

页岩气储层岩石力学特性及脆性评价

李庆辉¹, 陈勉¹, 金衍¹, 侯冰¹, 张家振²

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 2. 中国石油川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院, 四川成都 618300)

摘要:页岩气储层的岩石力学特性对开发影响极大,进行页岩破坏机理、力学特性和脆性评价方面的研究,可以为页岩气钻井和压裂设计工作提供技术支持。采用室内试验和测井分析相结合的方法,在黑色页岩力学特性研究的基础上,分析了其脆性破坏特征及影响因素,提出了一种利用岩石弹性参数和矿物组成综合评价页岩脆性的方法,并介绍了利用测井资料计算单井脆性剖面的流程。研究表明,页岩普遍具有脆性破坏的特征,破坏类型与页岩种类、取心深度、取心方位和加载条件相关,低围压下标准试样以劈裂式破坏为主,全应力应变曲线经历极短的塑性屈服阶段即发生破坏,高围压时多出现双剪式和单剪式破坏,页岩的脆性与试样的弹性参数和矿物组成关系密切。实例分析表明,脆性特征影响压裂效果,与压裂造缝能力和产气情况吻合良好。综合脆性评价既是储层岩石力学特性分析的重要内容,也是压裂选层的重要依据。

关键词:页岩气 岩石力学 破坏模式 脆性评价 测井数据 选择性压裂

中图分类号: TE311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2012)04-0017-06

Rock Mechanical Properties and Brittleness Evaluation of Shale Gas Reservoir

Li Qinghui¹, Chen Mian¹, Jin Yan¹, Hou Bing¹, Zhang Jiazhen²

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 2. CCDC Drilling & Production Engineering Technology Research Institute, CNPC, Chengdu, Sichuan, 618300, China)

Abstract: Rock mechanical properties of shale gas reservoir are vitally important for exploitation. It's necessary to conduct laboratory study on failure mechanism, mechanical properties and brittleness evaluation of shale, which can provide technical support for drilling and fracturing design. Based on rock mechanical properties of black shale, in combination with laboratory experiments and log analysis, the analysis of brittle failure characteristics and influential factors are performed. Comprehensive brittleness evaluation method utilizing elastic parameters and mineral compositions are proposed. Brittleness calculating process of single well utilizing logging data is introduced. Study results show that shale generally has a brittle fracture characteristic, and failure modes are related to shale type, coring depth, coring direction and loading conditions. Failure mode under low confining pressure is predominantly splitting failure; overall stress-strain curve has a very short plastic yield section before failure. Double shear and single shear failure modes are dominant under high confining pressure. Brittleness of shale samples has a close relationship to elastic parameter and mineral composition. A case study shows that brittleness affects hydraulic fracturing results, and coincides well with width generation capacity and deliverability. Comprehensive brittleness evaluation is useful for understanding reservoir mechanics and selecting fracture section.

Key words: shale gas; rock mechanics; failure modes; brittleness evaluation; log data; selective fracturing

页岩气储层具有低孔、低渗的特征,需大规模压裂才能形成工业产能。除自身天然裂缝外,开发过程中还应考虑储层是否易于改造^[1]。研究发现,脆性指数是遴选高品质页岩的重要参数^[2-3]。国外学者和石油公司都非常重视页岩气储层力学特征的评价,但研究方法和成果多不予公开,影响了新技术的广泛应用和新区块的高效、快速开发。

截至目前,对页岩气储层力学性质的研究尚未

收稿日期:2012-03-15; 改回日期:2012-06-16。

作者简介:李庆辉(1985—),男,河北赵县人,2008年毕业于中国地质大学(北京)勘查技术与工程专业,获双学士学位,油气井工程专业在读博士研究生,主要从事页岩气钻、完井过程中的岩石力学问题研究。

联系方式:(010)89732209, liqinghui@sina.cn。

通讯作者:金衍, cup_jinyan@163.com。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“深井复杂地层安全高效钻井基础研究”(编号:2010CB226700)、国家科技重大专项“力学与化学耦合并眼稳定技术研究”(编号:2011ZX05031-004-005HZ)和国家自然科学基金项目“超低渗透页岩多井多裂缝同步压裂机理研究”(编号:51074171)部分研究内容。

