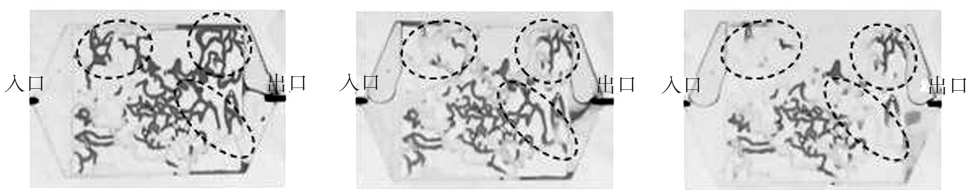
图6　二维可视化驱替实验局部放大图
(渗透率25×10^{-3} μm^2)

2.3　体系质量分数对驱油效果的影响

不同质量分数(0.001%、0.005%、0.01%)的2-D智能纳米黑卡体系在渗透率为25×10^{-3} μm^{2}的二维可视化微观物理模型的驱油效果见图7,注入速率为50 μL/min。由图7可见,2-D智能纳米黑卡体系的质量分数越高,驱油效果越好,模型中的剩余油量越少。质量分数为0.001%的2-D智能纳米黑卡体系对模型的波及系数明显低于质量分数为0.005%为黑卡体系的,而质量分数为0.005%和0.01%的黑卡体系的波及系数却并无明显差异。考虑到经济因素,2-D智能纳米黑卡体系的质量分数以0.005%为最佳。

2.4　注入速率对驱油效果的影响

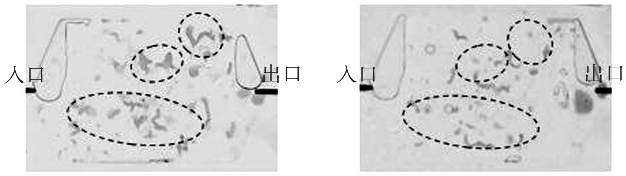
分别以50、500 μL/min的注入速率向渗透率为25×10^{-3} μm^{2}的二维可视化微观物理模型注入质量分数为0.005%的2-D智能纳米黑卡体系,不同注入速率下黑卡体系的驱油效果见图8。随着注入速度的提高,在渗透率为25×10^{-3} μm^{2}的二维可视化微观物理模型中的剩余油量减少,原油采收率得到显著提



(a)0.001%　(b)0.005%　(c)0.01%

图7　25×10^{-3} μm^{2}的模型中不同质量分数的2-D智能纳米黑卡体系的驱油效果

高。但是当注入速度过快时无法观察分析模型中2-D智能纳米黑卡体系的流动特征和驱油机理。



（a）50 μL/min （b）500 μL/min

图8 25×10^{-3} μm²模型中不同注入速率下2-D智能纳米黑卡体系的驱油效果

2.5 2-D智能纳米黑卡体系微观驱油机理分析

2.5.1 润湿性改变

在二维可视化微观物理模型的水驱过程中出现了黏性指进效应，使得油/水界面产生了沿着壁面的高界面张力油膜，导致水驱油能达到的效果有限。在水驱后紧接着注入质量分数为0.005%的2-D智能纳米黑卡体系，2-D智能纳米黑卡体系将岩石表面的润湿性从油润湿（润湿角约为120°）改变为中性湿润（润湿角为91°），使得油膜脱离壁面，然后在纳米流体的回旋式流动效应下聚并剩余油滴，形成近活塞驱替，从而将脱离出的油驱替出来（图9）。

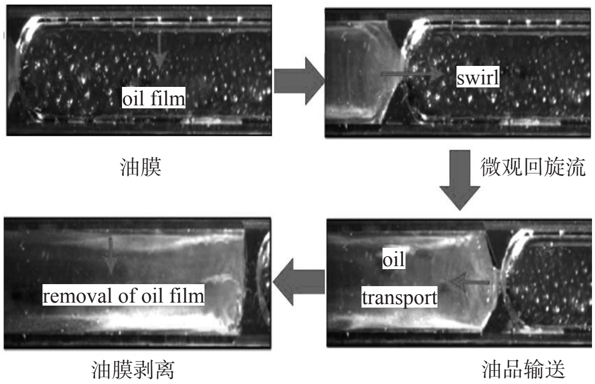


图9 油润湿转为中型润湿的变化过程

2.5.2 楔形渗透

在驱替实验过程中，由于纳米片和油的相互作用在两相界面上产生了渗透压，促使油形成楔形形状，同时渗透压在该界面处产生额外的压力，从而使纳米片流体在楔形区域中向前运动，然后在大量液体的压力驱动下，纳米流体能够沿着表面扩散从而使微观模型喉部的油滴脱落。另外纳米片的中性湿性性质，也可以降低模型喉部的毛细管力，有利于驱替剩余油（图10）。

