

# 中国致密油藏开发理论研究进展

朱维耀<sup>✉</sup>, 岳明, 刘昀枫, 刘凯, 宋智勇

北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083  
<sup>✉</sup>通信作者, E-mail: weiyao@sina.com

**摘要** 为保持国家能源安全,我国油气开发领域在常规油气藏维持产量进行剩余油挖潜的基础上,积极推进非常规油气资源的勘探与开发。致密油藏地质勘探资源储量高,但储层条件差,油水关系复杂制约着其大规模高效开发。虽然我国已经在低渗-超低渗油藏的开发中积累了大量的经验并取得了丰硕的成果,但致密油藏无论从开发规模还是理论研究都处于起步阶段,急需借鉴和开展适用于致密油藏的开发方法与渗流机理研究。本文首先概述了致密油藏的资源分布、地质特点与开发现状。在此基础上介绍了致密油藏开发方法并抽提了 4 类基本科学问题,围绕基本科学问题系统论述了相应的流动规律以及数学模型理论研究进展,并针对各问题提出了未来发展趋势,为促进我国致密油开发提供一定的指导意义。

**关键词** 致密油; 开发方式; 非线性; 多场耦合; 多尺度流动  
**分类号** TE34

## Research progress on tight oil exploration in China

ZHU Wei-yao<sup>✉</sup>, YUE Ming, LIU Yun-feng, LIU Kai, SONG Zhi-yong

School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China  
<sup>✉</sup>Corresponding author, E-mail: weiyao@sina.com

**ABSTRACT** The exploration and development of unconventional oil and gas become the hotspot in worldwide petroleum industry at present and in the future time. The unconventional resources are the succession and growth of conventional oil and gas production. Mineral resource investigations reveal that tight oil reservoirs in China contain highly geological and recoverable reserves, effective development of which is of great significance but restricted by poor reservoir physical properties and complex oil-water distribution. After decades of exploration and development, low and ultra-low permeability reservoirs have been successfully developed. However, development patterns and flow mechanisms suitable for tight oil are still insufficient, and the field application is far from mature yet. This study first summarized the resource distribution, geological characteristics, exploration, and development status of tight oil reservoirs in China. Then, development patterns and corresponding fundamental scientific issues of tight oil reservoirs were discussed. Corresponding nonlinear flow laws, mathematical flow models of multi-field and multiscale related to different exploitation patterns and scientific issues were summarized. Related study results of the authors were also introduced. Finally, a future development trend was proposed for each aspect. We hope that this study will provide some guiding to promote the tight oil exploration in China.

**KEY WORDS** tight oil; development pattern; nonlinear; multi-field coupling; multiscale flow

石油天然气已经成为影响我国经济建设和可持续发展的三大战略资源之一。目前我国石油对外依存度很高,据预测,到 2020 年我国将净进口石油

2.7 亿 t,对外依存度将超过 70%,面临严峻的石油安全问题。为此,加大致密油气开发理论和开采技术研究,突破高效开发致密油气的理论和技术瓶颈,

加快开采致密油气对确保石油天然气产量的稳定和增长, 维护国内石油市场的供求平衡, 延长石油资源的战略接替时间, 已成为保障国家能源安全、满足国民经济发展的重大需求<sup>[1-2]</sup>。

致密油是指夹在或紧邻优质生油层系的致密碎屑岩或者碳酸盐岩储层中, 未经过大规模长距离运移而形成的石油聚集, 一般无自然产能, 需通过大规模压裂才能形成工业产能<sup>[3]</sup>。中国致密油资源非常丰富, 分布范围广。资源评价表明, 中国致密油地质资源量大约为  $200 \times 10^8$  t, 技术可采资源量为  $20 \times 10^8 \sim 25 \times 10^8$  t<sup>[4]</sup>。目前在准噶尔盆地二叠系、鄂尔多斯盆地三叠系、四川盆地侏罗系、松辽盆地白垩系、渤海湾盆地古近系、柴达木盆地新近系地层均发现了致密油藏, 陆上空间以及地质年代跨度均达到一定规模。

然而, 无论是生产规模、开发方法还是理论研究来看, 中国致密油开发均处于起步阶段。据国土资源部统计, 2017 年全国致密油产量为  $150 \times 10^4$  t, 与此相比, 全国致密气 2017 年产量为  $340 \times 10^8$  m<sup>3</sup>, 约  $3090 \times 10^4$  t 油当量, 页岩气产量为  $91 \times 10^8$  m<sup>3</sup>, 约  $820 \times 10^4$  t 油当量。目前关于致密油的理论研究大都局限于储集层类型、储源关系、甜点主控因素及致密油聚集类型等方面, 开发方式以水平井体积压裂衰竭式开发为主<sup>[5-6]</sup>。开发方式单一, 地层能量补充困难、基质有效动用困难以及相应技术理论研究的缺失是制约中国致密油大规模高效开发的瓶颈问题。本文关注于中国致密油藏地质特点及其对

开发方式的影响, 提出致密油开发所面临的基本科学问题, 综述并分析了目前致密油开发方式以及与之对应的渗流理论的研究进展。同时结合《鄂尔多斯盆地致密油开发示范工程》等重大科技项目研究成果, 介绍了本课题组研究的一些最新成果, 以期对未来中国致密油高效开发提供一定的理论指导。

## 1 中国致密油资源勘探与开发现状

### 1.1 中国致密油资源分布

中国致密油资源分布范围广泛, 发育与湖相生油岩共生或接触、大面积分布的致密砂岩油或致密碳酸盐岩油, 具有广阔的勘探前景<sup>[7]</sup>。初步预测中国陆上主要盆地致密油分布达  $50 \times 10^4$  km<sup>2</sup>。目前在准噶尔盆地二叠系芦草沟组、四川盆地侏罗系大安寨段、松辽盆地青山口-泉头组、鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段、渤海湾盆地古近系沙河街组等都发现了丰富的致密油资源, 中国主要盆地致密油资源及主要性质见表 1。依据致密油层与烃源岩接触成因关系, 大致分为 3 类: 深湖水下三角洲砂岩致密油藏, 代表性油藏位于松辽盆地、渤海湾盆地以及四川盆地; 湖相碳酸盐岩油藏, 代表性油藏位于准噶尔盆地、三塘湖盆地, 储集层以咸化湖盆沉积的白云岩及白云石化岩为主; 深湖重力流砂岩致密油藏, 代表性油藏位于鄂尔多斯盆地<sup>[8]</sup>。致密油的突破与发展, 已成为目前中国陆上原油产量持续稳定、天然气产量快速发展的接替资源。

表 1 中国主要盆地致密油资源

Table 1 Tight oil resources in the major basins of China

含油盆地	含油层系	储层类型	有利面积/(10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> )	渗透率/mD	厚度/m	预测资源量/(10 <sup>8</sup> t)
准噶尔盆地	二叠系	灰质白云岩	6~8	<1	80~200	29
三塘湖盆地	二叠系	白云岩、灰岩、黑色泥岩	0.5~1	0.1~1	10~100	5.6
鄂尔多斯盆地	三叠系	粉细砂岩	8~10	0.01~1	20~80	19.9
四川盆地	侏罗系	粉细砂岩、介壳灰岩、泥质灰岩	7~11	0.0001~1	10~60	10.7
吐哈盆地	侏罗系	粉细砂岩	0.7~1	<1	30~200	1~1.5
松辽盆地	白垩系	致密砂岩	8~9	0.6~1	5~30	19~21.3
酒西盆地	白垩系	粉砂岩、碳酸盐岩	0.3~0.5	<0.1	100~300	1.8~2.3
渤海湾盆地	古近系	白云岩、致密砂岩	9~11	0.2~1	100~200	3.8~4.5
柴达木盆地	新近系	泥灰岩、藻灰岩、粉砂岩	2~3	<1	100~150	4~5

### 1.2 中国致密油资源特点

中国致密油资源通常分布于拗陷区以及斜坡带, 油气资源具有大面积分布、但丰度不均一的特点。其地质特点可以总结为: (1) 致密油资源在凹陷

内源储共生。油气分布不受圈闭控制, 平面上或滞留于烃源岩, 或位于紧邻烃源岩的大面积储层, 纵向上多层系叠置, 近源充注。(2) 储集层类型多, 物性差。储层类型包括致密砂岩、砾岩、灰岩、白云岩等,

