https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.189



页岩剪切摩擦与非稳态滑移特性实验

付利^{1,2},申瑞臣^{1,4},庞飞³,杨恒林^{1,4},陈科⁵

1. 中国石油集团工程技术研究院有限公司,北京 102206

2. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083

3. 中国地质调查局,北京 100037

4. 油气钻井技术国家工程实验室,北京 102206

5. 中国地质调查局油气资源调查中心,北京 100083

摘 要: 龙一₁亚段页岩是川南页岩气开发的主要目的层,实践表明水平井单井产气量对井轨迹所在小层较为敏感.龙一₁亚 段页岩各层脆性矿物组分、弹性模量变化幅度小,采用常规页岩脆性评价方法和模型不能有效评价川南龙一₁亚段各小层页岩 的可压性,借鉴地震学地震成核原因研究思路,提出利用稳态一非稳态破坏特征来表征各小层可压性.优化设计一种页岩剪切 摩擦、稳态一非稳态特性实验方法,利用川南页岩地面露头进行线切割制样开展相关实验测试,分析研究页岩摩擦系数受层理 性构造、矿物组分、法向应力大小的影响,表征量化不同矿物组分下的页岩稳态一非稳态特征,确定了速度弱化向速度强化转 换的粘土矿物含量临界值.以川南昭通YS108井区龙一1亚段页岩储层为例,对各小层可压性进行整体评价,得到:龙一1¹⁻²层 较易开启剪切滑移,且易形成网状裂纹,储层整体可压性好;龙一1³层较难开启剪切滑移,但裂纹为单一裂纹、网状裂纹过渡状 态,储层整体可压性较差;龙一1⁴层较易开启剪切滑移,但裂纹则呈现单一状态,储层整体可压性较差. **关键词**:页岩;摩擦;稳态;非稳态;可压性;油气地质.

中图分类号: P554 **文章编号:** 1000-2383(2019)11-3783-11 **收稿日期:**2019-08-01

Experiments on Friction and Non-Steady Slip for Shale

Fu Li^{1,2}, Shen Ruichen^{1,4}, Pang Fei³, Yang Henglin^{1,4}, Chen Ke⁵

1. Engineering Technology R & D Company Limited, CNPC, Beijing 102206, China

- 2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, CNPC, Beijing 100083, China
- 3. China Geological Survey, Beijing 100037, China
- 4. National Engineering Laboratory for Oil & Gas Drilling Technology, Beijing 102206, China

5. Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China

Abstract: L1₁ sub-section shale reservoir is the major production layer in the South Sichuan shale gas block. For the horizontal well production, different well paths in the different layers can show quite big production gap, which may be due to the different shale crushabilities. However, the elastic modulus and brittle minerals for different layers in L1₁ sub-section have not shown much difference, so it is still impossible to evaluate the shale brittleness sufficiently with the conventional methods and models, Based on studies on the cause of earthquake, the steady & non-steady state failure is introduced to characterize the crushability for the different L1₁ layers in this paper. The new friction and steady & non-steady state experiments were designed to replace the conventional fault gauge testing method for the L1₁ outcrop samples. Firstly, the influence of the lamination, mineral constituents

引用格式:付利,申瑞臣,庞飞,等,2019.页岩剪切摩擦与非稳态滑移特性实验.地球科学,44(11):3783-3793.

基金项目:国家科技重大专项(Nos.2016ZX05022-001,2017ZX05063-003);中国石油西南油气田分公司科学研究与技术开发项目(No. 20180601-17).

作者简介:付利(1985-),男,高级工程师,硕士,主要从事非常规油气钻完井地质力学一体化技术与应用研究工作.ORCID:0000-0001-9404-5928. E-mail:fulidri@cnpc.com.cn

and normal stress on the friction for shale was studied and analyzed. Secondly, the steady & non-steady state behavior was characterized and quantified by the calculated a-b value for the shale with different mineral constituents. Thirdly, the critical value from velocity-weakening to velocity-strengthening was established by the overlay method. Taking Well YS108 field in Zhaotong shale block as the example, the different crushabilities for different layers were analyzed and discussed. It is found that $L1_1^{1-2}$ layers have better crushability that can cause the shear slide easily and generate the map cracking, while the $L1_1^4$ layers have worse crushability that generates the single cracking or cause the shear slide difficultly.

Key words: shale; friction; steady state; non-steady state; crushability; petroleum geology.

0 引言

页岩气是一种潜力巨大的非常规资源,已经 在北美地区和我国川渝地区得到成功开发,成为 全球油气勘探的一个新领域.页岩气储层致密、渗 透率低,水平井工厂化钻井、多级压裂体积改造已 经成为页岩气勘探开发的关键技术(路保平, 2013; 邹才能等, 2016).

在我国川南长宁一威远、昭通页岩气区块水平 井开发中,志留系下统龙马溪组龙一,亚段富含有 机质黑色页岩是页岩气开发的主要目的层(梁兴 等,2016;李卓等,2017;岳鹏升等,2017),具有埋 藏深度大、构造复杂、有机质成熟度高、非均质性强 等特点.龙一,亚段页岩分为龙一,¹、龙一,²、龙一,³ 和龙一,⁴共4个小层,各层矿物组分、胶结结构、页 岩可压性纵向差异性较大,水平井眼在优质储层中 的轨迹对裂缝的扩展和纵向有效支撑影响较大,在 不同的储层箱体位置压裂,对储层改造效果的影响 显著.以威远区块某井区为例,水平井巷道位置位 于龙一,¹小层时单井均测日产气量约为20万方,而 水平井巷道位置位于龙一,³小层时单井均测日产气 量约为5万方.

