

页岩油气高效开发中的基础理论与关键力学问题

庄茁, 柳占立, 王永亮

(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)

摘要: 我国页岩油气开发刚刚起步, 许多基础理论和关键科学(力学)问题亟需明确和解决. 本文按页岩油气开发的全过程自然地将其分为四个相互关联的科学问题展开介绍和讨论, 包括: 页岩工程地质力学特征与预测理论, 地质力学找到气; 多重耦合下的页岩油气安全钻井完井理论, 钻井完井够到气; 页岩地层动态随机裂缝控制机理与新概念压裂理论, 体积压裂释放气; 页岩油气多尺度渗流特征与开采理论, 解吸运移产出气. 本文提出用水力压裂创造页岩传气能力, 用气体二次压裂页岩基质来解决气源问题, 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, 避免“断气”现象发生, 最终达到页岩气可持续性开采. 解决这些关键科学(力学)问题可以为页岩油气高效开发奠定可靠的基础, 具有重要的理论意义和应用前景.

关键词: 页岩油气; 工程地质力学; 钻井完井理论; 水力压裂; 多尺度渗流; 可持续性开采

中图分类号: TE37; O34

文献标志码: A 文章编号: 0254-0053(2015)01-0011-15

Fundamental Theory and Key Mechanical Problems of Shale Oil Gas Effective Extraction

ZHUANG Zhu, LIU Zhan-li, WANG Yong-liang

(Applied Mechanics Laboratory, School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The shale oil gas extraction is just beginning in China. Many of fundamental theories and key scientific (mechanical) problems should be clarified and addressed. In this paper, the whole process of shale oil gas extraction was naturally divided into four interrelated sections and discussed in detail: the mechanical characteristics of engineering geology and prediction theory of shale for finding shale oil gas; multiplicity coupling safety and quality well drilling theory for exposing to shale oil gas; dynamic random crack control mechanism for the shale layers and a novel concept hydraulic fracturing theory for gas release; multiscale permeability characteristic and production theory for the shale oil gas transfer. In order to achieve the goal of effective and sustainable extraction, a novel research concept of compatibility between the flow capacity in shale and the gas supply from matrixes was proposed to avoid the “no gas supply” phenomena. Solving these key fundamental scientific (mechanical) problems could lay a reliable foundation for the efficient extraction of shale oil gas, which is both theoretically and practically significant.

Key words: shale oil gas; engineering geology mechanics; well drilling theory; hydraulic fracture; multiscale permeability; sustainable gas production

页岩气是以吸附、游离以及流体相赋存于泥页岩中的非常规天然气. 美国和加拿大是对其进行大规模

收稿日期: 2014-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(11372157); 国家自然科学基金青年科学基金(11302115); 教育部博士学科点专项科研基金(20120002110075); 全国优秀博士学位论文作者专项资金资助(201326)

作者简介: 庄茁(1952-), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 博士. 研究方向: 非线性有限元和断裂力学. Email: zhuangz@tsinghua.edu.cn
柳占立(1981-), 男, 河南周口人, 博士. 研究方向: 非线性有限元和断裂力学. Email: liuzhanli@tsinghua.edu.cn
王永亮(1985-), 男, 河北唐山人, 博士后. 研究方向: 非线性有限元和结构工程. Email: wangyongliang@tsinghua.edu.cn

通信作者: 庄茁.

模开发的主要国家,我国页岩气开发则刚刚起步.2011年,美国页岩气年产量为 $2407.22 \times 10^8 \text{m}^3$,约占美国天然气产量的21.69%,超过我国当年天然气总年产量(约 $1011.15 \times 10^8 \text{m}^3$).2013年,美国能源部预测中国的页岩气储量排名世界第一,达到 $1115 \times 10^{12} \text{m}^3$ ^[1].北美页岩气的商业化开采给世界各国的能源结构调整带来巨大影响,在当前中国不合理的能源消费结构背景下,页岩气开采也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、降低化石燃料环境污染的有效途径.

我国页岩气开发基础理论和技术尚处于初步研究阶段,工程地质力学工作者还没有完全掌握页岩特征,前期开发阶段遇到了许多工程问题,亟需建立全面客观的页岩气评价指标以指导页岩气的高效开发.页岩油气规模开发主要依靠水平井和压裂改造两项核心技术,我国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.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0.001mD),油气溢出阻力比常规天然气大,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油气工业产能的主要手段,水力压裂是目前页岩压裂改造的常用技术.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,但是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,这也是页岩气与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,导致现有的设计技术较大程度上停留在工程尺度和经验模仿层面,无法在更广泛的区域形成工业产能.

因此,有针对性的对页岩在动态流固耦合作用下的变形、断裂与多尺度渗流机理、钻井完井和长期有效的缝网体压裂理论与设计新方法开展研究,具有重要的科学意义和工程前景,从而为我国页岩气的高效开发奠定坚实的基础理论,可以将其归结为如下四个基础理论方面的研究:1)页岩非线性工程地质力学特征与预测理论;2)多重耦合下的页岩油气安全优质钻井理论;3)页岩地层动态随机裂缝控制机理与新概念压裂理论;4)页岩油气多尺度渗流特征与开采理论.这些课题的依次顺序展示了从找气到产气的全过程:地质力学找到气、钻井完井够到气、体积压裂释放气、解吸运移产出气,上述页岩气开发过程涉及到诸多亟待解决的关键科学(力学)问题,相互关系如图1所示.

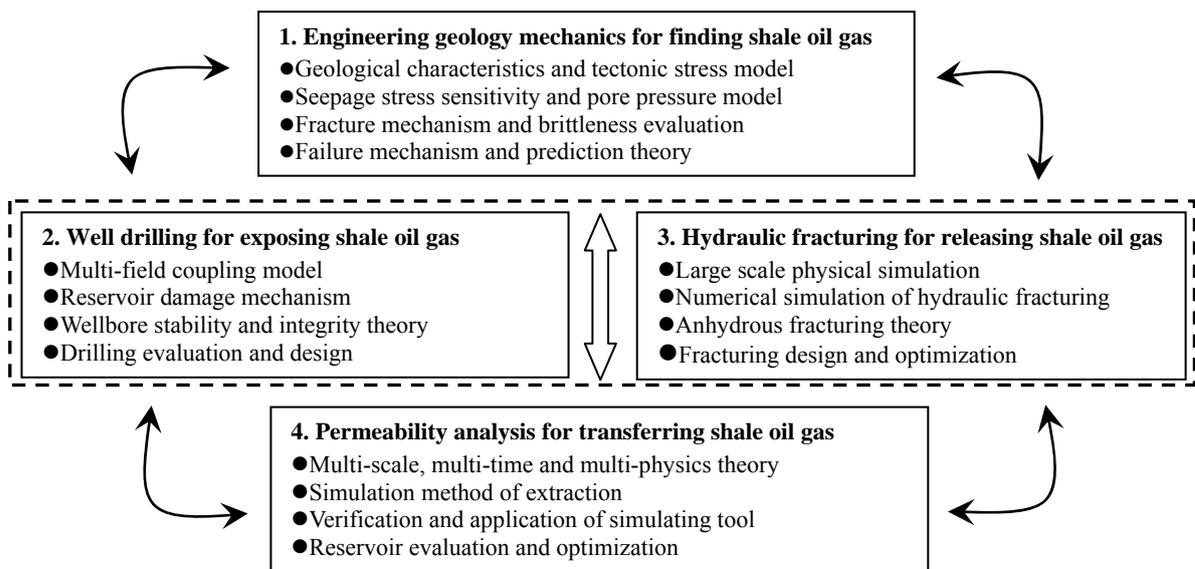


图1 页岩气开采基础理论之间的关系与关键科学(力学)问题

Fig.1 Relationship of fundamental theory and key scientific (mechanical) problems of shale gas extraction

