

页岩气高效开采的力学问题与挑战¹⁾柳占立^{*,2)} 庄 茁^{*} 孟庆国[†] 詹世革[†] 黄克智^{*}^{*}(清华大学航天航空学院应用力学教育部重点实验室, 北京 100084)[†](国家自然科学基金委员会数理学部, 北京 100085)

摘要 页岩气是指赋存于富含有机质泥页岩中以吸附和游离状态为主要存在方式的天然气, 中国资源量丰富, 地域分布广泛. 页岩气开采能缓解我国常规油气产量不足、煤化石燃料引起环境污染等问题, 已成为中国绿色能源开发的重要领域. 尽管北美页岩气“革命”取得了成功, 目前也仅有预期产量 5%~15% 的采收率. 与北美地区相比, 中国页岩气埋藏深, 赋存条件差, 自然丰度低, 因此, 高效开采面临更多的困难和挑战. 近年来, 围绕国家重大能源战略需求, 瞄准技术发展前沿, 学术界和工业界联合对页岩气高效开采的关键科学和技术问题展开研究. 本文结合近三年四川、重庆地区的页岩气试验区块遇到的新问题, 针对中国未来 3500m 以下深部开采的新挑战, 如地质沉积、裂缝发育构造不同、上覆压力增加、水平应力场变化等, 介绍和总结了目前中国页岩气高效开采面临的力学科学问题, 主要包括多重耦合下的安全优质钻井力学理论和方法、水力压裂体积改造和多尺度缝网形成机制、多尺度渗流力学特性与解吸附机理等. “深部页岩气高效开采”的研究面向国家重大能源需求, 科学意义重大, 工程背景明确, 需要工程力学、石油工程、地球物理、化学工程和环境工程等多学科专家合作, 开展理论研究、物理模拟、数值模拟及现场试验等综合应用基础研究, 取得高效开采页岩油气理论与技术的突破. 学科交叉是研究页岩气高效开采问题、突破技术瓶颈的桥梁, 只有力学与石油工程、地球科学等学科实现深度交叉融合, 才能更加有效地推动页岩油气等非常规油气资源的开发.

关键词 页岩气, 工程地质力学, 钻井完井理论, 水力压裂, 多尺度渗流

中图分类号: TE37 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-16-399

PROBLEMS AND CHALLENGES OF MECHANICS IN SHALE GAS EFFICIENT EXPLOITATION¹⁾Liu Zhanli^{*,2)} Zhuang Zhuo^{*} Meng Qingguo[†] Zhan Shige[†] Huang Keh-Chih^{*}^{*}(Applied Mechanics Lab., School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)[†](Department of Mathematical & Physical Science, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China)

Abstract Shale gas is unconventional natural gas stored in shale in free or absorbed forms and sometimes in free fluid phase. The exploitation of shale gas has become a promising field of green energy development in China. Although great success has been achieved in shale gas revolution in North America with the technique of hydraulic fracturing, there is only 5%~15% of the stored oil and gas could be exploited, which is still a puzzle for petroleum engineers. Compared with the North America, China's shale gas reservoirs are deep burial, the geologic construction conditions are complicated and natural quality is low, therefore, efficient exploitation is facing more difficulties and challenges. In recent years, aiming

2016-12-27 收稿, 2017-04-26 录用, 2017-05-03 网络版发表.

1) 国家自然科学基金资助项目 (11532008, 11372157).

2) 柳占立, 副教授, 主要研究方向: 塑性力学, 断裂力学和复合材料力学. E-mail: liuzhanli@tsinghua.edu.cn

引用格式: 柳占立, 庄茁, 孟庆国, 詹世革, 黄克智. 页岩气高效开采的力学问题与挑战. 力学学报, 2017, 49(3): 507-516

Liu Zhanli, Zhuang Zhuo, Meng Qingguo, Zhan Shige, Huang Keh-Chih. Problems and challenges of mechanics in shale gas efficient exploitation. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49(3): 507-516

at the national major energy strategy and the frontier of technological development, China's academia and industry have carried out the preliminary study on some of the key scientific and technical issues. Around the new issues encountered in the shale gas extraction in Sichuan and Chongqing areas in recent three years, this paper introduces and summarizes the key mechanics problems and challenges that the high efficient shale gas extraction is facing, mainly includes the multi-field coupling safe and high quality drilling mechanics, hydraulic fracturing and multi-scale fracture network formation mechanism and multi-scale seepage and desorption mechanism of shale gas, to solve the challenges in deep exploitation below 3500 meters in China, such as geologic sedimentation, different fracture development, increasing overburden pressure, the change of horizontal stress, etc. The deep shale gas exploitation is not only to adapt to the national energy demand, but also has scientific and engineering significance. To realize the efficient exploitation of shale oil and gas, it needs the interdisciplinary collaboration of mechanical engineering, petroleum engineering, geophysics, chemical engineering and environmental engineering to carry out basic theoretical research, physical simulation, numerical simulation and field experiment. It has been recognized that interdisciplinary research is the bridge and the key to breakthrough the technology bottleneck and realize the efficient exploitation of shale gas. It is necessary of the deep collaboration between mechanics, petroleum engineering, earth science and other disciplines to promote the development of shale gas and other unconventional oil and gas resources.

Key words shale gas, engineering geology mechanics, well drilling and completion theory, hydraulic fracture, multiscale seepage

引 言

2015 年美国页岩气年产量为 4 307.82 亿 m^3 , 约占美国天然气总产量的 56.22%, 超过我国 2015 年天然气总年产量 (1 270.97 亿 m^3). 据美国能源部能源信息管理局 2013 年预测, 中国的页岩气储量排名世界第一, 占比全球储量的 36%, 是美国的 1.5 倍, 达到 1 115 万亿 m^3 ^[1]. 加快页岩气资源勘探与开发已成为页岩气资源大国的共同目标. 北美页岩气的商业化开发给世界各国的能源结构调整带来巨大影响, 特别是在当前我国不合理的能源消费结构背景下, 页岩油气开采将成为我国绿色能源开发的新领域, 从而成为缓解原油产量不足, 降低减少煤化石燃料环境污染的有效途径. “十三五”期间, 我国将推动能源结构不断优化调整, 天然气等清洁能源需求持续加大, 为页岩油气大规模开发提供了宝贵机遇^[2-3].