页岩可压性研究主要集中在页岩脆性研究上, 页岩脆性主要用来评价页岩破碎,并能形成多维破 裂面的难易程度,是页岩地质、储层特征的综合反 映,影响因素众多(Mulen and Enderlin, 2012).页岩 脆性评价方法与模型是近几年的研究热点(李庆辉 等,2012a,2012b;李文阳等,2013;袁俊亮等, 2013;蒋廷学等,2014),其评价方法有30多种,主 要包括页岩矿物组分、弹性力学、强度参数、压入硬 度和全应力一应变等5大类.目前基于弹性力学和 矿物组分的页岩脆性评价方法较为常用.对于龙一1 亚段各小层而言,弹性模量和脆性矿物组分变化幅 度很小,弹性模量介于35~50 GPa,脆性矿物组分 介于40%~60%,利用弹性力学和矿物组分参数确 定的各小层脆性指数差异性不大(杨恒林等, 2017),均属于 II 类页岩.而单井产量对井轨迹所在 小层较敏感,说明各小层脆性指数差异性较大.因 此,传统脆性评价方法与模型不宜于确切评价龙一, 亚段各小层的可压性,需要探索一种新的页岩可压 性评价方法.

试验表明,低围压下页岩破坏特征以张拉破坏 为主,高围压下则以剪切破坏为主(李庆辉等, 2012a,2012b).水力压裂主裂缝尖端存在拉应力集 中,主裂缝尖端破坏模式为张拉破坏,水力压裂主 裂缝穿过后的层理和天然裂隙,在压裂液滤失作用 下,易发生剪切破坏,形成次裂缝(张树翠,2017).非 常规储集层压裂应追求裂缝高复杂度而不是主缝 高导流能力,压裂形成的大量剪切自支撑裂缝能显 著提高非常规储集层导流能力(胥云等,2018).因 此,笔者认为页岩可压性是裂缝能够发生破坏、扩 展、滑移的能力.

姚孝新(1984)在玻璃中预制小裂纹,对裂纹稳 态与非稳态扩展的全过程进行监测,发现裂纹稳态 扩展时,扩展速度随着时间在增长,而初始压力和 压缩量保持不变,一旦出现非稳态扩展,初始压力 和压缩量便突然下降,实验中的应力降和地震中的 应力降在数量级上是相同的.地震学行业认为,大 多数破坏性的构造地震是由断层的突然破裂、剪切 滑动引起的.为表征断层剪切特征,Dieterich(1978, 1979)提出了断层泥稳态一非稳态剪切摩擦这一概 念,剪切特征可以采用Dieterich 准则来描述,石英 等颗粒矿物在剪应变超过临界值以后,表现出速度 弱化、非稳态摩擦特征, Dieterich 准则中a-b < 0; 粘土矿物在高剪切应变条件下表现出速度强化、稳 态摩擦特征, Dieterich 准则中a-b>0.这与近年北 美学者对 Barnett 页岩水平井压裂作业时长周期多 持续的裂纹开裂特征进行监测研究相一致,页岩长 周期多持续的裂纹扩展属于稳态慢滑移,与逆冲或 走滑断层的地震频率相当(1~15 Hz),而大多数微 地震侧重监测高频地震信号(>15 Hz),属于高脆性 态扩展,不能生成高频地震波,因而常规微地震无 法采集到裂缝稳态扩展信号,导致页岩气产量与微 地震信号的相关性不理想(Das and Zoback, 2011, 2012;Zoback *et al.*, 2012).

开展龙一1亚段各小层的剪切摩擦、稳态一非 稳态破坏特性研究,能更好地揭示各小层页岩的可 压性、裂纹扩展滑移特性.目前,国内外仅利用人工 合成断层泥开展不同矿物组分下的剪切摩擦、稳 态一非稳态特性研究,而未针对真实的页岩储层开 展相关研究.由于不同页岩储层的矿物组分变化 大,人工合成类似断层泥的试样比较繁琐,同时有 失矿物组分真实性,为了更全面地对页岩可压性进 行评价,以助于更好地选择压裂工程甜点,提升压 裂作业效果,本文提出一种页岩剪切摩擦特性实验 方法,利用川南页岩地面露头进行线切割制样,来 开展川南页岩的摩擦、稳态一非稳态特性,以期探 索评价龙一1亚段各小层页岩的可压性差异.

1 实验方法

实验设备选择常规直剪实验系统,试样为长方体形,试样数量为3块,试样尺寸一致为100 mm× 50 mm×25 mm,其中2块试样安装在可固定的U 型实验夹具上下岩心槽中,第3块试样安装在可活动的平板式实验夹具岩心槽中.在U型实验夹具上 岩心槽上部1~2 mm高度空白区处施加法向应力 σ,在平板实验夹具外侧一端施加水平应力τ.剪切摩 擦实验夹具如图1所示.

剪切摩擦实验时,水平应力τ的加载速度 V 保持恒定,法向应力σ可根据实验方案要求进行 改变.稳态一非稳态特性实验时,法向应力σ保持 恒定,水平应力τ的加载速度 V可根据实验方案 要求进行改变.

