

引用格式:冯少柯,熊亮.基于多元力学实验的深层页岩气储层岩石力学特征研究[J].油气藏评价与开发,2025,15(3):406-416.

FENG Shaoke, XIONG Liang. Study on rock mechanical properties of deep shale gas reservoirs based on multi-mechanical experiments[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(3): 406-416.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.03.007

基于多元力学实验的深层页岩气储层岩石力学特征研究

冯少柯^{1,2}, 熊亮¹

(1. 中国石化西南油气分公司, 四川 成都 610041; 2. 成都理工大学, 四川 成都 610059)

摘要:川东南地区构造复杂,上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组一段页岩气储层埋深相对较大,对岩石力学特征具有较大影响,且缺乏系统性的研究。因此,以川东南林滩场深层页岩气储层为例,开展三轴抗压强度试验、声波波速测试、抗拉强度试验和断裂韧性试验等力学实验,依据多元力学实验结果对页岩样品的岩石力学特征进行分析,建立单井纵向岩石力学分布剖面。随温度和压力的升高,深层页岩样品破裂后的残余应力、杨氏模量和泊松比均有增大的趋势,峰后阶段应力-应变曲线的波动特征变得更加明显。林滩场背斜倾没端的波速小于背斜翼部,经动、静态线性转换规律校正的杨氏模量和泊松比更为准确。深层页岩样品的最大载荷低于10 kN, I型断裂和 II型断裂贯穿方式具有较大差异,贯穿程度受取样方向的影响较大。研究区T4井岩石力学特征纵向剖面显示,上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组一段底部的杨氏模量较高,泊松比较低,脆性较强;抗压强度较小,抗拉强度相对较小,断裂韧性指数较小,力学性质表现为弱挤压-拉张态,具有良好的工程改造条件,为后期勘探开发的优选目的层。

关键词:川东南;林滩场地区;深层页岩气储层;多元力学实验;岩石力学特征

中图分类号:TE135

文献标识码:A

Study on rock mechanical properties of deep shale gas reservoirs based on multi-mechanical experiments

FENG Shaoke^{1,2}, XIONG Liang¹

(1. Sinopec Southwest China Oil & Gas Company, Chengdu, Sichuan 610041, China;

2. Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The southeastern Sichuan region is characterized by complex tectonic structures. The shale gas reservoir from the first member of the upper Ordovician Wufeng Formation to the Lower Silurian Longmaxi Formation is buried at considerable depths, which significantly affects the rock mechanical properties. However, systematic studies remain limited. This study focuses on the deep shale gas reservoir in the Lintanchang area of southeastern Sichuan. A series of mechanical experiments, including triaxial compressive tests, acoustic wave velocity measurements, tensile strength tests, and fracture toughness tests, were carried out. Based on the results of these multi-mechanical experiments, the rock mechanical properties of shale samples were analyzed, and a vertical mechanical property profile for a single well was established. With increasing temperature and pressure, the residual stress after fracture, Young's modulus, and Poisson's ratio of the deep shale samples showed an upward trend. The post-peak stress-strain curves exhibited more pronounced fluctuations. Acoustic wave velocities at the plunging end of the Lintanchang anticline were lower than those at the flanks. Young's modulus and Poisson's ratio values, corrected using a dynamic-static linear transformation, exhibited improved accuracy. The maximum load borne by the deep shale samples was less than 10 kN. Type I and Type II fractures displayed notable differences in propagation characteristics, and the degree of fracture penetration was greatly affected by sampling direction. The vertical mechanical profile of well T4 revealed that the bottom section of the first member of the Wufeng-Longmaxi Formation has higher Young's modulus, lower Poisson's ratio, and stronger brittleness, while the compressive and tensile strengths, as well as the fracture toughness index, remain relatively low. These mechanical properties show a weak

收稿日期:2024-07-11。

第一作者简介:冯少柯(1995—),男,博士,助理研究员,主要从事非常规油气勘探开发、储层测井评价、岩石力学和地质力学研究等工作。地址:四川省成都市高新区吉泰路688号中国石化西南科研办公基地,邮政编码:610041。E-mail: fsk962359370@163.com

通信作者简介:熊亮(1975—),男,硕士,研究员,主要从事非常规油气勘探开发工作。地址:四川省成都市高新区吉泰路688号中国石化西南科研办公基地,邮政编码:610041。E-mail: xiongliang.xnyq@sinopec.com

基金项目:中国石化科技攻关项目“川南复杂构造区页岩气勘探开发关键技术”(P21042-1)。

compressive-tensile state, providing favorable conditions for reservoir stimulation. Thus, this interval represents an optimal target for future exploration and development.