需要重点指出的是,现在有关页岩气开采的研究主要集中在如何利用水力压裂创造页岩传气能力,忽略了对页岩气能否从页岩基质里流出来(气源)的研究,这就造成了美国页岩气开采面临是否可持续性的挑战,中国页岩气开采也面临技术和方法上的挑战(图2).如何解决气源问题,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, 发现并解决其中的关键力学问题, 避免“断气”现象发生, 最终达到页岩气的可持续性开采, 均成为新的研究课题。

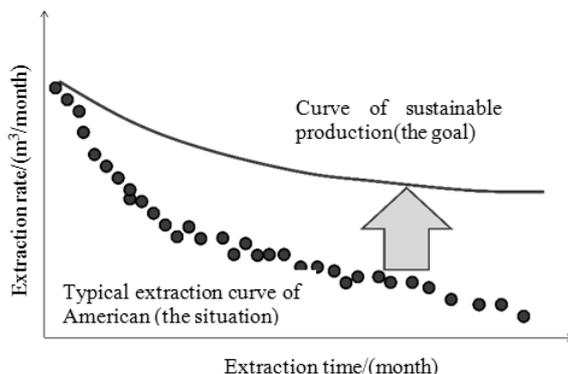


图2 页岩气开采现状与研究目标

Fig.2 The situation and goal of shale gas extraction

1 页岩工程地质力学特征与预测理论

1.1 深层各向异性页岩地层的物理预测研究现状

页岩属于超低渗透低孔隙度岩石, 孔隙结构的小变化会引起渗流阻力的大变化, 孔隙结构对应力的响应是敏感的, 页岩具有渗流的应力敏感性。此外, 页岩气的总有机碳含量中 20%~85%以吸附态赋存, 页岩气开采必然伴随着吸附气的解吸^[2]。页岩气解吸对孔隙率的变化和渗透性的改善也是明显的^[3-4]。因此, 有必要基于吸附解吸程度研究其对孔隙结构动态变化的影响和应力敏感性的影响。

页岩具有典型的各向异性力学特性。国内外学者就不同层理面取芯的力学特性进行了深入的研究, 分析了横观各向同性介质的抗压强度随岩石层解理面倾角发生变化规律^[5-6]。已有研究大多将地层考虑为正交各向异性、横观各向同性材料, 没有考虑在垂直井眼轴线平面上岩石力学性质各向异性的问题。近几年的研究表明, 在某些地质环境下, 岩石力学性质在垂直井眼轴线平面上各个方向的差异很大, Poisson 比的各向异性有时甚至超过 60%^[7]。

页岩气开发实践发现, 脆性页岩压裂时更容易产生较多的裂缝, 形成复杂的缝网。页岩的脆性指数是缝网压裂靶体优化和分段优化的关键指标之一。脆性指数计算公式主要有以下三类^[8-9]: 第一类是基于岩石的矿物组分, 其中石英、长石和碳酸盐岩含量与页岩脆度相关性较好, 是影响泥页岩脆度的主要因素; 第二类是基于硬度的评价方法, 弹性模量和 Poisson 比是主要的参数, 一般而言弹性模量高, Poisson 比低, 则脆性大; 第三类是基于强度的脆性评价方法, 主要在实验室进行岩石力学实验, 通过应力-应变特征进行评价。但是, 已有评价方法都没有考虑页岩的节理、裂缝、孔隙结构、高孔隙压力、吸附气等因素的影响。实际上, 在高孔隙压力或含有节理裂隙等条件下, 更易于发生 I 型断裂(拉破裂)。因此, 目前尚没有统一的页岩脆性评价方法。

由于油气田的开发涉及到具体某一地层或某些地层, 这些地层产状和力学性能差异甚大, 因此各层中的地应力值(方位)不尽相同, 需要构建精确的分层地应力数据和模型。目前石油工程中确定地应力的方法主要有各种岩芯试验、水力压力曲线解释、测井解释以及地震属性反演等^[10-12]。按照各种测井数据, 获得影响地应力的相关参数, 通过对地应力分布规律和影响因素的分析, 建立地应力计算的半经验半理论公式, 从而得到分层地应力数据。目前已有的分层地应力模型主要包括单轴应变经验关系式、Mohr-Coulomb 应力模型法、一级压实模型、黄氏模式、组合弹簧经验关系式、葛氏地层应力经验关系式、孔弹性水平应变模型法和应力-速度关系法^[13]。但是, 由于页岩气储层具有较强的非均质性和各向异性,

而已有地应力预测模型大部分建立在地层均质各向同性的基础上,多数学者的理论都只考虑上覆地层压力和构造应力的影响,对地应力的描述并不全面,因此并不能完全描述横观各向同性地层地应力的特性^[14]。目前,代表性的地应力分析软件有美国 GNT 公司开发的 GMI (GeoMechanics International) 软件(图 3),该软件可以分析井筒所处的地应力状态,通过测井解释并结合实测数据得到地应力的大小和方向,从而进行井壁稳定性、钻井优化、出砂预测、套管破损、裂缝渗透性分析等。

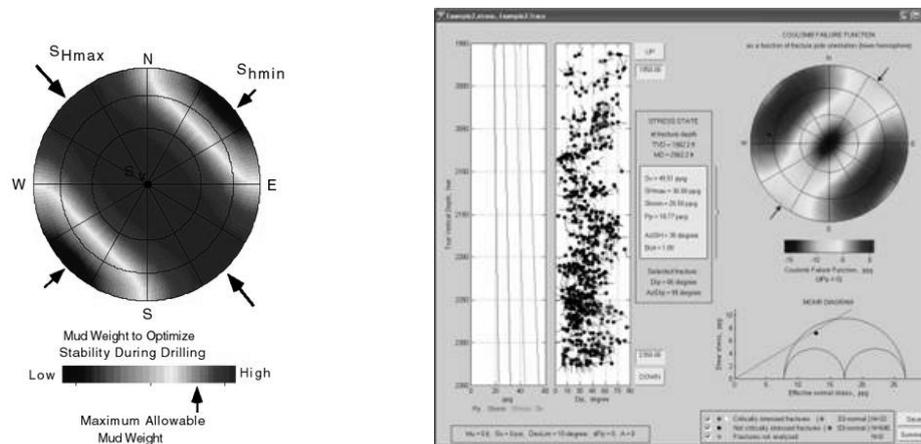


图 3 GMI 软件模拟算例

Fig.3 Simulation example of GMI

1.2 页岩地质特性及预测中的关键力学问题

页岩找气的基础工作是研究储层地质特征以及精细分层地应力模型,需要建立各向异性页岩地层中弹性参数的确定方法以及声波波速的表达式,进而基于三维地震等宏观尺度探测数据的综合解析,认清储层的构造形迹、构造运动、成藏作用、岩性及结构面空间展布,研究探测数据对不同尺度岩体结构的敏感性;开展储层岩体三维多尺度结构特征参数的研究,分析页岩宏观各向异性力学特性与纳观孔隙结构、微细观网络结构的关系,基于数字图像方法在多个尺度上构建页岩气储层表征单元体、本构参数的识别;研究页岩储层中的裂缝成因、充填状态、连通性,用 Monte Carlo 法构建页岩裂缝系统的空间分布,并按各级孔隙-裂缝的产气和导流能力表征多尺度裂缝系统。