见到系统的研究成果,涉及页岩气储层脆性的研究鲜见报道。也有学者从常规的压裂试验评价入手,对脆性和储层岩心敏感性进行了评价,但未涉及页岩脆性破坏的力学机理这一核心问题^[2]。可见,该领域目前尚缺乏系统分析和试验研究^[4-6]。

笔者利用深水孔隙压力伺服试验系统^[7-8],对北美重点页岩气储层和中国南方龙马溪组黑色页岩进行不同加载条件下的破坏模式和力学行为研究,分析页岩试样的脆性特征,通过考虑脆性断裂的力学机理和微观特征,探讨脆性表现的力学内涵。在对已有现场评价方法分析的基础上,得到了基于页岩弹性特征和矿物组成双重因子的综合脆性评价方法,介绍了单井的计算流程,并通过实例予以验证。

1 页岩的岩石力学特性试验

1.1 试验设备及取样方法

采用中国石油大学(北京)岩石力学实验室设计组建的深水孔隙压力伺服试验系统,对标准页岩试样进行单轴及不同围压下的全应力应变测试。测试岩样被加工成长 50 mm,直径 25 mm 的标准试样。利用磨平机磨平两端,尽量保证试样端面光滑、平行,且与中轴垂直。岩心主要来自北美 Barnett、Haynesville、Eagle Ford 和中国南方下志留统龙马溪组页岩,取样深度 2 133.6~4 164.0 m,取心角度分水平 0°、45°、90°和垂向 4 类,测试围压 10~90 MPa。通过不同围压下的力学破坏实验,研究标准试样力学破坏特征,得到全应力应变曲线。

1.2 测试结果分析

测试结果分析表明,页岩的力学破坏整体上具有显著的脆性断裂特征,其力学表现受到多种因素的共同影响,这些因素使页岩气储层具有较强的非均质性,分析认为页岩具有以下力学性质。

1) 页岩种类、取心深度、取心方位和加载条件均影响其力学表现。在相似测试条件下,不同种类页岩的弹性模量、泊松比、抗压强度等力学参数有较大差异(见图 1);不同深度垂向取心测试的力学参数也有差异(见图 2,试样均来自 Haynesville 页岩);取心方位不同,测试表明力学参数差异性显著(见图 3,试样均来自 Eagle Ford 页岩,且在相同深度 4 164 m 取心);从同一口井相同深度、相同方向取心的 Haynesville 页岩岩样,加载围压不同,测试后力学参数也有显著差异(见图 4)。

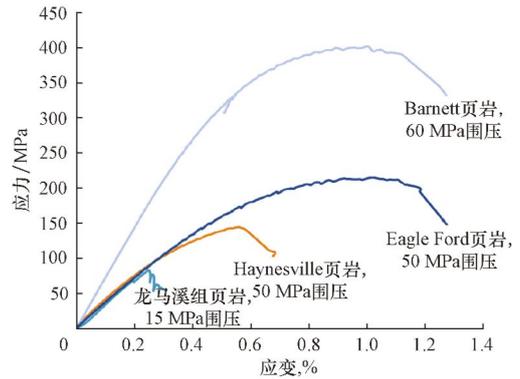


图 1 不同种类页岩的强度差异

Fig. 1 Strength difference for different types of shale

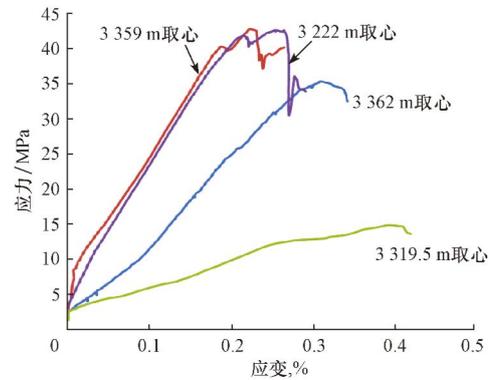


图 2 天然埋深对页岩强度的影响

Fig. 2 Effect of natural buried depth on shale strength

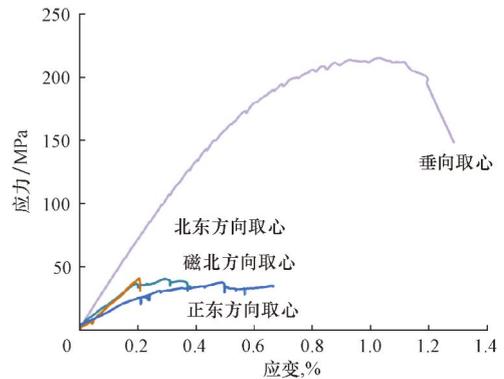


图 3 取心角度对页岩强度的影响

Fig. 3 Effect of coring direction on shale strength

2) 总体而言,测试围压越高,试样产生的微裂纹数量越少,破坏以剪切式破坏为主;围压越低,岩石的碎裂特征越显著,劈裂式破坏成为主导。主要原因在于,围压的升高对微裂纹的纵向扩展起到了抑制作用。

