

页岩油气高效开发的关键基础理论与挑战

陈 勉¹, 葛洪魁², 赵金洲³, 姚 军⁴

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)非常规天然气研究院, 北京 102249; 3. 西南石油大学, 四川成都 610500; 4. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580)

摘 要:为更好地指导我国页岩气资源高效开发,在概述我国页岩气资源和开采现状的基础上,从地质特征预测、安全快速钻井、环保高效开采等方面系统总结了我国页岩气开采面临的工程地质难题,指出页岩非线性工程地质力学特征与预测理论、多重耦合下的页岩油气安全优质钻井理论、页岩地层动态随机裂缝控制机理与无水压裂技术、页岩油气多尺度渗流特征与开采理论等是需要重点解决的关键理论问题,钻采过程中页岩储层物理力学化学特征演化规律与数学表征,多场耦合条件下非连续页岩与钻井完井流体作用机理,页岩地层动态随机裂缝控制、长效导流机制与无水压裂技术,页岩微纳尺度吸附/解吸机制、尺度升级及多场耦合的多相渗流理论等是亟需解决的关键前沿理论问题,并针对各前沿关键力学问题综述了研究进展和发展趋势,对促进我国页岩油气的科学、有效开发具有一定的借鉴作用。

关键词:页岩油气 钻井 渗流 储层改造

中图分类号:TE249 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2015)05-0007-08

The Key Fundamentals for the Efficient Exploitation of Shale Oil and Gas and Its Related Challenges

Chen Mian¹, Ge Hongkui², Zhao Jinzhou³, Yao Jun⁴

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 2. The Unconventional Natural Gas Institute, China University of Petroleum(Beijing), Beijing, 102249, China; 3. Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China; 4. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266580, China)

Abstract: This paper identifies and discusses the multiple geologic engineering challenges involved in shale gas exploitation which include reservoir characterization, safe and fast drilling, environmentally-friendly and efficient exploitation, and it puts them within a context of China's experience in exploring for and exploiting shale gas. The paper elaborates upon the key fundamentals, which include geologic mechanical behavior and prediction theories of non-linear shale engineering, safe and quality shale oil and gas well drilling theories based on multiple coupling, dynamic and random fracture control mechanisms and non-aqueous fracturing technologies of shale beds, and multiscale seepage characteristics and exploitation theories of shale oil and gas. The following advanced theoretical issues should be solved as soon as possible. It was necessary to investigate the evolution rules of physical, chemical and mechanical properties of shale reservoirs and carry out mathematical characterization, analyze the interaction between discontinuous surrounding rocks and drilling and completion fluids under multiple coupling conditions, develop dynamic and random fracture control methods, long-term effective diverting mechanisms and non-aqueous fracturing technologies for shale reservoirs, explore micro-nano scale adsorption and desorption mechanisms of shale, and study multi-phase seepage theories with upscaling and multiple coupling. The paper concludes with a summary of research progress and development trends in the key advanced mechanical issues. This paper serves as a reference and guidance for the scientific and efficient development of shale oil and gas in China.

Key words: shale oil and gas; drilling; seepage; reservoir stimulation

页岩气是近年来国际油气资源开发的热点,借助水平井分段压裂技术的规模化应用,美国实现了页岩气大规模的商业开采,并迎来了全球页岩气革命。据英国石油公司发布的 2014 年世界能源统计^[1],2014 年度美国天然气产量已达到创纪录的

收稿日期:2015-07-14。

作者简介:陈勉(1962—),男,辽宁沈阳人,1982年毕业于北京大学力学系,1991年获中国矿业大学矿山工程专业博士学位,教授,博士生导师,主要从事石油工程岩石力学方面的研究工作。

联系方式:(010)89732209,chenmian@vip.163.com。

基金项目:国家自然科学基金重大项目“页岩油气高效开发基础理论研究”(编号:51490650)及国家自然科学基金重点项目“页岩气开采岩石力学”(编号:51234006)联合资助。

93×10⁸ m³/d(3 280×10⁸ ft³/d),其中非常规天然气产量远超常规天然气产量,实现了天然气进口国向出口国的转变。美国能源信息署2013年6月发布的评估数据显示^[2],中国页岩气技术可采储量31.6×10¹² m³,占世界页岩气技术可采储量的14.3%。我国作为页岩油气资源丰富的大国,如何实现向开采强国的转变,是实现国家能源结构升级和低碳环保战略的迫切需求。

近年来,中国在页岩气开发方面开展了大量工作。2009年,中国石油在四川威远、长宁、富顺、永川等地区启动了首批页岩气工业化试验区建设;2010年,中国石油在四川盆地部署的威201井在寒武系、志留系页岩中获工业气流^[3];2012年11月,中国石化在涪陵焦石坝地区部署的焦页1HF井龙马溪组页岩层段经15段大型压裂改造后,获日产无阻流量16.7×10⁴ m³的高产工业气流,实现了我国海相页岩气勘探的重大突破^[4];2014年,中国石化在涪陵焦石坝地区建成了我国首个大型页岩气田,初步实现了页岩气的商业化开发。截至2015年9月,中国石油在长宁-威远、昭通国家级页岩气示范区共完钻108口气井,其中41口井进行了试采,累计生产页岩气5.6×10¹² m³,取得了页岩气勘探开发的重要阶段成果,创造了国内多个第一^[5]。虽然我国在局部地区页岩气勘探开发中取得重要突破,但由于基础理论研究不足,各个地区的开发效果差异很大,尚未掌握我国页岩气开发的一般性规律。中国石化在四川及其周缘的建南、涪陵、彭水、丁山等区块开展了页岩气勘探开发先导性试验^[6],除了涪陵焦石坝区块获得突破外,其他区块的页岩气井产量不佳,无法实现页岩气的经济有效开发。

