

# 碳酸盐岩油藏岩石润湿性评价实验研究

曹立迎<sup>1</sup>, 孙建芳<sup>1</sup>, 徐婷<sup>1</sup>, 曹丽丽<sup>1</sup>, 蔺高敏<sup>2</sup>

(1.中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083; 2.中国石化胜利油田分公司胜利采油厂,山东东营 257051)

**摘要:**为了明确碳酸盐岩油藏岩石的润湿性及其影响因素,利用自吸驱替方法定量测定了碳酸盐岩岩心充分老化后的润湿性和渗吸采出程度以及蒸汽驱后岩心润湿性的变化,并通过相对渗透率法对碳酸盐岩储层岩石润湿性进行定性研究。结果表明:碳酸盐岩岩心呈亲油或者弱亲油的润湿特征,油藏渗流阻力较大,自吸采出程度低。岩石矿物组成及原油组分是润湿性的主要影响因素;而高温蒸汽驱后碳酸盐岩岩心润湿指数变小,润湿性由强亲油—亲油向弱亲油方向转变。热采条件下岩心润湿性得以改善,共渗区含油饱和度由20.5%提高到37.0%,较之冷采提高了1.8倍;热采通过降粘、润湿改善等作用机理,驱油效率由29.7%提高至59.0%。润湿性的改变有利于提高油藏的采出程度。

**关键词:**碳酸盐岩 润湿性 渗吸 采出程度 自吸驱替方法 影响因素

**中图分类号:** TE311

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2014)04-0089-04

润湿性是在油藏条件下油和水与储层岩石间的相互作用,决定着油藏流体在岩石孔道内的微观分布和原始分布状态,在油田开发中对原油的采出程度起着决定性作用<sup>[1]</sup>。因此在提高采收率技术中将储层润湿性作为一个重要物性参数予以考虑。岩石矿物组成、孔隙结构、流体对岩石的润湿顺序、原油组分、温度、盐水化学性质等都可能影响储层润湿性。越来越多的研究表明,既有亲油油藏也有亲水油藏;很多实验结果也表明,储层岩石的润湿性可在很大范围内变化<sup>[2]</sup>。Holbrook等测定了油藏开发过程中润湿性指数的变化,认为该指数随开采过程中饱和度的变化而变化<sup>[3-4]</sup>。吴素英研究了润湿性随油藏含水率的变化及对开发效果的影响,指出随着含水率增大,储层润湿性由弱亲水向亲水转变<sup>[5]</sup>。Civan等研究了温度对岩石润湿性的影响,发现提高温度对石英和方解石润湿性的影响并不相同<sup>[6-8]</sup>。阳晓燕等研究了蒸汽驱对储层润湿性的影响,认为高温注蒸汽使得储层润湿性向亲水方向发展<sup>[9]</sup>。

目前测定储层润湿性的方法很多,根据实验需求的不同,可以分为定量和定性2种方法。定性方法主要包括残余油饱和度法、电阻率法、相对渗透率法等;定量方法主要是自吸驱替(Amott)方法,通常是针对天然岩心进行测定。笔者从定性和定量2

方面入手,通过Amott方法测定天然岩心的润湿指数,进而定量确定碳酸盐岩岩心的润湿指数;通过油水相渗实验对岩石润湿性进行定性分析;2种方法的实验结果可以相互验证。

## 1 润湿性评价和渗吸实验

### 1.1 实验岩心及流体

叙利亚O油田为典型的低渗透孔隙型碳酸盐岩稠油油藏。实验所用流体包括精炼油和O油田Sh油藏O-1井、O-4井的油样(地面原油粘度分别为550和2000 mPa·s),精炼油不含胶质、沥青质等极性物质。地层水为质量浓度为6000 mg/L的氯化钾溶液。实验选用5块碳酸盐岩岩心,为方便实验结果的对比分析,选取3块胜利油区某油田砂岩岩心同步进行润湿性实验,具体岩心参数见表1,其中S-1, S-2, S-3的气测渗透率分别与O-4, O-1-1, O-1-2的相近,选择渗透率相近的岩心便于不同类型岩心渗吸实验结果进行对比。