尽管北美页岩气“革命”取得了成功, 但是美国页岩油气田的产量数据表明, 目前只有预期产量 5%~15% 的油气开采出来^[4], 其原因是多方面的, 如水平井的井段缩短和井筒完整性没有达到预期, 页岩层改造的裂缝网络没有完好形成, 高比例的裂缝簇没有产出 (据 6 个区块统计, 30% 的裂缝簇没有产出), 油气渗流和解吸附尚未形成流动等. 相比北美以海相沉积为主的页岩气层, 其产区主要分布

在比较稳定的大地构造岩层内, 而中国南方海相页岩气储层存在于复杂山地区域和经历了后期地震的强烈改造, 页岩储层以裂隙和微孔为主, 层理、节理及夹层发育, 储层埋藏深, 页岩气赋存环境差^[5]. 以四川和塔里木盆地为例, 页岩气埋藏大多在 3 000 至 6 000 m, 且地表环境较差, 多山区或沙漠, 经历地震重构、严重缺水和道路崎岖, 因此, 施工成本和开发难度很高. 尽管条件困难, 在“十二五”期间, 页岩气勘探开发取得了重大突破, 2015 年形成以重庆涪陵为代表的年产 50 亿 m^3 的气田 (可供 3 200 万人口的年用气量), 成为北美之外第一个实现规模化商业开发的国家. 但从现有页岩油气开采技术层面看, 中国的页岩油气高效开采仍面临诸多理论、方法和工程技术的挑战.

因此, 页岩油气高效开采中的基础科学理论和工程技术问题亟需解决, 主要分为 4 个方面: (1) 页岩油气开采中的钻井完井力学理论与方法; (2) 水力压裂体积改造和多尺度缝网形成机制; (3) 多尺度多物理场渗流力学特性与解吸附机理; (4) 页岩油气开采新概念与新技术. 学科交叉是研究页岩油气高效开采问题、突破技术瓶颈的桥梁, 只有力学与石油工程、地球科学等学科实现深度交叉融合, 才能更加有效地推动页岩油气等非常规油气资源的开发, 实现“十三五”规划中“力争实现页岩气产量 300 亿

立方米”的目标。

1 页岩气高效开采的力学研究现状和发展趋势

页岩储层具有低孔、低渗透率的物性特征(孔隙度一般在 4%~6%, 渗透率小于 1.0 nD), 油气溢出阻力远大于常规天然油气, 基本无自然产能, 流体的渗透通道主要是裂缝网络系统, 因此对页岩储层进行大规模压裂改造是形成页岩气工业产能的主要手段^[6-7]。现有页岩气增产方法普遍采用水压致裂与水平井技术来增加储层的宏观透气性^[8-10]。整体来看, 我国页岩气开发基础理论和技术尚处于初步研究阶段, 例如, (1) 还没有完全掌握页岩特征, 造成前期勘探开发遇到了诸多问题, 亟需建立全面客观的页岩可压性评价指标以指导我国页岩气的高效开发; (2) 在页岩水平井钻井过程中, 出现井壁垮塌严重、垮塌周期明显等问题, 直接导致水平井段缩短、体积改造规模降低, 水平井井筒完整性因页岩气井特有的开发方式和井下工况受到严重挑战; (3) 水力压裂仅凭井口流量控制, 裂缝簇间距没有优化, 缝网形成机制尚不完全清楚, 弥散裂缝密度不能定量评估; (4) 页岩基质中气体的微流动(吸附、解吸、扩散与渗流)是影响产气量的决定因素, 这也是页岩气不同于常规天然气藏的主要区别, 由于对页岩油气渗流机理、开采理论认识不清, 导致现有的水平井压裂技术基本停留在工程尺度和经验模仿层面, 不能评估采收率, 无法在更广泛的区域形成工业产能。下面分 4 个方面叙述力学研究现状和发展趋势。

1.1 钻井完井力学理论与方法

此页岩非彼页岩, 已经成为工程界和学术界对页岩非均质性的共识。由于我国南方海相页岩气储层位于复杂山地, 具有后期强改造特征, 页岩水平井钻井完井工程面临诸多地质力学问题的挑战, 包括岩石物理和地质力学参数的非均质性、初始地应力场特征的系统认知, 岩石非线性变形、强度各向异性与剪切摩擦等力学行为, 矿物组分、有机质的微观力学特性以及矿物颗粒支撑和黏土胶结控制的滑移机理。因此, 高效开采页岩气, 必须能够评价页岩气储层、钻井和完井的质量^[11-12]。

(1) 页岩气储层、钻井和完井的质量评价体系

储层质量主要包括页岩有机质含量、储层物性以及地层孔隙压力, 特别是区块各异的储层伤害机

制等; 钻井质量主要包括水平井靶体深度, 水平段长度、轨迹方位的最优化以及全寿命周期的井筒完整性等; 完井质量主要包括页岩脆性、微裂缝发育以及水平地应力的非均匀性等。三者之间不是相互排斥或孤立, 而是相互依存、渗透和转化。例如, 2009 年—2016 年 3 月, 在四川长宁—威远页岩示范区的开发过程中, 套管变形达到 30%。在压裂的 101 口井中(水平井 90 口), 32 口井出现了不同程度的套管变形(变形点达 47 个), 导致桥塞无法坐封到位, 压裂段数减少, 单井产量降低, 加上井筒完整性差, 井生命周期降低, 从而严重影响了页岩气的采收率。套管变形成为制约长宁—威远区块页岩气开发的瓶颈之一。

(2) 页岩油气储层岩石物理、地质力学各向异性模型

工程地质部门基于地球物理技术和地质力学理论, 通过反演属性横向约束和井震结合, 搭建层面、断层和裂缝组成的构造模型, 揭示山地页岩强构造活动特征的异常地层压力和初始地应力场分布规律, 提供了“甜点”区位和建井钻井指南。为了指导现场施工, 需要优化设计井工厂的水平井靶体深度、水平段长度和轨迹方位, 建立页岩气单井产量敏感性评价方法及分析预测模型。

(3) 力学与化学耦合作用下的井壁失稳机理

在被应力损伤的页岩与钻井液发生化学耦合作用下, 井壁失稳导致套管变形的事件经常发生, 导致水平井段缩短和产量降低。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、环保压力大, 水基钻井液井壁易垮塌, 建井周期长等主要技术难题, 需要研发减小损害、降低滤失、平衡活度的环保型钻井液体系。