本次实验岩心取自四川长宁页岩气区块页岩 储层五峰组平行层理、五峰组垂直层理、龙马溪组 平行层理、龙马溪组垂直层理4个层位,切割制取后 的试验如图2所示.



图1 页岩剪切摩擦实验示意

Fig.1 The schematic diagram of the shear and friction experiment for the shale samples a.实验初始状态;b.实验状态;1,2,3表示3块页岩试样;4表示U型实验夹具;5表示平板实验夹具;6表示U型实验夹具上岩心槽;7表示U型 实验夹具U型槽;8表示U型实验夹具限位固定



图 2 剪切摩擦实验用试样 Fig.2 The shale sample for the shear and friction experiment

2 剪切摩擦测试

利用本试验方案进行剪切摩擦实验时,不同 时刻的试样摩擦系数可以根据摩擦系数计算公 式而求得.

摩擦系数计算公式:
$$f = \frac{\tau}{2\sigma}$$
, (1)

其中:f为摩擦系数;τ为水平应力;σ为法向应力.

随着水平应力τ的增加,试样逐渐由静摩擦状态向动摩擦状态转换,待试样摩擦系数值达到峰值后,试样开始产生滑动,当试样处于稳定滑动时,摩擦系数值也基本维持在某一稳定值处.这一稳定的摩擦系数值,即是本试验方案中对各组试样所测试的摩擦系数大小值.

对4组试样进行摩擦系数测试时,法向应力σ 为2MPa,水平应力加载速度V为10µm/s,待试样 处于稳定滑动时,测试得到五峰组平行层理页岩的 摩擦系数为0.595~0.638,五峰组垂直层理页岩的 摩擦系数为0.6205~0.6810,龙马溪组平行层理页 岩的摩擦系数为0.6075~0.6895,龙马溪组垂直层 理的摩擦系数为0.6563~0.7037,各组试样摩擦系 数一位移测试曲线如图3所示.

2.1 层理性对摩擦系数的影响

将五峰组平行层理页岩与垂直层理页岩摩擦 系数、龙马溪组平行层理与垂直层理页岩摩擦系数 分别对比发现,五峰组平行层理页岩的摩擦系数< 五峰组垂直层理页岩的摩擦系数,龙马溪组平行层 理页岩的摩擦系数<龙马溪组垂直层理页岩的摩 擦系数.整体而言,同一层位,平行层理方向页岩的 摩擦系数<垂直层理方向页岩的摩擦系数.

2.2 矿物组分对摩擦系数的影响

对4组试样进行全岩粘土矿物XRD衍射测试, 测试数据参见表1.测试结果表明:龙马溪组页岩中 石英、长石等脆性矿物含量高于五峰组页岩,龙马 溪组中白云岩、方解石等碳酸盐岩含量低于五峰组





页岩,龙马溪组中粘土含量略高于五峰组页岩.

将五峰组页岩摩擦系数与龙马溪组页岩摩擦 系数进行对比发现,五峰组平行层理页岩的摩擦系 数 < 龙马溪组平行层理页岩的摩擦系数,五峰组垂 直层理的页岩摩擦系数 < 龙马溪组垂直层理的页 岩摩擦系数.结合矿物组分 XRD 衍射测试结果发 现,同一方向不同层位的页岩摩擦系数受矿物组分 含量影响大:硅质脆性矿物含量越高,摩擦系数越 大,硅质脆性矿物含量高低控制摩擦系数大小.

2.3 应力差对摩擦系数的影响

在剪切摩擦测试过程中,水平应力加载速度 不变,逐步提高法向应力的大小,五峰组平行层理 页岩法向应力由2MPa逐步升至16MPa,五峰组 垂直层理页岩法向应力由2MPa逐步升至 10MPa,龙马溪组平行层理页岩法向应力由 2MPa逐步升至20MPa,龙马溪组垂直层理页岩 法向应力由2MPa逐步升至15MPa.4组试样摩 擦系数一位移曲线如图4和图5所示,实验结果同 时表明,随着法向应力增大,页岩摩擦系数逐渐降 低.这一结论与北美学者针对断层泥的摩擦实验 研究成果相类似(Elsworth, 2017).

组别	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·							粘土矿物总量	
	石英	钾长石	斜长石	黄铁矿	脆性矿物	白云石	方解石	碳酸盐岩矿物	(%)
五峰平行	27.9	0.4	2.2	3.4	33.9	13.6	39.1	52.7	13.4
五峰垂直	28.6	0.6	4.3	2.4	35.9	11.4	38.3	49.7	14.4
龙马溪平行	33.3	0.2	4.9	3.7	42.1	12.6	25.5	38.1	19.8
龙马溪垂直	38.3	0.5	5.0	4.3	48.1	9.2	27.4	36.6	15.3

表1 四组试样全岩矿物 XRD 衍射测试数据 Table 1 The whole-rock analysis data of the four shale samples by XRD diffraction



图4 以又仏问应力时的五峰组贝石库惊示奴 位彻面线

Fig. 4 The testing plot between friction factor and displacement for the Wufeng samples in different normal stress a.平行层理;b.垂直层理



Fig. 5 The testing plot between friction factor and displacement for the Longmaxi samples in different normal stress a.平行层理;b.垂直层理

3 稳态一非稳态特性测试

基于实验室摩擦实验结果得到的速度-状态 摩擦本构定律能够模拟断层面上的周期性慢滑移, 该定律中,断层面的摩擦强度由滑动速度 V 和界面 状态变量 θ 共同描述(Dieterich, 1978, 1979).在本 实验中,速度-状态本构方程表征页岩剪切裂纹演 化的稳态、非稳态特征,a-b>0表征为稳态(速度 强化),a-b<0表征为非稳态(速度弱化).

