

第517次学术讨论会·页岩气开发中的工程科学问题

页岩气储层改造的体破裂理论与技术构想

谢和平^{①*}, 高峰^②, 鞠杨^{②③}, 谢凌志^①, 杨永明^③, 王俊^④

① 四川大学能源工程安全与灾害力学教育部重点实验室, 成都 610065;

② 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 徐州 221116;

③ 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083;

④ 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065

* 联系人, E-mail: xiehp@scu.edu.cn

2015-03-19 收稿, 2015-04-16 修回, 2015-04-17 接受, 2015-06-05 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2011CB201201)、国家杰出青年科学基金(51125017)、国家自然科学基金(51374213, 51134018)和四川省科技厅科技支撑计划(2012FZ0124)

摘要 中国页岩气可采储量居世界第一位, 但是中国页岩气开发面临气藏赋存条件复杂、地质构造运动剧烈、储层渗透性极低、气藏富集区水资源匮乏等一系列难题, 迫切需要创新页岩储层改造的理论和方法, 探索适合中国页岩气高效开发的非常规理论与技术. 本文简要分析了目前储层压裂改造的主要方法、原理及面临的难题和挑战, 提出了储层改造的体破裂理论及技术构想. 定义体破裂是三维岩体在载荷作用下, 内部孔隙、层理裂隙及人工裂隙互相作用、充分发展和贯穿、并形成新的三维裂隙网络系统这一完整力学过程, 是岩体大尺度、多裂隙、高强度的破坏和能量释放的过程. 指出页岩三维断裂形态和扩展机理、人工裂隙与结构裂隙相互作用、缝网形态和演化、实现高度体破裂的载荷类型、方式与介质以及真实三维断裂过程的可视化与计算模拟新技术等构建了体破裂力学理论的研究框架. 基于早期实验室以及现场实验的探索, 提出和分析了实现体破裂的新技术及有待研究的关键科学问题和技术难点.

关键词 页岩气, 储层改造, 压裂, 体破裂, 缝网

北美页岩气的蓬勃发展扭转了美国油气供应局势, 同时也悄然改变着国际能源供给格局, 一场声势浩大的“页岩气革命”正席卷全球^[1-6]. 页岩气具有分布范围广、资源潜力大、高效清洁等优势, 其大规模开发将改变未来世界能源版图, 甚至会对全球经济、地缘政治乃至军事格局产生深远影响^[3,7].

中国页岩气可采储量居世界第一, 加快页岩气勘探与开发对完善我国能源结构、缓解能源供需矛盾、保障国家能源安全具有重要的战略意义. 然而页岩气“自生自储”的原地成藏方式、低孔低渗的储层特性以及广泛发育的天然裂缝决定了必须采用不同于常规天然气的勘探理念、工程思路与开发技术^[3,8];

加之中国页岩气赋存条件复杂、地质构造运动剧烈、气藏富集区水资源匮乏, 页岩储层改造难度及复杂程度远超过美国. 当前, 页岩气开发的关键工程科学问题并未得到真正的认识与解决, 压裂造缝机理及缝网演化机制尚未完全理解清楚, 导致压裂设计与施工作业缺乏定量可信的科学依据^[9]. 传统的压裂理论与技术手段无法适应现阶段的页岩气开发, 有必要从“工程实践、技术总结、理论猜想”3个方面, 探索适合中国页岩气高效开发的非常规理论与技术.

中国正处于经济飞速上升阶段, 把握页岩气自主开发的契机, 实现能源独立显得至关重要. 本文立足于中国页岩气开发工程现状, 分析了水力压裂力

引用格式: 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 页岩气储层改造的体破裂理论与技术构想. 科学通报, 2016, 61: 36-46

Xie H P, Gao F, Ju Y, et al. Novel idea of the theory and application of 3D volume fracturing for stimulation of shale gas reservoirs (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 36-46, doi: 10.1360/N972015-00262



学机理及现有压裂模型缺陷,针对页岩储层高效压裂的关键力学难题,提出了体破裂理论及技术新概念和构想,并介绍了本课题组研究的最新成果,期望对创新我国页岩气藏的高效开发理论和技术提供借鉴和参考。

1 页岩气资源状况与开发现状

页岩气泛指赋存于暗色泥页岩或高碳质泥页岩中,以吸附或游离态为主要存在方式的天然气聚集,也包括位于页岩夹层中的粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩及砂岩地层中的天然气藏^[10,11]。世界范围内页岩气资源储量巨大且地质分布范围极广,几乎存在于所有的盆地中。据美国能源信息署(EIA)最新统计^[12],包括美国在内的全球42个国家的页岩气技术可采资源量约207万亿立方米,占全球天然气资源总量的47%。中国页岩气资源潜力最丰富,可开采储量达到31.57万亿立方米,占全世界总量的15%,居各国之首位(表1)^[13]。2012年我国国土资源部公布的全

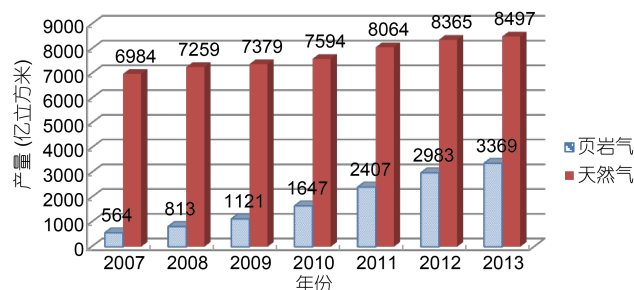


图1 (网络版彩色)美国页岩气及天然气产量发展趋势

Figure 1 (Color online) The yield development trend of shale gas and natural gas in USA

表1 全球页岩气技术可采量位列前10的国家

Table 1 Shale gas recoverable reserves among the top ten countries in the world

排名	国家	页岩气技术可采储量 (万亿立方米)
1	中国	31.57
2	阿根廷	22.71
3	阿尔及利亚	20.02
4	美国	18.83
5	加拿大	16.23
6	墨西哥	15.43
7	澳大利亚	12.37
8	南非	11.04
9	俄罗斯	8.07
10	巴西	6.94
世界总量		206.69

国页岩气资源评估显示,中国陆域页岩气地质资源潜力为134.42万亿立方米,可采资源潜力为25.08万亿立方米(不含青藏区)^[8],这些数据客观上表明了中国页岩气开发具有良好的战略机遇与广阔的发展前景。