分层地应力是人工裂缝扩展的关键影响因素,其研究是预测地层破裂压力、油层改造过程中裂缝发育方位与几何尺寸的重要依据。已有分层地应力预测模型大部分建立在地层均质各向同性的基础上,也没有考虑地表和地下加载或减载及开挖等引起的扰动效应。需要将页岩气储层视为横观各向同性的孔隙-裂缝介质,考虑流体可渗透性对应力分布的影响,在多孔弹性理论的基础上建立基于水压致裂数据的初始应力场模型,考虑大型水力压裂过程中人工裂缝对现今应力场的扰动,建立扰动后精细分层地应力模型。

渗流的应力敏感性是指和孔隙压力共同作用下孔隙结构改变的难易程度。由于页岩具有自生自储、超低渗透性等特征,页岩气的解吸、扩散、渗流的力学机理尚不够清楚。因此,考虑页岩矿物组分及含量的影响,从微观、纳观、分子层次研究吸附解吸的机理,分析吸附解吸程度(即广义的化学反应进展度)与孔隙结构动态变化的相互作用,研究变温吸附与解吸条件下页岩气运移规律,研究孔隙结构的动态变化所导致的页岩整体力学性质的弱化和对渗流敏感性的影响,是关系页岩气开采的关键科学问题。

页岩的脆性测试和评价是储层力学评价、遴选射孔改造层段和设计压裂规模的重要基础。目前,国内外学者对页岩脆性参数的研究主要是在实验室对矿物含量进行实测、通过测井资料求取弹性力学参数(主要是杨氏模量和 Poisson 比)、通过测试页岩的应力-应变特征、根据常规压裂试验手段等方面进行,

尚且没有共识的综合脆性指数评价方法. 在这方面, 基于页岩在赋存环境(温度、地应力、流体压力、水化)下的脆性破坏机理研究, 进一步考虑页岩的节理、裂缝、孔隙结构、高孔隙压力、吸附气等因素的影响, 探讨用断裂韧度和抗拉强度等岩石力学参数表达页岩脆性的力学内涵, 是进行脆性指数评价的关键性科学问题.

异常高压孔隙压力是引发钻井事故、造成页岩气开采损失的重要原因之一, 目前国内外还没有找到一种最理想的预测方法. 因此, 考虑脱水收缩、热收缩、化学反应引起的收缩、矿物相变收缩等因素, 分析异常高压与矿物组成、埋深、温度(热解)等效应, 基于多孔弹性理论研究异常高压孔隙压力形成机理, 建立异常高压孔隙压力模型与预测方法是关键性科学问题.

目前, 国内学者已经对上述问题开始研究, 朱万成等^[15-17]基于损伤理论, 建立了岩石破裂过程的损伤力学本构关系, 实现了岩石或岩体损伤的表征; 对节理岩体在温度场、渗流场和应力场(THM)作用下的耦合效应进行了研究. 陈朝伟等^[18-19]应用力学稳定性理论和方法研究井壁坍塌机理, 揭示了井壁坍塌的力学原因, 进行了井壁失稳机理和对策研究, 形成了井壁失稳现场诊断技术, 解决了部分油田现场的地质力学难题.

2 多重耦合下的页岩油气钻井完井理论

2.1 页岩油气钻井完井问题的对策研究

国内在页岩气水平井钻井过程中, 井壁垮塌严重并且垮塌周期明显, 直接导致水平段缩短, 体积改造规模降低. 其中, 流体与页岩的力学-化学耦合问题备受关注, 力学-化学耦合问题可分为两个层次: 流-固耦合问题和流-固-化耦合问题. 流-固耦合问题中, 孔隙流体的出现通过两种机理引发固体孔隙介质内部应力的相应变化, 一是孔隙压力的变化引起岩石体积的变化, 二是岩石应力状态的改变引起孔隙中未排出流体孔隙压力的变化, 这种扩散与变形的耦合使岩石力学响应具有了时间效应, 因而根据应力重分布算出的安全钻井液密度将随时间改变. 考虑孔隙流体对固体变形影响的理论主要有 Biot^[20]、Rice^[21]、Lubinski^[22]和 Yew^[23]等的各向同性单孔弹性理论, Carroll^[24]的各向异性单孔有效应力定律和 Chen^[25]的双重孔隙介质有效应力定律. 20 世纪 60 年代, Gray^[26]、Chenevert^[27]等指出井壁失稳不仅仅是力学问题, 泥页岩水化也是井壁失稳的重要原因. 随后, Darly^[28]等针对泥页岩水化问题进行了实验和理论研究, 提出了活度平衡和非理想半渗透膜的概念, 应用活度平衡理论引导泥页岩中水分流动, 高浓度盐水钻井液、油包水钻井液内相含过多盐分有利于井眼稳定, 对于有微小裂缝的页岩, 由于浸润性和表面张力的作用, 使得油基钻井液的临界毛管压力非常之高, 以至于整个液柱压力全部作用在井壁上, 而水基钻井液只是液柱压力和孔降压力之差作用在井壁上.

随着泥页岩流体与固体、力学与化学两个耦合问题独立研究的深入, 更复杂的渗流-应力-化学双重耦合研究成为可能, 并将力学与化学因素耦合起来进行泥页岩井壁稳定的定量化数学描述. 双重耦合理论研究大致可以分四类, 包括: 总压力理论、总吸附水热比拟法、等效孔隙压力法、总水势的增量弹性理论等. 在钻井液和页岩体系内, 水和离子在水力压差和活度差的作用下进入或流出页岩, 从而影响井眼附近的应力分布和页岩的物性, 这种影响通过渗透压或含水量的方式定量计入井壁稳定力学分析中. Lomba^[29]利用唯象规律, 通过不可逆传递过程的“流”与“力”的耦合, 将水力-电化学耦合起来, 其中电解质的浓度和板间距是估计泥页岩半透膜特性的关键系数, 可以通过调节流体中离子浓度控制水穿透泥页岩. 近几年, 多场耦合井壁稳定研究均是以此方法为基础, 但由于泥页岩水化的力学与化学耦合的高度复杂性, 很难估计泥页岩的唯象系数和反射系数. Ghassemi 和 Diek 建立了膨胀性页岩化学-孔隙弹性线性模型^[30], 并在此基础上提出了线性化学-孔隙-热弹性耦合模型^[31], 随后又建立了非线性化学-

孔隙-热弹性耦合模型^[32]，用全耦合化学-孔隙-热弹性有限元模型解决井眼实际问题。

针对富含宏观层理、微观网状天然裂缝页岩，Abousleiman 在分析模拟中采用孔隙力学的双重孔隙和双重渗透性理论对孔隙-裂缝页岩进行了三维地应力状态下孔隙-裂缝页岩地层斜井井眼稳定性数值模拟^[33-35]，由于钻井液与页岩流体压力差异和裂缝变形改变了井壁附近的有效应力，综合考虑裂缝网，基质岩石，钻井液密度的联合作用，分析了随时间变化的坍塌压力和破裂压力。在上述研究的基础上，流体饱和化学活性孔隙-裂缝性页岩地层斜井井眼稳定数值模拟又进一步开展^[36-38]，并开发出了 PBORE-3D 等相关求解软件（图 4）。