迪特里克本构方程:
$$\mu = \mu_0 + a \ln\left(\frac{V}{V_0}\right) + b \ln\left(\frac{V_0\theta}{D_c}\right),$$
 (2)

$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = 1 - \frac{V\theta}{D_c},\tag{3}$$

$$a-b = \frac{\Delta \mu_{ss}}{\ln\left(\frac{V}{V_0}\right)},\tag{4}$$

其中:V₀为初始参考速度;V为断层面滑动时的速 度;μ₀为速度为V₀时稳定状态下的摩擦系数;θ为界 面状态变量,与时间有关;a、b为与实验有关的经验 常数;D_c为临界滑动距离,即以某一速度稳定滑动 到以另一速度稳定滑动过程中所需的滑动距离.

对4组试样进行稳态一非稳态特性测试,法向应 力为2 MPa,水平应力加载速度在3 μm/s、10 μm/s、 30 μm/s之间转换,临界滑动距离为500 μm.测试得 到五峰组平行层理页岩的 *a*-*b* 值为-0.008 7~ -0.005,平均值为-0.007 95;五峰组垂直层理页岩 的 *a*-*b* 值 为 -0.009 1~ -0.005 8,平均值 为 -0.007 46;龙马溪组平行层理页岩的 *a*-*b* 值为 -0.008 2~-0.002 7,平均值为-0.005 16;龙马溪 组垂直层理页岩的 *a*-*b* 值为-0.006 4.故4组试样 在不同水平应力加载速度下的摩擦系数-位移曲线 如图6所示,各组页岩的*a*-*b* 值参见表2~表5.

本试验方案中,五峰组和龙马溪组底部页岩具 有速度弱化特征,对粘土矿物含量与*a*-b值进行拟 合,拟合曲线如图7所示,结果表明,随着粘土含量 的增大,*a*-b值增大,速度弱化现象减弱.当粘土矿 物含量约为31.6%时,*a*-b值为0;粘土矿物含量> 31.6%时,*a*-b>0,开始出现速度强化现象.





图 6 五峰组和龙马溪组平行层理、垂直层理页岩在不同水平应力加载速度下的摩擦系数一位移曲线

Fig.6 The testing plots between friction factor and displacement in different loading velocities for the parallel and vertical bedding samples from Wufeng Formation and Longmaxi Formation

a. 五峰组平行层理页岩在不同水平应力加载速度下的摩擦系数一位移曲线;b. 五峰组垂直层理页岩在不同水平应力加载速度下的摩擦系数一位移曲线;c. 龙马溪组平行层理页岩在不同水平应力加载速度下的摩擦系数一位移曲线;d. 龙马溪组垂直层理页岩在不同水平应力加载速度下的摩擦系数一位移曲线

表 2 五峰组平行层理页岩的 a-b 值计算表

Table 2The values of a-b for the parallel bedding shalefrom Wufeng Formation

摩擦系数	a — b
0.616	/
0.616	0
0.610	-0.004 98
0.610	0
0.630	-0.008 69
0.622	-0.006 64
9值	-0.007 95
	摩擦系数 0.616 0.616 0.610 0.610 0.630 0.622 均值

表4 龙马溪组平行层理页岩的*a*-b值计算表

Table 4 The values of a-b for the parallel bedding shale from Longmaxi Formation

	-	
速度(µm/s)	摩擦系数	a — b
10	0.643	/
30	0.640	-0.002 73
10	0.649	-0.008 19
30	0.644	-0.004 55
10	/	/
30	/	/
10	/	/
平均	自值	- 0.005 16

表3 五峰组垂直层理页岩的a-b值计算表

Table 3 The values of a-b for the vertical bedding shale from Wufeng Formation

IIOIII W		
速度(µm/s)	摩擦系数	a — b
3	0.675	/
10	0.668	-0.005 81
30	/	/
10	/	/
3	/	/
10	0.672	/
30	0.662	-0.009 1
平均	值	-0.007 46

表5 龙马溪组垂直层理页岩的a-b值计算表

Table 5 The values of a-b for the vertical bedding shale from Longmaxi Formation

from Longmaxi i ormation						
速度(µm/s)	摩擦系数	a — b				
10	0.663	/				
30	0.663	0				
10	0.670	-0.006 37				
3	0.670	0				
10	0.670	0				
30	0.670	0				
3	0.670	0				
平均	值	-0.006 37				

0.7







4 讨论

4.1 摩擦特征与地层可压性、剪切滑移关系

岩石受到外力作用发生破裂,通常有张性破裂和剪性破裂2种情况,这与储层岩石受到的三应力状态有关.传统压裂中,大多假设地应力处于*Sv*>*S*hmax</sub>>*S*hmin状态,即压裂产生张性裂缝,且裂缝垂直于最小主应力方向.而最新研究表明(吴奇等,2014),室内实验发现在很多区域储层岩石具有*S*hmax>*Sv*>*S*hmin特征,岩石在压裂时产生的裂缝会产生剪切滑移,并使形成的裂缝发生错位,这样的起裂特征会使得裂缝形成自支撑,大幅度提高裂缝导流能力.