20世纪90年代以来,北美地区页岩气率先起步并发展迅猛,特别是美国页岩气商业化的巨大成功逐渐改变了世界能源版图。据2014年12月美国EIA统计,美国页岩气产量从2000年的122亿立方米,大幅增长至2013年的3369亿立方米,约占天然气总产量的40%,如图1所示,预计到2025年这一比例将继续提升并超过50%^[7,13]。页岩气产业化使美国2009年天然气总产量超越俄罗斯而成为全球最大的天然气生产国。随着能源自给率的不断升高,2014年美国取消了实施50余年的原油出口禁令,美国“页岩气革命”推动了全球非常规油气获得战略性突破。以中国为代表的世界各国相继掀起页岩气的勘探开发热潮,目前已有美国、加拿大、澳大利亚3个国家真正实现页岩气的商业化开采^[13],中国涪陵页岩气田也提前进入商业开发初步阶段。

中国自2005年以来开始页岩气地质条件评价与勘探开发先导性试验,成为全球除北美以外率先发现页岩气的国家^[14]。基于对北美页岩气开发进程的跟踪研究,我国先后建立了四川长宁-威远、云南昭通、重庆涪陵等多个国家级页岩气工业化开发先导性示范区,页岩气勘探开发在我国政府、学术界和企业界已形成基本共识^[8]。2011年底页岩气正式被批准为我国第172个独立矿种;“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,2015年中国页岩气产量达到65亿立方米,2020年力争实现页岩气产量600~1000亿立方米^[15]。2014年11月,国务院办公厅新颁布《能源发展战略行动计划(2014~2020)》对页岩气发展目标进行了局部调整,“十三五”能源规划工作会议同样表示,2020年页岩气产量力争超过300亿立方米。在国家政策导向的大力激励下,企业纷纷进军页岩气领域,目前我国已取得页岩气开发的重大突破,2014年3月,中石化宣布涪陵页岩气田提前进入商业开发,截至12月涪陵气田累计产气11.36亿立方米,并明确2015年将建成产能50亿立方米,有望2017年达到年产100亿立方米。与此同时,中石油在四川长宁-威远区块积极建设国内首个“井工厂”平台^[16],并全力冲刺2017年产50亿立方米。总体而言,中国页岩

岩气开发仍处于起步阶段,并未形成适合我国国情的核心独立自主技术体系,距离大规模商业化生产存在差距.当前页岩气藏压裂改造机理尚不明确,水力压裂技术及现场施工经验不成熟,加之国际油价持续暴跌的市场冲击,亟需探索具有中国特色的页岩储层高效改造理论与技术.

2 页岩气储层压裂改造技术

2.1 水力压裂技术

压裂是石油行业的生命,对于低孔低渗的非常规致密气藏,须借助人工诱导裂缝沟通天然微裂缝系统,对储层区域实行增大改造体积(SRV)^[17~19].水力压裂即在低渗透油气藏开发中利用高压机组把大排量且具有一定黏度的压裂液泵入井内,使储层岩体产生足够的裂缝展布和导流能力来获得天然油气藏,页岩气高效开发的关键在于形成复杂的裂缝网络系统^[20~22].结合水平钻井的多段水力压裂技术是目前页岩气开采的核心,采用“井工厂”模式来实现大规模工业化生产(图2).

自1947年美国堪萨斯州试验成功后,水力压裂技术经过半个多世纪的发展已经日趋成熟.目前常用的压裂技术有多级压裂、重复压裂、同步压裂、交替压裂及改进拉链式压裂等^[23].中国借鉴美国经验引进吸收页岩气开采的关键技术,并取得初步成效.采用水平井分段压裂技术进行页岩储层体积改造,即:通过分段多簇射孔或割缝,运用高压、高排量、低黏液体以及转向材料与技术等,实现水力裂缝贯通天然裂缝和页岩层理,以及在主裂缝的侧向强制形成次生裂缝,从而使主裂缝与多级次生裂缝交织形成裂缝网络系统.随着裂缝壁面与储层基质的接触面积不断扩大,使得油气从任意方向进入裂缝的渗流路径最短,极大地提高储层整体渗透率,最终实现页岩储层在长、宽、高三维方向的全面改造^[24].

2.2 水力压裂模型与理论瓶颈

水压裂缝的几何形态与扩展机理是压裂评估与产能预测的关键因素,一直以来都是研究热点^[25].传统压裂理论认为,常规储层中压裂形成对称双翼裂缝.1946年Sneddon等人^[26]基于线弹性理论提出沿井筒径向的币状裂纹模型(Penny模型),假定裂纹为扁平的椭球形.在此基础上,学者们考虑流体滤失,

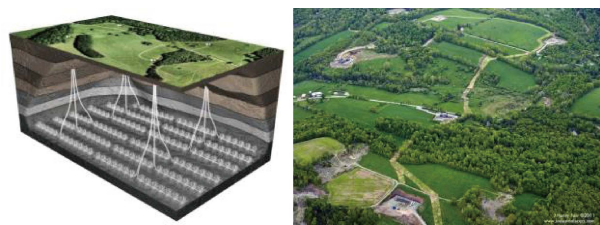


图2 水平井多段压裂技术及“井工厂”模式(<http://frack-off.org.uk>)

Figure 2 Multi-stage fracturing technology of horizontal well and “well factory” mode (<http://frack-off.org.uk>)

发展了二维PKN模型和KGD模型^[27,28](图3). KGD模型假设裂缝为缝高固定的平面状裂缝,裂缝垂直剖面视为矩形,水平椭圆截面处于平面应变状态,忽略缝长方向的断裂韧度及尖端流体净压力,通过计算垂向上不同宽度的细窄矩形裂缝内流动阻力来确定扩展方向的流体压力梯度,从而得出缝长和缝宽的变化规律.该模型适用于缝长小于缝高、长时间水力压裂作业. PKN模型同样假定裂缝高度限制在特定的油层范围内,裂缝沿水平方向呈椭圆形扩展,正交于裂缝扩展方向的垂直椭圆截面处于平面应变状态,关注岩石断裂韧度及尖端效应,该模型适用于缝长大于缝高、短时间的低滤失压裂设计.