3) 同种页岩的趋同性随围压升高而增强,超过 50 MPa 同种页岩的力学特性表现变得非常相似。这是因为页岩本身层理、节理发育,低围压下大量随机裂纹导致其强度表现随机性显著;高围压下侧向

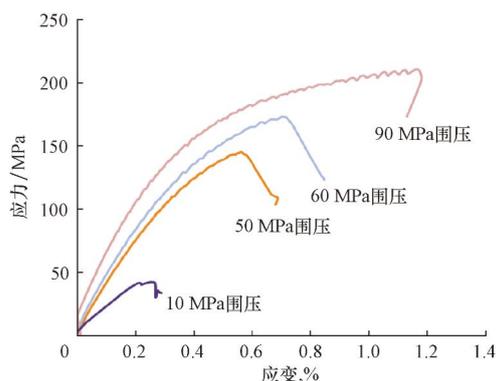


图 4 测试围压对页岩强度的影响

Fig. 4 Effect of confining pressure on shale strength

压力对裂纹离散扩展的限制作用增强,降低了微细裂纹的能耗,使更多能量集中在主裂缝扩展上,试样表现出更为相似的破坏形态。

4) 页岩的各向异性主要与其形成过程中造岩矿物类型、沉积取向性、沉积环境的力学特性和构造历史有关。这种力学上表现出的差异影响着页岩的钻井、完井工作,例如钻井时可能存在优势钻进方向、最佳钻入角,这些参数将影响页岩气井的井筒完整性,也影响压裂设计方案的优化。

北美和中国主要页岩气储层的岩石力学测试结

果表明,页岩的强度和弹性参数范围较大,抗压强度 14.8~391.3 MPa,弹性模量 4.9~70.4 MPa,泊松比 0.19~0.95。相同围压下的抗压强度平均值由高到低为 Barnett 页岩、龙马溪组页岩、Haynesville 页岩、Eagle Ford 页岩,弹性模量由高到低为 Barnett 页岩、龙马溪组页岩、Haynesville 页岩、Eagle Ford 页岩,泊松比由高到低为 Barnett 页岩、Haynesville 页岩、Eagle Ford 页岩、龙马溪组页岩。

由此可见,龙马溪组页岩在抗压强度、弹性模量和泊松比方面均与 Haynesville 页岩较为相似,但均质性方面强于 Haynesville 页岩,主要表现为测试结果的离散程度更低。整体观察发现, Haynesville 页岩的层理发育更好,长期存放后应力释放导致的岩性饼化现象更突出,平均饼化厚度 2.3 cm。

1.3 破坏模式及脆性特征分析

围压下含气页岩的破坏模式主要有单剪切面破坏(B1、B2)、双剪切面破坏(E3)和劈裂式破坏(H4、H5、H6、H7、E8、E9、H10、H11、H12)等 3 类(见图 5,岩心编号中的字母表示页岩种类,如 B 表示 Barnett 页岩, H 表示 Haynesville 页岩, E 表示 Eagle Ford 页岩,括号内为测试围压)。