页岩剪切摩擦试验表明,同一层位,平行层理 方向页岩的摩擦系数最小;页岩硅质脆性矿物含量 越低,摩擦系数越小;法向应力越高,摩擦系数越小.

平行层理方向页岩的摩擦系数最小:这说明 在一定程度上页岩层理面更容易在外力作用下 破裂并产生剪切滑移,限制部分初始压裂裂纹的 纵向延伸的同时,也促使初始压裂裂纹连接和开 启更多的平面层理和天然弱面,更利于形成复杂 裂缝网格,这与Palmer的研究认识相一致(Palmer *et al.*, 2007).

页岩硅质脆性矿物含量越低,摩擦系数越小: 这说明硅质脆性矿物含量低的地层更易于在受外 力作用下发生剪切滑移.如果水平井井眼轨迹起 伏较大,在龙一1亚段、五峰组之间频繁穿层,受不 同层位矿物组分的影响,不同层位页岩则会发生 不同概率的剪切滑移,如果采用同一压裂施工参 数,则会导致个别井段发生地层滑移导致的套管 剪切破坏问题.

法向应力越高,摩擦系数越小:法向力可类比 地层应力*S*_{hmax}、*S*_v,*S*_{hmin}中任意两应力值的差值,应力 差越大,页岩在第三方向上的摩擦系数越小,在第 三地应力状态下越易于在该方向上开启剪切滑移. 因此,不考虑地应力状态,硅质脆性矿物含量低、平 行于层理的地层更易于开启剪切滑移.但在真实地 层条件下,地层剪切滑移除受自身摩擦系数影响 外,更重要的要考虑地应力状态(Simpson,1997), 两者兼顾以确定地层剪切滑移开启的概率及方向.

4.2 稳态-非稳态特征与可压性关系

通过扫描电子显微镜定量材料评估(QEMS-CAN)系统(朱如凯等,2018;Li et al., 2019),笔者分 别对川南昭通页岩气YS108井区龙一⁴、龙一³和龙² 层页岩进行背散色图像扫描,获得含矿物成分信息的 页岩胶结结构,扫描电镜图如图8所示,图像分辨率为 1 μm;扫描尺寸为1500 μm×1500 μm.页岩微观结 构是由不同比例的伊利石粘土基质(<5 μm)、透镜或 细脉状有机质(20~50 μm)、碎屑状石英、长石和方解 石(20~100 μm)颗粒组成(Jiang et al., 2017).龙一⁴ 层粘土含量为43.2%、硅质含量为47.9%,属于粘土 质基底胶结结构;龙一³层粘土含量为29.8%,硅质含 量为52.5%,属于粘土基底与石英等颗粒支撑结构; 而龙一²层粘土含量为12.1%,硅质含量为59.7%,属 于石英等颗粒支撑结构(杨恒林等, 2018).

假设页岩首先由石英等颗粒矿物构成,孔隙 度为 φ_s,粘土颗粒随机充填入石英颗粒孔隙空间, 随着粘土含量的增加,颗粒结构孔隙空间被粘土 基质全部填满,粘土含量进一步增加,石英颗粒接 触将被分离,胶结结构演变为粘土基质胶结.定义 粘土体积与总体积之比为 c,当粘土填充所有颗粒 孔隙空间,则 c= φ_s,粘土矿物质量分数(W_c)与体 积分数(c)关系为:

$$w_{c} = \frac{c(1-\varphi_{c1})}{c(1-\varphi_{c1}) + (1-\varphi_{s})(\rho_{s}/\rho_{c1})} , c \leqslant \varphi_{s}, (5)$$

$$c(1-\varphi_{s1})$$

$$w_{c} = \frac{c(1-\varphi_{c1})}{c(1-\varphi_{c1})+(1-c)(\rho_{s}/\rho_{c1})} \quad , c > \varphi_{s}, (6)$$

式中 φ_s, φ_{cl} 分别表示颗粒结构孔隙度和粘土孔隙 度; ρ_s, ρ_{cl} 分别表示石英等颗粒矿物和粘土矿物的密 度,取 $\rho_s \approx \rho_{cl} \approx 2\,650 \text{ kg/m}^3, 则 \rho_s/\rho_{cl} \approx 1.$

粘土矿物完全充填石英等颗粒矿物结构孔隙 度时的质量分数为:



图 8 龙一1亚段扫描电镜图 Fig.8 The scanning electron photomicrographs for the different layers in the L1₁ sub-section a. $\dot{\pi}$ -1⁴层; b. $\dot{\pi}$ -1³层; c. $\dot{\pi}$ -1²层

$$w_{cr} = \frac{(1 - \varphi_{cl})}{\left(1 - \varphi_{cl}\varphi_{s}\right)}\varphi_{s}.$$
(7)

国内外学者研究一般取石英等颗粒矿物孔隙 度为0.30~0.33,粘土矿物孔隙度为0.10~0.24,则 粘土完全充填石英等颗粒矿物结构孔隙时的质量 分数约为25%~30.7%,即页岩胶结结构由粘土基 质胶结过渡为石英等颗粒接触结构时的粘土矿物 质量分数约为25%~30.7%.结合前述的粘土矿物 含量对页岩剪切稳态一非稳态破坏影响规律 (31.6%粘土含量临界值),说明页岩剪切破裂由稳 态过渡为非稳态对应页岩胶结结构由粘土基质胶 结过渡为石英等矿物颗粒支撑结构.