基质渗透率一般小于 0.1 mD, 孔隙度一般小于 10%。(3) 流体分异差. 无统一的油水界面与压力系统, 油、气、水常多相共存, 含油气饱和度变化大, 具有“整体普遍含油气”的特征。(4) 微纳米孔喉发育. 川中大安寨段灰岩有效喉道半径均值为 0.89  $\mu\text{m}$ , 鄂尔多斯长 7 段喉道半径主要分布于 0.1 ~ 0.75  $\mu\text{m}$ ;(5) 天然裂缝发育. 地层受多期构造作用影响, 发育明显的天然微裂缝, 川中桂花油田取芯结果显示, 各类裂缝数量达 11.79  $\text{m}^{-1}$ . 而且受区域性地应力控制, 裂缝具有一定的方向性。(6) 地层压力偏低, 我国陆相致密油以低压-常压为主, 压力系数介于 0.7 ~ 1.3. 其中储量最为丰富的鄂尔多斯长 7 段油藏压力系数在 0.7 ~ 0.85 之间, 为典型低压油藏, 天然能量严重不足;(7) 储层脆性指数高. 长 7 致密油储层脆性指数为 35 ~ 45, 适合于进行储层压裂改造.

### 1.3 中国致密油资源开采现状

中国致密油藏开发初期, 积极借鉴美国 Bakken、Eagleford 致密油藏以及国内在低渗-超低渗油藏开发过程中的经验, 但经过一段时间的勘探开发探索后, 认识到中国致密油藏有其特殊的开发难度, 出现“注不进、采不出”的现象, 致密油储层基质的致密程度已经达到了水驱无效的程度, 导致开发效果不佳. 其原因在于美国致密油藏以海相为主, 生油岩分布稳定, 面积大, 且储集层普遍为超压地层, 开发地质条件方面均优于国内储层, 而低渗-超低渗油藏开发成功模式中超前注水建立有效驱动系统的成功模式也难以应用到致密油藏. 中国致密油藏的开发特征主要表现为:(1) 初期大部分水平井日产原油明显优于直井, 产量一般为 3 ~ 5 倍, 吉木萨尔凹陷水平井初期产能可达直井的 10 ~ 15 倍<sup>[9]</sup>. 但产量递减快, 首年递减率可达 40% ~ 90%;(2) 井口压力下降快. 受基质供给能力限制, 新井投产 2 到 3 个月内, 井口压力可以由 20 多 MPa 下降至 5 MPa 以内。(3) 初期油水同产, 含水率稳定, 一段时间后含水率下降;(4) 压裂液反排率低, 大约 40% 左右, 不过长庆油田现场试验表明, 滞留压裂液可以起到一定程度的地层能量补充, 压裂后地层压力系数可提高至 1.0 左右<sup>[10]</sup>.

尽管困难重重, 经过多年积极探索与技术攻关, 中国石油集团公司成功推动了鄂尔多斯、四川、松辽、柴达木及三塘湖等盆地的致密油藏规模开发. 目前长庆油田经过多年探索, 形成了致密油 I + II + III 类储层开发主体技术, 建立了 3 个致密油水平井体积压裂试验区和 3 个致密油规模开发试验区,

致密油单井产量显著提高. 新疆油田进一步推动玛湖凹陷致密油经济有效开发, 吉木萨尔致密油产能评价取得重大进展. 大庆油田先后开辟了 14 个致密油试验区, 其中 10 个已经建成投产, 年产能达到  $20 \times 10^4$  t.

在开发技术领域, 我国致密油的主要研究和应用方向都集中于水平井体积压裂及其配套工艺开发模式, 其主要思路是通过体积压裂以及加密水平井距在致密储层形成裂缝网络, 增大含油基质与裂缝的接触面积, 缩短储层供给边界半径, 从而更好地实现致密储层有效动用. 目前已形成了水力喷砂、水力泵送桥塞、大通径裸眼封隔器滑套等多项水平井分段体积压裂主体技术. 吐哈油田三塘湖盆地致密油开发中的“速钻桥塞 + 多簇射孔压裂”工艺, 青海油田扎哈泉致密油区块开发中的“混合压裂液 + 小粒径陶瓷加砂”压裂工艺, 长庆油田首次开展的“大排量双水平井喷射分段多簇同步压裂”工艺都是我国致密油开发过程中关键技术的重大突破. 针对四川盆地砂岩和灰岩储层不同的地质特点, 四川油气田分别实施水平井体积压裂以及水平井酸化压裂, 酸化体系为“乳化酸 + 转向酸 + 降阻酸”<sup>[11]</sup>.

尽管我国致密油开发在短时间内取得了极大的进步, 但是相对常规油气藏, 其开发规模以及原油产量仍然较小. 即使是与其他非常规油气资源如页岩气、致密气、煤层气相比, 产量依然占据次要地位, 存在明显的资源与产量不匹配、经济效益过低的现象. 其主要原因是体积缝网的形成易引发明显的水窜, 导致注水工艺无法实施. 而衰竭式开发后无法获得有效的地层能量补充, 即使通过注水获得能量补充, 极高的渗流阻力导致难以有效驱动基质原油. 因此, 合理开发方式的应用, 是我国致密油开发的重点研究问题.

## 2 致密油藏开发方式

目前国内针对致密油藏孔喉直径狭小导致自然产能低, 脆性矿物体积分数高达 80% 以上<sup>[12]</sup>, 易于压裂并沟通天然裂缝形成缝网的特点, 普遍使用基于水平井体积压裂的开发模式. 大量的现场实践以及理论计算均表明, 水平井体积压裂可以实现更大体积的地质储量动用, 扩大渗流面积, 水平井投产前期可以达到直井单井产量的 10 倍以上, 也是目前开发致密油藏最有效的工艺手段. 此类技术与相关研究的基础均来源于低渗-超低渗透油藏的开发经验与理论研究基础, 与低渗-超低渗油藏相同, 地层能量损失严重同样制约着致密油藏的开发. 基于水

平井体积压裂的衰竭式开发、注水驱动开发、以及衰竭式开发后期注水吞吐开发是国内常见的三种开发模式,因此有必要针对以上开发模式各自的特点进行相应分析,明晰其优缺点并提出未来优化方向。

### 2.1 衰竭式开发

尽管在低渗-超低渗油藏的开发经验中,基于超前注水的有效压力系统建立是其成功的主要因素。但是目前衰竭式开发依然是致密油开发的主要模式,这主要是基于以下考虑。首先致密油开发需采用水平井多段多簇压裂的开发模式,水平井井距一般为半缝长的两倍,且致密油藏普遍发育的天然裂缝的存在更易于形成体积缝网,水平井网的控制面积较高。其次是在水平井大规模压裂中,目前一般遵循“大排量、大液量、低砂比”的模式,返排液量与入地液量之比较低。根据长庆西233致密油井区的统计结果表明,10口压裂水平井中,平均单段入地液量为 $1100\text{ m}^3$ 。YP1井与YP2井平均反排液量为 $3786\text{ m}^3$ ,平均返排率为48.6%<sup>[13]</sup>。压裂后大量的压裂液滞留在了地层中,起到了一定的能量补充的作用。最后是采用注水驱替容易发生水窜,直接导致水平油井的水淹,对油井的经济效益有较大的风险。

但从目前衰竭式开发的开发效果来看,依然存在着第1年采油速度较高,但1a后产液量、产油量递减快,地层能量不足的缺点,大量的剩余油还未能被有效采出,预测衰竭式开发采收率仅能达到5%左右。目前重复压裂是一种施工相对简单的接替技术,通过重复转向改造,希望既拓宽原裂缝,又形成新的缝网系统,实现二次采油<sup>[14]</sup>。但是,该方法地层能量补充有限,增产效果有待进一步矿场试验。因此,后续地层能量的补充是衰竭式开发致密油的主要瓶颈。