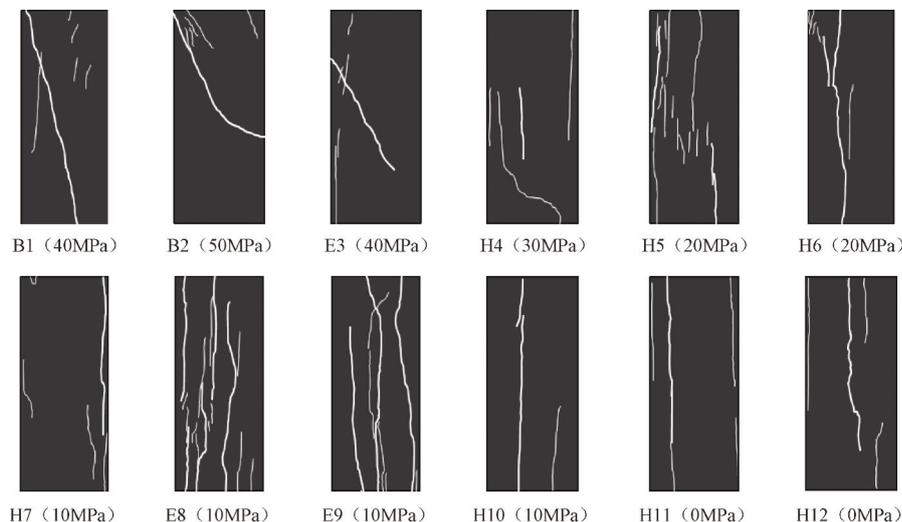


图 5 不同围压下页岩试样典型破坏模式

Fig. 5 Sketches of failure mode for shale samples under different confining pressures

围压低于 30 MPa 时,含气页岩的破坏模式以劈裂式为主,双剪切式和单剪切式较少,这主要与页岩自身特点和加载条件有关。页岩本身为层理面和微裂隙发育,这些天然的薄弱面在测试时影响破坏结果,使裂纹面沿其萌发和表现,形成多重劈裂式破坏。低围压加载时含气页岩的劈裂式破

坏较高围压时更显著,这主要与围压抑制竖向裂缝张开有关。

从裂纹数量看,劈裂式破坏和双剪切面破坏比单剪切面破坏能够产生更多的裂纹,脆性特征也更明显。从体积应变看,劈裂式破坏和双剪切面破坏均出现较为显著的体积扩容现象,这与裂纹密集发

育和多破裂面广泛分布密切相关。从应力应变曲线看,单剪切面破坏模式下试样的强度最大,高于其他2种破坏模式。

从破坏效果看,劈裂式和双剪切面破坏模式下试样的碎裂更加完全。要产生更多的破坏结构面岩石需具有一定强度,且均质性应较差。这是因为在外部荷载作用下,试样内部非协调变形增大,局部区域产生的微裂纹增多,微裂纹导致局部卸载,使试样整体强度降低。反之,均质程度越高,试样抵抗变形能力越强,微裂隙发育越少,能量耗散越少,强度更高,塑性更强。

2 单井脆性剖面的计算方法

如何利用页岩物理力学参数之间的统计关系预测脆性特征,是目前许多石油公司、科研机构试图解决的问题。目前多采用弹性模量和泊松比计算页岩脆性,认为弹性模量和泊松比可以较好地反映页岩在应力作用和微裂缝形成时的破坏能力。页岩产生裂缝后,泊松比可以反映应力的变化,弹性模量反映维持裂缝扩展的能力。

Rickman 等人^[9]在2007年针对Barnett页岩进行了经验总结,认为低泊松比、高弹性模量的页岩其脆性更好。图6采用Barnett页岩的数据描述了这一理念,箭头表示脆性逐渐增强的方向,并将北美Haynesville页岩、Eagle Ford页岩和中国南方部分地区的页岩测试结果进行了投影。结果显示,南方黑色页岩的脆性属于中等程度,造缝能力一般,且露头试样的脆性特征好于井下岩心。

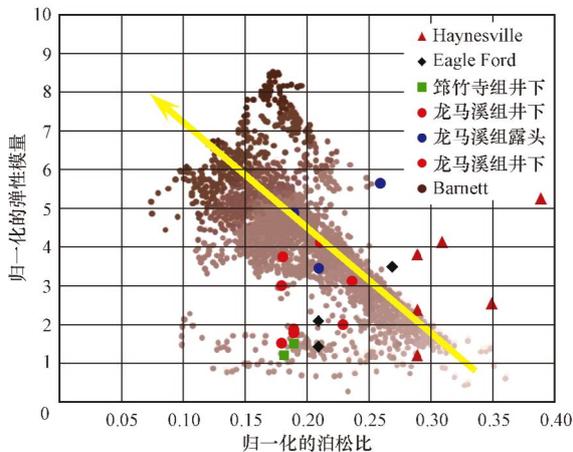


图6 脆性与弹性模量、泊松比的关系

Fig. 6 Relationship between brittleness, Young's modulus and Poisson's ratio

在脆性分析的基础上,建议采用弹性模量、泊松比、矿物组成特征3项指标作为参数综合计算脆性指数。因为页岩脆性的表现与所含矿物类型相关性非常明显,脆性矿物含量高的页岩其造缝能力和脆性更好,国内外学者对此已形成共识,并认为其重要性不可忽视^[1-3,9-14]。此外,矿物组成作为岩性识别标准,提高了计算结果的细分性和可靠性。实际计算过程中,采用静态弹性模量、静态泊松比和脆性矿物质量分数作为基础参量,针对不同地区特征参数归一化后,计算综合脆性指数。单井综合脆性参数的计算流程为:

1) 利用常规测井数据计算动态弹性模量和动态泊松比,依据动、静态弹性参数转化方程计算静态弹性模量和静态泊松比^[7-8,15];

2) 采用元素俘获谱测井(ECS)或放射性能谱测井数据,分析脆性矿物占矿物总质量的百分比,用岩心分析数据校正,得到脆性矿物的质量分数;

3) 对静态弹性模量、静态泊松比和脆性矿物质量分数分别针对地区特征进行归一化处理,得到无量纲参数 B_1 、 B_2 和 B_3 , 并求算数平均值,得到综合脆性指数 I_B ;

4) 计算单井脆性参数剖面,从而预测一定深度范围内目的层的脆性程度。

该方法在力学特性评价的基础上加上矿物组成这一因素,对具有相近弹性参数的岩石进行了区分。实际应用时,可依据压裂设计的裂缝半长、缝高和产能需求计算临界裂缝宽度,获得临界脆性指数,并结合测井资料解释结果、录井显示和岩心含气量测试结果,综合优选压裂层段。

3 应用实例

对中国南方某页岩气井W井的测井数据进行标准化处理,获得矿物组成、基本岩石力学参数,并依据上述脆性计算方法,计算下志留统龙马溪组黑色页岩的综合脆性指数,优选目的层段。

从测井解释结果(见图7)看,埋深1480~1540m龙马溪组黑色页岩的脆性特征差异较大,预计会对造缝效果和难易程度有较大影响。根据前人研究成果^[1-4],脆性越高,越倾向于形成裂缝网络,页岩气产能也越高;而脆性越差,岩石的塑性特征越明显,破坏时吸收的能量越多,岩石易形成简单形态的裂缝,在一定程度上降低了压裂改造的效果。脆性对页岩层段压裂效果的影响在实践中也得到裂缝示踪和微