二维压裂模型的局限性在于缝高固定,缝内流体沿长度单一方向流动.为了更好地反映真实水力压裂效果,拟三维模型(P3D)和平面三维模型(PL3D)应运而生^[29].拟三维模型考虑压裂过程中缝高变化,认为裂缝按椭圆形状向前延伸,常通过KGD模型计算垂向扩展,用PKN模型解决横向扩展,或者基于裂纹扩展准则引入裂缝高度参量.但P3D模型仍假设缝内流体一维流动,在裂缝垂向延伸较大时并不适用.后期发展的平面三维模型认为平面裂缝垂直于最小主应力方向扩展,从三维岩石变形和二维流动出发来建立裂缝耦合控制方程,假定缝内流体为定常层流,且沿缝宽方向流速为零.此类模型无法解释裂缝

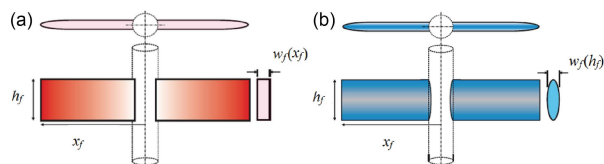


图3 两种经典的水力压裂模型示意图^[27]. (a) KGD模型; (b) PKN模型

Figure 3 Two types of classical hydraulic fracturing models^[27]. (a) KGD model; (b) PKN model

偏转,采用有限元求解代价相当大,不适合现场应用.事实上,真实的水力压裂是一个包含三维流动、三维裂缝、三维不连续岩体的复杂系统,受限于三维断裂理论发展滞后以及三维全耦合数值计算困难,真正意义上的全三维水力压裂模型并未实现.

水力裂缝的起裂与扩展规律涉及到多因素、多场域、多学科的交叉理论,特别是,针对页岩非连续储层的压裂改造机理一直是科学瓶颈.现有的水力压裂设计往往采用单个裂缝的压裂模型,假设储层为连续各向同性的线弹性体、裂缝是平面分离式裂纹、裂缝扩展方向不发生变化,没有考虑页岩具有天然裂缝与层理这一重要的构造特征,也忽略了水力压裂与天然裂缝相互作用而形成三维裂缝网络.页岩储层经体积改造后形成高度密集的网状裂缝系统,与传统高黏度压裂液在常规储层中压裂形成的对称双翼裂缝具有本质区别,已有的基于连续介质力学的二维、拟三维及全三维压裂理论模型难以表征页岩复杂系统的缝网形成与演化机理^[30].目前,国际上主要采用线网模型(wire-mesh)、非常规裂缝模型(UFM)及离散裂缝网络模型(DFN)等进行二、三维水力缝网扩展及产能预测研究^[20,31],但是这些模型基于传统压裂理论采用简单的裂纹扩展准则,与实际压裂缝网演化存在较大差距,在三维岩体空间内讨论水力裂缝扩展机理以及考虑储层地质特征的现场尺度缝网演化数值模拟将是未来的研究难点和热点.

3 储层压裂的关键力学问题

页岩复杂的结构特性及所经历的漫长地质演变,形成一个非均匀、含裂隙、多尺度、各向异性并存在初始地应力的复杂系统,这些特征给基于连续介质力学的压裂理论带来严峻的挑战,压裂过程中关键科学问题还未得到真正的认识^[3,22].现阶段页岩高效压裂的理论创新需要我们以力学思维重新审视水力压裂,关注多场耦合下岩体内部裂隙与裂缝起裂、扩展和贯通的全过程.该过程涉及固体力学、流体力学、断裂力学和热力学等多学科,主要包含4个关键理论^[25]:储层岩石力学变形、裂缝内流体流动与滤失规律、水力裂缝起裂与扩展机理、支撑剂的运移与沉降.考虑三维空间的复杂因素,建立反映真实水力压裂的基本控制函数,是页岩储层高效压裂的必然要求.

3.1 储层岩石的力学变形

固体力学描述流体压力变化引起的储层岩石受力与变形,一般基于弹性理论建立裂缝内流体压力与裂缝宽度之间的关系:

$$\omega(x, y, z, t) = F_1(E, \nu; P_f, \sigma_c; C_L), \omega \geq \omega_c, \quad (1)$$

式中, ω 为裂缝宽度; E 和 ν 为储层岩石弹性模量与泊松比; P_f 为作用在裂缝表面的流体压力; σ_c 为地应力,主要指最小水平地应力; C_L 为流体滤失系数; ω_c 为裂缝受压闭合时考虑裂缝粗糙表面影响的临界最小缝宽.

3.2 裂缝内流体的流动

流体力学描述单相或多相流体在水力裂缝内的流动,反映了裂缝表面流体压力随空间与时间的变化情况:

$$\frac{\partial P_f(x, y, z, t)}{\partial(x, y, z, t)} = F_2(\mu, n, k; \omega, h, \xi; q, C_L), \quad (2)$$

式中, P_f 为流体作用在裂缝面上的压力; μ 为流体的动力黏度; k 和 n 分别表示流体的稠度系数和流态指数; ω 和 h 分别指裂缝的宽度和高度; ξ 为裂缝表面粗糙系数; q 为单位时间流体注入量; C_L 为滤失系数.现有压裂理论通常不考虑裂缝表面粗糙度,假定不可压缩牛顿流或者幂律流在裂缝内以层流形式运动,与实际存在较大差距.

3.3 储层孔隙内流体的流动

流体在压力差作用下向储层多孔多裂隙介质中发生渗透,即为滤失现象,通常结合达西定律与质量守恒方程得到流体向储层渗透引起的密度变化规律:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} = F_3(\mu, c; K, \phi; v_f, \Delta p), \quad (3)$$

式中, ρ_f 为缝内流体的密度; μ , c 分别为流体的动力黏度与压缩系数; K , ϕ 分别为储层介质的渗透率与孔隙度; v_f 为流体渗透速度; Δp 为压力差.

3.4 水力裂缝起裂准则

水力裂缝的起裂与扩展通常基于断裂力学、弹塑性力学或者损伤力学,描述水力裂缝尖端附近发生的破坏及裂缝扩展,不同处理方法形成了压裂数值模拟的多样性与复杂性,以断裂力学扩展准则为例:

$$\lambda \geq F_4(E, \nu; \delta_c, \sigma_t; K_{IC}, K_{IIC}, K_{IIIC}), \quad (4)$$

式中, λ 为采用不同裂缝起裂准则时的代表物理量, 可以是最大切向应力、应力强度因子或能量释放率等; E , ν 为储层岩石弹性模量与泊松比; δ_c 为临界裂缝张开度; σ_t 为岩石抗拉强度; K_{IC} , K_{IIC} , K_{IIIC} 分别为储层岩石的 I 型、II 型及 III 型断裂韧度。