与美国页岩油气资源相比,我国页岩油气的地质条件更为复杂^[7-8]、埋藏深度更深、地层年代更老、水资源更匮乏,页岩油气开发中仍存在诸多重要的问题亟待解决^[9],页岩油气渗流机理、开采理论认识不清,导致现有的工程设计、施工工艺等较大程度上还停留在工程尺度和经验模仿层面,无法在更广泛区域推广应用。笔者基于我国页岩气开发实际,从页岩气开采面临的工程地质难题出发,详细阐述了页岩油气开采过程中涉及的关键基础理论问题,分析了理论创新难点及挑战,提出了页岩气开发基础理论、研究方法和设计技术的研究方向,以期加速我国页岩油气资源开发提供指导和借鉴。

1 页岩油气开采面临的工程地质难题

1.1 地质条件复杂,页岩储层物理力学特征预测精度差

我国页岩储层构造改造强烈,多尺度裂缝、节理、断裂发育,岩性明显有别于砂岩、碳酸盐岩储层,非连续的特性决定了现有岩石力学理论与方法难以准确反映页岩力学特征。中美两国的页岩在储层特征上存在较大差异(见表1),美国页岩工程地质力学理论与方法不能直接用于我国页岩气勘探开发中。

表1 中美两国页岩气储层差异

Table 1 The different characteristics of Chinese and American shale gas reservoirs

特征参数	中国	美国
埋深	以>3 500 m为主	以1 500~3 500 m为主
构造	复杂,多次改造,断裂发育	简单,一次抬升,断裂较少
沉积类型	发育3大类,海相有效范围保存少	单一,主要为海相页岩
有机碳含量	中等一好,以1%~5%为主	丰富,以5%~10%为主
含气量	偏低(平均1~3 m ³ /t)	高(平均3~6 m ³ /t)
热演化程度 R _o	变化大,海相偏高(R _o >2.0%),陆相偏低(R _o <1.3%)	适中(R _o 为1.1%~2.0%),普遍为成气高峰阶段

1.2 生态环境脆弱,地表条件复杂,安全经济与环保钻井难度大

我国西南地区生态环境脆弱,对钻井流体的环保性能要求高。由于页岩储层层层裂隙发育,具有较强的非均质性和各向异性,毛细管自吸相关的微尺度作用显著,导致钻井过程中井壁失稳频发,漏失严重,安全钻井风险高(如焦页10-2HF井在钻井过程中井下故障频发),采用油基钻井液能在一定程度上缓解井壁失稳现象,但是成本高(钻井液费用占钻井总费用的10%~40%),且维护、处理复杂,对生态环境影响大,每口井钻井成本约4 000万元,远高于国外的1 600万元;同时,为有效降低成本,采用了“井工厂”开采模式^[10],但山区地貌使井场布置难度加大,现有的平台式工厂化作业设计、评估理论与方法已不能满足丛式水平井组的集约化施工的要求。

1.3 水资源匮乏,少井高产与环保压力大

美国页岩气产区多为平原地区,水资源丰富,通过多井能实现高产,我国西部地区缺水,南方多山区丘陵,必须通过全井段储层缝网体积改造实现少井高产。全井段缝网体积改造面临两大难题:埋藏深,裂缝闭合压力高,裂缝自支撑能力不能满足长效导流的要求;水资源匮乏(美国人均水资源量 $9\,920\text{ m}^3$,我国只有 $2\,100\text{ m}^3$),并且我国页岩气富集区块大部分位于西部生态脆弱、南方人口稠密地区,不能承受页岩气开发对水资源的巨大消耗和对地表水系的严重污染。

1.4 页岩气藏复杂,油气产能预测与方案设计针对性差

页岩气藏具备如下特征^[11]:1)页岩气赋存形式多样,游离气、吸附气、溶解气共存;2)储存空间复杂,纳米级有机质粒内孔隙、纳米—微米级粒间孔隙、微米—毫米级微裂缝和厘米级人工压裂缝发育,具有多尺度特性;3)储层孔渗极低,渗透率纳达西级别,孔隙度小于 10%;4)页岩脆性大^[12],压裂裂缝扩展随机性强,微裂缝发育。可见,页岩气藏有别于常规气藏,导致页岩气解吸-扩散-渗流机理以及渗流规律异常复杂,常规方法难以准确评价页岩气井产能,区块开发效果差异大。