Keywords: southeastern Sichuan; Lintanchang area; deep shale gas reservoirs; multi-mechanical experiments; rock mechanical properties

四川盆地及周缘地区的页岩气资源量约占中国页岩气总储量的三分之一,其上奥陶统五峰组—龙马溪组富有机质海相页岩是勘探开发的重要层段^[1]。随着川东南的林滩场、丁山—东溪和綦江等地区勘探开发工作的不断深入,为进一步实现增储上产目标,埋深大于3 500 m的深层页岩气将成为下一步的重点攻关目标,川东南地区深层页岩气(3 500~4 500 m)资源量占埋深4 500 m以浅页岩气资源总量的70%以上,开发潜力巨大^[2]。林滩场地区受多期构造运动的影响,具有断裂发育、力学特征变化复杂和富集保存差异大等特点,早期部署的T1井揭示了该区存在牛蹄塘组和五峰组—龙马溪组2套区域性烃源岩,T2井(2017年)的单井最大产能达 $4.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,T3井(2019年)的最大日产气量为 $17.19 \times 10^4 \text{ m}^3$,均表明该区具有较大的勘探开发潜力^[3-4]。2022年,T4井五峰组—龙马溪组一段页岩储层测试产气量达 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,足以证明林滩场区块资源潜力巨大,将是未来十年页岩气增储上产的重点区域。

岩石力学性质是指岩石在外界因素(荷载、温度、压力和流体性质等)作用下的应力、应变、破坏及韧性等力学性质^[5-6]。岩石力学参数是衔接储层地质参数与地质力学参数的桥梁,也是储层地应力场模拟、裂缝成因机制分析以及工程甜点评价的关键^[7-9],主要包括岩石的弹性参数(杨氏模量、体积模量和泊松比等)和强度参数(抗压强度、抗拉强度和断裂韧性指数等)^[10]。一般情况下,岩石力学实验(静态岩石力学参数)测试难度大、花费高,基于阵列声波测井资料分析的动态岩石力学参数误差较大^[11-12]。不同温度、围压下Tournemire页岩(图尔奈页岩)的三轴岩石力学试验结果显示:随温度的增加,样品塑性应变、泊松比增加,抗压强度和杨氏模量降低;随围压的增加,样品杨氏模量增加,泊松比降低^[13]。脆性较强的页岩在压裂过程中更易形成复杂缝网,深层页岩的局部塑性特征会使得岩石发生塑性变化,不易产生裂缝或使得人工裂缝因闭合阶段支撑嵌入而不具备较好的裂缝导流能力^[14-17]。因此,为进一步落实川东南地区有利的深层页岩气勘探目标,深层页岩气储层岩石力学特征研究已经成为了勘探开发的重大突破点^[18-19]。

研究以川东南林滩场地区五峰组—龙马溪组一段深层页岩储层为例,开展了深层页岩样品的多元力学实验(三轴抗压强度试验、声波波速测试、抗拉强度试验和断裂韧性试验),对实验方法和仪器进行了详细描述。根据

不同的力学实验结果分别对深层页岩样品的三轴抗压强度特征、声波波速变化特征、抗拉强度特征和断裂韧性特征进行分析,建立了单井岩石力学特征纵向剖面,为纵向压裂测试的目标层段选取提供重要技术支撑,对准确表征深层页岩气储层岩石力学特征及高效开发同类型气藏具有重要参考价值。