3.5 质量守恒方程

考虑流体滤失, 采用质量守恒方程建立流体注入量、滤失量及裂缝体积变化三者之间的动态关系:

$$\Delta q(t) = F_5(q_L, \Delta V_f), \quad (5)$$

式中, Δq 为流体注入变化量; q_L 为流体滤失量; ΔV_f 为水力裂缝体积变化量。

以上水力压裂力学机制及其基本控制方程尚未完全掌握, 针对各向异性、广泛分布天然裂缝的层状页岩体积改造理论更是远远滞后, 力学界并没有形成统一的认识。页岩体积改造的核心是以压裂方式在储层形成多条主裂缝, 初步实现沟通天然层理与裂缝, 随着天然裂缝不断扩张及脆性岩石产生剪切滑移, 进一步形成复杂交错的次生裂缝网络, 从而构建三维裂缝系统。储层网状裂缝系统的产生与演化不再是简单的张性破坏, 而且还存在剪切、滑移、错断等复杂的力学行为^[19]。目前, 在常规水力压裂的基础上, 页岩高效开发亟需解决4个关键科学问题: (1) 压裂过程中页岩储层三维应力场分布规律; (2) 人工裂缝和天然裂缝相互作用机理; (3) 三维裂缝网络形成和演化机制; (4) 页岩气在裂隙场中的运移规律。针对以上核心问题, 有必要围绕中国页岩储层进行正交各向异性本构关系、非线性三维软化损伤模型、准脆性黏聚裂纹以及页岩蠕变等重点研究^[32]。把握页岩气高效开发的科学关键, 形成中国自己的页岩气开采体系, 迫切需要发展新理论和新技术。

4 页岩气储层的体破裂理论构想

页岩气藏具有“低孔、低渗、低日产、低丰度”等特点, 属于典型的低品位“边缘资源”, 其高效开发须采用不同于常规天然气的新理念与新技术^[3,8]。针对页岩储层高效改造的关键科学问题, 本文提出体破裂理论与技术构想, 旨在从力学角度去阐述储层体破裂的内涵、体破裂的特征、体破裂的准则、表征及演化规律, 构建完整的页岩储层体破裂的力学分

析体系, 指导页岩气生产设计与开发。

4.1 体破裂的定义

事实上, 岩体破坏都是三维体积破坏, 然而页岩气高效开发必须使页岩储层产生高密度的裂缝网络, 即产生高强度的体积破坏。根据页岩储层水力压裂的真实状态, 我们定义的体破裂系指三维岩体在载荷作用下, 内部孔隙、层理裂隙及人工裂隙互相作用、充分发展和贯穿、并形成新的三维裂隙网络系统这一完整力学过程, 是岩体大尺度、多裂隙、高强度的破坏和能量释放的过程。页岩储层高效压裂改造的核心在于形成高密度的裂缝网络, 即高度三维体破裂。

4.2 体破裂理论体系

如何使页岩产生高度体破裂, 核心是一个力学问题, 需要力学理论指导。体破裂理论包含3个层面的理论探索。第一, 研究岩体中单一三维裂纹的形态、临界起裂准则和动态扩展行为; 第二, 研究单一或若干宏观压裂缝与岩体天然微裂隙损伤间的相互作用; 第三, 研究宏观裂缝群的相互影响及复杂压裂缝网的形成、形态与演化。这些理论的建立, 将使得页岩气压裂改造、裂缝网络模拟、产量预测、工艺设计等上升到科学定量的层次, 得到准确的、精细化表征。体破裂理论体系的核心内容包含三维断裂力学、损伤力学及多裂隙体力学, 难点是三维断裂理论及多裂隙相互作用与能量释放机理。体破裂理论研究应从页岩的三维破坏形态试验入手, 重点研究在压裂改造作用下, 三维应力场分布、三维裂隙场的形成与演化, 可将分形重构理论^[33-35]、能量理论^[36,37]、损伤断裂理论^[38,39]及现代实验技术相结合, 实现三维裂缝网破裂形态、三维复杂应力场及页岩气渗流的可视化^[40], 从而建立三维断裂准则, 揭示页岩压裂过程中裂缝网络的形成及演化机制, 计算页岩体破裂度及增透率, 综合反映页岩的地质构造特征、正交各向异性机理、非线性损伤软化等本质特征, 发展多尺度裂缝网演化的数值模拟方法, 构建完整的页岩体破裂理论体系, 实现页岩气开发的产能预测与生产指导。

4.3 体破裂的新技术实施

要实现页岩储层的高度体破裂, 根据体破裂力学原理, 可以从多个方面的转变来实现: (1) 载荷作用类型的转变, 即将外部载荷压裂转换为孔隙裂隙

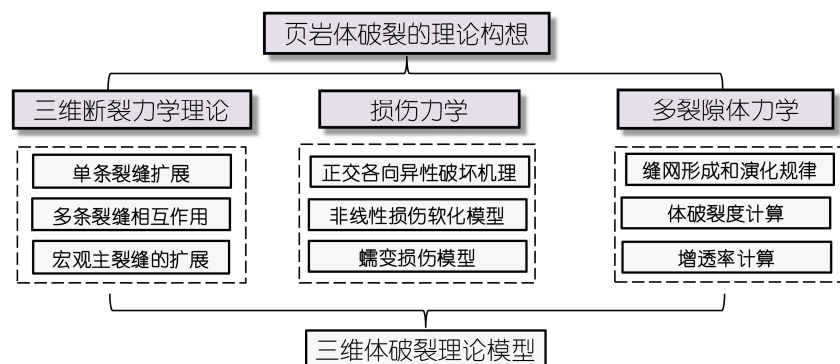


图4 (网络版彩色)三维体破裂理论体系构想

Figure 4 (Color online) Idea and construction of 3D volume fracturing theory

内压致裂；(2) 载荷作用方式的转变，即将一次性压裂转变为多次甚至疲劳压裂或者瞬态动态压裂；(3) 载荷作用媒介的转变，即将低黏度的液态压裂液向高扩散性的气体压裂源转变。这些方式上的转变，将驱动页岩储层原生裂隙更多地发育、扩展，形成高裂缝密度的体破裂，促进页岩储层的高效压裂改造。例如，探讨以气体为压裂媒介的页岩储层压裂改造技术方式，这也是非常规天然气开发中的一个需要重点攻关的技术难题。因为在缺水地区、生态脆弱或重点保护区域、储层岩性不适合水力压裂等情况下，都需要开发无水压裂技术。作者在平煤集团八矿煤瓦斯共采中提出了气动疲劳致裂技术，通过气体疲劳压裂增大煤层透气性从而实现瓦斯高效抽采，目前正在井下开展试验并取得一定效果。一些煤岩实验结果对于页岩压裂研究是有启发性的，图5~7给出一些水气压裂对比试验结果。

图5实验结果表明，水力压裂下载荷单调增加至试件破裂，具有突然性；气体压裂下气压波动式增大至试件破裂，这意味着压裂过程中有多条裂缝扩展和相互作用。图6实验结果可以看出，水力压裂下岩石试件破坏基本对称破裂成两块，而气体压裂下试件出现了多组断裂面。图7煤样压裂实验显示：富含原生节理的煤岩水力压裂下的破裂程度很低，但是反复气压下出现了很高程度的体破裂，其原因是气体相比于水，更易渗入进煤岩的原生裂隙或孔隙中，诱发裂隙或微孔隙的发育、扩展，进而形成高度的体破裂。