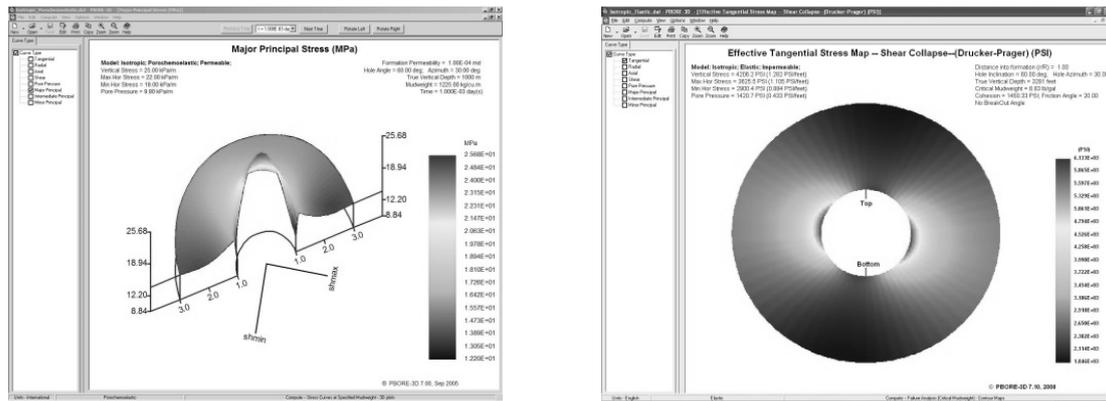


图 4 PBORE-3D 软件模拟算例

Fig.4 Simulation example of PBORE-3D

钻井阶段的井筒完整性问题，目前主要集中于套管-水泥环-地层组合体的密封有效性和长久性方面。Goodwin^[39]在实验室模拟套管内压力变化对密封完整性的影响，当套管内压增加时，套管-水泥环体系可保持其密封完整性，当套管内压升高至一定值（约 50-70 MPa）再卸压至一定范围（约 7MPa），此时体系密封性大幅下降；Boukhelifa^[40]也做了类似实验，验证了套管内压变化而产生环空微间隙的可能性。除实验研究外，前人还展开了理论解研究以及有限元分析：Fourmaintraux^[41]提出了系统响应曲线的方法，将复杂的热-化学-孔隙-力学耦合模型分解成一系列元素的合成，基于此方法，Saint-Marc^[42]综合考虑了水泥环初始应力的作用，建立了分析密封完整性的有限元模块（SealWell）。

2.2 页岩油气优质钻井中的关键力学问题

研究页岩气储层井壁坍塌机理，形成页岩气井在渗流-应力-化学耦合作用下的井壁稳定性分析方法，有利于页岩气钻井井身结构优化设计及钻井方式优选，指导水基钻井液体系的参数优化。拟解决的关键力学问题如下：1) 了解层理性页岩在力学-化学耦合作用后渗透率的变化规律；2) 建立层理性页岩在应力-渗流-化学耦合作用下的本构模型；3) 多因素耦合作用下页岩气储层井壁围岩应力-应变分布及数值计算；4) 确定层理性页岩坍塌机理及主要影响控制因素；5) 形成页岩水平井段井壁稳定周期的计算方法；6) 探明页岩气储层损害机理；7) 建立井筒完整性的实验评价方法。

中石油钻井院对长宁-威远页岩气示范区 2 口井的不同深度的龙马溪组页岩进行扫描电镜分析，得到如图 5 所示的扫描电镜图像，研究了页岩微观结构、黏土质级别、矿物质方向性以及力学参数等^[43]。

本课题组基于损伤力学，建立含损伤的页岩渗流-应力耦合模型，研究了岩石体积压裂的过程^[44]。采用 WEIBULL 分布模拟了岩石的非均质特性；基于统计强度理论和连续损伤理论，推导了岩石连续损伤演化控制方程及定解条件，并利用 COMSOL 与 MATLAB 软件联合编程建立并求解含损伤的岩石渗流模型。从求解得到的岩石孔隙率分布（图 6）可以看出，压裂液由井眼向四周呈圆形扩散，在岩石内部微裂缝处，扩散速度更快，该分析结果与相应大物模实验数据吻合；图 7 给出了损伤演化中岩石渗透率的变

化, 可以看出在井眼附近的损伤区域, 随着加载过程的进行, 岩石的渗透率不断提高; 图 8 对比了考虑岩石损伤与不考虑岩石损伤的渗透率, 可以看出损伤对岩石渗透率有所提高, 进而在工程实际中通过体积压裂, 提高页岩气的渗透率和孔隙率, 达到页岩气增产的目的. 页岩连续损伤研究与渗流模拟技术为体积压裂的后续研究提供了很好的基础.

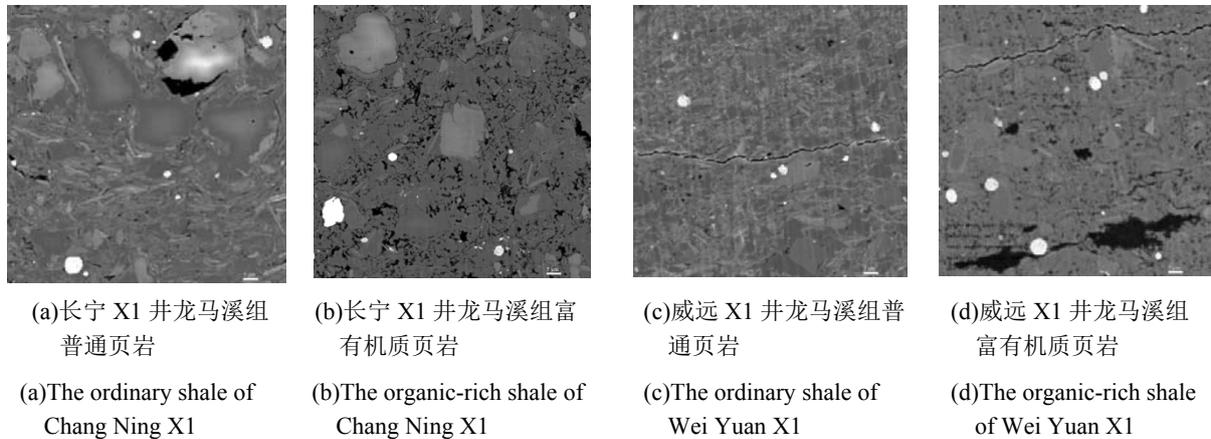


图 5 龙马溪页岩微观结构

Fig.5 The microscopic structure of Long Ma Xi shale

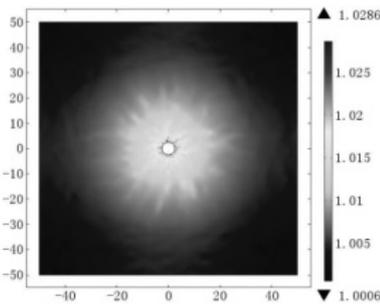


图 6 孔隙率比值 ϕ / ϕ_0 分布

Fig.6 The porosity ratio ϕ / ϕ_0

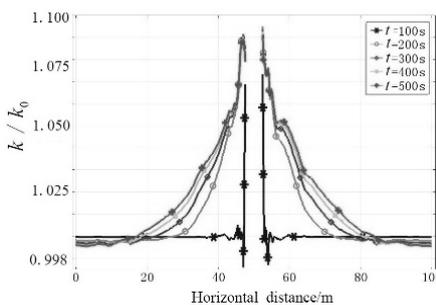


图 7 损伤岩石渗透率

Fig.7 Permeability in damage process

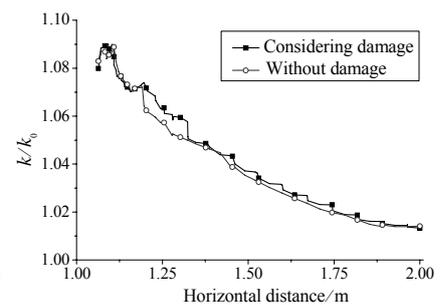


图 8 损伤与无损伤岩石渗透率对比

Fig.8 Permeability comparison

3 页岩地层动态随机裂缝控制机理与压裂理论

3.1 页岩体积压裂裂缝网扩展与控制

随着页岩气、煤层气、致密气等非常规天然气藏大规模开发, 大型水力压裂物理模拟实验在认识复杂裂缝起裂扩展机理、模拟现场压裂工艺方面起重要作用. 20 世纪 60 年代, 国外 Thomas^[45] 和 Biot^[46] 分别开始水力压裂物理模拟方面的研究, 从 20 世纪 90 年代末至今, 我国学者陈勉^[47] 和姚飞^[48] 利用小规模物模实验设备也开展了相关研究. 中石油勘探院于 2012 年在国内率先建立目前国际领先的大物模实验系统, 岩样的标准尺寸为 762*762*914mm, 加载最大应力可达 69MPa. 对水力压裂裂缝实时扩展动态进行了准确监测. 目前, 水力压裂实验中采用的声波监测裂缝扩展技术主要分为主动声波和被动声波两类. 2001 年, 荷兰 Delft 大学的 De Pater 等自主开发的主动声波监测技术具有国际领先水平^[49], 但该技术只能进行二维平面定位, 对于转向缝或扭曲缝定位还存在误差. 被动声波监测技术是目前应用最广泛的监测技术, 多次应用到小型岩心板压裂实验中, 并取得较好监测效果^[50].