(4) 深部地层复杂应力环境高精度宏细观力学测试解释新方法

随着我国对深部(大于 3500 m)页岩气开采的需求增大, 通过建立高精度的宏细观力学测试解释新方法, 研究复杂应力条件下的页岩宏细观变形破坏机理和强度特性, 揭示层理面控制的页岩强度各向异性, 黏土矿物控制的页岩稳态、非稳态与脆性开裂特性; 基于 Biot 本构关系和各向异性强度准则对应力模型进行三维井壁稳定性校核, 指导钻井液流量和密度设计; 这些研究都是深部开采必须解决的基础力学问题。

1.2 水力压裂缝网形成机制

水力压裂是用带有相位角的射孔枪沿井筒分段微爆起裂,在岩层孔壁形成初始裂缝,在水压驱动下沿着地层最大主应力(压应力)方向形成扩展裂缝簇,裂缝速度为几米每秒的量级^[13-18]。含有支撑剂的压裂液作用在裂缝面上阻止裂缝闭合,形成扩展的裂缝网络。这种缝网在各向异性的非均质页岩中是随机分布的,而在各向同性的均质砂岩中则形成币状裂缝。

我国在页岩水力压裂工程方面已经有所突破,比较成功的区块是重庆涪陵焦石坝区块,但是对于水力压裂缝网形成机理的认识尚不完全清楚,这也严重制约了页岩油气的高效开发。我国深层页岩比重高,高应力效应引发的力学行为变化突出;多段多簇射孔、多种工作液压裂施工等综合因素控制着页岩裂缝形态。针对以上特征,要大幅改善体积压裂效果,必须对水力压裂缝网形成机制的关键问题开展研究。

(1) 页岩复杂缝网的可压性评价

评价页岩储层压裂后形成复杂裂缝网络的能力是缝网形成机制分析和储层质量评价的重要方面。狭义上可压性仅指脆性,广义上则包括所有控制缝网复杂程度的因素^[19-22]。矿场上使用最多的 Jarvie 矿物评价模型和 Rickman 力学评价模型本质上为经验公式。从地质学角度分析,脆性矿物含量、孔隙度、沉积作用、胶结矿物等均对脆性有影响;从力学角度分析,可以从应力与应变关系、力学强度参数、岩样破碎特征等方面提取不同的参数来表征脆性。除脆性外,天然弱面和地应力也是决定裂缝复杂程度的重要因素。从真三轴大物模实验以及弱面交互模型出发提取地应力差、弱面逼近角等参数作为评价参数;实验发现天然弱面胶结面特征、注入流体粘度和速率也有重要影响。目前关于可压性评价的研究虽然有所进展,但仍无统一认识,在应力特征、弱面力学参数、射孔与压裂工程参数等综合可压性评价方面,尚无成熟的模型。

(2) 裂缝起裂机制

随着页岩气开发深度增加,闭合应力亦大幅增加。在不同压裂液的扰动下,页岩具有不同的起裂模式。从考虑不同角度下井眼或单个射孔孔眼的围压应力,计算起裂方位与压力,逐渐发展到考虑页岩横观各向同性、应力-渗流-Biot 本构的耦合模型,以及井壁单个天然弱面、水化应力、弹塑性变形等渗

流-应力-化学耦合起裂模型。大量的实验及现场观测表明井筒工作液的扰动存在渗吸水化行为与前置酸液的力学损伤行为,但关于力学本构及渗流规律耦合的模型尚未建立。北美地区 6 个区块的现场监测表明裂缝簇失效率超过 30%,因此,在应力作用下的多孔眼起裂竞争与裂缝簇形成机制受到关注,其研究工作刚刚开始。

(3) 多物理场耦合的裂缝扩展模式

这是页岩水力压裂研究的热点,可以归结为如下问题:天然弱面的非连续、高应力弹塑性变形、分段压裂的多裂缝簇、围压作用下多场耦合。在 0.3~1.0 m 尺度范围的物理模型真三轴实验中,通过声发射或计算机断层扫描技术,初步揭示了裂缝在围压影响下界面处的两类行为:一类是裂缝穿越界面伴随双扩、转向行为;另一类是进入界面受限后止裂、分叉和起裂行为。在理论模型方面,通过数值模拟引入位移不连续建立多裂缝扩展模型,分析了裂缝间的应力阴影效应及竞争机制;裂缝交互及多裂缝随机转向扩展规律;模拟缝内支撑剂沉降和浓度分布;基于自相似原理模拟正交复杂裂缝三维形态,能够考虑裂缝干扰、滤失和支撑剂输送,但无法反映裂缝随机扩展与剪切断裂过程。对于岩层在多相流体作用下裂缝尖端的张剪复合开裂机制,需要综合考虑弱面结构及各向异性断裂准则、高围压下流固耦合效应、缝内支撑剂力学暂堵与流体滤失耦合效应等。

(4) 支撑剂输运机制

在页岩压裂中,支撑剂输运是在复杂裂缝通道中的固液两相流动,也是支撑剂离散流、裂缝连续流与基质滤失流的多尺度流动过程。现场监测反馈支撑剂的输运距离远远低于压裂液的响应距离。目前对单一裂缝中的支撑剂运移、沉降实验和理论模拟较多,认识到在清水压裂中平板裂缝内的支撑剂输运是依靠翻越砂堤维持平衡高度推进,而对复杂裂缝中的支撑剂输运研究较少,仅有少量实验研究了垂直正交裂缝中支撑剂的输运,提出了支撑剂从主缝进入次缝的两种控制机制:砂堤表面颗粒向次缝滚落的重力机制和主缝流速大于临界流速时才能携带支撑剂进入次缝的动能机制。在数值模拟方面,采用计算流体力学方法模拟了正交平板裂缝中清水输送支撑剂,得到了与物模实验类似的结论。目前实验和模拟均未解决粗糙裂缝壁面的动边界、壁面高温下压裂液的流变性、壁面多孔多裂缝下滤失行为