相同岩样的水气压裂对比实验表明(表2)，相比于水力压裂，气体能产生更高的体积应变和渗透性，气体产生的体积应变比水力压裂产生的大一个量级，

而且气体压裂具有较低的破坏门槛值，表2中的试件气体压裂载荷比水力压裂载荷降低近40%。尽管实验结果是初步的，有待进一步分析和验证，但是给了我们有益的启示。

4.4 多裂缝扩展模式与定量表征

实验室实验表明：岩石的非均质性和水平地应力差是影响体破裂多裂缝扩展的两个主要影响因素。利用CT扫描、切片实验以及X射线衍射实验，提取和

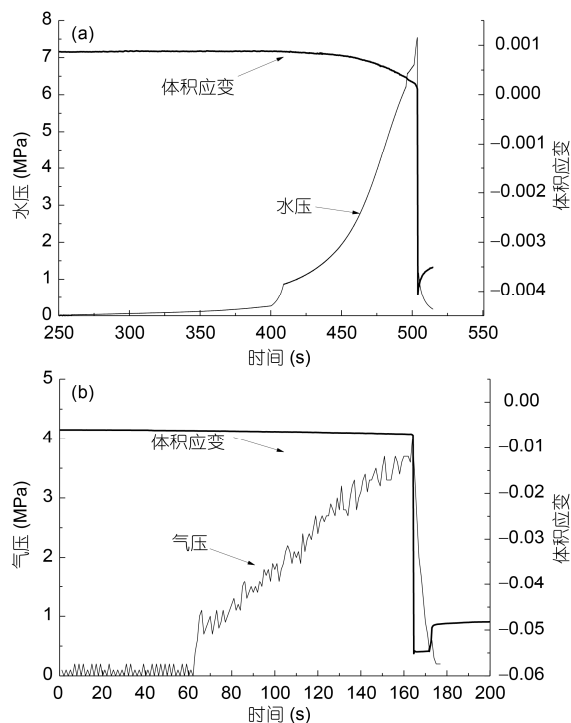


图5 岩石水力压裂响应曲线(a)和气体压裂响应曲线(b)的对比

Figure 5 Comparison of the hydraulic fracturing response (a) and the gas fracturing response (b) of rocks

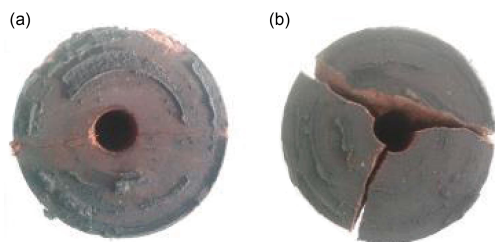


图6 (网络版彩色) 岩石水力压裂破坏(a)和气体压裂破坏(b)的对比
Figure 6 (Color online) Comparison of the hydraulic fracturing failure (a) and the gas fracturing failure (b) of rocks

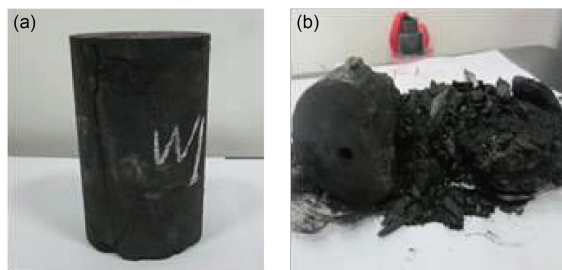


图7 (网络版彩色) 煤岩水力压裂破坏(a)和气动疲劳压裂破坏(b)的对比

Figure 7 (Color online) Comparison of the hydraulic fracturing failure (a) and the gas-driven fatigue fracturing failure (b) of coal

表2 岩石水气压裂体积应变与破坏载荷

Table 2 The volumetric strain and rupture load for hydraulic fracturing and gas fracturing of rocks

试样编号	加载速率 (MPa/s)	体积应变增量	破裂时 (s)	破裂载荷 (MPa)
水压W1	0.09552	0.00020	82.4	7.52
水压W2	0.07328	0.00017	102.2	7.38
水压W3	0.06368	0.00018	119.9	7.75
气压G1	0.03259	0.00100	102.6	4.00
气压G2	0.02254	0.00130	177.1	4.70
气压G3	0.01237	0.00170	309.2	4.20

分析了低渗透非均质砂砾岩储层的岩心内部结构和颗粒成分. 通过对CT扫描和重构分析, 得到了砂砾岩中不同粒径的矿物颗粒的分布特征(表3). 根据岩心矿物成分分析结果, 制备了非均质岩心模型, 开展了具有相同垂向应力、5种不同水平地应力条件下的非均质砂砾岩模型的水力压裂实验, 获得了非均质结构中的多裂缝起裂与扩展模式. 实验结果显示: 矿物颗粒的存在弱化了不同水平地应力比对裂缝起裂压力的影响, 矿物颗粒与基质的交界面的强度决定了裂纹的起裂压力, 所以起裂压力的变化幅度并不大. 对压裂后的试样进行了高精度CT扫描, 并将CT

表3 砂砾岩岩心的颗粒级配分布

Table 3 The composition and distribution of gravels in glutenite cores

粒径范围 (mm)	占颗粒总体积的百分比 (%)
5~7	39
7~9	24
9~11	14
11~13	11
13~15	4
15~17	3
17~19	3
19~21	2

图像转化为只含有裂缝、均匀基质以及颗粒3种不同灰度信息的灰度图像, 利用三维重构方法, 获得不同水平应力比和矿物颗粒影响下的内部多裂缝扩展和展布规律, 如图8所示.

实验结果表明, 当水平应力比达到1:1.9时, 裂缝面较为平整, 裂缝主要受较大的水平应力差的影响, 裂缝穿过矿物颗粒扩展, 形成了一条平行于最大水平主应力方向的单一裂缝. 在井筒两侧形成基本对称的双翼裂缝, 主要为张拉裂缝; 而当水平应力比小于1:1.9时, 出现了多裂缝起裂的情况, 裂缝面呈现较大扭曲; 主裂缝的周围出现多条次生裂缝, 且绕过矿物颗粒扩展, 此时产生的裂缝多为剪切裂缝, 而不再以平直的张拉裂缝为主. 井筒周围出现多个薄弱位置同时开裂的情况, 易形成多裂缝; 在远离井筒的位置, 裂缝会绕过较大的颗粒扩展, 形成具有较大迂曲度的剪切裂缝. 实验同时发现: 虽然由于非均质颗粒的影响形成了多处起裂的情况, 但扩展汇聚贯通后形成的主裂缝, 当非均质颗粒较少时, 仍趋向与沿平行于最大水平主应力的方向扩展.