2 关键基础理论问题

虽然我国在常规油气开发方面已经形成了比较完整的基础理论体系,但由于页岩储层明显有别于砂岩、碳酸盐储层,因而页岩油气开采中的许多重要科学问题尚未解决,严重制约了我国页岩油气工业化开采进程。目前,我国页岩油气开发存在以下关键基础理论问题尚待解决。

2.1 页岩非线性工程地质力学特征与预测理论

深部页岩的地质属性、力学行为和工程性质是有别于其他地层的本质特征,是影响页岩油气高效开发的关键因素。深部页岩的地质属性具有高度的隐蔽性、不确定性和时空变异性,需要重点研究其多尺度层理、节理及夹层发育特征,提出多节理、层理页岩的跨尺度结构表征方法。就力学性质而言,需要研究复杂应力条件下深部页岩的宏细观变形破坏机理和强度特性,建立非连续页岩岩体宏观力学特性评价的多尺度理论模型;同时,需要突破峰前的力

学参数或者峰后的应力衰减程度表征页岩脆性的局限性,提出科学的脆性指数定义,建立相应评价方法及分析预测模型,形成非连续页岩脆度峰后评价理论体系。就工程性质而言,需要研究深部地层复杂的应力环境及高精度的测试方法,揭示具有强烈构造活动特征的储层异常压力及地应力场形成机制,建立考虑强烈构造活动和非线性边界条件的地层压力预测及地应力场反演理论,重点考虑压裂改造中扰动引起的三维应力场演化规律,建立页岩地层三维地应力场形成与压裂扰动引起的应力场演化模型。基于上述基础理论,建立地球物理表征模型,为页岩油气高效开发理论研究提供必要的地质力学模型及相关数据。

2.2 多重耦合下的页岩油气安全优质钻井理论

页岩油气是典型的边际油气资源,工程技术要求高,作业风险大且成本高,长水平段钻井与多级压裂成为主要的勘探开发技术手段,工厂化作业成为降低成本的主要模式。目标体的复杂性、高技术需求和高成本压力给页岩油气钻井完井带来一系列基础理论方面的挑战,突出表现为传统理论和模型不再适用、力学-化学及固体-流体等多重耦合作用强烈。为此,需要进行技术攻关,形成一套页岩储层安全优质钻井基础理论:针对长裸眼水平井和工厂化钻井完井过程中普遍存在的油基钻井液成本高和环保压力大、井壁失稳、建井周期长和建井成本高等主要技术难题,需开展页岩储层伤害机理研究,研发低伤害环保型水基钻井液体系;探索力学-化学、固体-流体双重耦合条件下的井筒失稳机理及规律,建立水平井井筒完整性理论;依据可钻性与可压性进行高压水射流技术适用性评价,探索高压水射流钻井压裂一体化技术原理,形成页岩储层新型钻井完井方式;建立页岩水平井工厂化钻井完井评估与优化设计方法。

2.3 页岩地层动态随机裂缝控制机理与无水压裂技术

缝网压裂改造是实现页岩气商业化开采的关键,储层动态随机天然裂缝的相互连通是实现缝网体积改造的必要条件。页岩储层随机分布天然裂缝和层理弱面,导致裂缝的起裂特征和动态扩展规律异常复杂,裂缝形态难以辨识和掌握,需要将大尺寸真三轴物理模拟与声发射三维空间精准定位技术相结合,揭示页岩裂缝的空间起裂和扩展行为,为页岩缝网压裂的数值模拟研究提供基础。针对“井工厂”

模式的页岩储层体积压裂改造,需要研究不同模式、工艺措施、施工参数和储层随机天然裂缝分布条件下多裂缝间的应力场干扰、空间非平面裂缝特征和多井间裂缝网络的连通性,揭示“井工厂”模式下网络裂缝扩展与控制规律,建立页岩复杂缝网支撑剂运移机制与长效导流能力评价模型。针对油气开采和应力扰动诱发的页岩气井初始缝网失效特征,建立应力扰动与初始缝网条件下的页岩重复造缝理论;同时,提出页岩气储层的无水压裂新理论,揭示无水压裂介质流变调控机制与造缝机理,研制高性能无水压裂介质体系,建立无水压裂页岩储层缝网改造体积的评价标准,为页岩油气高效开发提供理论模型。

2.4 页岩油气多尺度渗流特征与开采理论

渗流机制和数值模拟方法是油气田开发工程的基础。页岩油气藏储层介质具有明显的多尺度性,流体赋存方式多样,因此流动机制复杂,基于连续介质和达西方程的传统渗流力学无法准确刻画页岩油气藏的多尺度流动机制。另外,由于页岩致密,很难进行室内流动物理模拟试验。为此,亟待研究有效的微观流动数值模拟方法,揭示页岩微纳尺度流动机制,借助于微纳尺度的数字岩心和格子 Boltzmann 方法,有效模拟气水、油水在页岩微纳孔隙中的流动。在此基础上,应建立尺度升级方法,将页岩的微观传输性质和流动模式升级到宏观层面,为宏观数值模拟、试井解释、产能评价以及潜力预测奠定基础。同时,由于应力对页岩缝网的形成、页岩渗流参数等影响较大,有必要研究应力场和渗流场耦合的数值模拟方法,为井工厂的设计、生产动态模拟及预测奠定理论基础。