1 研究区地质概况

川东南自中生界白垩系晚期至新生界第四系以来受多期构造运动叠加,发生多期褶皱、隆升构造运动形成了现今的山前带构造、盆内的隔挡式褶皱等^[20-21]。林滩场地区处于泸州—赤水构造叠加带,位于盆缘的齐岳山构造带前缘,为基底逆断层叠瓦逆冲推覆而形成的断背斜。构造整体表现为北东至南西向展布的长轴背斜,主要发育北东向断裂,北东向断裂多为基底卷入式高角度逆冲断裂,背斜两翼断层较为发育,形成冲起构造,两翼地层较陡;背斜南、北两侧的倾没端地层平缓^[22];研究区五峰组—龙马溪组富有机质黑色页岩的埋深介于地下2 000~4 500 m,具有较大的勘探开发潜力(图1)。

2 实验方法及仪器

基于固体介质中弹性波的传播理论,利用奥林巴斯5058PR声波测试脉冲发射器对岩石样品的声波波速进行测定,声波在转换为微弱的电信号后,在屏幕上显示出信号放大后的波形,计算得到纵波波速和横波波速(图2a)。

研究区五峰组—龙马溪组一段页岩样品的岩石力学实验(三轴抗压强度试验、断裂韧性试验和抗拉强度试验)是由多功能的程控伺服岩石力学试验系统完成的,该系统是将美国MTS815 Teststar程控伺服岩石刚性试验机(主体)与自主开发岩石的常规三轴试验、真三轴试验、断裂韧性试验、巴西劈裂试验等装置进行组合得到的,可以完成单轴、三轴及直剪等条件下的静态力学参数测试,并记录岩石的应力-应变全过程曲线和静、动力学特性指标(图2b)。

在围压分别为15、30、50 MPa、温度分别为30、60、90 °C、湿度为64%RH(相对湿度)的条件下,采用侧向等压的三轴试验方式对研究区2.5 cm×(2.6~5.2) cm的页岩小柱体样品进行三轴抗压强度试验,以0.5~1.0 MPa/s