等问题,反映出对支撑剂的输运机制尚未完全明晰。

(5) 缝网形成机制和支撑剂作用原理

页岩压裂由近及远形成主裂缝簇+分支裂缝+次生裂缝组成的缝网。研究发现主裂缝及分支裂缝以张性 I 型裂缝为主,次生裂缝以剪切滑移 II 型裂缝为主。支撑剂以多层及单层铺置形式进入张性裂缝,却难以进入剪切错位裂缝,后者是依靠岩石粗糙面形成的自支撑裂缝,这可能是现场监测到支撑剂输运长度远低于压裂液响应距离的原因之一。针对支撑剂多层铺置短期导流能力的问题,从支撑剂尺度、强度、组合、层数等方面已开展较多研究。对于单层铺置,闭合应力的影响比较明显。对于自支撑裂缝,基于实际岩板的导流实验研究表明,闭合压力、壁面粗糙度、杨氏模量、剪切滑移量、非达西效应对导流能力的影响突出,不同的页岩导流能力差异最高可达 2 个数量级。对于滑移量计算,主要基于直剪实验拟合或者根据无限大地层单裂缝应变计算获得。目前需要解决的问题是剪切错位量计算、粗糙裂缝壁面的数学描述及重构、高闭合应力下裂缝的接触力学、粗糙壁面条件下裂缝导流能力预测等。

(6) 裂缝监测评价方法

目前页岩裂缝监测评价主要针对改造体积(SRV)开展,直接法包括微地震和测斜仪监测等,间接法包括裂缝破裂体模拟、裂缝扩展拟合、产量拟合等。井下微地震监测是应用最广泛的监测方法,通过微地震事件监测可以确定人工裂缝的整体趋势,但仍需要对震源机制深入研究以确定裂缝的产生性质、流体导流能力和维持时间等参数。目前震源机制的反演方法主要基于纵、横波振幅值进行,初步认识到不同井况水力压裂过程中诱导的微地震震源机制是有差异的。进一步需要对震源机制三维显示方法、优化观测方式、结合岩石物理和施工参数进行综合研究。基于改造体积评价技术,需要开展缝网跨尺度表征、裂缝延伸特征、储层参数反演等相关研究。

1.3 多尺度渗流力学特性与解吸附机理

页岩油气开采中的渗流与解吸附是一个多尺度、多场、多相耦合的力学问题^[23-25]。立足我国页岩油气开发实际,研究页岩油气藏渗流力学特性与解吸附机理,形成页岩油气多尺度渗流机理和开采理论,对于页岩油气藏的高效开发具有重要的科学价值和实际工程意义。

(1) 页岩油气藏孔隙结构特征和储集方式。

页岩孔隙类型多、结构复杂,具有多尺度性。主要由四类不同的孔隙介质构成:有机质中分布的纳米级粒内孔隙、无机矿物中纳米至微米级粒间孔隙、发育丰富的微米至毫米级天然裂缝以及更大尺度的水压裂缝。基岩孔隙是页岩油气藏的主要储集空间,基岩非常致密,主要为纳米孔隙,渗透率极低。纳米级孔隙直径在 5~800 nm 之间,大部分在 100 nm 左右,孔喉直径一般在 10~20 nm。目前一般采用扫描电镜、聚焦离子束扫描电镜、原子力显微镜、纳米计算机断层扫描等手段观测页岩的孔隙结构分布。吸附气和游离气共存,储集方式多样。游离气储集在孔隙空间和微裂缝中,吸附气储集在有机质中,吸附气可占总储集量的 20%~85%。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,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无氧作用的结果。页岩气藏均存在一定的含水饱和度,成藏过程在水环境下产气与聚集。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。而固、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,在气藏开发中存在吸附量与产量之间的矛盾,因此,亟需开展页岩气实际成藏过程、生产过程和多尺度运移规律的研究。

(2) 页岩油气在微纳米孔隙内的流动规律

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流动,其毛细管压力及相渗曲线与常规油气藏存在差异,亟需开展页岩微纳尺度多相流运移机制的研究。国内外在微纳米级致密孔隙介质物理模拟实验方面存在着微孔隙油水分布规律监测难度大、出口微量油水计量不准确等技术瓶颈,因此难以通过实验手段揭示致密微孔隙内流体渗流规律。目前国内对于微纳米多孔介质内流动机理的研究主要是采用数字岩心的微观流动模拟方法,包括图像处理、基础资料获取及数字岩心构建等。

(3) 页岩油气储层介质的多尺度流动特性

页岩油气藏储层介质具有明显的多尺度性,基于连续介质假设和达西方程的传统渗流力学无法准确刻画页岩气藏的流动机制,需要从分子尺度和介观尺度、达西尺度和油藏尺度及尺度升级方法进行

研究和论证. 在分子尺度上, 形成了基于分子动力学模拟的页岩油气吸附解吸及运移机理的研究方法, 研究甲烷、二氧化碳及水在黏土、有机质及干酪根中的吸附规律, 阐明页岩油气吸附解吸行为. 在介观尺度上, 建立了页岩多尺度数字岩心的构建方法, 以及基于数字岩心的单相和气水两相流动模拟方法. 根据分子尺度上流体流动机制, 分别建立了考虑微尺度效应、气体高压影响和有机质吸附影响的格子 Boltzmann 及孔隙网络模型流动模拟方法, 能够进行大密度比气水两相流模拟, 揭示了页岩气单相和气水两相孔隙尺度渗流规律. 在达西尺度上, 形成了基于均匀化理论的页岩基岩尺度升级方法, 考虑基岩不同孔隙介质的赋存方式和相应运移机理, 建立了考虑有机质分布特征和相应运移机制的尺度升级数学模型, 研究了微观孔隙结构特征对页岩油气宏观流动的影响. 在油藏尺度上, 建立了应力场和渗流场耦合的页岩裂缝扩展及油气开采数值模拟方法.

(4) 页岩油气藏应力、渗流、温度三场耦合数值模型

目前页岩油气藏的数值模拟大多未考虑应力场与渗流场的耦合或者在渗流场中未考虑储层耦合运移机理. 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, 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, 而渗流场的改变反之影响地应力场. 目前相关的商业软件对于此类强耦合问题尚未形成模拟功能. 因此, 亟需建立一套适用于页岩气藏应力、渗流、温度三场耦合的全隐式裂缝性介质数值模拟方法和技术.

1.4 页岩气开采新概念与新技术

深部页岩油气开采是未来我国页岩油气开采的重点, 然而现有钻完井理论、压裂技术和渗流解吸方式难以满足其高效开发需求^[7,26-27]. 截止 2016 年 9 月, 全国完钻页岩气井 960 口, 累产气约 114 亿 m^3 , 初步形成 3500 m 浅开发工程技术链. 然而, 四川盆地 3500~4000 m 页岩气资源量为 3.5 万亿 m^3 , 是 3500 m 浅资源量的两倍多, 可采储量 0.9 万亿 m^3 , 其开采已经纳入“十三五”规划. 不仅是我国, 美国 2016 年也成功试采开发了超 4000 m 深层超高压页岩气藏.