### 2.2 注水吞吐开发

为避免致密油开发过程中地层能量消耗过快的的问题,进行地层能量补充是必不可少的开发方式,目前的工艺中,一般通过注水或者注气进行地层能量补充。但在致密油注水驱动的开发经验中,吸水剖面测试和示踪剂监测结果表明,随着累计注入水量的增加,注入水沿开启的天然裂缝快速推进,易于形成高渗透条带,导致对应的采油井水淹,致密油体积压裂水平井注水开发见水风险大。长庆油田在安83区块开展的七点、五点注采井网与准自然能量开发对比试验表明,七点井网3~6月后见水比例达到50%,五点井网一年后见水比例达48%。

尽管由于注水开发的高风险性,目前国内注水驱动的生产试验较少,但是基于注水、注气的地层能

量补充方式仍然是不可忽视的技术手段,尤其是我国致密油藏普遍压力系数不高,鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7油层又是典型的低压油藏。因此在避免增能介质窜流的前提下,应当进行更多的基于该种模式的研究。对致密油藏 $\text{CO}_2$ 驱的室内实验以及数值模拟研究表明, $\text{CO}_2$ 在致密油藏具有较低的混相压力,对于致密油藏有着更好的开发效果。今后的研究方向应注重于以下两个方面,首先是国外已广泛研究的空气泡沫驱、 $\text{CO}_2$ 驱也不失为可行的研究方法<sup>[15-16]</sup>。其次,合理的驱动井网部署方式可以尽可能的发挥驱动作用而避免窜流的发生,也是值得研究的重点方向。

### 2.3 注水吞吐开发

针对衰竭式开发地层压力下降过快,自然产能递减大的缺陷,基于裂缝性低渗透油田的注水吞吐机理研究及开发经验<sup>[17]</sup>,吐哈油田马中56、长庆油田安83区块长7、大庆油田致密油藏均进行了注水吞吐开发试验<sup>[18-19]</sup>,现场数据表明:三塘湖盆地开展先导试验的7口井,平均单井日增油 $10.3\text{ t}$ ,平均单井累积增油 $805\text{ t}$ 。水平井体积缝网的产生,通过注水吞吐可实现地层能量补充,重力分异油水置换以及渗吸采油以达到提高采收率的目的。

注水吞吐采出的油量与周期注入量、注入速度、注入压力、焖井时间、岩石润湿性等紧密相关,实验证明不同润湿性油藏实施注水吞吐采油均有效,油藏岩石亲水性越强,越有利于实施注水吞吐采油。但是由于毛管力作用范围较小,渗吸速度较慢,注水吞吐的提高提高采收率程度有限。微生物在地下培养繁殖可以产生表面活性剂,以此降低油水界面张力,具有更好的提高采收率潜力,可以作为今后研究的重点方向<sup>[20]</sup>。

## 3 致密油开发面临的主要科学问题

目前我国致密油藏产量较低,相较于储层条件较为接近的低渗-特低渗透油藏,其不同之处正是影响致密油藏开发的关键因素。首先是致密油藏孔喉半径进一步缩小,纳米喉道分布更为广泛,微尺度流动效应更为突出;其次天然裂缝的存在以及水平井人工裂缝形成了复杂的多尺度、多物理场流动现象;最后由于致密油藏靠近烃源岩,不具有明显的圈闭构造,储层油气水界面不清晰,开发过程中多相流动效应明显。基于以上认识,忽略其他影响程度较低的因素,抽提出以下4方面内容作为基础科学研究问题,是今后进行深层次研究的重点。其最终的进步与解决,不仅仅需要石油工作者的努力,更需要

全社会相关行业科学工作者的集体智慧。

### 3.1 流体多尺度流动机理

致密油储存主体流动空间为微纳米尺度下的孔喉系统,微纳米尺度的孔喉形态及连通性等影响着储层物性、流体的分布和运移状态,表现出强“微尺度效应”。油气流动过程中多孔介质固体骨架对流动的影响愈发明显,固体壁面边界层占据孔喉比例增大。关于微尺度流动机理,目前在物理、化学、力学、生物、材料等领域进行了广泛探索,但是在油气田开发领域,由于多孔结构难以进行数学描述以及非均质特性,常规基于规则流动通道的微尺度流动模型难以应用。同时,多孔介质领域常用的在统计意义上合理的忽略壁面影响的达西定律及其修正模型也不再适用。因此,急需发展新的理论来描述纳米尺度多孔介质气液流动机理。

致密油藏开发过程中,储层本身发育的天然微裂缝以及由于基质孔喉直径过小所必须引入的人工裂缝,就形成了典型的3种规模尺度的流体流动通道。这三种典型流动通道中,纳微米喉道的尺寸在50 nm ~ 1 μm 范围内,天然微裂缝介于几十到几百 μm,人工裂缝开度通常可以达到 mm 级。基质与裂缝流动半径差异明显,导致渗透率差异巨大。流体在多尺度通道中流动,经典的通过窜流方程建立的多重介质渗流模型在面对微纳米孔喉基质时是否依然适用,仍值得进一步研究。在此基础上,是进一步修正多重介质模型还是发展新的耦合理论,是多尺度流动的核心科学问题。

### 3.2 流体多场流动耦合机理

流体在多孔介质中流动受到不断变化得多孔介质形态以及温度等因素的影响,而流体流动又会反过来影响这些因素,体现为强耦合作用。但是常规开发过程中,地层温度场变化很小,故在致密油开发中,温度场的影响通常可以忽略。但是在涉及到特殊工艺比如 CO<sub>2</sub> 注入导致的流体相变,或者有些致密油藏为深层油藏,油藏温度过高,温度的影响就不能再被忽略。同时,应力场变化导致多孔介质的变形将进一步增强微尺度效应的影响,进而影响产量。目前需要在多孔介质损伤演化,裂缝扩展,渗流-应力-介质变形相互作用规律等方面,进行更多的研究。

### 3.3 多相流体流动机理

致密油藏主要赋存有油水两相,同时在压裂过程中,大量压裂液被注入地层中,具有明显的两相流特征。同时,由于衰竭式开发模式的普遍使用,地层流体压力降低至泡点压力以下时,形成溶解气驱,又

具有了典型的三相流动特征。三相流体在致密基质以及多尺度流动通道中的流动无疑是一个综合影响模型。

一方面气体的溶解与析出使流动存在变化的流动相;另一方面,由于流体对固体介质的润湿特性,各相之间也存在着相互驱作用,极大的复杂了多相流动规律。因此,多相流体流动机理也是致密油开发过程中区别于常规油藏所要重点考虑的问题。

### 3.4 多级压裂水平井非线性渗流规律

体积压裂工艺中,裂缝的形成机理、缝网形态、应力控制、体积压裂产能优化与控制是主要的研究方向。涉及多级压裂水平井的非线性渗流规律是以上多相流体在多尺度流动通道内的多场强耦合问题。以上因素的耦合作用机理以及数学表征及其所带来的求解上的困难,将成指数倍于单因素产生的影响。

## 4 致密油藏开发多尺度流动规律研究进展

致密油藏在不同的开发方式下所面临的不同类型的多尺度流动问题是亟待解决的科学问题。根据现场开发实践和室内岩心实验,启动压力梯度现象和应力敏感特征是低渗-特低渗、致密油藏在开发过程中区别于常规油藏的主要差异。在油藏开发过程中,由于以上现象的存在,导致油气流动渗流阻力增大,单井产量低,递减速度加快,稳产难度增大。致密油藏渗透率更低,孔喉直径更为细小,启动压力梯度与应力敏感的影响更为突出。

启动压力梯度受原油黏度、有效围压和岩石润湿性的影响。在相似孔隙结构的储层中,渗透率一定的情况下,原油黏度越高,岩心测得的启动压力梯度就越大。岩石受到的上覆压力增大,会使岩石颗粒间胶结物受挤压,孔隙体积和喉道半径减小,岩石颗粒受压发生弹性形变,表现为流动能力的应力敏感特性。岩石孔隙的减小将增加渗流流体中边界流体的比重,边界层流体黏度增大,从而使启动压力梯度增大,体现出地层中流动的非线性特征。

### 4.1 纳微米孔道流动规律

致密油藏纳微米尺度孔道流体流动规律主要体现在边界层对流体运动的影响,目前还难以通过微观流动实验直接模拟纳米层面流体运动规律,微圆管直径均在微米级<sup>[21-22]</sup>。李洋等<sup>[23]</sup>通过熔融石英毛细微圆管实验进行了2.5 ~ 10 μm 尺度的去离子水流动实验,以此分析流体平均流速与压力梯度的关系,压力梯度对流体边界层的影响。李战华等<sup>[24]</sup>进行了25 μm 石英圆管中四氯化碳、乙基苯及环己

烷等分子结构尺度为 1 nm 的非极性液体的流动实验. 笔者团队<sup>[25-26]</sup>曾采用管径 5 ~ 20  $\mu\text{m}$  的微圆管, 以去离子水、煤油以及磁性介质为流动介质, 研究了微圆管中流体的微观流动规律. 以上微观流动实验均表明, 微纳米圆管流动存在流速与压力梯度的非线性关系, 主要原因是由于尺度下降, 压力作用下, 分子间力(即固体表面对流体分子的作用力)作用上升, 边界层占孔道比例上升<sup>[27-28]</sup>.