利用龙一⁴、龙一³和龙²层页岩背散色扫描 图像进行随机数字页岩模型建立,再根据数字页岩 模型,在ABAQUS软件中建立微观尺度下的页岩 有限元模型.利用有限元数值模拟单向拉伸破坏 形貌,模拟云图如图9所示.将数值模拟结果与各 小层粘土矿物含量结合分析表明:龙一⁴层粘土含 量越高,产生的裂纹越单一;龙一1³和龙1²层粘土含 量越低,产生的裂纹较复杂,并伴随大量的裂纹偏 转与分叉现象.

综上说明,粘土矿物含量高,速度强化现象明显,易发生稳态破坏,破坏裂纹单一,可压性较差;粘土矿物含量低,速度弱化现象明显,易发生非稳态破坏,形成网状裂纹,可压性较好.

4.3 龙一1亚段页岩各小层可压性

以川南昭通页岩气YS108井区为例,对龙一1 亚段各小层页岩可压性特征进行讨论分析.YS108 井区龙一1亚段地应力参数参见表6.龙一1亚段地 应力状态为Shmax>Sv>Shmin,页岩在压裂时产生的裂 缝会产生剪切滑移,并使形成的裂缝发生错位.龙 一1亚段各小层水平应力差大小为龙一1²层>龙 一1^{1.4}层>龙一1³层,但龙一1²层水平应力差值与龙 一1^{1.4}层水平应力差值相当,皆远大于龙一1³层水平 应力差值.根据应力差越大、摩擦系数越小的认识, 可得:相对龙一1³层而言,龙一1^{1.2.4}层摩擦系数较 小,较易开启剪切滑移.



图 9 龙一1亚段各层单向拉伸破坏形貌 Fig.9 The failure patterns of tension for different layers in the L1₁ sub-section a. 龙一1⁴层; b. 龙一1³层; c. 龙一1²层

表6 YS108井区龙一,亚段地应力状态							
Table 6 The crustal stress state of $L1_1$ sub-section in the YS108 well block							ck
井区	小层	顶深(m)	底深(m)	$S_v(g/cm^3)$	$S_{\rm hmax}({\rm g/cm^3})$	$S_{\rm hmin}({\rm g/cm^3})$	水平地应力非均匀系数
	龙一14	2 483.52	2 495.70	2.52	2.98	2.26	0.32
	龙一13	2 495.70	2 502.78	2.52	2.75	2.22	0.24
YS108	龙一12	2 502.78	2 509.54	2.52	3.15	2.31	0.36
	龙一11	2 509.54	2 511.01	2.53	3.10	2.32	0.34
	五峰	2 511.01	2 516.05	2.52	3.06	2.39	0.28



图 10 龙一1亚段各层裂纹扩展特征

Fig.10 The extension characteristics of the fracture for the different layers in the L1₁ sub-section

龙一1亚段各小层硅质脆性矿物含量大小为龙 一1¹⁻²层>龙一1³层>龙一1⁴层,但背散色图像扫描 获得的矿物成分信息显示各层硅质脆性矿物含量 相差不大,介于47.9%~59.7%.根据硅质脆性矿物 含量越小、摩擦系数越小的认识,可得:龙一1¹⁻⁴层 摩擦系数相当,具有相同难易程度的地层剪切滑移.

龙一1亚段各小层粘土矿物含量大小为龙一1⁴ 层高于40%,龙一1³层约30%~40%,龙一1^{1~2}层约 10%~30%.根据粘土矿物含量大于30%时、易发 生稳态破坏形成网状裂纹的认识,可得:龙一1⁴层 发生稳态破坏,裂纹单一;龙一1³层逐渐由稳态破 坏向非稳态破坏过渡;龙一1^{1~2}层发生非稳态破坏, 易形成网状裂纹.

综上所述, 龙一1 亚段各层呈现不同的裂纹扩展特征, 如图 10 所示, 龙一1¹⁻²层较易开启剪切滑移, 且易形成网状裂纹, 储层整体可压性好; 龙一1³层较难开启剪切滑移, 但裂纹为单一裂纹、网状裂纹过渡状态, 储层整体可压性较差; 龙一1⁴层较易开 启剪切滑移, 但裂纹则呈现单一状态, 储层整体可 压性较差. 这在一定程度上也揭示了龙一1¹⁻²层的 钻遇率决定单井产气量的原因.

5 结论与建议

(1)页岩具有稳态一非稳态破坏特性,稳态破 坏时,随着外力加载速度的增大,裂纹破坏或扩展 阻力增大,形成的破坏裂纹较单一,页岩可压性较差;页岩非稳态破坏时,随着外力加载速度的增大,裂纹破坏或扩展阻力降低,易形成网状裂纹,页岩可压性较好.页岩稳态一非稳态破坏突破了常规页岩脆性评价方法和模型不能有效评价页岩可压性的局限性,能够从矿物组分角度出发,更深入地表征页岩的可压性.

(2)页岩层理面更容易在外力作用下破裂并 产生剪切滑移,限制部分初始压裂裂纹的纵向延 伸的同时,也促使初始压裂裂纹连接和开启更多 的平面层理和天然弱面,更利于形成复杂裂缝网 格.硅质脆性矿物含量低的地层更易于在受外力 作用下发生剪切滑移,如果水平井井眼轨迹起伏 较大,各小层穿层频繁,受不同层位矿物组分的影 响,不同层位页岩则会发生不同概率的剪切滑移, 滑移严重则会导致套管剪切破坏问题发生.地应 力中任意两方向应力差越大,页岩在第三方向上 的摩擦系数越小,在第三地应力状态下越易于在 该方向上开启剪切滑移.