北美页岩气低成本开发得益于关键技术的进步. 在钻井方面, 北美正研发大直径连续管欠平衡钻井技术, 并取得成功, 水平井钻速达 30 m/h. 在完井压

裂方面, 美国 2016 年尝试超长水平井低成本开发页岩气, 水平段长度超过 5600 m, 作业成本降低 40%. 相比北美页岩气开采条件, 我国开采页岩气从地质地貌条件、钻井和压裂工程、钻完井成本等方面都更加复杂; 部分地区水资源匮乏, 生态环境脆弱; 采用常规页岩气开采方法和概念在深部页岩和一些复杂地质条件下的储层中开采成本高、效果差, 甚至在压裂后完全没有效果.

我国页岩气开采的形势严峻, 面临着 3 个方面的挑战: (1) 钻完井工程技术难题: 建井成本居高, 占总成本 50% 以上; 水平井钻速低, 缝网压裂改造有效性难以评定. (2) 资源条件复杂: 储层埋深大, 地质构造复杂、地表多丘陵, 井场布置困难; 深层地应力高, 井眼稳定和岩石破碎难. (3) 生态环境脆弱: 所有入井液均带来水资源和土壤污染风险. 我国水资源匮乏, 但同时压裂耗水量巨大. 我国人均水资源量仅 2100 m^3 , 单井压裂用水量达 1.8 万 m^3 . 针对这 3 个方面的挑战, 亟需提高改造效率, 增大泄气沟通面积; 创新技术方法, 降低单井作业成本; 亟需发展环境友好型技术, 减少耗水和废物排放. 最终实现又快、低成本、环保的技术突破. 发展页岩气高效开采的新理念、新技术, 为实际施工提供新的思路.

(1) 连续管钻完井一体化、新型压裂液及无水压裂技术

连续管钻完井一体化技术, 采用连续管微小井眼钻井方法, 在页岩气储层中钻成不同空间方位、数量、长度的分支井眼, 成井后直接采用连续管一体化实施水力压裂, 利用井间应力干扰作用控制形成三维复杂裂缝网络. 需要重点研究在页岩层理弱面与地应力竞争下, 径向井压裂裂缝起裂的模式和机理, 从而控制裂缝起裂的位置及扩展模式. 压裂液润滑裂缝壁面, 导致表面能降低, 从而影响裂缝扩展. 探索在径向井多裂缝竞争扩展中的流体压力分配和人工、天然裂缝作用等机制. 使用连续管钻完井压裂联作, 效率高和成本低. 压裂流体选用超临界二氧化碳或液氮等无水压裂流体替代水压裂, 具有黏度低、表面张力低、扩散能量强、压裂更易形成复杂缝网等特性, 从而达到安全高效、无水、环保开采页岩气的目标.

(2) 页岩气多级压裂井产能评价

只有做到掌握真实气体、限域效应等对于微纳尺度页岩气的传输特征与机理的影响, 并传递到宏观传输模型; 定量表征基质孔隙、天然孔隙以及岩心

尺度微纳米孔隙流动与天然裂缝渗流的相互耦合, 阐明其非均质渗流特性, 建立岩心尺度的渗透率模型, 才能建立显式表征非平面复杂裂缝网中多级压裂井产能的预测模型. 需要考虑自发渗析和基质、裂缝中的多相流动, 建立压裂液返排预测模型, 探索关井时期压裂液在基质中的自吸, 以及复杂裂缝网、天然裂缝发育程度对于压裂液返排的影响, 从而提高压裂液的返排率. 在此方面, 光纤生产剖面测试技术和压裂示踪剂动态检测技术是产能评价的重要手段, 可准确评价压裂井段产量贡献率, 为优化产能预测模型和完井设计提供基础数据.

(3) 基质与裂隙相互作用的原位科学管理

我国页岩基质的渗透率极低, 在纳达西水平; 基质与裂隙之间传导性能的差异高达几个数量级, 导致页岩气渗透率的演化成为一个漫长的过程, 而且基质与裂隙之间一直处于非平衡态, 准确定义和描述这一动态变化是实现页岩气有效开采的前提条件. 为了应对这些挑战, 需要实现水力压裂创造的页岩传气能力与页岩基质气体供应能力相匹配. 因此, 理解页岩基质传导性能和基质、裂隙之间相互作用, 在原位应力、压力以及温度条件下的演化过程, 并在此基础上实现基质与裂隙相互作用的原位科学管理, 实现页岩气可持续开采, 成为目前页岩油气高效开采的发展趋势.

2 页岩气高效开采的力学研究面临的挑战

2.1 钻井完井力学理论与方法

页岩水平井钻井完井工程面临诸多地质力学问题的挑战, 包括岩石物理和地质力学参数的非均质性、初始地应力场特征的系统认知, 岩石非线性变形、强度各向异性与剪切摩擦等力学行为, 矿物组分、有机质的微观力学特性以及矿物颗粒支撑和黏土胶结控制的滑移机理. 因此, 需要重点突破如下方面的力学研究.

基于地球物理、钻录测井和岩石力学一体化的地质力学环境非均质性、各向异性表征方法, 实现多尺度裂缝结构识别、异常地层压力预测和地应力场数值模拟. 开发深部地层复杂应力环境高精度岩石力学测试解释新方法, 研究复杂应力条件下页岩的宏细观变形破坏机理和强度特性, 揭示层理面、矿物组分、胶结结构等控制的页岩强度与脆性特性, 以及基于 Biot 本构关系的三维井壁稳定性校核方法. 钻井液与超低渗页岩压力传递效应的高精度测试技

术, 研究钻井液与井壁围岩应力损伤与化学腐蚀耦合作用下的压力、活度和损伤演化效应, 周期性失稳机理与规律. 研究多维度、跨尺度的地质力学属性特征及其演化规律, 压裂过程中矿物组分、层面遮挡、地应力约束的裂缝扩展特征, 地层压力的各向异性变化, 地层变形位移风险的量化表征等.