### 1.2 实验仪器

实验仪器主要包括:岩样油(水)驱替系统、岩样抽空装置、恒温箱(最高温度不低于100℃,精度为±1℃)、离心机(离心产生的油水驱替压力大于等于1 MPa)、吸水仪(分度值为0.05 mL)、水浴锅等。

收稿日期:2014-05-12。

作者简介:曹立迎,男,工程师,硕士,从事稠油油藏开发方面的研究。联系电话:13811726918, E-mail: caoly.syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“裂缝-孔隙型碳酸盐岩稠油油藏开发关键技术”(2011ZX05031-002)。

表1 实验用岩心基本参数

岩心编号	岩心类型	长度/cm	直径/cm	气测渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
O-1-1*	碳酸盐岩	7.340	2.498	6.322
O-1-2*	碳酸盐岩	3.250	2.492	0.513
O-2	碳酸盐岩	4.045	2.490	114.023
O-3	碳酸盐岩	4.958	2.482	1.023
O-4*	碳酸盐岩	4.752	2.516	76.85
S-1*	砂岩	7.742	2.516	45.94
S-2*	砂岩	5.820	2.560	8.46
S-3*	砂岩	5.628	2.500	0.22

注: \*为参与渗吸实验结果对比的岩心。

### 1.3 实验原理及步骤

在毛管压力作用下,润湿流体具有自发吸入岩石孔隙中并驱替其中非润湿流体的特性。通过测量并比较油藏岩石在束缚水状态下岩心自吸排油量和岩心驱替排水量,可以判别储层岩石对油(水)的润湿性。实验步骤及润湿指数的计算参考SY/T 5153—2007<sup>[10]</sup>。在得到各岩心润湿指数后,根据润湿性评价标准(表2)判断各岩心的润湿性。

表2 Amott法润湿性评价标准

岩心润湿性	油湿指数	水湿指数	相对润湿指数
强亲油	0.8~1.0	0~0.2	-1.0~-0.7
亲油	0.7~0.8	0.2~0.3	-0.7~-0.3
弱亲油	0.6~0.7	0.3~0.4	-0.3~-0.1
中间润湿	中性	两指数相近	-0.1~0.1
弱亲水	0.3~0.4	0.6~0.7	0.1~0.3
亲水	0.2~0.3	0.7~0.8	0.3~0.7
强亲水	0~0.2	0.8~1.0	0.7~1.0

## 2 润湿性评价及渗吸实验结果分析

### 2.1 润湿性定量评价

在油藏温度(50℃)下,利用Amott方法测量了8块不同渗透率岩心的自吸排油量、驱替排油量、自吸排水量、驱替排水量,并计算得出润湿指数,实验所用流体为地层原油。实验结果(表3)表明:碳酸盐岩岩心相对润湿指数小于-0.3,呈明显的亲油特征;砂岩岩心相对润湿指数大于0.4,呈典型的亲水特征。

表3 岩心润湿性评价结果

岩心类型	岩心编号	自吸排油量/ mL	驱替排油量/ mL	自吸排水量/ mL	驱替排水量/ mL	水湿指数	油湿指数	相对润湿指数	润湿性
碳酸盐岩	O-3	0.03	0.4	0.1	0.14	0.07	0.42	-0.35	亲油
	O-1-1	0.04	0.4	0.2	0.12	0.09	0.63	-0.54	亲油
	O-2	0.08	0.75	0.25	0.05	0.1	0.83	-0.73	强亲油
	O-4	0.2	1.3	0.2	0.16	0.13	0.56	-0.43	亲油
	O-1-2	0.02	0.3	0.12	0.15	0.06	0.44	-0.38	亲油
砂岩	S-1	0.5	0.2	0.1	0.3	0.71	0.25	0.46	亲水
	S-2	0.49	0.17	0.08	0.17	0.74	0.32	0.42	亲水
	S-3	0.3	0.08	0.05	0.17	0.79	0.23	0.56	亲水

除相对润湿指数外,从岩石表面流体的分布特征同样可以看出不同类型岩石润湿性的差别。对比胜利油区某油田砂岩岩心和O油田碳酸盐岩岩心(图1)可以看出,原油在砂岩岩心表面呈球状分布,水相润湿角小于 $90^\circ$ ,呈水湿特征;原油在碳酸盐岩岩心表面呈铺展状态,油相润湿角小于 $90^\circ$ ,呈油湿