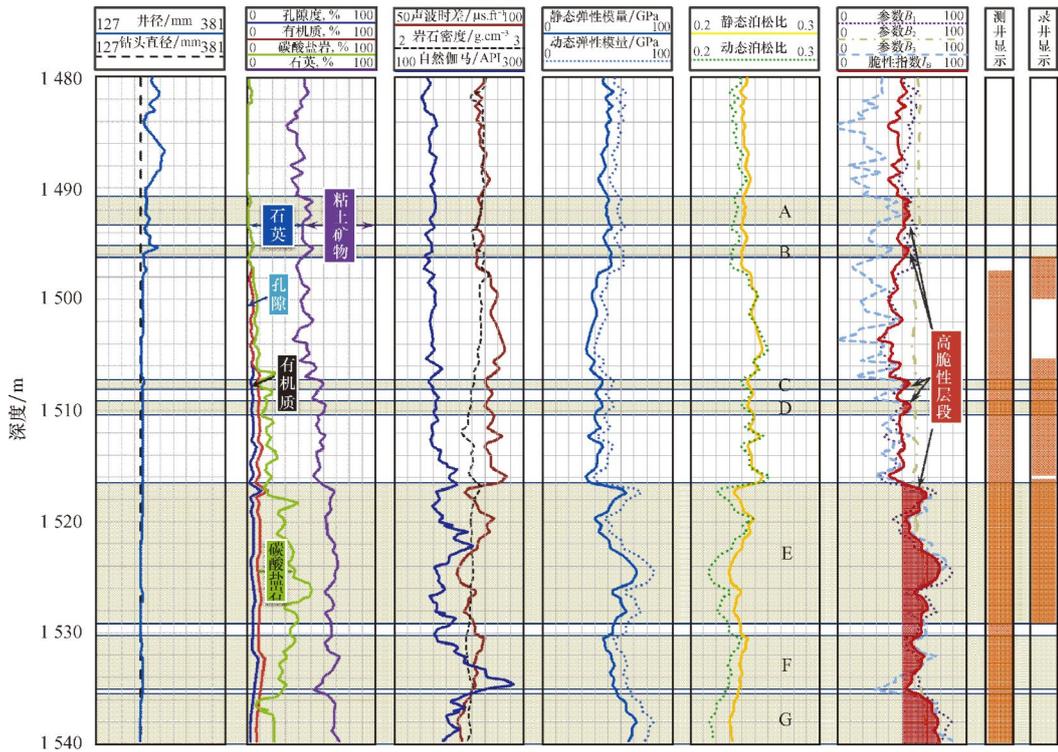


图 7 W 井龙马溪组黑色页岩脆性分析结果

Fig. 7 Brittleness analysis results of Longmaxi Shale from Well W

地震监测的证实^[2],脆性层段水力裂缝穿透和扩展充分,遇天然裂缝后分叉更多,转向角度更大,改造效果较塑性层段更加显著^[3]。

依据脆性参数剖面,可将 W 井的目的层划分为 A、B、C、D、E、F、G 等 7 个特征段,这些层段的综合脆性指数均在 50 以上,显示具有相对较好造缝能力。根据是否有气体显示可进一步分为以下 3 类:

1) A、B 层段的共同特征是较薄(1~2 m),脆性程度中等(50~53),有机质含量较低,测、录井过程中未发现气体显示。这类储层虽具有较好的脆性,但是生、采气体潜力不足,加之厚度较小,水力裂缝极易穿透储层进入邻近地层。因此,经济价值尚待进一步评估,压裂时应慎重选择。

2) C、D、E 段均具有较高的有机质和脆性矿物含量,气体显示良好,脆性程度高。这其中 E 段又明显优于 C、D 段,除有机质含量和孔隙度更高、脆性更好外,厚度还更大(13 m 左右),可保证裂缝在产层内扩展,同时,测、录井气体异常表明可能具备经济开发潜能。值得注意的是,E 段与下伏的 F、G 段相隔不足 2 m,且 F、G 段脆性也较好,预计水力压裂时裂缝易穿透进入下部,施工时应采取措施予以控制。

3) F、G 段脆性较好,两层厚度均在 4~5 m,有机质含量也较稳定,测井解释为气层,但实钻过程中

未见录井异常,选层压裂时也应慎重考虑。

该井龙马溪组地层含气页岩的压裂测试分 3 段进行,射孔厚度 9.0 m。在测试压裂基础上进行主压裂,泵压 36.1~40.0 MPa,排量 10.1~10.2 L/min。测试压裂和主压裂分别注入压裂液 175.0 m³ 和 1 978.0 m³,注入支撑剂 163.4 t(102.1 m³)。

压裂测试结果显示,用封隔器封闭筇竹寺组地层后,龙马溪组地层初期产量不稳定,产气量 2 000~2 500 m³/d 页岩气,与预测结果大致相同。压力监测数据显示井深 1 523.0 m 处压力异常,从压裂液和支撑剂注入量看,该层压裂改造的体积和支撑效果较好,产生的裂缝更多,较其他层段改造效果更佳。这也同时验证了相对脆性较好的层段在进行压裂后具有更好的改造效果。上述测试和生产结果表明,综合脆性评价方法有效性高,预测结果和实际情况吻合良好,具有很好的现场应用价值。

4 结 论

1) 页岩的脆性特征与其种类、取心深度、取心方位和加载条件相关。实际评价其力学性质时,建议针对具体地区进行研究,且应模拟地下力学环境进行试验,这样才能得到更加准确的结果。

2) 页岩的脆性破坏特征显著,标准试样以劈裂式破坏为主,破坏后产生较多裂缝,全应力应变测试显示塑性屈服过程很短即进入破坏阶段。

3) 提出了一种采用弹性参数和矿物组成综合评价页岩脆性的方法,并通过测井数据计算实现单井脆性评价。压裂测试结果显示该方法能够较好地表征页岩的脆性破裂和造缝能力,对评价岩石力学性质和压裂选层均具有重要参考价值。

4) 储层的力学特性对页岩气的开发影响重大,钻井、压裂时需要根据岩石的力学特性进行设计和施工。深入了解页岩的破坏机理和力学特性,既是基础工作又是必不可少的技术支撑,在今后研究中应给予足够重视。