(3)页岩粘土矿物含量大约在30%时,速度弱 化现象开始向速度强化现象转变,破坏形式也以非 稳态破坏向稳态破坏转变,此时页岩胶结结构由石 英等矿物颗粒支撑结构过渡为粘土基质胶结结构. 粘土矿物含量高,易发生稳态破坏,破坏裂纹单一, 可压性较差;粘土矿物含量低,易发生非稳态破坏, 形成网状裂纹,可压性较好.

(4)对于川南龙一1亚段页岩储层,龙一1¹⁻²层较 易开启剪切滑移,且易形成网状裂纹,储层可压性 好;龙一1³层较难开启剪切滑移,但裂纹为单一裂 纹、网状裂纹过渡状态,储层整体可压性较差;龙 一1⁴层较易开启剪切滑移,但裂纹则呈现单一状态, 储层可压性较差.这在一定程度上也揭示了龙一1¹⁻² 层的钻遇率决定单井产气量的原因.

(5)建议页岩气开发时,应针对龙马溪各小层 地质力学特性不同而灵活进行布井方案设计,同时 在后期压裂作业施工时,也应根据各小层不同的裂 纹扩展特性进行压裂参数优化,以实现各小层最大 程度的采收率.

References

- Das, I., Zoback, M.D., 2011. Long-Period, Long-Duration Seismic Events during Hydraulic Fracture Stimulation of a Shale Gas Reservoir. *The Leading Edge*, 30(7):778-786. https://doi.org/10.1190/1.3609093
- Das, I., Zoback, M. D., 2012. Microearthquakes Associated with Long Period, Long Duration Seismic Events during Stimulation of a Shale Gas Reservoir. 2012 SEG Annual Meeting, Las Vegas.
- Dieterich, J.H., 1978. Time-Dependent Friction and the Mechanics of Stick-Slip. Pure and Applied Geophysics, 116 (4/5): 790-806. https://doi.org/10.1007/bf00876539
- Dieterich, J.H., 1979. Modeling of Rock Friction: 1. Experimental Results and Constitutive Equations. *Journal of Geophysical Research*, 84(B5): 2161-2168. https://doi. org/10.1029/jb084ib05p02161
- Elsworth, D., 2017. Deformation and Permeability Evolution in Reservoir and Seals with a Focus on Well Survivability. Shale Gas Engineering Geomechanics International Conference, Beijing.
- Jiang, T.X., Bian, X.B., Su, Y., et al., 2014. A New Method for Evaluating Shale Fracability Index and Its Application. *Petroleum Drilling Techniques*, 42(5): 16-20 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z.X., Duan, H.J., Liang, C., et al., 2017.Classification of Hydrocarbon-Bearing Fine-Grained Sedimentary Rocks. *Journal of Earth Science*, 28(6):963-976.
- Li, J.Q., Zhang, P.F., Lu, S.F., et al., 2019. Scale-Dependent Nature of Porosity and Pore Size Distribution in Lacustrine Shales: An Investigation by BIB-SEM and X-Ray CT Methods. *Journal of Earth Science*, 30(4): 823-833.

- Li, Q.H., Chen, M., Jin, Y., 2012a. Experimental Research on Failure Modes and Mechanical Behaviors of Gas-Bearing Shale. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31(S2): 3763-3771 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q.H., Chen, M., Jin, Y., et al., 2012b. Rock Mechanical Properties and Brittleness Evaluation of Shale Gas Reservoir. *Petroleum Drilling Techniques*, 40(4): 17-22 (in Chinese with English abstract).
- Li, W.Y., Zou, H.L., Wu, C.Z., et al., 2013. An Analysis of Shale Gas Development in View of Engineering Technologies. Acta Petrolei Sinica, 34(6): 1218-1224 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Jiang, Z.X., Tang, X.L., et al., 2017. Lithofacies Characteristics and Its Effect on Pore Structure of the Marine Shale in the Low Silurian Longmaxi Formation, Southeastern Chongqing. *Earth Science*, 42(7): 1116– 1123 (in Chinese with English abstract).https://doi.org/ 10.3799/dqkx.2017.090
- Liang, X., Wang, G.C., Xu, Z.Y., et al., 2016. Comprehensive Evaluation Technology for Shale Gas Sweet Spots in the Complex Marine Mountains, South China: A Case Study from Zhaotong National Shale Gas Demonstration Zone. *Natural Gas Industry*, 36(1): 33-42 (in Chinese with English abstract).
- Lu, B.P., 2013. SINOPEC Engineering Technical Advance and Its Developing Tendency in Shale Gas. *Petroleum Drilling Techniques*, 41(5): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- Mulen, M., Enderlin, M., 2012. Fracability Index-More than just Calculating Rock Properties. SPE Annual Technical Conferenceand Exhibition, San Antonio. https://doi. org/10.2118/159755-MS
- Palmer, I.D., Moschovidis, Z.A., Cameron, J.R., 2007. Modeling Shear Failure and Stimulation of the Barnett Shale after Hydraulic Fracturing. SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, Texas.
- Simpson, R. W., 1997. Quantifying Anderson's Fault Types. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 102(B8): 17909-17919. https://doi.org/10.1029/97jb01274
- Wu, Q., Xu, Y., Zhang, S.L., et al., 2014. The Core Theories and Key Optimization Designs of Volume Stimulation Technology for Unconventional Reservoirs. Acta Petrolei Sinica, 35(4): 706-714 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y., Lei, Q., Chen, M., et al., 2018. Progress and Development of Volume Stimulation Techniques. *Petroleum Exploration and Development*, 45(5):874-887 (in Chinese with English abstract).