石油工作者通过大量实验观测, 提出以宏观启动压力梯度以及拟启动压力梯度来表示油气储层中纳微米孔道边界层对渗流结果的影响规律, 岩心渗流实验结果是岩心中流体流动的统计平均, 反映了岩心孔隙结构, 岩石矿物组成及表面性质、流体性质等综合因素的宏观结果. 启动压力梯度体现了多孔介质中只有在超过某个起始的压力梯度时才发生液体渗流的现象<sup>[29-30]</sup>. 目前启动压力梯度实验方法可以分为稳态测试法以及非稳态测试法. 陈明强等选取鄂尔多斯盆地长 7 油藏 7 个不同渗透率等级的岩心, 郝斐等对用模拟油、注入水等四种介质对我国 119 块典型特低渗透岩心进行了驱替实验<sup>[31-32]</sup>. 目前岩心实验所测结果数值偏差很大, 而且与现场实践有明显偏差, 分析认为一方面是由于实验方法存在一定程度的缺陷, 另一方面是由于岩心尺度有限, 无法考虑天然储层宏观上的非均质性. 基于传统的稳态与非稳态岩心测试方法, 笔者改进设计了“非稳态驱替-瞬间动用法”进行了吐哈油田岩心的最小启动压力梯度、拟启动压力梯度以及两相启动压力梯度的室内研究, 所测结果更加符合实际<sup>[33]</sup>. 同时笔者团队还对围压控制模式、注入流体方式、岩石物性特性等参数对启动压力梯度的影响进行了研究, 提出了合理的实验标准<sup>[34-35]</sup>.

微观圆管以及宏观渗流实验结果综合表明, 流体在纳微米尺度通道流动存在非线性特征, 拟启动压力梯度是微观流动边界层影响在宏观岩心实验中的综合反映, 尤其是烃类等极性大分子在流动中表现为更强的非线性特征. 而启动压力梯度则仅仅在宏观测试中发现, 微尺度实验由于在长度尺度上的限制, 并不能严格意义上证明该现象的存在. 目前微纳米尺度分子自由程定义不清楚, 如何确定液体分子的特征尺度, 如何找到类似努森数的无量纲参数将液体流动的宏观特征尺度与微观特征尺度相联系, 仍然是微尺度流动理论需要解决的问题. 另外, 在致密油开发过程中, 将启动压力梯度加入特征体积单元的做法忽视了油藏非均质性的影响, 造成实验室与矿场所测启动压力梯度的不一致性, 严重影

响产量计算的精度与施工方案的实施.

## 4.2 流固耦合作用机理

应力敏感现象在生产实际中主要体现为随着油气资源开发, 孔隙中流体压力变化导致的岩石渗透性能的变化. 基于实验室条件的可操控性, 目前关于应力敏感的研究主要基于变围压实验, 得到不同有效应力条件下的渗透率变化关系<sup>[36-39]</sup>. 最新的石油行业标准《SY/T 5358 — 2010 储层敏感性流动实验评价方法》增加了定内压(孔隙压力)的实验方法, 该方法在机理上更加符合实际生产过程<sup>[40]</sup>. 结合有效应力方程计算应力敏感程度, 以此评价储集层应力敏感性. 徐新丽<sup>[41]</sup>研究裂缝岩心应力敏感性, 研究表明微裂缝岩心的应力敏感程度很弱, 渗透率变化率低于 30%, 敏感曲线分为 2 个阶段: 第 I 阶段渗透率下降幅度超过 20%, 主要是以发生微裂缝受压闭合的拟塑性变形为主; 第 II 阶段渗透率下降幅度低于 10%, 该阶段主要以岩石骨架颗粒本体被压缩的弹性形变为主, 实际储层的净应力多处于该阶段; 杨孝等<sup>[42]</sup>利用铸体薄片、恒压和恒速压汞、场发射扫描电镜、微米 CT 成像等测试手段, 表明塑性组分含量、填隙物类型及其含量、孔喉尺度是长 7 致密油储层应力敏感性不同的主要控制因素.

于俊红等通过改进的巴西劈裂方法对岩心进行人工造缝(图 1(a))<sup>[43]</sup>, 利用单轴试验机缓慢对其施加载荷, 可以在不破坏岩心整体构型的情况下, 得到人造微裂缝. 笔者依靠此方法进行致密油岩心人工造缝, 经压裂后岩心的渗透率可达 18 ~ 109 mD. 对致密岩心 37#、40# 分别在微裂缝改造前后分别进行应力敏感性测试, 使用不同有效应力条件下的渗透率  $K$  与初始渗透率  $K_0$  比值来表示应力敏感程度, 图 1(b)、图 1(c) 分别为致密岩心与带微裂缝致密岩心应力敏感测试结果, 结果表明带裂缝岩心相较于基质岩心具有更强的应力敏感性, 其平均应力敏感指数为 98.7%.

大量实验均证实了应力敏感作用对油气开发产量的影响, 尤其是基质渗透率较低, 天然裂缝大量发育作为油藏渗透率主要贡献者, 开发过程中应力敏感的影响因素更为明显. 目前实验上对于应力敏感的基本规律认识已较为统一, 但是目前针对应力敏感实验结果存在着不同类型的评价方法, 包括幂律模型、指数模型、二项式模型以及对数模型等<sup>[44-45]</sup>. 在数值模拟过程中应用不同的应力敏感数学模型将对数值计算结果产生明显的影响. 因此, 从物理基本规律出发的应力敏感评价方法是亟待解决的问题.

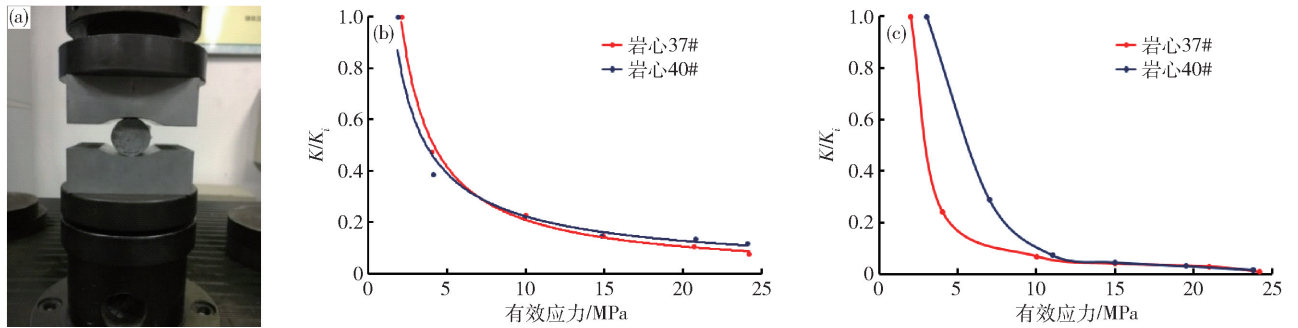


图1 新型应力敏感方法及测试结果。(a)改进巴西劈裂实验;(b)致密岩心应力敏感;(c)含微裂缝致密岩心应力敏感

Fig. 1 A novel experimental method for determining stress sensitivity: (a) improved Brazilian splitting test; (b) stress sensitivity of tight core; (c) stress sensitivity of tight core with microfractures