国内外对岩体压裂裂缝扩展的数值模拟主要有以下几种典型方法: 基于边界元的位移间断方法 (DDM)^[51], 当裂纹扩展时需要重新剖分网格, 以求解裂纹面处位移间断在岩体内部产生的变形场; 基

于有限元和非连续变形分析的流行元方法 (NMM)^[52], 该方法很容易处理岩体内断层、节理、裂纹等不连续面, 但扩展到三维有一定困难; 基于解析或半解析裂缝模型的离散裂缝网方法 (DFN)^[53], 该方法求解效率高, 在商业软件中广泛采用, 但其基于简单的平面裂缝模型, 难以考虑天然裂纹、材料各向异性、孔隙压力等对裂缝网形貌的影响. 当前广泛应用的压裂软件以国外产品为主, 代表性的主要有 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. 但是由于这些软件大多采用非常简化的裂缝模型, 难以应对页岩中复杂的缝网系统. 如 FracpropPT, E-StimPlan 等软件, 认为储层是各向同性均匀材料, 采用解析或半解析的裂纹模型, 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 (图 9). Meyer 公司基于 DFN 模型研制求解模块并将其融入压裂软件 (Meyer Fracturing Simulators) 中, 该模块建立拟三维模型, 构造复杂裂缝网时假设裂缝网为两组正交的平行裂纹面组成, 且平行裂纹面间距相等, 不能考虑天然裂纹、材料各向异性、孔隙压力等对裂缝网形貌的影响, 另一方面该模块还假设裂缝网区域为以射孔为中心的椭球区域 (图 10). 这些假设都与微地震观测收集到的数据有较大差距, 在页岩压裂领域亟需发展更加符合真实物理状况的裂缝扩展模拟工具.

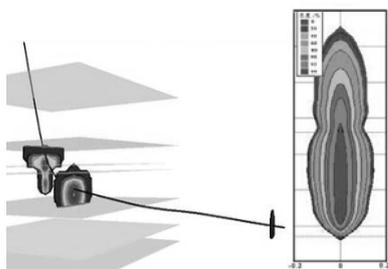


图 9 FracpropPT 软件模拟算例

Fig.9 Simulation example of FracpropPT

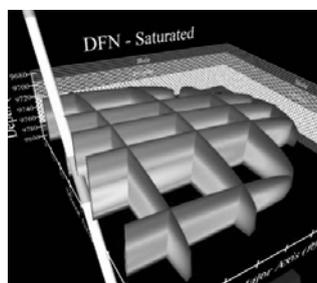


图 10 Meyer Fracturing Simulators 软件模拟算例

Fig.10 Simulation example of Meyer Fracturing Simulators

现在有关页岩气开采的研究主要集中在如何利用水力压裂创造页岩传气能力, 忽略了对页岩气能否从页岩基质里流出来 (气源) 的研究, 这就造成了美国页岩气开采面临可持续性挑战, 中国页岩气开采面临技术和方法上的挑战. 为了解决这一问题, 往往需要对页岩储层进行二次压裂. 目前, 对页岩进行二次压裂常规采用的技术是重复压裂^[54]. 传统重复压裂每次均采用水力压裂, 达到对页岩储层进行优化改造的目的. 国外研究者 (Alpern) 已经针对二次无水压裂开展探索性实验研究, 在相同的实验材料 (聚甲基丙烯酸甲酯)、外荷载条件下, 对存在初始裂缝的部位进行气体 (CO₂、N₂、He、Ar、SF₆) 再次加压, 分析裂缝再次扩展的气体压力大小以及最终形成缝网的形态, 研究表明不同填充气体产生的结果大不相同, 使得各向异性页岩二次无水压裂研究变得更为复杂.

3.2 页岩体积压裂中的关键力学问题

研究页岩动态裂缝网形成机理, 探索新概念压裂理论, 拟解决的关键力学问题有: 1) 建立能考虑页岩各向异性、页岩孔隙中流体压力变化及页岩气解吸附对页岩基体变形影响的新型本构模型; 2) 建立符合页岩特性的起裂扩展准则; 3) 研究水压裂缝间距、地应力状态、压裂裂缝和天然裂缝夹角、裂缝间摩擦力等各种因素对水压裂缝扩展路径选择的影响; 4) 页岩中三维裂纹的产生、扩展、分叉、汇合等几何拓扑描述, 研究裂缝在页岩储层中的任意路径扩展; 5) 研究多相气体流动下复杂缝网扩展规律, 理解二次气体压裂中控制稳定产气的主要因素.

本课题组已经对上述力学问题进行了尝试分析, 基于扩展有限元方法, 分别独立开发了二维、三维、壳体单元断裂模拟程序、复合材料断裂程序和两相流体程序^[55-60], 并应用这些程序研究了如图 11~图 16 所示的复杂材料、复杂构型的断裂力学难题.

自 2012 年起, 本课题组开始进行页岩裂缝扩展模拟软件的研制, 该软件目前已经能够处理复杂裂缝的任意扩展, 并能计算简单裂缝中流场的流动^[61]. 在该程序中采用 Biot 本构关系模拟多孔岩石介质, 通过扩展有限元方法模拟复杂裂缝的任意扩展; 页岩缝间流场通过质量守恒方程及扩散方程进行计算得到裂缝面上的压力和流量分布. 使用 Python 语言编写如图 17 所示的图形化界面, 进行计算参数的输入: 1) 初始裂纹面位置及模型几何信息; 2) 岩石的材料参数以及开裂准则 (如最大主应力或最大主应变); 3) 液体注入流量、三个方向地应力等载荷信息. 通过断裂模拟计算和流场压力计算, 求得描述页岩压裂缝网体的几何形貌的开裂后的几何形态以及用于评估压裂效果的开裂裂缝面积等信息. 图 18 所示的是模拟得到的页岩人工压裂裂缝和天然裂缝形成的复杂缝网.