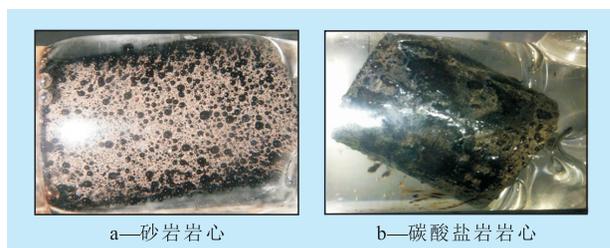


图1 不同类型岩心表面流体分布特征

特征。这与润湿指数计算结果相符。

### 2.2 渗吸实验结果分析

为了对比不同润湿性对岩石渗吸采出程度的影响,在8块岩心中选取渗透率相近的岩心(亲油、亲水岩心各3块)对其渗吸实验结果进行对比。从O油田碳酸盐岩岩心与胜利油区某油田砂岩岩心渗吸采出程度对比(图2)可以看出,在渗透率相近的情况下,砂岩岩心的渗吸采出程度普遍高于碳酸盐岩岩心;砂岩岩心渗吸采出程度最高达到17%,而碳酸盐岩岩心的最高仅达到6.5%。前者的渗吸速度也快,后者渗吸速度慢。岩心的润湿程度决定着渗吸最终采出程度和渗吸速度。

在亲水油藏中,束缚水主要是以水膜的形式吸

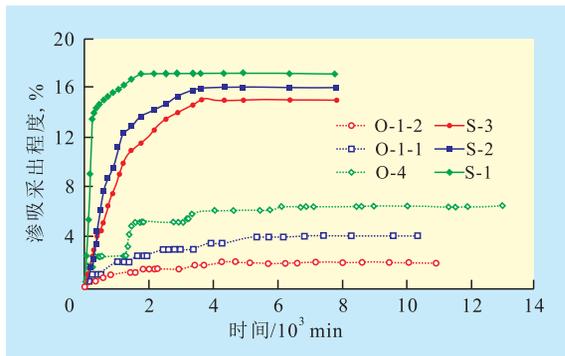


图2 O油田碳酸盐岩岩心与胜利油区某油田砂岩岩心渗吸采出程度对比

附在岩心孔壁上,原油则主要存在于较大的孔隙中以及孔隙的中间部位。在渗吸驱油过程中,水沿着岩石的表面推进,水膜变厚,把孔隙中的原油剥离,被注入水挤出的原油从大孔道排出,当大孔道中原油的排出速度与剥蚀速度相当时,采出程度达到最大。在亲油油藏中,束缚水主要以水珠的形式存在。水沿着大孔道中轴部位前进,原油随着水的排出而被携带出去,孔壁上的油膜可以沿岩石颗粒表面流动,原油残留在小孔道中。若多孔介质非均质性严重时,孔隙中的原油被优势通道中的水包围,这部分原油将形成成片的残余油。因此亲油岩心的采出程度要比亲水岩心的采出程度低。

### 3 润湿性影响因素

#### 3.1 岩石矿物组成

为对比不同类型岩石的矿物组成对其润湿性的影响,通过X衍射实验分析了O-1-1,O-4及S-3等3块岩心的矿物组成。结果表明,O油田碳酸盐岩岩心的主要矿物成分是方解石,含量大于70%,其为偏亲油矿物,而亲水矿物石英、长石等的含量不到10%;胜利油区某油田砂岩岩心的主要矿物组成是石英和长石,两者含量大于70%。砂岩岩石中亲水矿物含量较高,地层中的水容易吸附在岩石表面,使岩石具备亲水特征;碳酸盐岩岩石偏亲油矿物含量较高,容易造成原油中极性物质的吸附。

#### 3.2 原油组分

为测定原油组分对岩心润湿性的影响,将O-2岩心分别饱和在精炼油和地层原油中进行老化,老化不同时间后测定润湿指数。在精炼油中老化2和12 d的相对润湿指数分别为-0.16和-0.17,均表现为弱亲油;在地层原油中老化2和12 d的相对润湿指数分别为-0.27和-0.73,分别表示弱亲油和强亲