### 4.3 致密储层油水两相渗吸机理

油田开发过程中由于毛管力及重力引发的油水两相自发渗吸现象,最早起源于底水油藏和裂缝性油藏开发的研究中<sup>[46-47]</sup>,后来在低渗-特低渗油藏开发过程中注水吞吐作为一种地层能量补充方式与提高采收率技术,导致了渗吸现象在石油天然气行业的持续研究。所谓自发渗吸是多孔介质在毛细管力驱动下自发地吸入某种润湿液体的过程,在石油工程、土木工程、建筑材料、工程地质等方面皆有广泛的研究。笔者<sup>[48]</sup>利用常规室内渗吸实验和先进的核磁共振技术,系统地研究了低渗透裂缝性砂岩油藏中以上各种因素对渗吸的影响程度。结果表明,渗吸速度与基质-裂缝接触面的位置、基质-裂缝系统流体特性参数、润湿性、老化时间有关。动态渗吸结果则还与驱替速度、油水黏度比、界面张力等有关<sup>[49]</sup>。DuPrey<sup>[50]</sup>, Li 和 Horne<sup>[51]</sup>认为渗吸采收程度与毛管力与重力的比值(Bond数)有关,因此驱替介质界面张力存在临界值使得自发渗吸采出程度最高。屈雪峰等<sup>[52]</sup>基于长7致密油藏的静态渗吸实验也得出了相同的结论,并得出最佳渗吸采收率时的Bond数倒数约为1。

在致密油藏开发过程中,致密油自发渗吸提高采收率的效果受到多种工艺参数及地质条件的影响。静态渗吸实验表明,基质渗透率越高,渗吸采出程度越高,而岩心渗透率越高,一般孔隙半径越大,毛管压力越小,渗吸驱动力越弱。根据孔隙结构分析,这主要是由于高渗岩心孔喉连通性较强,扩大了渗吸范围<sup>[53]</sup>。同时核磁共振研究表明,在特定压力下,渗吸作用具有最小孔喉半径,小于该半径的孔隙内的原油无法被渗吸采出。在致密油开发过程中,逆向渗吸为主要作用,王向阳等<sup>[54]</sup>认为逆向渗吸采油效果很弱,且渗透率越低,逆向渗吸置换效果越差。基于表面活性剂在降低油水界面张力方面的作用,

注水吞吐过程中加入表面活性剂在一定程度上也有利于采收率的提高<sup>[55-56]</sup>。

目前,渗吸采油机理实验主要集中在小尺度岩心,主要研究采收率宏观相关影响因素<sup>[57-58]</sup>,为成功指导现场施工提供了有利依据<sup>[59-60]</sup>。但是由于实验设备的限制,定量研究渗吸强度与流体运动规律的研究较少。

## 5 致密油藏多级压裂水平井开发非线性渗流模型

围绕水平井井筒及多段多簇压裂裂缝的渗流理论是目前致密油藏开发过程中最为关心的理论方向之一,而且由于多尺度流动介质以及多场耦合关系,所需建立的渗流数学模型表现为强非线性。正确的产能模型将为井网模式设计(包括井距、段数段间距、簇数簇间距等),压裂工艺优化(入地液量、加砂比、排量、注入流程等)等提供有力的支撑以便实现最大的开发经济效益。目前围绕多级压裂水平产能模型开展了大量的研究,包括低渗-特低渗油气藏,页岩油气等非常规油气藏领域。正确的模型必须合理考虑油藏地质条件及工艺措施,为关键物理机制提供合理的数学描述。前面已经提到,致密油藏多级压裂水平井开发中,基质启动压力梯度、油水两相渗吸以及应力敏感效应是关键影响因素,国内外研究者逐步建立了完善的考虑以上3种因素的产能方程。苏玉亮等<sup>[61]</sup>通过引入基质与裂缝间的毛管力来修正窜流项以表征渗吸作用。魏漪等<sup>[62]</sup>、郝明强等<sup>[63]</sup>都针对致密储层基质,通过考虑启动压力梯度和应力敏感效应的广义达西定律推导得到了压裂水平井产能计算方法。

而在另一方面,体积压裂所形成的复杂裂缝网络结构特征的描述与表征的数学描述一直是影响产能模型精度的制约因素,流体在不同尺度的流动通

道存在不同的流动机制. 为了简化求解难度, 取得产能方程的解析公式, 目前最为通用的方法是将压裂后储层分区进行描述, 根据流动通道的尺寸, 大致分为人工裂缝改造区域, 裂缝与基质共存的裂缝控制区, 以及裂缝未能扩展波及到的基质流动区. 姚军等<sup>[64]</sup>建立了储层未改造区域存在启动压力梯度时的压裂水平井试井数学模型, 认为两

条裂缝中间的储层被完全压裂, 中间位置存在不渗透边界, 在不渗透边界与裂缝之间考虑为双重介质的不稳定渗流的数学模型. 笔者团队基于此种方法, 对低渗-特低渗以及致密油藏进行了大量的产能公式研究<sup>[65-67]</sup>. 同时, 笔者曾在此基础上提出三大区五小区的裂缝网络描述方法进行产能公式研究, 如图2所示.

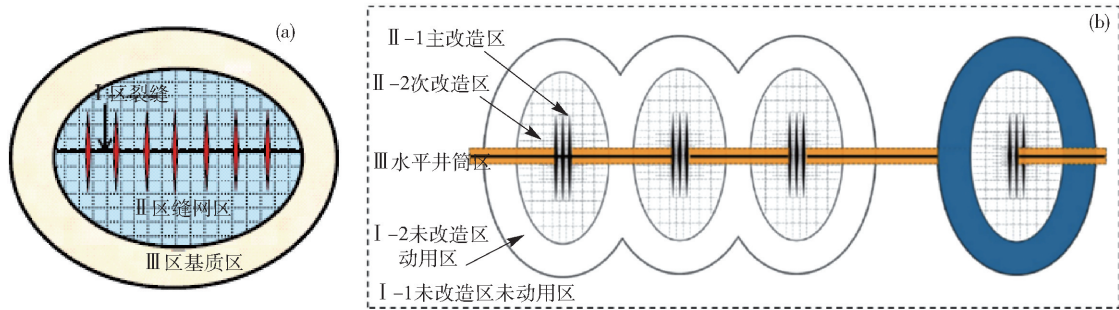


图2 分区耦合模型. (a) 传统三区流动模型; (b) 三大区五小区模型

Fig. 2 Coupled modeling of different zones: (a) traditional flow model of three zones; (b) flow model of three large zones, including five small zones

对于建立的致密油藏水平井体积压裂非线性渗流偏微分方程或积分方程分区模型, 目前的求解难点在于裂缝控制区缝网形态数学描述以及进行解析公式推导. 推导过程需要对体积压裂的复杂缝网结构做理想化的处理, 需要使用严格的数学公式对裂缝形态进行描述, 能够处理的裂缝形态均较为规则. 近年来, 更多的学者将分形几何学应用到石油天然气工程领域, 其中一个重要方向是地下缝网分布的描述<sup>[68-69]</sup>. 笔者曾基于树状分叉分形理论表征体积压裂复杂裂缝形态<sup>[66]</sup>, 但是目前存在着相关参数如变形系数、分形维数等获取困难的缺陷. 总体来说, 分形等新兴几何学等将为复杂缝网的描述提供强有力的理论支撑, 是未来研究的重点方向.

而在另一方面, 现代数值计算方法的兴起和运算能力的飞速提升对通过数值方法精确求解产能提供了更大的可能性<sup>[70-71]</sup>. 数值计算方法可以处理更为复杂的裂缝形态以及更多的流体相, 而不必进行严格的数学推导. 客观上由于储层数据的获取困难以及生产数据的不精确性, 导致地质模型的建立存在相应的误差同时模型的精确度验证也存在困难. 主观上, 目前整个石油天然气行业对于数值模型计算精度要求的不严格也延缓着该方向的快速发展.

## 6 结论与展望

致密油在未来中国油气开发中将占据越来越重要的地位, 为实现致密油的大规模高效开发, 需要全

社会各学科领域的专家学者集思广益和石油行业工作者的努力攻关. 目前, 针对以上所述的基本问题, 笔者建议从以下方面开展深化研究.