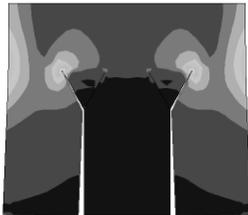


图 11 裂纹分叉

Fig.11 Crack branching

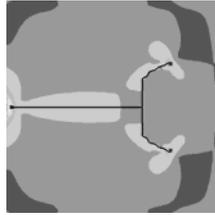


图 12 裂缝正交汇合

Fig.12 Orthogonal crack convergence

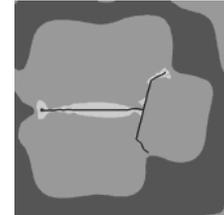


图 13 裂缝斜交汇合

Fig.13 Oblique crack convergence

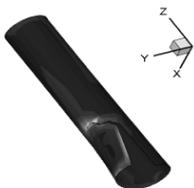


图 14 管道断裂

Fig.14 Pipeline fracture

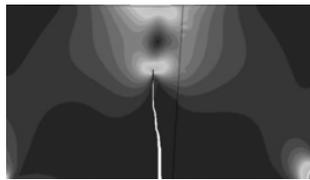


图 15 双材料裂纹扩展

Fig.15 Double material crack propagation

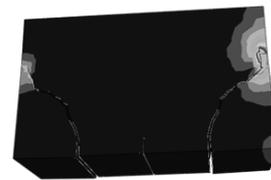


图 16 三维断裂

Fig.16 Three dimensional fracture

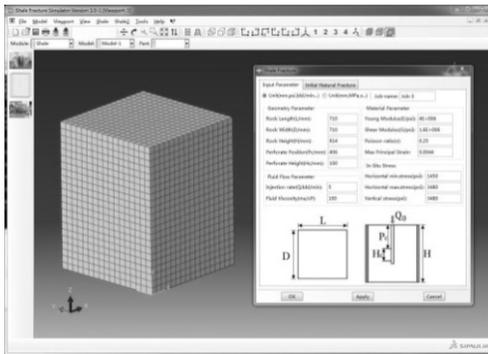


图 17 图形化输入界面

Fig.17 Graphical input interface

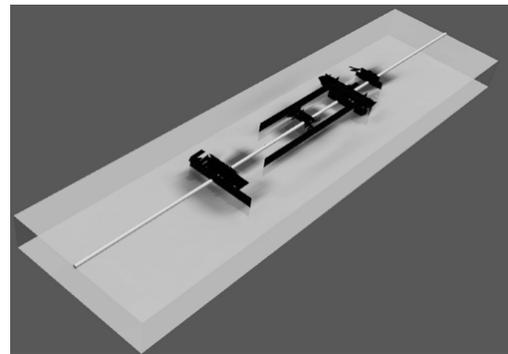


图 18 裂缝网构型

Fig.18 Fracture network configuration

中石油勘探院开发的全三维水力压裂物理模拟系统 (简称大物模), 具有目前国际领先的岩样最大尺寸、最大应力、实时声波监测的实验设备优势, 大物模系统如图 19 所示. 该系统利用主/被动声发射结合监测技术, 能够对岩样内声发射事件进行实时监测和定位, 为进行复杂裂缝表征和研究提供了途径和手段^[62], 图 20 为水力压裂形成的缝网系统.

4 页岩油气多尺度渗流特征与开采理论

4.1 页岩储层多尺度流体运移机制研究现状

页岩储层中页岩气主要以游离和吸附形式共存, 吸附气可占总储集量的 20%~85%, 其含量主要与有

机碳含量高低成正比关系^[63]。页岩气解吸对页岩气藏开采起重要作用，但是这也使得开采过程中储层的渗透率演化更加复杂。因为储层中吸附气体的解吸可使页岩基质收缩，而气体的吸附可使页岩基质膨胀，储层基质的变形导致储层渗透率发生改变。储层基质膨胀/收缩变形量可以通过注入不同种类气体来确定，储层中裂隙的渗透率变化必须用模型来评估。目前描述气体吸附的典型模型都是基于气体的宏观特征，如 Langmuir 吸附理论^[64]、Henry 吸附理论^[65]和 BET 吸附理论^[66]等，这些模型依赖于实验和经验数据。页岩储层纳米级的微观孔隙结构与相同孔隙度的微米级孔隙相比提供了更大的比表面积，是气体吸附的主要空间。页岩气在纳米尺度的解吸过程对页岩气抽采起着重要作用，可以在生产末期增加 5%-15% 的产量^[67]。为深入理解气体分子吸附-解吸机理，完善页岩气解吸理论模型，需要对微纳尺度气体分子物理化学特征进行深入研究，构建纳米孔隙结构与气体分子吸附过程的关系，基于分子动力学的运动规律建立页岩气吸附解吸理论模型。

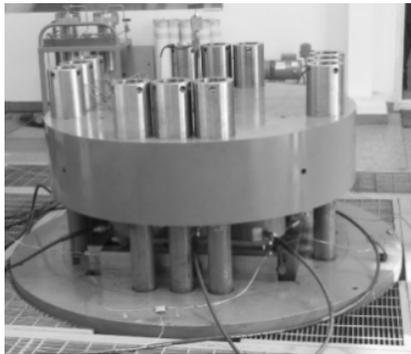


图 19 大物模系统

Fig.19 Large scale physical simulation system

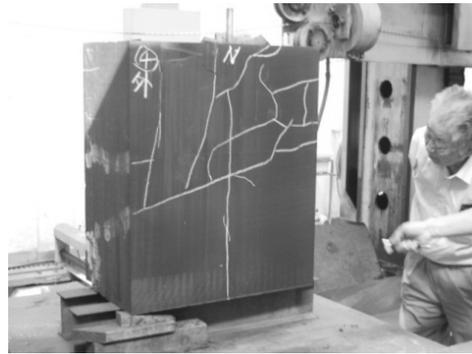


图 20 页岩水力压裂形成缝网

Fig.20 Hydraulic fracturing in shale rock

作为衡量和评价储层优劣的重要指标，微观孔隙特征一直是国内外学者研究的重点。大量学者运用扫描电子显微镜(SEM)、X 射线成像、透射电子显微镜(TEM)或者扫描声学显微镜(SAM)方法研究页岩微观结构。通过扫描电镜等成像技术和脉冲法等测试技术研究表明，纳米级的有机质孔隙是页岩的主要储集空间和孔隙类型^[68]，其形成和分布与有机质的丰度密切相关。孔隙和吼道的尺寸为纳米级别，孔隙、吼道配置关系复杂；基质渗透率为纳达西级别，孔隙度一般小于 7%。纳米级孔径是页岩气储层连通性储集空间的主体，对纳米孔隙结构的深入研究对储层内页岩气局部富集、页岩气聚集机理和增加资源开发潜力的有重要意义。

页岩孔隙结构的致密性和复杂性是开采页岩气并使之流出基质的重要挑战，但从基质流出来的天然气能否通过裂隙流到生产井则由页岩储层渗透率的动态演化规律来决定。目前储层渗透率演化模型的发展大致经历了三个阶段：1) 定义页岩渗透率为努森数 (Knudsen Number) 的函数，主要考虑纳米级孔隙通道中气体流动特性影响；2) 定义页岩渗透率为气体压力的函数，目前已有的储层渗透率模型的重要缺陷就是忽略了渗透率是过程的函数，因此不能反映开采过程，不具有普遍性，只能用于一些特殊情况；3) 定义页岩(煤)渗透率为有效应力的函数，这是当前最接近开采过程的渗透率模型。从孔隙流体运移过程看，有效应力变化后一方面可以引起页岩孔隙/裂隙结构变形，另一方面，孔隙变形反过来又可以影响孔隙流体的流动及其孔隙压力的分布。在页岩气抽采过程会诱发气体压力梯度、应力和吸附化学多个过程量的变化，这些变化都可以通过有效应变来表示，因此基于有效应变函数的渗透率模型全面包括了多物理过程的耦合关系。

4.2 页岩气开采运移中的关键力学问题

页岩气抽采诱发的反应链，包括气体扩散、解吸和流动、储层变形、孔隙率变化和渗透率变化，为多尺度、多时度和多物理场耦合关系。在不考虑过程与过程之间的耦合作用时，每个单一物理过程形成