3 理论创新难点与挑战

我国“十二五”规划明确要求“推进页岩气等非常规油气资源开发利用”。大力发展页岩油气迫切需要解决的理论技术难题包括:1)深化认识页岩工程条件,突破传统岩石力学和渗流理论;2)实现安全高效环保开发,创新水平井钻井完井一体化和缝网体长效压裂理论。

3.1 钻采过程中页岩储层物理力学化学特征演化规律与数学表征

深部页岩多尺度裂缝、层理发育,非均质性、各

向异性特征显著,明显区别于常规地质储层,研究页岩的力学行为、物理化学特征,是进行其他深入研究的基础。

3.1.1 页岩天然裂缝、节理、断层等地质特征跨尺度表征

对于深部非连续页岩而言,缺乏专门针对页岩裂缝、节理等地质特征从细观到宏观的跨尺度表征描述方法,阻碍了钻井液、压裂液与页岩间力学、化学、流体与固体耦合的相互作用机理研究。国内外研究岩体节理裂隙的模型有3大类:力学模型、几何模型和几何力学模型。由于结构面发育的随机性、非均匀性和复杂性,造成上述模型均不能准确地表征页岩的节理裂隙特征。目前,将地质统计学、分形理论与图论等相关理论引入裂隙模型,有助于准确地描述和模拟裂缝网络,但是相关研究处于起步阶段,对于非连续页岩岩体跨尺度表征需进一步深入。

3.1.2 非连续页岩力学特性及峰后脆度评价

页岩脆性是评价其力学特性的关键指标,对井壁稳定和压裂效果影响显著。现有脆性评价方法有20余种,R. Rickman 等人^[13]提出用矿物含量表征脆性,Boris Tarasov 等人^[14]提出了单轴压缩条件下基于能量理论的峰后脆度评价方法。基于压缩试验的页岩脆度理论和测井、矿物组分分析方法,不能定量解释页岩剪切或张性裂缝密度规律,不能揭示其在缝网发育过程中的作用机制。李庆辉等人^[15]采用了基于全应力-应变特征的脆性表征方法反映峰前和峰后力学特征,能够较准确地反映页岩脆性破坏的实质,但是研究刚刚起步,仍需深入研究。

3.1.3 跨尺度三维空间地应力分布特征与压裂裂缝扰动下的演化规律

压裂缝网体发育过程对压裂空间三维应力场的扰动机制不清楚,地应力预测精度差,不能有效支撑压裂设计。目前,国际石油工程学术界开展了应力阴影研究,J. Hyunil^[16]及 R. M. Bruce 等人^[17]分析了局部地应力场的扰动和控制机制及对裂缝转向、扩展的影响规律,并形成了水平井分段压裂裂缝间距设计方法,但对天然裂缝与人工裂缝同时作用的应力场以及化学作用的应力场演化尚鲜有涉及。

3.1.4 各向异性页岩地层的地球物理预测理论与方法

页岩储层中非连续层理、片理特征决定了岩石物理力学特征的各向异性。L. Thomsen^[18]引入了 3 个无量纲参数来表征岩石的各向异性程度,但只能表征弱各向异性介质的弹性性质。J. G. Berryman^[19]在 Thomsen 理论的基础上得出了扩展的 Thomsen 方程,也可适用于强各向异性介质。胡起等人^[20]通过融合各向异性微分等效介质 DEM 理论和 Brown-Korringa 各向异性流体替换模型建立了有机页岩各向异性岩石物理模型,提出了根据纵波速度反演岩石等效孔隙纵横比进行页岩油气储层横波速度预测的方法。Xu Weiya 等人^[21]基于岩石各向异性破坏准则,根据回归映射基本原理,推导出适用于横观各向同性地层的弹塑性模型。目前,关于各向异性页岩地层岩石物理性质的研究还很欠缺,富有机质多尺度页岩物理力学特性与地球物理参数缺乏定量表征,传统砂泥岩的解释模型预测精度差,无法定量预测地层特征,导致钻井完井设计缺乏科学有效性,需要进一步研究。

3.2 多场耦合条件下非连续页岩与钻井完井流体作用机理

页岩与液体作用的力学与化学耦合理论是揭示页岩水化后的受力、变形与破坏动态变化规律的重要基础,是从根本上解决页岩破岩效率、井壁失稳的时效性及储层伤害的关键科学问题。

3.2.1 地层可钻性与可压性评价研究

高压射流破岩与压裂条件下页岩储层可钻性与可压性评价是流固耦合下射流破岩和压裂改造的基础。现有可钻性评价模型主要用于三牙轮钻头和 PDC 钻头,存在以下问题:1)已不能满足混合 PDC 钻头、高压射流破岩等评价需要;2)岩石破碎规律需要深入研究,流体-页岩微观相互作用对破岩的重要影响需结合到可钻性评价中;3)缺乏有效的随钻评价手段,不能对实钻储层可钻性的横向变化进行有效评价。

传统理论认为,储层可压性取决于岩石的脆性、天然裂缝发育以及各向异性。B. Tiryaki^[22]探索利用随钻录井或利用井场钻屑 X 射线 SEM 评价岩石可压性的方法,存在的主要问题包括:1)将“脆性系数”等同于可压性,未充分考虑天然裂缝和应力各向