(1) 致密油开发方法中, 最为常用的多级压裂水平井衰竭式开发方法目前面临着后续能量补充缺失, 纳微米级孔喉基质有效动用困难, 理论采收率较低的瓶颈. 合理的地层能量补充方法以及致密储层有效动用方式是亟需解决的两大根本难题. 根据国外开发经验及理论研究成果, 空气泡沫驱、 $\text{CO}_2$ 驱可作为未来发展方向进行进一步攻关.

(2) 致密油藏开发中涉及多相流体在多尺度流动介质中的流动, 目前对于启动压力梯度、储层应力敏感以及油水渗吸在实验基础上的定性分析取得了较为统一的认识. 但是相应的定量研究以及理论基础研究还存在明显的不足之处, 尤其是如何合理可靠的进行以上机理的数学描述以提高数值计算的精度, 还需要进一步的深化研究.

(3) 持续不断新型工艺技术的提出将会使多级压裂水平井开发致密油藏渗流模型具有更强的非线性, 需要流动规律理论建模上的持续研究, 同时也提高了模型求解的难度. 非均匀裂缝网络几何描述的困难极大的制约着理论解析产能公式的提出, 分形等新兴几何学的应用以及新的微分、积分方程求解方法是其未来发展方向. 现代计算机运算能力的不断提升, 导致数值计算是今后产能计算不可忽视的重要力量, 但是需要注意数值计算求解准确度的分析与验证等方面的研究.



## 参 考 文 献

- [1] Tong X G, Zhang G Y, Wang Z M, et al. Distribution and potential of global oil and gas resources. *Petrol Explor Dev*, 2018, 45(4): 727  
(童晓光, 张光亚, 王兆明, 等. 全球油气资源潜力与分布. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 727)
- [2] BP Group. *Statistical Review of World Energy 2018* [R/OL]. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/downloads.html>
- [3] Zhang J F, Bi H B, Xu H, et al. New progress and reference significance of overseas tight oil exploration and development. *Acta Petrol Sin*, 2015, 36(2): 127  
(张君峰, 毕海滨, 许浩, 等. 国外致密油勘探开发新进展及借鉴意义. 石油学报, 2015, 36(2): 127)
- [4] Zou C N, Zhu R K, Bai B, et al. Significance, geologic characteristics, resource potential and future challenges of tight oil and shale oil. *Bull Mineral Petrol Geochem*, 2015, 34(1): 3  
(邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 致密油与页岩油内涵、特征、潜力及挑战. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(1): 3)
- [5] Du J H, Liu H, Ma D S, et al. Discussion on effective development techniques for continental tight oil in China. *Petrol Explor Dev*, 2014, 41(2): 198  
(杜金虎, 刘合, 马德胜, 等. 试论中国陆相致密油有效开发技术. 石油勘探与开发, 2014, 41(2): 198)
- [6] Hu S Y, Zhu R K, Wu S T, et al. The exploration and development of continental tight oil in China under the background of low oil price. *Petrol Explor Dev*, 2018, 45(4): 1  
(胡素云, 朱如凯, 吴松涛, 等. 低油价背景下中国陆相致密油的效益勘探开发. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 1)
- [7] Zhu X M, Pan R, Zhu S F, et al. Research progress and core issues in tight reservoir exploration. *Earth Sci Front*, 2018, 25(2): 141  
(朱筱敏, 潘荣, 朱世发, 等. 致密储层研究进展和热点问题分析. 地学前缘, 2018, 25(2): 141)
- [8] Jia C Z, Zou C N, Li J Z, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China. *Acta Petrol Sin*, 2012, 33(3): 343  
(贾承造, 邹才能, 李建忠, 等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景. 石油学报, 2012, 33(3): 343)
- [9] Qu J X, Ding X J, Zha M, et al. Geochemical characterization of Lucaogou formation and its correlation of tight oil accumulation in Jimsar Sag of Junggar Basin, Northwestern China. *J Petrol Explor Prod Technol*, 2017, 7(3): 699
- [10] Xu Z J, Liu L F, Wang T G, et al. Characteristics and controlling factors of lacustrine tight oil reservoirs of the Triassic Yan-chang Formation Chang 7 in the Ordos Basin, China. *Marine Petrol Geol*, 2017, 82: 265
- [11] Huang D, Yang G, Wei T Q, et al. Recognition of high yield and stable yield factors of Daanzhai tight oil, Guihua oilfield. *J Southwest Petrol Univ Sci Technol Ed*, 2015, 37(5): 23  
(黄东, 杨光, 韦腾强, 等. 川中桂花油田大安寨段致密油高产稳产再认识. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2015, 37(5): 23)
- [12] Ren Y, Cao H, Yao F C, et al. Brittleness and fracability prediction for tight oil reservoir in Jimsar Sag, Junggar Basin. *Oil Geophys Prosp*, 2018, 53(3): 511  
(任岩, 曹宏, 姚逢昌, 等. 吉木萨尔致密油储层脆性及可压裂性预测. 石油地球物理勘探, 2018, 53(3): 511)
- [13] Fan J M, Yang Z Q, Li W B, et al. Assessment of fracturing treatment of horizontal wells using SRV technique for Chang-7 tight oil reservoir in Ordos Basin. *J China Univ Petrol Ed Nat Sci*, 2015, 39(4): 103  
(樊建明, 杨子清, 李卫兵, 等. 鄂尔多斯盆地长7致密油水平井体积压裂开发效果评价及认识. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2015, 39(4): 103)
- [14] Guo J C, Tao L, Zeng F H. Optimization of refracturing timing for horizontal wells in tight oil reservoirs: a case study of Cretaceous Qingshankou Formation, Songliao Basin, NE China. *Petrol Explor Dev*, 2019, 46(1): 146  
(郭建春, 陶亮, 曾凡辉. 致密油储集层水平井重复压裂时机优化——以松辽盆地白垩系青山口组为例. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 146)
- [15] Yassin M R, Habibi A, Zolfaghari A, et al. An experimental study of nonequilibrium carbon dioxide/oil interactions. *SPE J*, 2018, 23(5): 1768
- [16] Dong P F, Puerto M, Jian G Q, et al. Low-IFT foaming system for enhanced oil recovery in highly heterogeneous/fractured oil-wet carbonate reservoirs. *SPE J*, 2018, 23(6): 2243
- [17] Huang D Z, Xiang D, Wang C S. A feasibility analysis of water-flood swallowing-spitting oil production. *Drill Prod Technol*, 2003, 26(4): 17  
(黄大志, 向丹, 王成善. 油田注水吞吐采油的可行性分析. 钻采工艺, 2003, 26(4): 17)
- [18] Tao D H, Zhan X H, Gao J W, et al. Study and practice of cyclic water injection in Mazhong tight oil reservoir in the Santanghu Basin. *Oil Drill Prod Technol*, 2018, 40(5): 614  
(陶登海, 詹雪函, 高敬文, 等. 三塘湖盆地马中致密油藏注水吞吐探索与实践. 石油钻采工艺, 2018, 40(5): 614)
- [19] Wang X Z, Dang H L, Gao T. Method of moderate water injection and its application in ultra-low permeability oil reservoirs of Yanchang Oilfield, NW China. *Petrol Explor Dev*, 2018, 45(6): 1026  
(王香增, 党海龙, 高涛. 延长油田特低渗油藏适度温和注水方法与应用. 石油勘探与开发, 2018, 45(6): 1026)
- [20] Zhao L J. Applications of oil producing technology of huff and puff infection of microbe in low permeable oilfields. *Petrol Drill Tech*, 2005, 33(3): 61  
(赵丽娟. 微生物采油技术在低渗透油田的应用. 石油钻探技术, 2005, 33(3): 61)
- [21] Kumar V, Paraschivoiu M, Nigam K D P. Single-phase fluid flow and mixing in microchannels. *Chem Eng Sci*, 2011, 66(7): 1329
- [22] Kandlikar S G. Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels. *Exp Therm Fluid Sci*, 2002, 26(2-4): 389
- [23] Li Y, Lei Q, Liu X G, et al. Characteristics of micro scale non-