了一门学科的基础。因此, 过程与过程之间的耦合作用规律是建立页岩气可持续性开采多物理场耦合理论的基础, 也是需要解决的关键力学问题, 具体包括: 1) 建立不同尺度和时度上气体扩散、解吸和运移机理, 用合理的模型来代表产气源, 即有多少气能从微孔流到基质里; 2) 气体吸附/解吸过程中页岩基质发生膨胀/收缩, 将会引起基质有效应变和裂隙开度等的改变, 必须提出合理的力学模型, 建立气体压力-膨胀/收缩应变-有效应变-裂隙开度之间的相互关系, 揭示页岩有效渗透率随有效应变的演化规律; 3) 建立气源与基质内流动相匹配、基质内流动与裂隙内流动相匹配以及裂隙内流动与生产能力相匹配的概念和表征模型, 并用这些新概念和模型来评价储层和优化设计; 4) 建立新的相对渗透率模型; 5) 建立瞬态非平衡态流体饱和度和平衡态流体饱和度之间的关系; 6) 揭示页岩气状态转化过程中水气两相流机制; 7) 建立多孔隙尺度毛细压力与渗透率和孔隙率之间的关系。

目前, 国内学者已经对上述问题开始研究: 王沫然等采用努森数对流态进行划分^[69], 不同的流动区间对应不同的流动机理和控制方程, 并发展了与之对应的宏观、介观和微观模拟方法(包括 Monte Carlo 法^[70]、格子-Boltzmann 方法^[71]以及分子动力学方法^[72]等)。气体吸附/解吸过程中页岩基质发生膨胀/收缩, 将会引起基质有效应变和裂隙开度等的改变, 刘继山等建立了气体压力-膨胀/收缩应变-有效应变-裂隙开度之间的相互关系, 构建出更新的 Biot 本构^[73]

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \sigma_{ij} - \left(\frac{1}{6G} - \frac{1}{9K} \right) \sigma_{kk} \delta_{ij} + \frac{\alpha}{3K} P \delta_{ij} + \frac{\varepsilon_s}{3} \delta_{ij}$$

式中, σ_{ij} 、 ε_{ij} 分别为应力、应变, ε_s 为气体吸附引起的应变, α 为 Biot 系数。上式以有效应变为基础的广义有效渗透率模型, 揭示了页岩有效渗透率随有效应变的演化规律。

5 结语

页岩油气按照自然开采过程可以分为四个相互关联的方面, 本文介绍了其中的主要内容并讨论了关键的科学(力学)问题, 包括: 地质力学找到气, 涉及地质特征描述与地应力模型、渗流应力敏感性及空隙压力模型、断裂机理与脆度评价和破坏机理与物理预测理论; 钻井完井够到气, 要求解决多重耦合模型、储层损害机理、井筒完整理论和钻井评估与设计等问题; 体积压裂释放气, 包括大型物理模拟实验、水力压裂数值模拟、新概念无水压裂理论和压裂设计与优化; 解吸运移产出气, 归结为多尺度多时度多物理场理论、页岩气开采模拟工具、模拟工具验证及应用和储层评估与优化等问题。这些内容涵盖了页岩油气高效开发的关键基础科学问题。现在有关页岩气开采的研究主要集中在如何利用水力压裂创造页岩传气能力, 忽略了对页岩气能否从页岩基质里流出来(气源)的研究, 这就造成了美国页岩气开采面临是否可持续性的挑战, 中国页岩气开采面临技术和方法上的挑战。如何应对这些挑战定义了研究的目的。为了实现这一目的, 本文提出了用水力压裂创造页岩传气能力, 用气体二次压裂页岩基质来解决气源问题, 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, 避免“断气”现象发生, 最终达到页岩气可持续性开采。

页岩油气开采的理论和工程问题是综合交叉科学和工程实践, 解决中国页岩气的问题不仅需要石油领域的科技工作者, 更需要其他相关领域的科技工作者协同创新, 共同努力, 特别是为力学工作者展开了广阔的舞台, 任重道远。

致谢

感谢中科院岩土所刘继山教授, 东北大学朱万成教授, 清华大学王沫然教授, 中石油钻井院杨恒林高工、陈朝伟高工, 中石油勘探院付海峰工程师等对本文的贡献。

参考文献:

- [1] UNITED STATES ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. Technically recoverable shale oil and shale gas resources: An assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United States, Analysis and projections[R]. 2013.
- [2] 孙赞东, 贾承造, 李相方, 等. 非常规油气勘探与开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- [3] SZEKELY J, EVAN J W. A structural model for gas-solid reactions with a moving boundary-II: The effect of grain size, porosity and temperature on the reaction of porous pellets[J]. Chemical Engineering Science, 1971, 26:1901-1913.
- [4] SOHN H Y, SZEKELY J. A structural model for gas-solid reactions with a moving boundary-III: A general dimensionless representation of the irreversible reaction between a porous solid and a reactant gas[J]. Chemical Engineering Science, 1972, 27:763-778.
- [5] 赵文瑞. 泥质粉砂岩各向异性强度特征[J]. 岩土工程学报, 1984, 1:32-36.
- [6] 贾长贵, 陈军海, 郭印同, 等. 层状页岩力学特性及其破坏模式研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增 2):57-61.
- [7] 刘斌, 席道瑛, 葛宁洁, 等. 不同围压下岩石中泊松比的各向异性[J]. 地球物理学报, 2002, 43(6):880-890.
- [8] 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.
- [9] RICKMAN R, MULLEN M J, PETRE J E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett Shale[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2008.
- [10] 赵海峰, 陈勉. 由实钻资料反演地应力及井壁稳定[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增 1):2799-2804.
- [11] DUTTA N. Geo-pressure prediction using seismic data: Current status and the road ahead[J]. Geophysics, 2002, 67(6):2012-2041.
- [12] 卢运虎, 陈勉, 金衍, 等. 深层地应力地理方位确定的新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2):233-237.
- [13] BLANTON T, OLSON J. Stress magnitudes from logs: effects of tectonic strains and temperature[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 1999, 2(1):62-68.
- [14] 邓金根, 陈峥嵘, 耿亚楠, 等. 页岩气储层地应力预测模型的建立和求解[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(6):59-64.
- [15] ZHU W C, WEI C H, LIU J, et al. A model of coal-gas interaction under variable temperatures[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 86(2-3):213-221.
- [16] ZHU W C, WEI C H. Numerical simulation on mining-induced water inrushes related to geologic structures using a damage-based hydromechanical model[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62(1):43-54.
- [17] ZHU W C, WEI C H, LIU J, et al. Impact of gas adsorption induced coal matrix damage on the evolution of coal permeability[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46(6):1353-1366.
- [18] 陈朝伟, 周英操, 申瑞臣, 等. 考虑岩石尺寸效应的井壁稳定性分析[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(3):38-41.
- [19] 陈朝伟, 蔡永恩. 套管-地层系统套管载荷的弹塑性理论分析[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(2):242-246.
- [20] BIOT M A. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid[J]. Journal of Applied Physics, 1955, 26(2):182-185.
- [21] RICE J R, CLEARY M P. Some basic stress diffusion solutions for fluid - saturated elastic porous media with compressible constituents[J]. Reviews of Geophysics, 1976, 14(2):227-241.
- [22] LUBINSKI A. The theory of elasticity for porous bodies displaying a strong pore structure[C]// Proceedings of the 2nd US National Congress of Applied Mechanics, 1954:247-256.
- [23] YE W C H, LIU G. Pore fluid and wellbore stabilities[C]// International Meeting on Petroleum Engineering,