4.5 三维裂缝网络的分形表征

为了实现对多裂缝空间分布和形态进行量化表征, 本文提出了裂缝网络复杂形态的分形表征方法. 该方法是在二维计盒维数法^[33,41]基础上改进提出的, 计算三维裂隙网络的分形维数时采用体盒覆盖方法, 即覆盖时二维单元网格变为三维立方体单元. 具体如下: 首先将CT扫描得到的平面图像进行二值化处理, 得到裂隙网络的二值化图(图9). 将黑白位图进行三维重构得到裂隙网络的三维体模型. 对重构得到的裂隙体进行网格划分, 即原立方体的长、宽、高分别逐次等分, 将其划分成 δ_k 个小立方体,

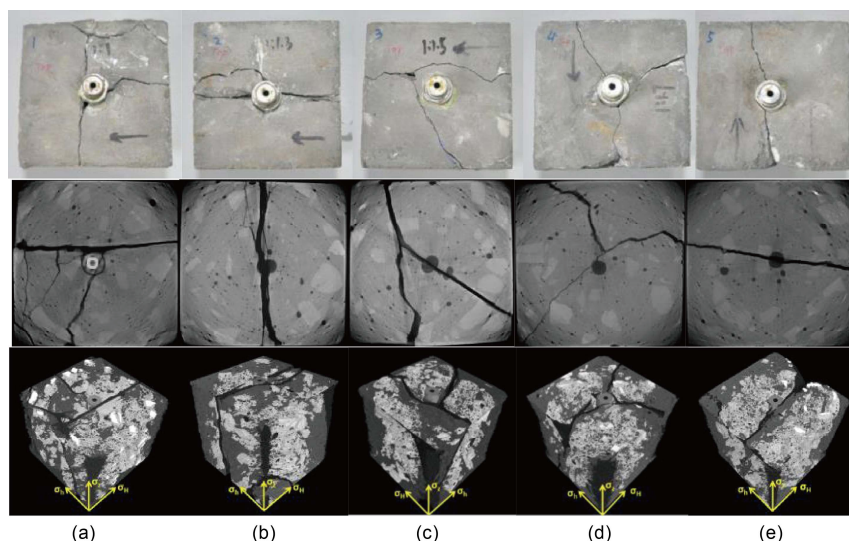


图8 (网络版彩色)压裂裂缝的空间展布与扩展。(a)~(e)分别表示水平地应力比为 1:1, 1:1.3, 1:1.5, 1:1.7, 1:1.9 的压裂实验结果, 其中轴向压力 20 MPa, 最小水平应力 10 MPa。第一行为试件表面裂缝照片; 第二行为CT扫描图像; 第三行为重构得到的内部三维裂缝网络, 其中灰色部分为基质, 白色部分为非均质颗粒

Figure 8 (Color online) The spatial distribution and form of fracturing cracks. The images in columns represent the results of different horizontal stress ratios σ_h/σ_H , i.e., 1:1, 1:1.3, 1:1.5, 1:1.7 and 1:1.9. The vertical stress is 20 MPa and the minimum horizontal stress is 10 MPa. The first row shows the appearance of the fractured samples. The second row presents the CT images of the fractured samples. The third row demonstrates the reconstructed models of the crack network of glutenites, in which the gray parts are matrixes, and the white parts are mineral particles in models

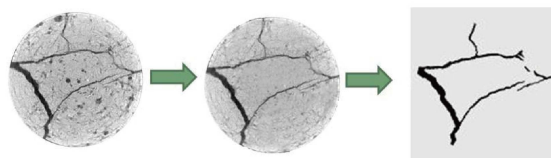


图9 (网络版彩色)数字图像预处理
Figure 9 (Color online) Digital images processing

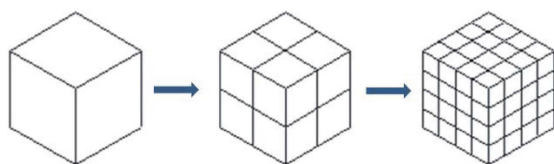


图10 (网络版彩色)网格划分
Figure 10 (Color online) Mesh generation

统计出各次等分下覆盖区域的小立方体数目 $N_{\delta k}$ (图10), 分析空间中各数据点的 $(-\ln \delta_k, \ln N_{\delta k})$ 相关性, 得到三维裂隙网络的分维值. 利用自主开发的分形计算程序^[42], 对三维裂隙网络进行遍历计算, 求得三维裂缝结构的分形维数. 表4列出了采用该方法得到的上述岩石压裂实验的裂隙网络的计算结果. 计算表明: 水平应力比小于1.9的裂缝网络分维数总是

大于水平应力比高于1.9时的情况, 这主要是由于多裂缝缝网的复杂程度更高, 裂缝的迂曲度以及裂缝密度更大. 因此体积分维较大. 裂缝的分形特征可以有效的定量地显示裂缝网络的复杂程度.

5 结论

页岩气具有资源潜力大、分布广、高效清洁等优势, 已成为能源资源开发的优选和战略发展目标, 页岩气的开发与利用将对全球经济、地缘政治乃至军事格局产生深远影响. 中国页岩气可采储量居世界第一位, 然而, 中国页岩气开发面临气藏赋存条件复杂、地质构造运动剧烈、储层渗透性极低、气藏富集区水资源匮乏等一系列难题, 页岩储层改造的难度及复杂程度极高, 迫切需要创新页岩储层改造的理

表4 压裂试件多裂缝空间形态的分形特征

Table 4 The fractal characteristics of crack network of rock samples

模型	水平应力比	分形维数
1	1:1.0	2.59
2	1:1.3	2.51
3	1:1.5	2.62
4	1:1.7	2.57
5	1:1.9	2.51

论和技术,探索适合中国页岩气高效开发的非常规理论与技术.本文简要分析了目前储层压裂改造的主要方法、原理及面临的难题和挑战,提出了储层改

造的体破裂理论及技术构想.基于早期的实验室实验以及现场实验的探索,讨论和分析了应用体破裂理论与技术中有待研究的关键科学问题和技术难点.