- linear filtration. *Petrol Explor Dev*, 2011, 38(3): 336  
(李洋, 雷群, 刘先贵, 等. 微尺度下的非线性渗流特征. 石油勘探与开发, 2011, 38(3): 336)
- [24] Li Z H, Zhou X B, Zhu S N. Flow characteristics of non-polar organic liquids with small molecules in a microchannel. *Acta Mech Sin*, 2002, 34(3): 432  
(李战华, 周兴贝, 朱善农. 非极性小分子有机液体在微管道中的流量特性. 力学学报, 2002, 34(3): 432)
- [25] Zhu W Y, Tian Y A, Yu M X, et al. Mechanism of microscopic fluid flow in microtubes. *Sci Technol Rev*, 2014, 32(27): 23  
(朱维耀, 田英爱, 于明旭, 等. 微圆管中流体的微观流动机制. 科技导报, 2014, 32(27): 23)
- [26] Cao M J. *Experiment Research of Magnetic Fluid Flow Characteristics in Microscale* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016  
(曹孟菁. 磁性流体微尺度流动规律实验研究[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2016)
- [27] Tian X F, Cheng L S, Cao R Y, et al. Characteristics of boundary layer in micro and nano throats of tight sandstone oil reservoirs. *Chin J Comput Phys*, 2016, 33(6): 717  
(田虢丰, 程林松, 曹仁义, 等. 致密油藏微纳米喉道中的边界层特征. 计算物理, 2016, 33(6): 717)
- [28] Song F Q, Yu L. The boundary negative slippage of liquid flowing in hydrophilic micro-tubes. *Chin J Hydrodyn*, 2013, 28(2): 128  
(宋付权, 于玲. 液体在润湿性微管中流动的边界负滑移特征. 水动力学研究与进展(A辑), 2013, 28(2): 128)
- [29] Fan J M, Li W B, Han H P, et al. Study on variation of the starting pressure gradient of Chang 7 tight oil in Erdos Basin. *Sci Technol Eng*, 2014, 14(28): 27  
(樊建明, 李卫兵, 韩会平, 等. 鄂尔多斯盆地长7致密油启动压力梯度变化规律研究. 科学技术与工程, 2014, 14(28): 27)
- [30] Zhao Y J, Wang X W, Ling H C. Experimental study on the porous flow law of tight oil reservoir. *Sci Technol Rev*, 2014, 32(28-29): 59  
(赵玉集, 王学武, 凌浩川. 致密油藏流体渗流规律实验研究. 科技导报, 2014, 32(28-29): 59)
- [31] Chen M Q, Ren L, Li M, et al. Study on seepage law of Chang 7 ultra-low permeability reservoir in Ordos Basin. *Fault-Block Oil Gas Field*, 2013, 20(2): 191  
(陈明强, 任龙, 李明, 等. 鄂尔多斯盆地长7超低渗油藏渗流规律研究. 断块油气田, 2013, 20(2): 191)
- [32] Hao F, Cheng L S, Li C L, et al. Study on threshold pressure gradient in ultra-low permeability reservoir. *J Southeast Petrol Inst*, 2006, 28(6): 29  
(郝斐, 程林松, 李春兰, 等. 特低渗透油藏启动压力梯度研究. 西南石油学院学报, 2006, 28(6): 29)
- [33] Zhu W Y, Tian W, Zhu H Y, et al. Study on experiment of threshold pressure gradient for tight sandstone. *Sci Technol Eng*, 2015, 15(3): 79  
(朱维耀, 田巍, 朱华银, 等. 致密岩心启动压力梯度实验研究. 科学技术与工程, 2015, 15(3): 79)
- [34] Tian W, Zhu W Y, Zhu H Y, et al. Optimization of confining pressure modes during starting pressure test in tight sandstone. *Spec Oil Gas Reserv*, 2014, 21(2): 107  
(田巍, 朱维耀, 朱华银, 等. 致密砂岩启动压力测试中围压模式的优选. 特种油气藏, 2014, 21(2): 107)
- [35] Tian W, Zhu W Y, Zhu H Y, et al. Influencing factors of threshold pressure gradient value for tight sandstone. *Fault-Block Oil Gas Field*, 2014, 21(5): 611  
(田巍, 朱维耀, 朱华银, 等. 致密砂岩启动压力梯度数值的影响因素. 断块油气田, 2014, 21(5): 611)
- [36] Wang Y Z, Zhang R, Song F Q. Stress sensitivity evaluation of tight sandstone reservoir eliminate the influence of gas slippage. *Sci Technol Eng*, 2017, 17(17): 221  
(王永政, 张嵘, 宋付权. 消除滑脱效应的致密砂岩储层应力敏感评价. 科学技术与工程, 2017, 17(17): 221)
- [37] Fu L Q. The effect of fractures on stress sensitivity and seepage characteristics in tight sandstone reservoirs. *J Yangtze Univ Nat Sci Ed*, 2016, 13(20): 14  
(付兰清. 裂缝对致密砂岩储层应力敏感性及其渗流特征影响研究. 长江大学学报: 自科版, 2016, 13(20): 14)
- [38] Dou J J, Xiu N L, Yan Y Z, et al. Research on stress sensitivity evaluation experiments of tight sandstone reservoir based on stress sensitivity constant. *J Chongqing Univ Sci Technol (Nat Sci Ed)*, 2015, 17(4): 10  
(窦晶晶, 修乃岭, 严玉忠, 等. 基于应力敏感常数的致密砂岩储层应力敏感性评价研究. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2015, 17(4): 10)
- [39] Ding J C, Yang S L, Nie X R, et al. Stress sensitivity of tight gas reservoir and its influence on productivity of gas well. *J Xi'an Shiyou Univ Nat Sci Ed*, 2014, 29(3): 63  
(丁景辰, 杨胜来, 聂向荣, 等. 致密气藏的应力敏感性及其对气井单井产能的影响. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2014, 29(3): 63)
- [40] National Energy Administration, People's Republic of China. SY/T5358 — 2010 *Formation Damage Evaluation by Flow Test*. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010  
(国家能源局. SY/T5358 — 2010 储层敏感性流动实验评价方法. 北京: 石油工业出版社, 2010)
- [41] Xu X L. Stress sensitivity of low permeability reservoir containing micro fracture and its influence on productivity. *Spec Oil Gas Reserv*, 2015, 22(1): 127  
(徐新丽. 含微裂缝低渗储层应力敏感性及其对产能影响. 特种油气藏, 2015, 22(1): 127)
- [42] Yang X, Feng S B, Wang J, et al. Stress sensitivity and its influence factors of tight oil reservoir in Chang 7 Member, Ordos Basin. *China Petrol Explor*, 2017, 22(5): 64  
(杨孝, 冯胜斌, 王炯, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7段致密油储层应力敏感性及其影响因素. 中国石油勘探, 2017, 22(5): 64)
- [43] Yu J H, Shang X C, Wu P F. Experimental study and theoretical analysis on shale strength. *Sci Sin Tech*, 2016, 46(2): 135  
(于俊红, 尚新春, 吴沛飞. 页岩圆盘压裂的理论分析与试验研究. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(2): 135)