异性的影响,页岩储层可压性评价模型有待进一步完善;2)未考虑压裂液对储层岩石的裂缝扩展存在的强烈微观物理化学作用;3)缺乏有效的随钻评价手段,不能对水平段储层可压性的横向变化进行有效评价;4)需要结合新型压裂改造方式进行可压性评价。

3.2.2 页岩井筒失稳机理和完整性评估方法

页岩井壁稳定研究主要考虑力学化学耦合作用。M. Yu 等人^[23]建立了井筒在热应力和溶质化学扩散作用下的三维井壁稳定性数学模型,首次考虑了钻井液性质对井壁稳定性的影响。金衍等人^[24]利用力学与化学耦合的研究方法,提出了井壁坍塌周期的定量计算方法。A. Ghassemi 等人^[25]系统研究了力学、化学与热力学等多场耦合条件下的井壁稳定问题。Q. Wang 等人^[26]考虑了由于钻井液渗流和离子输运导致的岩石变形,建立了流体-固体-化学耦合作用模型,精细描述了钻井液化学作用对页岩井壁稳定性的影响。Liang Chuan 等人^[27]通过试验研究了井壁在钻头动载荷作用下的损伤失稳过程。上述研究虽然得出了一些有益结果,但假设页岩为各向同性,无天然裂缝损伤,对泥页岩井壁水化失稳的机理和本质认识还不够深入和完整,仍未考虑页岩气储层中普遍存在的天然微裂缝和岩石各向异性等因素对井壁稳定性的影响。

3.2.3 页岩储层伤害机理与环保型水基钻井液体系研究

页岩储层保护技术研究主要采用室内试验和数值模拟等方法。M. A. Siddiqui 等人^[28]通过室内试验评估了钻井液中聚合物对致密储层的伤害,检测了多种清洗液在去除泥饼方面的效果,优选了钻井液配方,进行了现场试验并获得成功。I. J. Lakatos 等人^[29]研究了致密砂岩储层中钻井液的自吸和渗透现象,结果发现,因致密砂岩的孔隙结构和岩石润湿性具有特殊性,会产生较强的毛细管力来自吸钻井液,造成储层“水锁”伤害。对此,国内外学者采用特殊的表面活性剂、可溶性水溶剂和大分子添加剂等化学处理剂来降低水基钻井液渗透和自吸现象引起的储层伤害,并起到了良好的效果。

3.3 页岩地层动态随机裂缝控制、长效导流机制与无水压裂技术

页岩储层分布有天然裂缝和层理,压裂过程中

天然裂缝、层理及人工裂缝相互作用,裂缝控制难度大,在高闭合压力条件下如何增大储层改造体积和提高缝网长效导流能力尤为关键。同时,页岩气开发主要采用的滑溜水大型压裂要消耗大量水资源并可能污染环境,而我国页岩气勘探的有利区域大部分处于重点缺水地区或邻近区域,面临着严峻的水资源约束及环保问题,有必要研究无水压裂理论与技术,为我国页岩气未来大规模高效开发奠定基础。

3.3.1 “井工厂”模式下网络裂缝扩展与控制机理

国内外学者针对裂缝相互作用、裂缝扩展进行了一系列研究,较多学者引入位移不连续法(DDM)建立模型分析复杂裂缝扩展机理,部分学者选用有限元方法研究裂缝扩展,并指出储层局部应力差、天然裂缝等是影响裂缝延伸路径的主控因素。目前该类研究主要针对于单井裂缝扩展,对于“井工厂”井组情况下多口水平井在多裂缝干扰下的裂缝扩展模型鲜有涉及。

3.3.2 页岩复杂缝网支撑剂运移机制与长效导流能力模型

R. Sahai 等人^[30]首次通过试验研究了垂直相交裂缝中的支撑剂运移和沉降规律。Guo Jianchun 等人^[31]考虑支撑剂颗粒与地层岩石的黏弹性蠕变相互作用,建立了线弹性条件下支撑剂颗粒嵌入预测模型。Deng Shouchun 等人^[32]研究了特定条件下页岩与支撑剂颗粒的相互作用。目前页岩缝网中的支撑剂运移研究尚未考虑流体流量自动重分配,同时未考虑支撑剂颗粒与页岩长期相互作用下的缝网导流能力。

3.3.3 应力扰动与初始缝网条件下的页岩重复造缝机理

目前国内未见页岩水平井重复压裂施工的报道,针对重复压裂造缝机理的研究没有考虑天然裂缝的影响。国内外在重复压裂机理方面取得了一些初步认识,Wu Ruiting 等人^[33]在 Cheng Yueming^[34]的研究基础上对水平井分段多簇裂缝扰动应力场进行了研究,J. B. Altmann 等人^[35]对页岩重复压裂的流固耦合问题进行了研究,均未考虑天然裂缝、温度场等复杂因素,有必要针对应力扰动与初始缝网条件下的页岩重复造缝机理进行系统地研究。