- Society of Petroleum Engineers, 1992.
- [24] CARROLL M M. An effective stress law for anisotropic elastic deformation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84:7510-7512.
- [25] CHEN H Y, TEUFEL L W. Coupling fluid-flow and geomechanics in dual-porosity modeling of naturally fractured reservoirs[C]// SPE annual technical conference, 1997:419-433.
- [26] GRAY G R, DARLEY H H, Composition and properties of oil well drilling fluids[M]. Gulf Publishing Co., Houston, 1980.
- [27] CHENEVERT M E. Adsorptive pore pressure of argillaceous rocks[C]// Eleventh Symposium on Rock Mechanics, The University of California, Berkeley, California, 1969:599-627.
- [28] DARLEY H C H. Advantages of polymer Muds[J]. *International Journal of Petroleum Engineering*, 1976:46-52.
- [29] LOMBA R F T, CHENEVERT M E, SHARMA M M. The ion-selective membrane behavior of native shales[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2000, 25(1):9-23.
- [30] GHASSEMI A, DIEK A. Linear chemo-poroelasticity for swelling shales: theory and application[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2003, 38(3):199-212.
- [31] GHASSEMI A, DIEK A. A chemo-poro-thermoelastic model for swelling shales[J]. *International Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2002, 34:123-135.
- [32] 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.
- [33] ABOUSLEIMAN Y N, NGUYEN V X. PoroMechanics response of inclined wellbore geometry in fractured porous media[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2005, 131(11):1170-1183.
- [34] NGUYEN V X, ABOUSLEIMAN Y N. Naturally fractured reservoir three-dimensional analytical modeling: theory and case study[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2009.
- [35] NGUYEN V X, ABOUSLEIMAN Y N. Real-time wellbore-drilling instability in naturally fractured rock Formations with field applications[C]// IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2010.
- [36] NGUYEN V X, ABOUSLEIMAN Y N, HOANG S. Analyses of wellbore instability in drilling through chemically active fractured rock formations: NahrUmr Shale[C]// SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, Society of Petroleum Engineers, 2007.
- [37] NGUYEN V X, ABOUSLEIMAN Y N. Poromechanics response of inclined wellbore geometry in chemically active fractured porous media[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2009, 135(11):1281-1294.
- [38] NGUYEN V X, ABOUSLEIMAN Y N, HEMPHILL T. Geomechanical coupled poromechanics solutions while drilling in naturally fractured shale formations with field case applications[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2009.
- [39] GOODWIN K J, CROOK R J. Cement sheath stress failure[J]. *SPE Drilling Engineering*, 1992, 7(4):291-296.
- [40] BOUKHELIFA L, MORONI N, JAMES S G, et al. Evaluation of cement systems for oil and gas well zonal isolation in a full-scale annular geometry[C]// IADC/SPE Drilling Conference, Society of Petroleum Engineers, 2004.
- [41] BOUTECA M J, BARY D, FOURMAINTRAUX D. Does the seasoning procedure lead to intrinsic properties?[C]// EUROCK 98, Symposium, 1998.
- [42] SAINT-MARC J, GARNIER A, BOIS A P. Initial state of stress: the key to achieving long-term cement-sheath integrity[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2008.
- [43] 杨恒林, 申瑞臣, 付利. 含气页岩组分构成与岩石力学特征[J]. *石油钻探技术*, 2013, 41(5):31-35.

- [44] 林三春. 基于损伤演化模型的页岩储层渗流数值模拟[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [45] BLANTON T L. An experimental study of interaction between hydraulically induced and pre-existing fractures[C]// SPE Unconventional Gas Recovery Symposium, Society of Petroleum Engineers, 1982.
- [46] BLOT M A, MEDLIN W I, MASSE L. Laboratory experiment in fracture propagation[J]. SPE 10377, 1981:162-169.
- [47] 陈勉, 庞飞, 金衍. 大尺寸真三轴水力压裂模拟与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增):868-872.
- [48] 姚飞, 陈勉, 吴晓东, 等. 天然裂缝性地层水力裂缝延伸物理模拟研究[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(3):83-86.
- [49] ECONOMIDES M J, NOLTE K G. 油藏增产措施[M]. 张保平, 蒋阗, 刘立云, 译. 北京: 石油工业出版社, 2002:185-220.
- [50] DE PATER, GROENENBOOM J, VAN DAM D B, et al. Active seismic monitoring of hydraulic fractures in laboratory experiments[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(6):777-785.
- [51] CROUCH S L, STARFIELD A M. Boundary element methods in solid mechanics[M]. London: George Allen & Unwin Ltd, 1983.
- [52] 石根华, 裴觉民. 数值流形方法与非连续变形分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [53] DVERSTORP B, ANDERSSON J. Application of the discrete fracture network concept with field data: Possibilities of model calibration and validation[J]. Water Resources Research, 1989, 25(3):540-550.
- [54] 胡永全. 重复压裂技术研究[J]. 天然气工业, 2004, 24(3):72-75.
- [55] ZHUANG Z, CHENG B B. Development of X-FEM methodology and study on mixed-mode crack propagation[J]. Acta Mechanica Sinica, 2011, 27:406-415.
- [56] ZHUANG Z, CHENG B B. Equilibrium state of mode-I sub-interfacial crack growth in bi-materials[J]. International Journal of Fracture, 2011, 170:27-36.
- [57] ZENG Q L, LIU Z L, XU D D, et al. Modeling stationary and moving cracks in shells by X-FEM with CB shell elements[J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57:1276-1284.
- [58] XU D D, LIU Z L, LIU X M, et al. Modeling of dynamic crack branching by enhanced extended finite element method[J]. Computational Mechanics, 2014, 54:489-502.
- [59] 庄茁, 柳占立, 成斌斌, 等. 扩展有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [60] ZHUANG Z, LIU Z L, CHENG B B, et al. Extended finite element method[M]. Amsterdam/Beijing: Elsevier/Tsinghua University Press, 2014.
- [61] 王涛, 高岳, 柳占立, 等. 基于扩展有限元法的水力压裂大物模实验的数值模拟[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2014, 54:1304-1309.
- [62] 付海峰, 崔明月, 彭翼, 等. 基于声波监测技术的长庆砂岩裂缝扩展实验[J]. 东北石油大学学报, 2013, 37(2):96-101.
- [63] 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 7:15-18.
- [64] LANGMUIR I. The constitution and fundamental properties of solids and liquids[J]. Journal of the American Chemical Society, 1916, 38(1916):221-229.
- [65] FATHI E, AKKUTLU I Y. Nonlinear sorption kinetics and surface diffusion effects on gas transport in low-permeability formations[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2009.
- [66] SCHETTLER J P, PARMELY C R. Contributions to total storage capacity in devonianshales[C]// SPE Eastern Regional Meeting, Society of Petroleum Engineers, 1991.
- [67] THOMPSON J M, MANGHA V O, ANDERSON D M. Improved shale gas production forecasting using a simplified analytical method-a marcellus case study[C]// North American Unconventional Gas Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2011.
- [68] RAY J, ROBERT C, MERY D, et al. New pore-scale considerations for shale gas in place calculations[C]//

- SPE Unconventional Gas Conference, Society of Petroleum Engineers, 2010.
- [69] WANG M, LAN X, LI Z. Analysis of Gas flows in Micro- and Nanochannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(13-14):3630-3641.
- [70] WANG M, LI Z. An Enskog based Monte Carlo method for high Knudsen number non-ideal gas flows[J]. Computer & Fluids, 2007, 36(8):1291-1297.
- [71] WANG J, WANG M, LI Z. Lattice Poisson-Boltzmann simulations of electro-osmotic flows in microchannels[J]. Journal of colloid and interface science, 2006, 296(2):729-736.
- [72] WANG M, LIU J, CHEN S. Similarity of electro-osmotic flows in nanochannels[J]. Molecular Simulation, 2007, 33(3):239-244.
- [73] ZHANG H, LIU J, ELSWORTH D. How sorption-induced matrix deformation affects gas flow in coal seams: a new FE model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(8):1226-1236.