2.5.3 微观回旋流

当纳米片接触到油相表面时，两相界面产生表面张力梯度，从而形成微观回旋式流动，导致油和纳米片溶液界面附近呈现对流的流动现象。这种微观回旋式流动使纳米片与剩余油滴表面持续接触，对油滴的运移产生“润滑效应”，类似于给油滴安装“滑轮”，提高原油的流动能力，有利于将附近的微小剩余油滴聚集在一起，然后在对流作用的驱动下将其采出。因此2-D智能纳米黑卡体系的微观回旋式流动有利于提高驱替效率（图11）。

3 结论

2-D智能纳米黑卡材料与球形颗粒的纳米材料相比，具有更大的比表面积。2-D智能纳米黑卡体

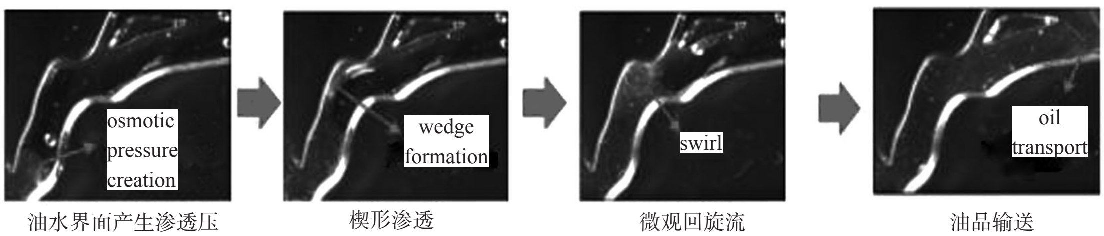


图10 楔形渗透过程

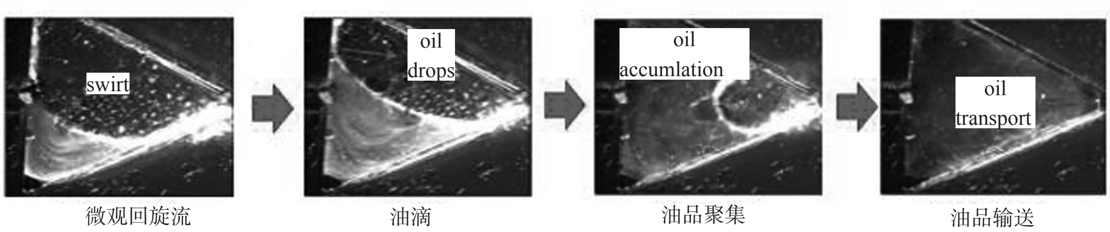


图11 微观回旋流过程

系在较低加量(质量分数0.05%)下就能有效扩大低渗层波及体积，均匀扩散至各个孔喉，提高低渗储层原油采出程度，充分发挥其智能找油的功效。

2-D智能纳米黑卡体系具有亲水亲油两亲性，能够将岩石表面的润湿性从油润湿改变为中性湿润，从而使得油膜脱离壁面；由于纳米片受流体外力驱使，使得岩石壁面上产生了油水两相渗透压，形成楔形渗透，两相界面产生界面张力梯度，促使微观回旋流形成，进而扩大波及面积，提高驱替效率。

参考文献：

[1] 张莉. 胜利油田聚合物驱油技术经济潜力分析[J]. 石油勘探与开发，2007(1)：79–82.

[2] 侯吉瑞，吴凡，马云飞，等. 靶向输送三元复合体系提高采收率技术研究[J]. 油田化学，2017，34(3)：524–527.

[3] 于龙，李亚军，宫厚健，等. 支化预交联凝胶颗粒驱油机理可视化实验研究[J]. 断块油气田，2014，21(5)：656–659.

[4] 刘卫东 罗莉涛，廖广志，等. 聚合物-表面活性剂二元驱提高采收率机理实验[J]. 石油勘探与开发，2017，44(4)：600–607.