3.3.4 无水压裂介质流变调控机制与造缝机理

加拿大 GasFrac 公司最先提出 LPG 无水压裂

液理念,该压裂液对地层无任何伤害^[36],但国内研究还处于空白,有必要开展研究。超临界 CO₂ 压裂技术在苏里格气田现场试验获得成功,伯灵顿公司在 Lewis Shale 进行 CO₂ 干法加砂压裂也取得重大突破^[37],但液体流变结构特征以及适应性的基础理论研究还较薄弱,没有相关文献报道,需要进行探索研究。层内爆炸压裂也是低渗透储层无水改造的一种重要措施,有一定的理论研究基础^[38-39],但矿场可操作性与储层适应性没有相关研究报道,特别是需对页岩储层的可改造性进行深入研究。

3.4 页岩微纳尺度吸附/解吸机制、尺度升级及多场耦合的多相渗流理论

页岩储层因其多尺度的储集空间和多样性的油气赋存方式,传统的油气渗流理论不再适用,亟需开展页岩油气多尺度渗流特征及开采理论的研究,包括页岩气-液-固三相系统吸附/解吸机理,微纳尺度多相流运移机制及其尺度升级方法,应力场与渗流场全耦合的数值模拟,分段压裂水平井不稳态压力产量分析及开发潜力预测理论,以及“井工厂”开采模式下地质、油藏和工程参数对页岩油气流动的影响机制。

3.4.1 页岩气-液-固三相系统吸附/解吸机理及规律

对于页岩气储层的吸附/解吸机理研究,目前沿用煤层气固-气界面吸附理论,即认为满足固-气界面吸附的 Langmuir 等温吸附/解吸关系式。实际上页岩通常以泥岩形式在潮汐沼泽或者深水盆地的水环境下沉积,同时,页岩有机质(干酪根)的降解及甲烷气的产生,是甲烷菌在水环境下的无氧作用的结果,页岩气藏均存在一定的含水饱和度。因此,页岩气成藏过程在水环境下产气与聚集。一部分游离气在孔隙水中溶解与扩散并在孔隙表面吸附,一部分游离气运移到其他孔隙与裂缝中。因此,页岩气成藏与生产存在气-液-固三相界面的平衡吸附与解吸。固液界面吸附与解吸主要与孔隙水中的气体溶解度密切相关,对压力不敏感。目前国内外对于页岩气储层气-液-固三相系统下的吸附及解吸机理研究匮乏,鉴于目前页岩气藏开发中存在的吸附量与产量之间的冲突,基于页岩气实际成藏过程与生产过程开展该研究具有紧迫性。

3.4.2 页岩微纳尺度多相流运移机制及其尺度升级

微纳米孔隙为页岩储层的主要储集空间,流体

在微纳米孔隙内的流动规律与常规油气藏不同,毛管压力及相渗曲线与常规油气藏也存在差异,因此,亟需开展页岩微纳尺度多相流运移机制的研究。姚军等人^[40]提出基于扫描电镜等手段获取孔隙结构图像而构建数字岩心,再采用格子 Boltzmann 方法进行微观流动模拟的方法^[41],可以研究页岩微纳尺度的运移机制,但是目前研究还处于起步阶段,页岩数字岩心构建过程中没有区分孔隙介质(有机质孔隙和无机质孔隙)的差异,格子 Boltzmann 方法模拟仅为单相气模拟,且未全面考虑耦合运移机制,因此亟需开展考虑孔隙介质类型的数字岩心构建及微纳尺度多相流动模拟方法研究。如何考虑微纳米尺度的微观运移机制,是宏观数值模拟的关键,而目前对于页岩储层物性及运移机制的尺度升级尚未见文献报道。

3.4.3 应力场与渗流场全耦合的页岩油气藏数值模拟

目前页岩气藏的数值模拟大多未考虑应力场与渗流场的耦合或渗流场未全面考虑页岩储层耦合运移机制,而有关流固耦合的油气藏数值模拟研究大都局限于单孔隙介质或双重介质模型,且对于双重介质模型的研究仍存在诸多困难,主要难点在于基岩系统和裂缝系统间的耦合作用对水力参数的影响机制尚不清楚,因此目前大都基于经验公式,同时对于两者 Biot 有效应力系数的选取也没有成熟方法。然而,页岩油气藏通常发育天然微裂缝,人工压裂后会形成多尺度离散裂缝网络,为典型的裂缝性介质。随着储层地应力场的改变,裂缝会随之开启或闭合,对渗流场产生重要影响,与此同时渗流场的改变会反过来影响地应力场,两者相互影响。目前相关的商业或开源数值模拟器包括: TOUGH2-FLAC, CMG-GEM, DuMux 和 OpenGeoSys。前两者均采用控制体积有限差分或有限差分法,但采用序列耦合,计算精度受限,尤其是对于强耦合问题;后两者则采用有限元方法,可实现全隐式耦合,计算精度较高,但计算量巨大,且尚未形成裂缝性介质相关模拟功能。因此,亟需建立一套适用于页岩油气藏应力场与渗流场全耦合的全隐式裂缝性介质数值模拟理论和方法。