参考文献

- 1 Zhang H X. Shale gas: New bright point of the exploitation of the global oil-gas resources——The present status and key problems of the exploitation of shale gas (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2010, 25: 406–410 [张鸿翔. 页岩气: 全球油气资源开发的新亮点——我国页岩气开发的现状与关键问题. *中国科学院院刊*, 2010, 25: 406–410]
- 2 Pan J P, Zhou D S, Liu H L. Unconventional natural gas resources in China and its prospects (in Chinese). *Energy China*, 2010, 32: 37–41 [潘继平, 周东升, 刘洪林. 我国非常规天然气资源与发展前景. *中国能源*, 2010, 32: 37–41]
- 3 Xie H P, Gao F, Yang J, et al. Unconventional theories and strategies for fracturing treatments of shale gas strata (in Chinese). *J Sichuan Univ(Eng Sci Ed)*, 2012, 44: 1–6 [谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 页岩储层压裂改造的非常规理论与技术构想. *四川大学学报(工程科学版)*, 2012, 44: 1–6]
- 4 Zhao Q, Wang H Y, Liu R H, et al. Global development and China's exploration for shale gas (in Chinese). *Nat Gas Technol*, 2008, 2: 11–14 [赵群, 王红岩, 刘人和, 等. 世界页岩气发展现状及我国勘探前景. *天然气技术*, 2008, 2: 11–14]
- 5 Zhang J C, Jin Z J, Yuan M S. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution (in Chinese). *Nat Gas Ind*, 2004, 24: 15–18 [张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布. *天然气工业*, 2004, 24: 15–18]
- 6 Editorial Board of Geology, Exploration and Exploitation of Shale Gas. *Geological Research Progress of Shale Gas in China* (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 2011 [《页岩气地质与勘探开发实践丛书》编委会. 中国页岩气地质研究进展. 北京: 石油工业出版社, 2011]
- 7 Liu S C, Yan W D. The status of worldwide shale gas exploration and its suggestion (in Chinese). *Land Res Inform*, 2012, 2: 2–6 [刘树臣, 闫卫东. 世界页岩气资源勘探开发现状与启示. *国土资源情报*, 2012, 2: 2–6]
- 8 Hu W R, Bao J W. To explore the way of Chinese-style shale gas development (in Chinese). *Nat Gas Ind*, 2013, 33: 1–7 [胡文瑞, 鲍敬伟. 探索中国式的页岩气发展之路. *天然气工业*, 2013, 33: 1–7]
- 9 Zhao H F, Chen M, Jin Y, et al. Rock fracture kinetics of the fracture mesh system in shale gas reservoirs (in Chinese). *Petr Explor Devel*, 2012, 39: 465–470 [赵海峰, 陈勉, 金衍, 等. 页岩气藏网状裂缝系统的岩石断裂动力学. *石油勘探与开发*, 2012, 39: 465–470]
- 10 Daniel J K R, Bustin R M. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian Mississippian strata in the western Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation. *AAPG Bull*, 2008, 92: 87–125
- 11 Xu C C. Research progress in shale gas geological theory in China (in Chinese). *Special Oil Gas Reserv*, 2012, 19: 9–16 [许长春. 国内页岩气地质理论研究进展. *特种油气藏*, 2012, 19: 9–16]
- 12 Technically recoverable shale oil and shale gas resources: An assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United States. <http://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/>
- 13 Jiang H Y, Ju B S, Li Z P, et al. A study on the world's shale gas resources today (in Chinese). *Sino-Global Energy*, 2014, 3: 14–22 [江怀友, 鞠斌山, 李治平, 等. 世界页岩气资源现状研究. *中外能源*, 2014, 3: 14–22]
- 14 Dong D Z, Zou C N, Yang H, et al. Progress and prospects of shale gas exploration and development in China (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2012, 33: 107–114 [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: 107–114]
- 15 Zhang D W. Important measures for promoting the shale gas exploration and development in China: An explanation of The Shale Gas Development Programming from 2011 to 2015 (in Chinese). *Land Res*, 2012, 4: 43–45 [张大伟. 绘就“能源革命”路线图——《页岩气发展规划(2011–2015年)》解读. *国土资源*, 2012, 4: 43–45]
- 16 Chen P, Liu Y, Ma T S. Status and prospect of multi-well pad drilling technology in shale gas (in Chinese). *Petr Drilling Techn*, 2014, 3: 1–7 [陈平, 刘阳, 马天寿. 页岩气“井工厂”钻井技术现状及展望. *石油钻探技术*, 2014, 3: 1–7]
- 17 Mayerhofer M J. What is stimulated reservoir volume? *Eur J Pediatr Surg*, 2007, 17: 115–118
- 18 Wu Q, Xu Y, Wang T F, et al. The revolution of reservoir stimulation: An introduction of volume fracturing (in Chinese). *Nat Gas Ind*, 2011, 31: 7–12, 16 [吴奇, 胥云, 王腾飞, 等. 增产改造理念的重大变革——体积改造技术概论. *天然气工业*, 2011, 31: 7–12, 16]
- 19 Wu Q, Xu Y, Liu Y Z, et al. The current situation of stimulated reservoir volume for shale in U.S. and its inspiration to China (in Chinese). *Oil Drilling Product Technol*, 2011, 33: 1–7 [吴奇, 胥云, 刘玉章, 等. 美国页岩气体积改造技术现状及对我国的启示. *石油钻采工艺*, 2011, 33: 1–7]