- [44] Dong H E, Zhang H J, Yao S L, et al. Measurement and evaluation of the stress sensitivity in tight reservoirs. *Petrol Explor Dev*, 2016, 43(6): 1022  
( 窦宏恩, 张虎俊, 姚尚林, 等. 致密储集层岩石应力敏感性测试与评价方法. 石油勘探与开发, 2016, 43(6): 1022)
- [45] Xiao W L, Li T, Li M, et al. Evaluation of the stress sensitivity in tight reservoirs. *Petrol Explor Dev*, 2016, 43(1): 107  
( 肖文联, 李滔, 李闽, 等. 致密储集层应力敏感性评价. 石油勘探与开发, 2016, 43(1): 107)
- [46] Huan G R. A discussion of the mechanism of the displacement of oil by water in a medium with double porosity. *Petrol Explor Dev*, 1982(1): 48  
( 桓冠仁. 论双重介质两相驱替机理. 石油勘探与开发, 1982(1): 48)
- [47] Yin D. Numerical simulation method for single well water cone of double porosity medium. *Petrol Explor Dev*, 1981(1): 68  
( 尹定. 双重孔隙介质单井水锥数值模拟方法. 石油勘探与开发, 1981(1): 68)
- [48] Zhu W Y, Ju Y, Zhao M, et al. Spontaneous imbibition mechanism of flow through porous media and water flooding in low-permeability fractured sandstone reservoir. *Acta Petrol Sin*, 2002, 33(6): 56  
( 朱维耀, 鞠岩, 赵明, 等. 低渗透裂缝性砂岩油藏多孔介质渗吸机理研究. 石油学报, 2002, 33(6): 56)
- [49] Wang J L, Liu Y Z, Chen M Q, et al. Experimental study on dynamic imbibition mechanism of low permeability reservoirs. *Petrol Explor Dev*, 2009, 36(1): 86  
( 王家禄, 刘玉章, 陈茂谦, 等. 低渗透油藏裂缝动态渗吸机理实验研究. 石油勘探与开发, 2009, 36(1): 86)
- [50] DuPrey L. Gravity and capillary effects during imbibition. *SPE J*, 1978, 18(6): 927
- [51] Li K W, Horne R N. Characterization of spontaneous water imbibition into gas-saturated rocks. *SPE J*, 2001, 6(4): 375
- [52] Qu X F, Lei Q H, Gao W B, et al. Experimental study on imbibition of Chang7 tight oil cores in Erdos Basin. *J China Univ Petroleum Ed Nat Sci*, 2018, 42(2): 102  
( 屈雪峰, 雷启鸿, 高武斌, 等. 鄂尔多斯盆地长7致密油储层岩心渗吸试验. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2018, 42(2): 102)
- [53] Gu X Y, Pu C S, Huang H, et al. Micro-influencing mechanism of permeability on spontaneous imbibition recovery for tight sandstone reservoirs. *Petrol Explor Dev*, 2017, 44(6): 948  
( 谷潇雨, 蒲春生, 黄海, 等. 渗透率对致密砂岩储集层渗吸采油的微观影响机制. 石油勘探与开发, 2017, 44(6): 948)
- [54] Wang X Y, Yang Z M, Liu X W, et al. Physical simulation experiment investigation on large scale model using countercurrent imbibition in tight oil reservoirs. *Sci Technol Eng*, 2018, 18(8): 43  
( 王向阳, 杨正明, 刘学伟, 等. 致密油藏大模型逆向渗吸的物理模拟实验研究. 科学技术与工程, 2018, 18(8): 43)
- [55] Shen A Q, Liu Y K, Qiu X H, et al. Improvement of spontaneous imbibition oil recovery in tight oil reservoir by surfactants. *Oilfield Chem*, 2016, 33(4): 696  
( 沈安琪, 刘义坤, 邱晓惠, 等. 表面活性剂提高致密油藏渗吸采收率研究. 油田化学, 2016, 33(4): 696)
- [56] Su Y B, Lin G Y, Han Y. Influence of surfactant on spontaneous imbibition in tight sandstone reservoir and its application. *Fault-Block Oil Gas Field*, 2017, 24(5): 691  
( 苏煜彬, 林冠宇, 韩悦. 表面活性剂对致密砂岩储层自发渗吸驱油的影响. 断块油气田, 2017, 24(5): 691)
- [57] Zhang X W, Guo H K, Li H B. Experimental study on imbibition oil displacement of tight oil reservoir using NMR technology. *Bull Sci Technol*, 2018, 34(8): 35  
( 张新旺, 郭和坤, 李海波. 基于核磁共振致密油储层渗吸驱油实验研究. 科技通报, 2018, 34(8): 35)
- [58] Zhou W F, Wang X, Lu X G, et al. Effects of the dynamic imbibition recovery and its influencing factors for the tight oil reservoirs. *Petrol Geol Oilfield Dev Daqing*, 2017, 36(3): 148  
( 周万富, 王鑫, 卢祥国, 等. 致密油储层动态渗吸采收效果及其影响因素. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(3): 148)
- [59] Wang Q G, Wang T T, Chen Y, et al. Effect of static imbibition recovery and its influencing factors in Fuyu reservoir of Daqing oilfield. *Oilfield Chem*, 2018, 35(2): 308  
( 王庆国, 王婷婷, 陈阳, 等. 大庆扶余油层静态渗吸采收效果及其影响因素. 油田化学, 2018, 35(2): 308)
- [60] Wu Z B, Zeng Q, Li J, et al. New effective energy-supplement development method of waterflood huff and puff for the oil reservoir with stimulated reservoir volume fracturing. *Petrol Geol Recov Efficiency*, 2017, 24(5): 78  
( 吴忠宝, 曾倩, 李锦, 等. 体积改造油藏注水吞吐有效补充地层能量开发的新方式. 油气地质与采收率, 2017, 24(5): 78)
- [61] Su Y L, Han X H, Wang W D, et al. Production capacity prediction model for multi-stage fractured horizontal well coupled with imbibition in tight oil reservoir. *J Shenzhen Univ Sci Eng*, 2018, 35(4): 345  
( 苏玉亮, 韩秀虹, 王文东, 等. 致密油体积压裂耦合渗吸产能预测模型. 深圳大学学报: 理工版, 2018, 35(4): 345)
- [62] Wei Y, Ran Q Q, Tong M, et al. A full cycle productivity prediction model of fractured horizontal well in tight oil reservoirs. *J Southwest Petrol Univ Sci Technol Ed*, 2016, 38(1): 99  
( 魏漪, 冉启全, 童敏, 等. 致密油压裂水平井全周期产能预测模型. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2016, 38(1): 99)
- [63] Hao M Q, Wang X D, Hu Y L. Productivity calculation of multi-fractured horizontal well in ultra-low permeability pressure-sensitive reservoirs. *J China Univ Petrol Ed Nat Sci*, 2011, 35(6): 99  
( 郝明强, 王晓冬, 胡永乐. 压敏性特低渗透油藏压裂水平井产能计算. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2011, 35(6): 99)
- [64] Yao J, Yin X X, Fan D Y, et al. Trilinear-flow well test model of fractured horizontal well in low permeability reservoir. *Well Test*, 2011, 20(5): 1  
( 姚军, 殷修杏, 樊冬艳, 等. 低渗透油藏的压裂水平井三线性流试井模型. 油气井测试, 2011, 20(5): 1)
- [65] Wang Z P, Zhu W Y, Yue M, et al. A method to predict the

- production of fractured horizontal wells in low/ultra- low permeability reservoirs. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2012, 34(7): 750  
(王志平, 朱维耀, 岳明, 等. 低、特低渗透油藏压裂水平井产能计算方法. 北京科技大学学报, 2012, 34(7): 750)
- [66] Zhu W Y, Yue M, Gao Y, et al. Nonlinear flow model and productivity of stimulated reservoir volume in tight oil reservoirs. *J China Univ Min Technol*, 2014, 43(2): 248  
(朱维耀, 岳明, 高英, 等. 致密油层体积压裂非线性渗流模型及产能分析. 中国矿业大学学报, 2014, 43(2): 248)
- [67] Song H Q, Liu Q P, Yang D W, et al. Productivity equation of fractured horizontal well in a water-bearing tight gas reservoir with low-velocity non-Darcy flow. *J Nat Gas Sci Eng*, 2014, 18: 467
- [68] Wang X X, Hou J G, Liu Y M, et al. Overall PSD and fractal characteristics of tight oil reservoirs: a case study of Lucaogou formation in Junggar Basin, China. *Fractals*, 2019, 27(1): 1940005
- [69] Wang X Z, Wan Y P. Quantitative characterization of fracture in reservoir and its geological significance. *Geol Bull China*, 2008, 27(11): 1939  
(王香增, 万永平. 油气储层裂缝定量描述及其地质意义. 地质通报, 2008, 27(11): 1939)
- [70] Wang B H, Wu S H, Han D K, et al. Block compressed storage and computation in large-scale reservoir simulation. *Petrol Explor Dev*, 2013, 40(4): 462  
(王宝华, 吴淑红, 韩大匡, 等. 大规模油藏数值模拟的块压缩存储及求解. 石油勘探与开发, 2013, 40(4): 462)
- [71] Ye J G, Wu X H, Zhu Y X, et al. Study on computer assisted history-matching method in corner point grids. *Acta Petrol Sin*, 2007, 28(2): 83  
(叶继根, 吴向红, 朱怡翔, 等. 大规模角点网格计算机辅助油藏模拟历史拟合方法研究. 石油学报, 2007, 28(2): 83)