4 结束语

我国页岩油气的高效开发研究,需以提高页岩油气产量、减少物耗与保护环境为目标,开展从宏观

到细观的页岩油气渗流与动态断裂理论研究,采用不同尺度物理模拟手段,分析页岩气解吸附、汇聚、渗流关键过程,实现井型与人工缝网的匹配和耦合调控,形成页岩油气产能预测、水平井钻井完井一体化和缝网体长效压裂理论,在页岩油气开发基础理论、研究方法和设计技术上取得原创性的突破,从而为我国页岩油气高效开采奠定坚实的理论和技術基础,提高我国在该领域的国际学术影响力。

参 考 文 献

References

- [1] 潘潇. 国际地质新动态[J]. 资源环境与工程, 2014, 28(5): 762. Pan Xiao. The new development of international geology[J]. Resources Environment & Engineering, 2014, 28(5): 762.
- [2] 孙张涛, 田黔宁, 赵霞, 等. 世界页岩气开发现状及对中国页岩气合理勘探开发的建议[J/OL]. 国土资源情报, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4479.N.20150729.1627.002.html>. Sun Zhangtao, Tian Qianning, Zhao Xia, et al. Current development of shale gas in the world and suggestions for rational exploration and exploitation of shale gas in China[J/OL]. Land and Resources Information, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4479.N.20150729.1627.002.html>.
- [3] 赵常青, 谭宾, 曾凡坤, 等. 长宁-威远页岩气示范区水平井固井技术[J]. 断块油气田, 2014, 21(2): 256-258. Zhao Changqing, Tan Bin, Zeng Fankun, et al. Cementing technology of horizontal well in Changning-Weiyuan shale gas reservoir[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2014, 21(2): 256-258.
- [4] 周德华, 焦方正, 贾长贵, 等. JY1HF 页岩气水平井大型分段压裂技术[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(1): 75-80. Zhou Dehua, Jiao Fangzheng, Jia Changgui, et al. Large-scale multi-stage hydraulic fracturing technology for shale gas horizontal Well JY1HF[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(1): 75-80.
- [5] 任勇, 钱斌, 张剑, 等. 长宁地区龙马溪组页岩气工厂化压裂实践与认识[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(4): 96-99. Ren Yong, Qian Bin, Zhang Jian, et al. Practice and understanding of industrial fracturing for shale gas of Longmaxi Formation in Changning region[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(4): 96-99.
- [6] 路保平. 中国石化页岩气工程技术进步及展望[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(5): 1-8. Lu Baoping. Sinopec engineering technical advance and its developing tendency in shale gas[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(5): 1-8.
- [7] 葛洪魁, 王小琼, 张义. 大幅度降低页岩气开发成本的技术途径[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(6): 1-5. Ge Hongkui, Wang Xiaoqiong, Zhang Yi. A technical approach to reduce shale gas development cost[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(6): 1-5.
- [8] 薛承瑾. 国内页岩气有效开采值得关注的几个问题[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(4): 1-6. Xue Chengjin. Noteworthy issues on effective production of shale gas resource in China[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(4): 1-6.
- [9] 曾义金. 页岩气开发的地质与工程一体化技术[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(1): 1-6. Zeng Yijin. Integration technology of geology & engineering for shale gas development[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(1): 1-6.