- Yang, H.L., Qiao, L., Tian, Z.L., 2017. Advances in Shale Gas Reservoir Engineering and Geomechanics Integration Technology and Relevant Discussions. *Petroleum Drilling Techniques*, 45 (2): 25-31 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H.L., Zhang, J.J., Wang, G.C., et al., 2018. Fabric Difference and Mineral Nanomechanics Characteristics of High-Quality Shale in Longmaxi Formation, Weiyuan Block in Sichuan Basin and Zhaotong Block in Yunnan Province. *Natural Gas Exploration and Development*, 41(1):16-22 (in Chinese with English abstract).
- Yao, X.X., 1984. The Experimental Studies of Stable and Unstable Cracking by Using a Ultrasmall Testing Machine. Acta Geophysica Sinica, 27(5):439-445 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, J.L., Deng, J.G., Zhang, D.Y., et al., 2013. Fracability Evaluation of Shale-Gas Reservoirs. Acta Petrolei Sinica, 34(3): 523-527 (in Chinese with English abstract).
- Yue, P.S., Shi, Q., Yue, L.Q., et al., 2017. The Latest Progress of Shale Gas Exploration and Development in China. Natural Gas Exploration and Development, 40(3): 38-44 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S.C., 2017. Research on the Rule of Crack Propagation during Hydraulic Fracturing in Shale Gas Reservoir (Dissertation). Liaoning Technical University, Fuxin, 82-86 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R.K., Jin, X., Wang, X.Q., et al., 2018. Multi-Scale Digital Rock Evaluation on Complex Reservoir. *Earth Science*, 43(5):1773-1782 (in Chinese with English abstract). https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.429
- Zoback, M.D., Kohli, A., Das, I., et al., 2012. The Importance of Slow Slip on Faults during Hydraulic Fracturing Stimulation of Shale Gas Reservoirs. SPE Americas Unconventional Resources Conference, Pittsburgh. https:// doi.org/10.2118/155476-MS
- Zou, C.N., Dong, D.Z., Wang, Y. M., et al., 2016. Shale Gas in China: Characteristics, Challenges and Prospects (II). *Petroleum Exploration and Development*, 43(2): 166– 178(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蒋廷学,卞晓冰,苏瑗,等,2014.页岩可压性指数评价新方法 及应用.石油钻探技术,42(5):16-20.
- 李庆辉, 陈勉, 金衍, 2012a. 含气页岩破坏模式及力学特性 的试验研究. 岩石力学与工程学报, 31(S2): 3763-3771.
- 李庆辉,陈勉,金衍,等,2012b.页岩气储层岩石力学特性及 脆性评价.石油钻探技术,40(4):17-22.
- 李文阳,邹洪岚,吴纯忠,等,2013.从工程技术角度浅析页岩 气的开采.石油学报,34(6):1218-1224.
- 李卓,姜振学,唐相路,等,2017. 渝东南下志留统龙马溪组页 岩岩相特征及其对孔隙结构的控制.地球科学,42(7): 1116-1123.
- 梁兴,王高成,徐政语,等,2016.中国南方海相复杂山地页岩 气储层甜点综合评价技术——以昭通国家级页岩气示 范区为例.天然气工业,36(1):33-42.
- 路保平,2013.中国石化页岩气工程技术进步及展望.石油钻 探技术,41(5):1-8.
- 吴奇,胥云,张守良,等,2014.非常规油气层体积改造技术核 心理论与优化设计关键.石油学报,35(4):706-714.
- 胥云, 雷群, 陈铭, 等, 2018. 体积改造技术理论研究进展与 发展方向. 石油勘探与开发, 45(5):874-887.
- 杨恒林,乔磊,田中兰,2017.页岩气储层工程地质力学一体 化技术进展与探讨.石油钻探技术,45(2):25-31.
- 杨恒林,张俊杰,王高成,等,2018.四川威远及云南昭通区块 龙马溪组优质页岩组构差异性与矿物纳米力学特征. 天然气勘探与开发,41(1):16-22.
- 姚孝新,1984. 用超小型压力机研究裂纹的稳态与非稳态扩展. 地球物理学报,27(5):439-445.
- 袁俊亮,邓金根,张定宇,等,2013.页岩气储层可压裂性评价 技术.石油学报,34(3):523-527.
- 岳鹏升,石乔,岳来群,等,2017.中国页岩气近期勘探开发进 展.天然气勘探与开发,40(3):38-44.
- 张树翠,2017.页岩气储层水力压裂裂纹扩展规律研究(博士 学位论文). 阜新:辽宁工程技术大学,82-86.
- 朱如凯,金旭,王晓琦,等,2018.复杂储层多尺度数字岩石评价.地球科学,43(5):1773-1782.
- 邹才能,董大忠,王玉满,等,2016.中国页岩气特征、挑战及 前景(二).石油勘探与开发,43(2):166-178.