参 考 文 献

References

- [1] 蒋裕强,董大忠,漆麟,等.页岩气储层的基本特征及其评价[J].天然气工业,2010,30(10):7-12.
Jiang Yuqiang, Dong Dazhong, Qi Lin, et al. Basic features and evaluation of shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 7-12.
- [2] 付永强,马发明,曾立新,等.页岩气储层压裂实验评价关键技术[J].天然气工业,2011,31(4):51-54.
Fu Yongqiang, Ma Faming, Zeng Lixin, et al. Key techniques of experimental evaluation in the fracturing treatment for shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(4): 51-54.
- [3] 李庆辉,陈勉, Fred P W, 等.工程因素对页岩气产量的影响:以北美 Haynesville 页岩气藏为例[J].天然气工业,2012,32(4):54-59.
Li Qinghui, Chen Mian, Fred P W, et al. Influences of engineering factors on shale gas productivity: a case study from the Haynesville shale gas reservoir in North America[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(4): 54-59.
- [4] 蒋恕.页岩气开发地质理论创新与钻井技术进步[J].石油钻探技术,2011,39(3):17-23.
Jiang Shu. Geological theory innovations and advances in drilling and completion technology for shale gas development[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(3): 17-23.
- [5] 薛承瑾.页岩气压裂技术现状及发展建议[J].石油钻探技术,2011,39(3):24-29.
Xue Chengjin. Technical advance and development proposals of shale gas fracturing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(3): 24-29.
- [6] 蒋廷学,贾长贵,王海涛,等.页岩气网络压裂设计方法研究[J].石油钻探技术,2011,39(3):36-40.
Jiang Tingxue, Jia Changgui, Wang Haitao, et al. Study on network fracturing design method in shale gas[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(3): 36-40.
- [7] 金衍,陈勉,周健,等.岩性突变体对水力裂缝延伸影响的实验研究[J].石油学报,2008,29(2):300-303.
Jin Yan, Chen Mian, Zhou Jian, et al. Experimental study on the effects of salutatory barrier on hydraulic fracture propagation of cement blocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2): 300-303.
- [8] 金衍,陈勉,张旭东.利用测井资料预测深部地层岩石断裂韧性[J].岩石力学与工程学报,2001,20(4):454-456.
Jin Yan, Chen Mian, Zhang Xudong. Determination of fracture toughness for deep well rock with geophysical logging data[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 454-456.
- [9] Rickman R, Mullen M, Petre E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: all shale plays are not clones of the Barnett Shale[R]. SPE 115258, 2008.
- [10] 沈建中.宣页1井钻井技术难点及对策[J].石油钻探技术,2011,39(3):41-45.
Shen Jianzhong. Drilling technical difficulties and counter measures in Well Xuanye 1[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(3): 41-45.
- [11] 王海涛.页岩气探井测试压裂方案设计与评价[J].石油钻探技术,2012,40(1):12-16.
Wang Haitao. Design and evaluation of mini-frac scheme in shale gas exploration well[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(1): 12-16.
- [12] 孙海成,汤达祯,蒋廷学.页岩气储层裂缝系统影响产量的数值模拟研究[J].石油钻探技术,2011,39(5):63-67.
Sun Haicheng, Tang Dazhen, Jiang Tingxue. Numerical simulation of the impact of fracture system on well production in shale formation[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(5): 63-67.
- [13] 刘红磊,熊炜,高应运,等.方深1井页岩气藏特大型压裂技术[J].石油钻探技术,2011,39(3):46-52.
Liu Honglei, Xiong Wei, Gao Yingyun, et al. Large scale fracturing technology of Fangshen 1 shale gas well[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(3): 46-52.
- [14] 莫里斯·杜索尔特,约翰·麦克力兰,蒋恕.大规模多级水力压裂技术在页岩油气藏开发中的应用[J].石油钻探技术,2011,39(3):63-67.
Maurice Dusseault, John McLennan, Jiang Shu. Massive multi-stage hydraulic fracturing for oil and gas recovery from low mobility reservoirs in China[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(3): 63-67.
- [15] 金衍,陈勉,张旭东.天然裂缝地层斜井水力裂缝起裂压力模型研究[J].石油学报,2006,27(5):124-126.
Jin Yan, Chen Mian, Zhang Xudong. Hydraulic fracturing initiation pressure models for directional wells in naturally fractured formation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(5): 124-126.