- [10] 陈平, 刘阳, 马天寿. 页岩气“井工厂”钻井技术现状及展望[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(3): 1-7.
Chen Ping, Liu Yang, Ma Tianshou. Status and prospect of multi-well pad drilling technology in shale gas[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(3): 1-7.
- [11] 薛承瑾. 页岩气压裂技术现状及发展建议[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(3): 24-29.
Xue Chengjin. Technical advance and development proposals of shale gas fracturing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(3): 24-29.
- [12] 蒋廷学, 卞晓冰, 苏璠, 等. 页岩可压性指数评价新方法及应用[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(5): 16-20.
Jiang Tingxue, Bian Xiaobing, Su Yuan, et al. A new method for evaluating shale fracability index and its application[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(5): 16-20.
- [13] Rickman R, Mullen M, Petre E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: all shale plays are not clones of the Barnett Shale[R]. SPE 115258, 2008.
- [14] Boris Tarasov, Yves Potvin. Universal criteria for rock brittleness estimation under triaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 59: 57-69.
- [15] 李庆辉, 陈勉, 金衍, 等. 页岩脆性的室内评价方法及改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1680-1685.
Li Qinghui, Chen Mian, Jin Yan, et al. Indoor evaluation method for shale brittleness and improvement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1680-1685.
- [16] Hyunil J. Optimizing fracture spacing to induce complex fractures in a hydraulically fractured horizontal wellbore[R]. SPE 154930, 2012.
- [17] Bruce R M, Lucas W B. A discrete fracture network model for hydraulically induced fractures: theory, parametric and case studies[R]. SPE 140514, 2011.
- [18] Thomsen L. Weakelastic anisotropy[J]. Geophysics, 1986, 51(10): 1954-1966.
- [19] Berryman J G. Exact seismic velocities for transversely isotropic media and extended Thomsen formulas for stronger anisotropies[J]. Geophysics, 2008, 73(1): 1-10.
- [20] 胡起, 陈小宏, 李景叶. 基于各向异性岩石物理模型的页岩气储层横波速度预测[J]. 石油物探, 2014, 53(3): 254-261.
Hu Qi, Chen Xiaohong, Li Jingye. Shear wave velocity prediction for shale gas reservoirs based on anisotropic rock physics model[J]. Geophysical prospecting for petroleum, 2014, 53(3): 254-261.
- [21] Xu Weiya, Zhang Jiuchang, Wang Rubin, et al. An elasto-plastic model and its return mapping scheme for anisotropic rocks[C]//Yang Qiang, Zhang Jianmin, Zheng Hong, et al. Constitutive modeling of geomaterials: advances and new applications. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 371-380.
- [22] Tiryaki B. Evaluation of the indirect measures of rock brittleness and fracture toughness in rock cutting[J]. Journal of The South African Institute of Mining And Metallurgy, 2006, 106(6): 407-424.
- [23] Yu M, Chen G, Chenevert M, et al. Chemical and thermal effects on wellbore stability of shale formations[R]. SPE 71366, 2011.
- [24] 金衍, 陈勉. 水敏性泥页岩地层临界坍塌时间的确定方法[J]. 石油钻探技术, 2004, 32(2): 12-14.
Jin Yan, Chen Mian. A method for determining the critical time of wellbore instability at water-sensitive shale formations[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004, 32(2): 12-14.
- [25] Ghassemi A, Tao Q, Diek A. Influence of coupled chemo-poro-thermoelastic processes on pore pressure and stress distributions around a wellbore in swelling shale[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2009, 67(1): 57-64.
- [26] Wang Q, Chen Z, Ma P, et al. Analysis of effect factor in shale wellbore stability[R]. ARMA 2013-504, 2013.
- [27] Liang Chuan, Chen Mian, Lu Baoping, et al. The study of nano sealing to improve the brittle shale wellbore stability under dynamic load[R]. OTC 24919, 2014.
- [28] Siddiqui M A, Nasr-EI-Din H A. Evaluation of special enzymes as a means to remove formation damage induced by drill-in fluids in horizontal gas wells in tight reservoirs[R]. SPE 81455, 2003.
- [29] Lakatos I J, Bodi T, Lakatos-Szabo J, et al. Mitigation of formation damage caused by water-based drilling fluid in unconventional gas reservoirs[R]. SPE 127999, 2010.
- [30] Sahai R, Miskimins J L, Olson K E. Laboratory results of proppant transport in complex fracture systems[R]. SPE 168579, 2014.
- [31] Guo Jianchun, Liu Yuxuan. Modeling of proppant embedment: elastic deformation and creep deformation[R]. SPE 157449, 2012.
- [32] Deng Shouchun, Li Haibo, Ma Guowei, et al. Simulation of shale-proppant interaction in hydraulic fracturing by the discrete element method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 70: 219-228.
- [33] Wu Ruiting, Kresse O, Weng Xiaowei, et al. Modeling of interaction of hydraulic fractures in complex fracture networks[R]. SPE 152052, 2012.
- [34] Cheng Yueming. Mechanical interaction of multiple fractures-exploring impacts of the selection of the spacing/number of perforation clusters on horizontal shale-gas wells[J]. SPE Journal, 2012, 17(4): 992-1001.
- [35] Altmann J B, Müller T M, Müller B I R, et al. Poroelastic contribution to the reservoir stress path[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(7): 1104-1113.
- [36] 韩烈祥, 朱丽华, 孙海芳, 等. LPG 无水压裂技术[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 48-54.
Han Liexiang, Zhu Lihua, Sun Haifang, et al. LPG waterless fracturing technology[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 48-54.
- [37] 宋振云, 苏伟东, 杨延增, 等. CO₂干法加砂压裂技术研究与实践[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 55-59.
Song Zhenyun, Su Weidong, Yang Yanzeng, et al. Experimental studies of CO₂/sanddry-fracprocess[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 55-59.
- [38] 林英松, 刘兆年, 秦涛. 层内爆炸后储层裂缝分析方法研究[J]. 断块油气田, 2006, 13(1): 44-46.
Lin Yingsong, Liu Zhaonian, Qin Tao. Analysis methods of reservoir fracture after exploding in fracture[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2006, 13(1): 44-46.
- [39] 徐鹏, 刘新云, 石李保. 地应力对爆炸压裂影响规律的数值模拟研究[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(1): 65-69.
Xu Peng, Liu Xinyun, Shi Libao. Numerical simulation for the effect of ground stress on explosive fracturing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(1): 65-69.
- [40] 姚军, 孙海, 黄朝琴, 等. 页岩气藏开发中的关键力学问题[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2013, 43(12): 1527-1547.
Yao Jun, Sun Hai, Huang Zhaoqin, et al. Key mechanical problems in the development of shale gas reservoirs[J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2013, 43(12): 1527-1547.
- [41] 孙海, 姚军, 张磊, 等. 基于孔隙结构的页岩渗透率计算方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2014, 38(2): 92-98.
Sun Hai, Yao Jun, Zhang Lei, et al. A computing method of shale permeability based on pore structures[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2014, 38(2): 92-98.