2.2 水力压裂缝网形成机制研究

页岩水力压裂的目的是形成匹配地层渗流的有效网络裂缝, 已有研究尚在初步认识阶段, 在高应力和物理化学作用下起裂机理、复杂介质下大型物模实验与数值模拟、复杂动边界支撑剂输运规律、页岩不同支撑模式下的长效导流能力、高精度压裂随机裂缝实时动态监测评价等方面仍存在诸多问题和挑战.

在裂缝起裂方面, 工作液自发渗吸及诱导裂缝机理、页岩水化及酸损伤本构、弹塑性页岩多簇多孔眼起裂机制目前仍认识不清. 在裂缝扩展方面, 多相流体作用下裂缝尖端应力场、裂缝剪切滑移机制、高应力力学非线性与流固耦合非线性理论、支撑剂-压裂液-裂缝多相作用与动态扩展耦合机制、非连续的多裂缝随机扩展理论需要寻求突破. 目前亟需开展如下研究工作.

(1) 建立裂缝簇扩展归一化条件. 在裂缝簇形成过程中, 水平井筒中的流量从微爆孔口分配给各压裂段内的裂缝簇, 簇内水压与分配流量和射孔摩阻的乘积成正比, 而裂缝尖端处地应力主导的应力强度因子与裂缝面上水压力构成驱动裂缝扩展的竞争机制. 工程上希望形成平行扩展, 行稳至远的裂缝簇, 而不希望出现裂缝之间的屏蔽效应, 后者是北美 6 个页岩气区块中 30% 裂缝簇没有产出的原因之一. 裂缝扩展和止裂既要满足流量的增加和保持, 又要满足应力强度因子或者能量释放率表征的断裂准则. 由此流量增加率和断裂准则构成了裂缝簇扩展的归一化条件. 在该条件中, 应力强度因子和断裂韧性是地球物理勘测数据的已知条件, 井口流量是工程控制条件, 射孔摩阻是可以计算的参数. 这样, 由此建立裂缝簇扩展归一化条件可以评估和优化裂缝簇间距和扩展长度.

(2) 建立基于裂缝密度的采收率评估模型. 在水平井的压裂过程中, 不但需要形成主裂缝簇, 更重要的是形成成百上千弥散裂缝的缝网结构, 这些裂缝包含水力裂缝本身的随机扩展和分叉, 以及它们与天然裂缝的交汇. 如何对裂缝簇和缝网进行力学

表征和数值模拟, 对流固耦合的断裂力学理论和模拟计算提出全新的挑战. 根据北美 5 个区块 26 个月油气产量调查统计, 保证页岩气充分解吸附的合理裂缝间距是 0.1 m, 该数据提供了一种逆向推算思路, 目前国际上由此形成了两种分析模型, 基于本构层次的损伤模型和基于多尺度自相似裂缝密度模型. 国外这些统计数据如何对比我国页岩气的现场裂缝间距数据, 结合井口控制流量和孔口摩阻系数, 可以推算裂缝密度和评估采收率. 研究的目标是能够开发页岩气工程模拟软件, 指导现场工程.

(3) 发展大物模实验技术和提高数据处理水平. 水压过程对裂缝扩展的影响主要体现在流体对裂缝尖端亚临界扩展的影响, 和水力的加载方式, 即地应力围压下裂缝面内分布力加载的影响. 水力裂缝面临的另一个问题是后期的检测和表征. 在室内的大物模实验中, 如中石油勘探院廊坊分院的 1.0 立方米三维水压实验设备, 是目前亚洲最大尺度的露头岩石的物理实验平台, 样品尺寸为 762 mm×762 mm×914 mm, 最大载荷为 69 MPa. 以声发射和截面观测为主的表征方式仍然与现场几千米深的压裂施工差别很大, 无法给出实际工程中流量与裂缝速度、扩展长度和多裂缝相互作用影响间距等真实数据. 因此, 水力裂缝的准确监测与表征仍然是亟待解决的问题.

(4) 揭示支撑剂运输和裂缝导流机制. 在支撑剂输运方面, 动边界下高温、高压、高应力下固液多相流理论、多重介质下流体竞争滤失理论、多裂缝壁面效应与支撑剂分布预测模型是需要解决的难题. 在裂缝导流能力方面, 页岩-支撑剂接触与页岩粗糙错位缝接触动力学理论、高温高应力下低浓度支撑剂与自支撑裂缝的长效导流实验与理论需要进行研究. 在裂缝评价方面, 跨尺度三维网络裂缝表征方法、高精度三维震源机制与力学反演理论、基于施工参数的裂缝延伸反演理论需要重点突破.

(5) 发展页岩压裂数值模拟软件. 目前国际上水力压裂数值模拟形成了一些软件体系, 从整体区块的压裂设计, 到单井压裂设计和实时监测分析等方面, 都有相应的软件, 主要有 FracpropPT, Meyer, TerraFrac, E-StimPlan 等, 这些软件的开发和使用大大促进了水力压裂技术的发展. 但是这些软件大多采用非常简化的力学模型, 认为储层是各向同性的均匀材料, 采用解析或半解析的裂缝模型, 把裂缝简化成对称平面裂纹, 忽略了裂缝复杂的几何形态及

多个裂缝之间的相互作用, 难以应对非均质各向异性页岩中复杂缝网系统的模拟. 针对页岩压裂的复杂特点, 在页岩压裂领域急需发展符合真实物理状况的水力压裂数值模拟工具.

2.3 多尺度渗流力学特性与解吸附机理研究

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, 在开采过程中的运移是应力、多相渗流的耦合过程, 常规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, 面临以下挑战性问题:

(1) 页岩气、液、固三相系统吸附/解吸机理及规律. 前期关于页岩气藏的吸附/解吸机理的研究只是局限于气、固两相系统, 其吸附/解吸机理与页岩气藏矿场生产特征差别较大, 大规模水力压裂造成很多水滞留在多孔介质中, 使得有机质的气体很难解吸释放. 工程实践和实验证明: 水相的存在对吸附/解吸影响较大, 因此有必要研究气、液、固三相系统页岩气的吸附/解吸机制.

(2) 页岩微纳尺度多相流运移机制及其尺度升级. 页岩不同则孔隙介质运移机制不同, 亟需构建考虑不同孔隙介质类型的页岩数字岩心, 全面考虑耦合运移机制, 开展微纳尺度气水、油水两相流动模拟, 揭示页岩储层微纳尺度渗流规律, 开展尺度升级研究, 得到考虑微观运移机制的宏观渗流模型.