- 20 Wang H, Liao X W, Zhao X L, et al. Research progress of simulation technology of unconventional reservoir volume stimulation (in Chinese). *Special Oil Gas Reserv*, 2014, 21: 8–15 [王欢, 廖新维, 赵晓亮, 等. 非常规油气藏储层体积改造模拟技术研究进展. *特种油气藏*, 2014, 21: 8–15]
- 21 Chen Z, Xue C J, Jiang T X, et al. Proposals for the application of fracturing by stimulated reservoir volume (SRV) in shale gas wells in China (in Chinese). *Nat Gas Ind*, 2010, 10: 30–32 [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, 10: 30–32]
- 22 Yao J, Sun H, Huang C Q, et al. Key mechanical problems in the development of shale gas reservoirs (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2013, 12: 1527–1547 [姚军, 孙海, 黄朝琴, 等. 页岩气藏开发中的关键力学问题. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2013, 12: 1527–1547]
- 23 Tang Y, Tang X, Wang G Y, et al. Summary of hydraulic fracturing technology in shale gas development (in Chinese). *Geol Bull China*, 2011, 30: 393–399 [唐颖, 唐玄, 王广源, 等. 页岩气开发水力压裂技术综述. *地质通报*, 2011, 30: 393–399]
- 24 Wu Q, Xu Y, Wang T F, et al. The revolution of reservoir stimulation: An introduction of volume fracturing (in Chinese). *Nat Gas Ind*, 2011, 31: 7–12, 16 [吴奇, 胥云, 王腾飞, 等. 增产改造理念的重大变革——体积改造技术概论. *天然气工业*, 2011, 31: 7–12, 16]
- 25 Adachi J, Siebrits E, Peirce A, et al. Computer simulation of hydraulic fractures. *Int J Rock Mech Mining Sci*, 2007, 44: 739–757
- 26 Sneddon I N. The distribution of stress in the neighborhood of a crack in an elastic solid. *Proc R Soc London A*, 1946, 187: 229–260
- 27 Economides M J, Martin T. *Modern Fracturing—Enhancing Nature Gas Production*. Houston: Energy Tribune Publishing Inc, 2007
- 28 Economides M J, Nolte K G. *Reservoir Stimulation*. 3rd Ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2000
- 29 Yang X F, Liu X S, Chen M, et al. Presence of the imitation of geometric morphology of hydraulic fissures both at home and abroad (in Chinese). *West-China Explor Eng*, 1997, 6: 14–17 [杨秀夫, 刘希圣, 陈勉, 等. 国内外水压裂缝几何形态模拟研究的发展现状. *西部探矿工程*, 1997, 6: 14–17]
- 30 Zhao H F, Chen M, Jin Y, et al. Rock fracture kinetics of the fracture mesh system in shale gas reservoirs (in Chinese). *Petr Explor Devel*, 2012, 39: 465–470 [赵海峰, 陈勉, 金衍, 等. 页岩气藏网状裂缝系统的岩石断裂动力学. *石油勘探与开发*, 2012, 39: 465–470]
- 31 Zhang S C, Mou S R, Cui Y. Numerical simulation models with hydraulic fracturing in shale gas reservoirs (in Chinese). *Nat Gas Ind*, 2011, 31: 81–84 [张士诚, 牟松茹, 崔勇. 页岩气压裂数值模型分析. *天然气工业*, 2011, 31: 81–84]
- 32 Bazant Z P, Salvati M, Chau V T, et al. Why fracking works? *J Appl Mech-Trans ASME*, 2014, 81: 101010
- 33 Xie H P. *Fractals-Rock Mechanics Introduction* (in Chinese). 2nd Ed. Beijing: Science Press, 2005 [谢和平. 分形-岩石力学导论. 第二版. 北京: 科学出版社, 2005]
- 34 Ju Y, Sudak L, Xie H P. Study on stress wave propagation in fractured rocks with fractal joint surfaces. *Int J Solids Struct*, 2007, 44: 4256–4271
- 35 Ju Y, Zheng J T, Epstein M, et al. 3D numerical reconstruction of well-connected porous structure of rock using fractal algorithms. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 2014, 279: 212–226
- 36 Xie H P, Ju Y, Li L Y. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2005, 24: 3003–3010 [谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24: 3003–3010]
- 37 Xie H P, Ju Y, Li L Y, et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2008, 27: 1729–1740 [谢和平, 鞠杨, 黎立云, 等. 岩体变形破坏过程的能量机制. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27: 1729–1740]
- 38 Gao F, Xie H P, Zhao P. Fractal properties of size-frequency distribution of rock fragments and the influent of meso-structure (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 1994, 3: 240–246 [高峰, 谢和平, 赵鹏. 岩石块度分布的分形性质及细观结构效应. *岩石力学与工程学报*, 1994, 3: 240–246]
- 39 Xie H P, Gao F, Zhou H W, et al. Fractal fracture and fragmentation in rocks (in Chinese). *J Disaster Prevent Mitig Eng*, 2003, 23: 1–9 [谢和平, 高峰, 周宏伟, 等. 岩石断裂和破碎的分形研究. *防灾减灾工程学报*, 2003, 23: 1–9]
- 40 Ju Y, Xie H P, Zheng Z M, et al. Visualization of the complex structure and stress field inside rock by means of 3D printing technology. *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 5354–5365
- 41 Xie H P. *Fractals in Rock Mechanics*. Rotterdam: Balkema A A, 1993
- 42 Ju Y, Chen F, Huang Y H. Computer codes for characterization of three dimensional fracture networks in rocks (in Chinese). Registration No. 2014SR164477. Registered in Oct 2014, Beijing China, 2014 [鞠杨, 陈飞, 黄耀辉. 岩石三维裂隙网络分形特征分析软件. 授权号2014SR164477. 授权日期: 2014年10月, 北京]

Novel idea of the theory and application of 3D volume fracturing for stimulation of shale gas reservoirs

XIE HePing¹, GAO Feng², JU Yang^{2,3}, XIE LingZhi¹, YANG YongMing³ & WANG Jun⁴

¹ Key Laboratory of Energy Engineering Safety and Mechanics on Disasters, Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

² State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining Technology, Xuzhou 221116, China;

³ State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining Technology, Beijing 100083, China;

⁴ College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China

Shale gas has become a preferably alternative energy resource and national strategic goal for many countries for its noticeable advantages, including huge reserves and potentials, green, and broad distribution. Successful exploitation and utilization of shale gas has profoundly impacted global economy, regional politics, and even military strategies around the world. China holds the largest amount of recoverable shale gas reserves in the world. The shale gas recoverable reserves of China rank firstly in the world. However, most of the shale gas formations in China are low-permeability deposit and in conditions of geological complex, tectonic active, and lack of water, which makes the exploitation of shale gas difficult using the current methods. It is imperative to renovate the methods and techniques for stimulation of shale gas formations and to establish theory and technology for achieving high-efficiency exploitation and utilization of shale gas in China. This paper briefly reviews the adopted methods, principles, intractable issues and challenges in reservoir fracturing. A promising reservoir stimulation idea, i.e., 3D volume fracturing, and its principles and technology, are proposed. The volume fracturing of shale rock is defined as a three-dimensional fracturing process from the mechanics point of view, taking into account the interaction, growth, bifurcation between internal pores, inherent joints or cracks, and artificial fractures of reservoir rock under complex geostresses. The volume fracturing of shale rock is a failure process featured by large scale, multi cracking, high strength, and intensive energy release. The paper preliminarily frames the 3D volume fracturing theory from the aspects of 3D fracture modes, growth mechanism, interaction between artificial fractures and structural cracks, crack networks and development, loading type, modes and media for realizing large-scale volume fracturing, visualization of 3D fracturing process and computing programs, and stimulation implementation. Based on the early laboratory and field tests, we discussed the key scientific issues and technical challenges in realizing this promising stimulation technology for shale gas reservoirs.

shale gas, reservoir stimulation, fracturing, volume fracturing theory, technical measures

doi: 10.1360/N972015-00262