[5] 刘翎. 表面活性剂-聚合物二元复合驱油体系性能研究[J]. 石油化工应用，2018，37(6)：13–20.

[6] 吴文祥，刘万林，张栋. 复合体系特性及驱油效果研究[J]. 科学技术与程，2013，13(2)：472–475.

[7] 彭昊，何宏，符静宇，等. 多层非均质油藏水驱油跨度界限实验研究[J]. 中国科技论文，2018，13(21)：2486–2492.

[8] 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.

[9] 彭宝亮，罗健辉，王平美，等. 纳米材料在油田堵水调剖中的应用进展[J]. 油田化学，2016，33(3)：552–556.

[10] 刘嘉，杨金华，李晓光，等. 未来十年最具潜力的15项油气勘探开发技术[DB]. 2018国内外石油科技发展与展望，2018-11-23.

[11] 周勤. 低渗透油藏纳米乳液降压增注研究[J]. 油气藏评价与开发，2016，6(06)：61–66.

[12] 袁俊秀，王康. 纳米乳液驱油体系性能评价及驱油机理分析[J]. 能源化工，2016，37(03)：47–49.

[13] 郭小哲，韩文磊，牛慧珍，等. 基于专利分析的纳米采油技术发展趋势[J].石油科技论坛，2017，36(3)：32–40.

[14] 侯军伟，廖先燕，郭文建. 纳米材料应用于化学驱提高石油采收率研究[J]. 化工新型材料，2014，42(12)：233–235.

[15] 刘培松，陶晓贺，李小红，等. 水基纳米聚硅在低渗油藏中的降压增注研究[J]. 油田化学，2017，34(4)：604–609.

[16] TU Y F, HUANG, S Y, SANG J P, et al. Preparation of Fe-doped TiO_2 nanotube arrays and their photocatalytic activities under visible light[J]. Mater Res Bul，2010，45(2)：224–229.

[17] 陈炘钧. 纳米科技创新与知识图谱[M]. 科学出版社，2015：1–3

[18] 郑佳.基于专利分析的纳米技术创新能力研究[J]. 情报杂志，2012，31(11)：113–117.

[19] 张宗勋. 纳米颗粒驱油实验技术研究[D]. 北京：中国石油大学(北京)，2016.

[20] 王维. 驱油用纳米二氧化硅的制备及改性研究[D]. 青岛：中国石油大学(华东)，2015.

[21] ALANSSARI S, BARIFCANI A, WANG S, et al. Wettability alteration of oil-wet carbonate by silica nanofluid[J]. J Colloid Interface Sci，2016，461：435–442

[22] 武俊文，贾文峰，雷群，等. 改性纳米粒子在有机硅类消泡剂中的应用[J]. 油田化学，2016，33(4)：585–588.

Microscopic Flooding Mechanism Experiment Visualization of 2-D Smart Black Nano-card

WU Weipeng[1,2], HOU Jirui[1,2], QU Ming[1,2], WEN Yuchen[1,2], LIANG Tuo[1,2], YANG Jinbin[1,2], ZHAO Mengdan[1,2]

(*1. The Unconventional Oil and Gas Institute, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, P R of China; 2. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, P R of China*)

Abstract: The 2-D smart black nano-card is a new nanosheet material which is independently developed by the institute of enhanced oil recovery from china university of Petroleum (Beijing). The nano-card has the advantages of small size (80×60×1.2 nm) and large specific surface area (57 m^2/g). In this paper, 2-D smart black nano-card displacement experiments was carried out with different porosity and permeability two-dimensional visualized models. Through analyzing the influence factors such as core permeability, particle concentration and injection rate on oil displacement effect, the migration rules and microscopic seepage mechanism of the 2-D smart black nano-card system were studied. The experiment results revealed that the nano-card had advantage hydrophile-lipophile balance (HLB). The wettability of the rock surface could be changed, the wedge osmotic pressure could be generated by the two-phase interface, and the microscopic cyclotron could be formed. Besides that, nano-card had enormous surface contact compared with previous spherical nanoparticles such as SiO_2. Therefore, nano-card could effectively displace the remaining oil from the formation, peel off the oil film on the throat wall on micro pores, expand the sweep volume of the low permeability layer, and thus, improve the degree of the crude oil recovery.

Keywords: *2-D smart black nano-card; oil flooding of two-dimensional model; wetting inversion; microscopic cyclotron flow; wedge penetration*