(3) 应力场与渗流场全耦合的页岩油气藏数值模拟. 在实际工程中, 应力场与渗流场发生相互影响, 因此, 需要建立页岩油气藏力学模型, 开展页岩油气藏的应力场与渗流场完全耦合的数值模拟研究, 形成高效求解方法.

(4) 分段压裂水平井非稳态压力产量分析及开发潜力预测模型. 分段压裂水平井是页岩油气藏开发的主要手段, 目前非稳态压力(试井)解释及产能预测方法未能全面考虑页岩储层内的耦合运移机制, 因此亟需建立基于页岩储层耦合运移机制的渗流数学模型, 开展页岩油气藏非稳态压力(试井)解释及产能预测方法研究. 另外, 在井工厂模式下, 需要考虑同步压裂应力干扰水平井和人工裂缝, 揭示井工厂开采模式下的水平井位置以及分段压裂缝的空间配置, 形成井工厂优化设计方法.

2.4 页岩气开采新概念与新技术

页岩基质的超低渗和基质与裂缝传导性能之间的高差异是页岩气藏的两个最大特征. 页岩的渗透

性可以低到纳达西水平,基质与裂缝之间传导性能的差异可以高到几个数量级。这两个特征决定了页岩渗透率的演化将是一个漫长的过程,而且基质与裂缝之间一直处于非稳定非平衡的状态,准确定义和描述这个动态系统是页岩气高效开采的核心理论模型。目前的研究不但要关注水力压裂创造页岩气通道的能力,也要关注页岩气能否从基质中流出。美国页岩气开采面临可持续性的挑战,中国页岩气开采面临技术和方法上的突破。为了应对这些挑战,提出了实现水力压裂创造的页岩气传气能力与基质气体供应能力相匹配,避免“断气”现象发生,最终达到页岩气可持续性开采的新理论概念。研究重点是理解页岩基质传导性能和基质-裂缝之间相互作用在原位应力、压力及温度条件下是如何演化的,并在此基础上实现从制造裂缝到基质与裂缝相互作用的原位科学管控。

面对页岩气深部开采的挑战,发展连续管钻完井一体化技术。页岩坚硬致密,钻井破岩效率低,径向井眼成孔难,如何钻成不同空间方位、数量和长度分支井眼?如何通过径向孔眼间应力干扰,设计、控制并形成复杂裂缝网络?如何准确评价页岩气井产能?回答这些问题,需要发展连续管钻完井一体化技术:采用连续管钻多层、多孔径向井,加速解吸、扩散、渗流速度,径向井压裂一体化形成复杂裂缝网络,增大泄气面积,从而实现“一井多层、一层多孔、一孔多缝”的复杂三维裂缝网络,达到连续管钻完井压裂联作,高效率、低成本开采页岩油气的目的。同时建立压裂缝网形成机制和基于微纳尺度流动的产能评价方法,

总的来说,连续管钻完井一体化压裂缝网形成机制研究;新型压裂液及无水压裂机理研究;页岩油气井的开采寿命优化研究;安全环保页岩油气开采新概念和新方法研究等问题是目前页岩油气高效开采的力学研究面临的挑战。

3 结 论

根据近三年四川、重庆地区的页岩气试验区块遇到的新问题,中国未来 3500 m 以下深部开采的新挑战,如地质沉积、裂缝发育构造不同,上覆压力增加,水平应力场变化等新问题,目前我国页岩油气高效开采面临的主要力学科学问题如下:

(1) 多重耦合下的安全优质钻完井力学理论和方法

井壁围岩稳定性的多尺度、多物理场耦合力学理论研究;深部页岩(3500 m 以下)水平井稳定性控制理论研究;钻采过程中页岩储层伤害机理和地质力学特征演化研究;地层-水泥环-套管系统在复杂工况条件的破坏规律研究;水基钻井液适应性研究;非均质各向异性含孔隙页岩本构理论研究。

(2) 多尺度水力压裂缝网形成机理

深部页岩压裂致裂机理研究;多簇裂缝起裂和扩展与流场分布机理研究;页岩裂缝网的跨尺度表征与采收率评价体系研究;多物理场耦合和多尺度水力压裂数值模拟和裂缝管控技术研究;大物模实验和现场数据对数模的验证研究;裂缝缝隙的支撑剂输运机制与接触力学理论模型研究。

(3) 多尺度渗流力学特性与解吸附机理

深部页岩基质渗流的微观机制研究;数字岩心再现技术研究;多尺度、多相、多物理场耦合的渗流机理研究;尺度升级方法和渗透率计算研究;裂缝扩展和缝网演化过程中油气体解吸、驱替和渗流特性研究。井工厂开采模式下同步压裂裂缝扩展和多相多场耦合流动的三维数值模拟的大规模计算。

“深部页岩油气高效开采”的研究面向国家重大能源需求,科学意义重大,工程背景明确,需要工程力学、石油工程、地球物理、化学工程和环境工程等多学科交叉合作,开展理论研究、物理模拟、数值模拟及现场试验等综合应用基础研究,取得高效开采页岩油气理论与技术的突破。

致谢 感谢上海大学周哲玮教授,中国石油大学(华东)姚军教授、薛世峰教授,中国石油大学(北京)李根生院士、陈勉教授,北京大学张东晓教授,中石油钻井院杨恒林高工、田中兰高工、项德贵高工、陈朝伟高工,西南石油大学郭建春教授,中国科学院力学研究所赵亚溥研究员、袁泉子副研究员、刘曰武研究员、苏业旺研究员,中国科学院岩土力学研究所刘继山教授等对本文的贡献。

参 考 文 献

- 1 U.S. Energy Information Administration. Shale gas production drives world natural gas production growth. 2006. <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=27512>
- 2 王南,裴玲,雷丹凤等. 中国非常规天然气资源分布及开发现状. 油气地质与采收率, 2015, 22(1): 26-31 (Wang Nan, Pei Ling, Lei Danfeng, et al. Analysis of unconventional gas resources distribution and development status in China. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(1): 26-31 (in Chinese))
- 3 董大忠,邹才能,杨桦等. 中国页岩气勘探开发进展与发展前景.