油。由此可见,精炼油老化对岩石润湿性无显著影响,而用地层原油老化后,储层岩石亲油性增强,且油润湿程度随老化时间的增加而增加。出现这种现象的原因是:地层原油中沥青质含量偏高,沥青质是原油中不溶于非极性小分子正构烷烃而溶于苯的物质,其基本结构是以稠环芳烃为核心并连接有环烷和烷基侧链的大分子,且含有一定的杂原子。沥青质是原油中相对分子质量最大、极性最强的非烃类组分。当沥青质与油藏岩石接触时,其极性端容易与岩石表面相互作用,使岩石表面的润湿性向亲油方向转变<sup>[11]</sup>。而精炼油中由于不含有极性组分,因此无论老化多长时间,对岩石的润湿性都没有影响。因此,原油组分中胶质、沥青质等原油极性组分的性质和含量是影响储层岩石润湿性的重要参数<sup>[12-17]</sup>。

#### 3.3 温度

测定高温条件下碳酸盐岩储层岩石润湿性的变化,可为优化油藏驱油方式提供理论依据。对比不同渗透率碳酸盐岩岩心蒸汽驱前后岩心润湿性(表4)可以看出,经过高温蒸汽驱后,岩心的相对润湿指数增大,润湿性由强亲油—亲油向弱亲油方向发展;渗透率较大的岩心相对润湿指数变化较大,即润湿性改变较大。出现这一现象的主要原因是:经过蒸汽驱及高温蒸汽浸泡后,吸附在岩心表面的活性物质受热及驱替作用脱离,导致岩心亲油性减弱,润湿性变为弱亲油。

表4 高温蒸汽驱前后碳酸盐岩岩心润湿性对比

岩心编号	相对润湿指数		润湿性		最终采出程度,%	
	蒸汽驱前	蒸汽驱后	蒸汽驱前	蒸汽驱后	蒸汽驱前	蒸汽驱后
O-3	-0.35	-0.22	亲油	弱亲油	1.80	4.26
O-1-1	-0.54	-0.28	亲油	弱亲油	4.00	5.63
O-2	-0.73	-0.21	强亲油	弱亲油	2.86	6.96

### 4 润湿性对油藏开发效果的影响

热采开发效果室内评价实验采用非稳态法测定了低渗透稠油油藏岩心在油藏条件下和150℃下的油、水相对渗透率,对比分析冷采与热采条件下相渗特征的差异性。基于对相渗曲线(图3)的分析可知:油藏温度(50℃)下等渗点含水饱和度小于50%,可以判断岩心润湿性为油湿;热采条件(150℃)下等渗点右移,岩心润湿性得以改善,这与

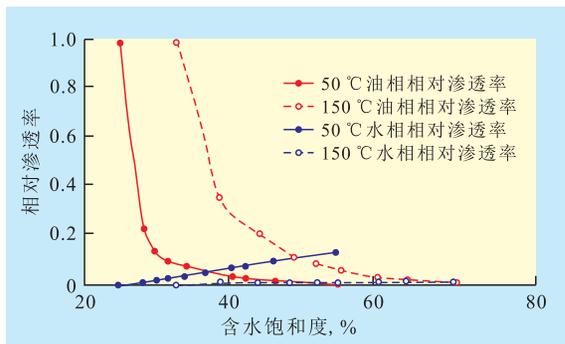


图3 O-3岩心油藏温度和高温下水相渗曲线对比

高温蒸汽驱后岩石润湿性改善的观点相吻合;共渗区含油饱和度由20.5%提高到37.0%,较之冷采提高了1.8倍,热采条件下可动用范围明显扩大;热采通过降粘、润湿改善等作用机理,驱油效率由29.7%提高至59.0%,提高近1倍。

由蒸汽驱前后自吸采出程度的变化(图4)可以看出,在高温润湿性改变的同时,由于毛管阻力减小,渗吸采出程度显著提高,达到最大采出程度的时间明显变短。润湿性的改变有利于提高油藏的采出程度。

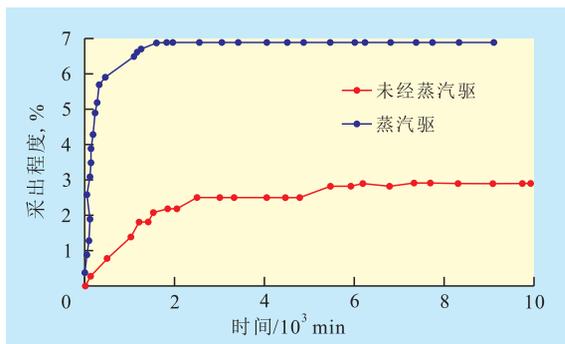


图4 O-2岩心蒸汽驱前后自吸采出程度对比

## 5 结论

叙利亚O油田碳酸盐岩储层岩心呈明显的亲油润湿特征。原油在岩心表面呈现铺散状态,油相润湿角小于 $90^\circ$ ,这有别于实验中普通砂岩储层岩心的亲水润湿性。岩心的润湿性决定着渗吸最终采出程度和渗吸速度,岩心的油润湿程度越高,渗吸程度越低,最终渗吸采出程度也越低。在储层条件、流体性质相近的情况下,碳酸盐岩油藏天然能量下采出程度比砂岩油藏要低。

岩石的矿物组成和原油中极性物质的存在是影响储层岩石润湿性的主要因素:亲水矿物(石英和长石等)含量越大,储层岩石亲水特性越明显;原

油中极性物质(胶质和沥青质等)的吸附使岩石润湿性向亲油方向发展。

热采条件下,碳酸盐岩油藏岩心相对润湿指数明显降低,而高温油水相渗中等渗点也明显右移,这说明高温可改变岩石的润湿性,改善油相渗流能力,提高油藏的驱油效率。

### 参考文献:

- [1] 刘中云,曾庆辉,唐周怀,等.润湿性对采收率及相对渗透率的影响[J].石油与天然气地质,2000,21(2):375-380.
- [2] 彭珏,康毅力.润湿性及其演变对油藏采收率的影响[J].油气地质与采收率,2008,15(1):104-106.
- [3] Holbrook O C, Bemard G G. Determination of wettability by dye adsorption[J]. Trans AME, 1958, (213): 261-264.
- [4] Schmid C. The wettability of petroleum rocks and results of experiments to study effects of variations in wettability of core samples [J]. Erdöl Kohle, 1964, 17(8): 605.
- [5] 吴素英. 胜坨油田二区沙二段8<sup>3</sup>层储层润湿性变化及对开发效果的影响[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(2): 72-74.
- [6] Civan Faruk, Wang Wei, Gupta Anuj. Effect of wettability and matrix to fracture transfer on the waterflooding in fractured reservoirs [R]. SPE 52197-MS, 1999.
- [7] Escrochi M, Nabipour M, Ayatollahi Sh. Wettability alteration at elevated temperatures: The consequences of asphaltene precipitation [R]. SPE 112428-MS, 1998.
- [8] Roosta A, Kerman, Escrochi M. Investigation the mechanism of thermally induced wettability alteration [R]. SPE 120354-MS, 2009.
- [9] 阳晓燕,杨胜来,李秀峦,等.蒸汽驱对储层润湿性的影响[J].油气地质与采收率,2012,19(5):87-89.
- [10] 曲岩涛,王建,李奋. SY/T 5153—2007油藏岩石润湿性测定方法[S].北京:石油工业出版社,2007.
- [11] 王业飞,王所良,徐怀民,等.沥青质与石英表面相互作用及润湿性改变机理[J].油气地质与采收率,2011,18(4):87-89.
- [12] 张方礼,刘其成,刘宝良,等.稠油开发实验技术与应用[M].北京:石油工业出版社,2007.
- [13] Anderson W G. Wettability literature survey-part 1: rock/oil/brine interactions and the effects of core handling on wettability [J]. JPT, 1986, 38(11): 1 246-1 265.
- [14] 吴志宏,牟伯中,王修林,等.油藏润湿性及其测定方法[J].油田化学,2011,18(1):90-96.
- [15] 姚凤英,姚同玉,李继山.油层润湿性反转的特点与影响因素[J].油气地质与采收率,2007,14(4):76-78.
- [16] 高楚桥,章成广,毛志强.润湿性对岩石电性的影响[J].地球物理学进展,1998,13(1):60-72.
- [17] 李素梅,张爱云,王铁冠.原油极性组分的吸附与储层润湿性及研究意义[J].地质科技情报,1998,17(4):65-69.