- 石油学报, 2012, 33(s1): 107-114 (Dong Dazhong, Zou Caineng, Yang Hua, et al. Progress and prospects of shale gas exploration and development in China. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(s1): 107-114 (in Chinese))
- 4 Bažant ZP, Salviato M, Chau VT, et al. Why fracking works. *Journal of Applied Mechanics*, 2014, 81(10): 101010
- 5 李玉喜, 张金川. 我国非常规油气资源类型和潜力. 国际石油经济, 2011, 3: 61-67 (Li Yuxi, Zhang Jinchuan. Unconventional gas & oil resource type and potential of China. *International Petroleum Economy*, 2011, 3: 61-67 (in Chinese))
- 6 Nelson PH. Pore-throat sizes in sandstones, tight sandstones, and shales. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(3): 329-340
- 7 邹才能, 朱如凯, 吴松涛等. 常规与非常规油气聚集类型, 特征, 机理及展望——以中国致密油和致密气为例. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187 (Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, Characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2): 173-187 (in Chinese))
- 8 Nobakht M, Clarkson CR, Kaviani D. New type curves for analyzing horizontal well with multiple fractures in shale gas reservoirs// Proceedings of the SPE Unconventional Resources Conference, Calgary, Alberta, Canada, 15-17 November 2011. Society of Petroleum Engineers, 2011
- 9 Lewis AM, Hughes RG. Production data analysis of shale gas reservoirs// Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA, 21-24 September 2008. Society of Petroleum Engineers, 2008
- 10 朱光普, 姚军, 樊冬艳等. 页岩气藏压裂水平井试井分析. 力学学报, 2015, 47(6): 945-954 (Zhu Guangpu, Yao Jun, Fan Dongyan, et al. Pressure transient analysis of fractured horizontal well in shale gas reservoir. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(6): 945-954 (in Chinese))
- 11 Arthur JD, Bohm B, Layne M. Evaluating implications of hydraulic fracturing in shale gas reservoirs. SPE 121038, 2009
- 12 Akbarnejad-Nesheli B, Valko PP, Lee WJ. Relating fracture network characteristics to shale gas reserve estimation. SPE 154841, 2012
- Warpinski NR, Branagm PT. Altered-stress fracturing. SPE 17533, 1989
- 13 Soliman MY, East L, Adams D. Geomechanics aspects of multiple fracturing of horizontal and vertical wells. SPE 86992, 2004
- 14 Cheng Y. Impacts of the number of perforation clusters and cluster spacing on production performance of horizontal shale gas wells. SPE 138843, 2010
- 15 Wikel K. Geomechanics: bridging the gap from geophysics to engineering in unconventional reservoirs. *First Break*, 2011, 29: 71-81
- 16 Wu K, Olson JE. Investigation of critical in situ and injection factors in multi-frac treatments: guidelines for controlling fracture complexity. SPE 163821, 2013
- 17 陈作, 薛承瑾, 蒋廷学等. 页岩气井体积压裂技术在我国的应用建议. 天然气工业, 2010, 30(10): 30-32 (Chen Zuo, Xue Chengjin, Jiang Tingxue, et al. Proposals for the application of fracturing by stimulated reservoir volume (SRV) in shale gas wells in China. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(10): 30-32 (in Chinese))
- 18 张广明, 刘勇, 刘建东等. 页岩储层体积压裂的地应力变化研究. 力学学报, 2015, 47(6): 965-972 (Zhang Guangming, Liu Yong, Liu Jiandong, et al. Research on the geostress change of shale reservoir volume fracturing. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(6): 965-972 (in Chinese))
- 19 陈昀, 金衍, 陈勉. 基于能量耗散的岩石脆性评价方法. 力学学报, 2015, 47(6): 984-993 (Chen Yun, Jin Yan, Chen Mian. A rock brittleness evaluation method based on energy dissipation. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(6): 984-993 (in Chinese))
- 20 隋丽丽, 杨永明, 鞠杨等. 岩石可压裂性分形描述方法初探. 力学与实践, 2014, 36(6): 753-756 (Sui Lili, Yang Yongming, Ju Yang, et al. Fractal description of rock fracture behavior. *Mechanics in Engineering*, 2014, 36(6): 753-756 (in Chinese))
- 21 Chong KK, Grieser WV, Passman A. A completions guide book to shale-play development: A review of successful approaches toward shale-play stimulation in the last two decades//Proc. of Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, Canada, SPE133874, 2010
- 22 曾青冬, 姚军, 孙致学. 页岩气藏压裂缝网扩展数值模拟. 力学学报, 2015, 47(5): 994-999 (Zeng Qingdong, Yao Jun, Sun Zhixue. Numerical modeling of fracture network propagation in shale reservoirs. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(5): 994-999 (in Chinese))
- 23 魏明强, 段永刚, 方全堂等. 页岩气藏孔渗结构特征和渗流机理研究现状. 油气藏评价与开发, 2011, 1(4): 73-77 (Wei Mingqiang, Duan Yonggang, Fang Quantang, et al. Current research situation of porosity & permeability characteristics and seepage mechanism of shale gas reservoir. *Reservoir Evaluation and Development*, 2011, 1(4): 73-77 (in Chinese))
- 24 Loucks RG, Reed RM, Ruppel SC, et al. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous. Mudstones of the Mississippian Barnett Shale. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(11-12): 848-861
- 25 樊冬艳, 姚军, 孙海等. 考虑多重运移机制耦合页岩气藏压裂水平井数值模拟. 力学学报, 2015, 47(6): 906-915 (Fan Dongyan, Yao Jun, Sun Hai, et al. Numerical simulation of multi-fractured horizontal well in shale gas reservoir considering multiple gas transport mechanisms. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(6): 906-915 (in Chinese))
- 26 邹才能, 朱如凯, 吴松涛等. 常规与非常规油气聚集类型, 特征, 机理及展望——以中国致密油和致密气为例. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187 (Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, Characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2): 173-187 (in Chinese))
- 27 李道伦, 郑德温, 方朝合等. 页岩气井组分比例变化规律研究. 力学学报, 2015, 47(6): 899-905 (Li Daolun, Zheng Dewen, Fang Chaohe, et al. Sensitivity study of flowing gas composition for wells in shale gas reservoir. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(6): 899-905 (in Chinese))
- 28 张东晓, 杨婷云. 页岩气开发综述. 石油学报, 2013, 34(4): 792-801 (Zhang Dongxiao, Yang Tingyun. An overview of shale-gas production. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(4): 792-801 (in Chinese))