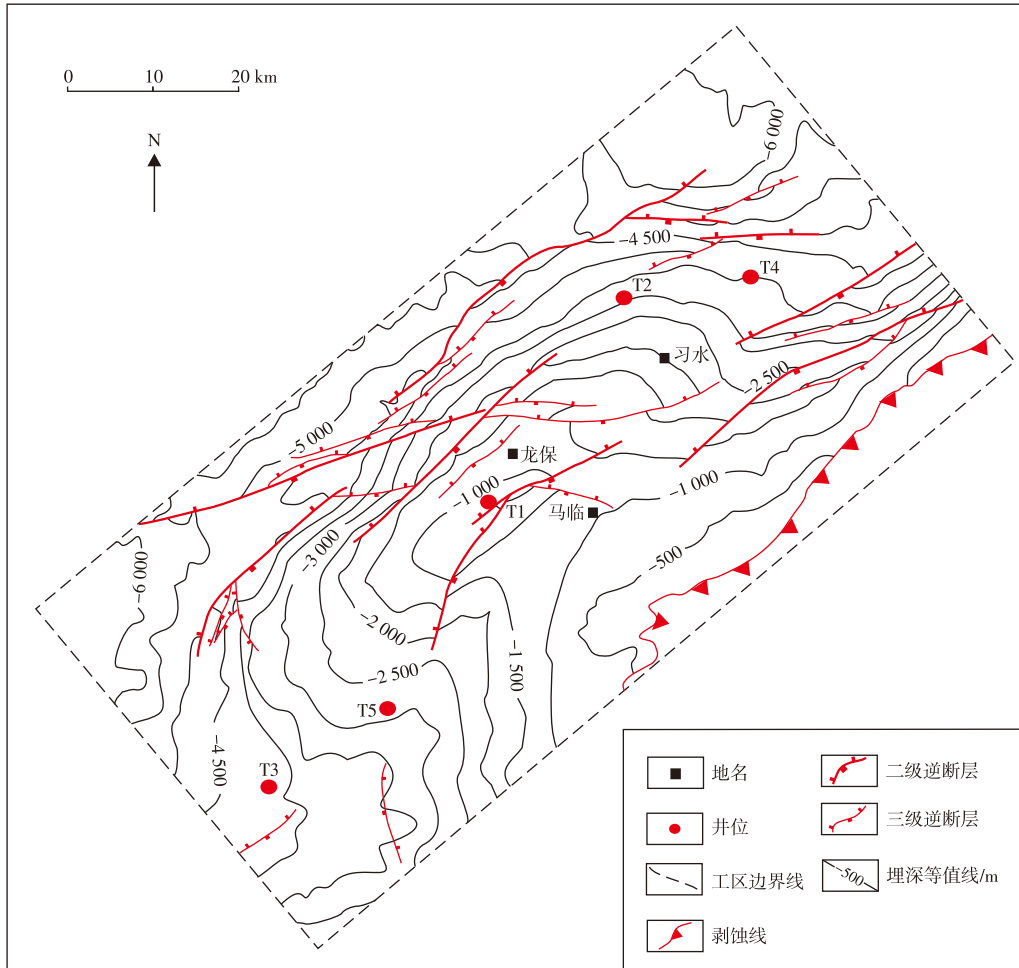


图1 川东南林滩场地区五峰组—龙马溪组构造及埋深分布

Fig. 1 Tectonic structure and burial depth distribution of Wufeng-Longmaxi Formation in Lintanchang area of southeastern Sichuan

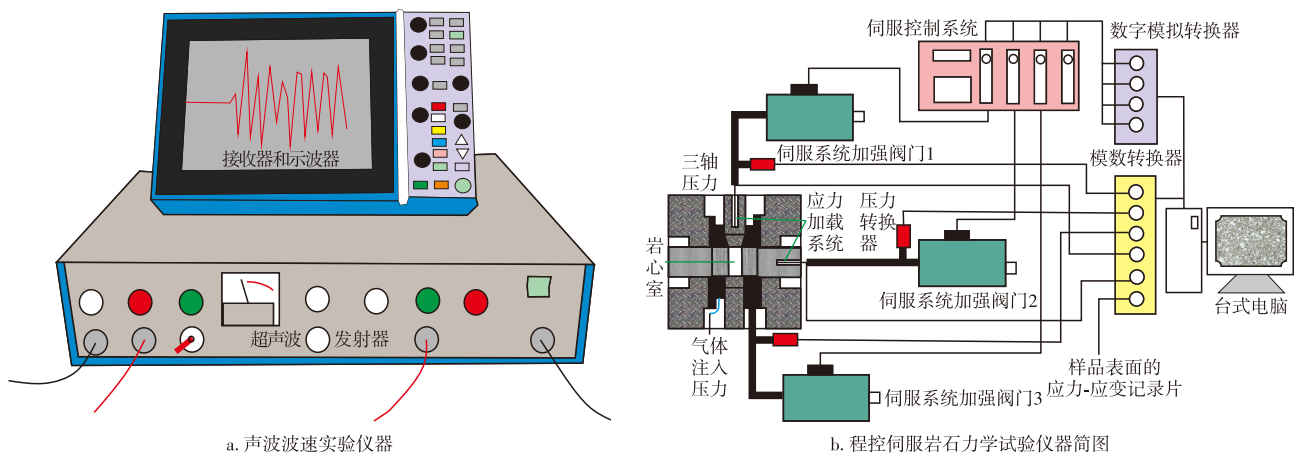


图2 声波波速实验仪器和程控伺服岩石力学试验仪器简图(据参考文献[23]修改)

Fig. 2 Schematic diagrams of acoustic wave velocity testing apparatus and servo-controlled rock mechanics testing system (modified from reference [23])

的加载速率施加轴向载荷,并逐级读取轴向载荷及轴向变形,直至试件破坏,并记录破坏载荷。

由于岩石类材料难以直接在轴向加载拉应力,室内实验常采用间接方法(巴西劈裂试验法)进行抗拉强度试

验,并依据中华人民共和国地质矿产行业标准《岩石物理力学性质试验规程第21部分:岩石抗拉强度试验》(DZ/T 0276.21—2015)计算得到岩石样品的抗拉强度。岩石样品装载过程中,需要将样品上下两垫条置于压力

机加荷板中心线的垂直面内,避免产生偏心应力,影响测试结果。

断裂韧性试验的加载方式是位移加载控制,加载速率为0.08 mm/min。I型断裂韧性测试的加载角为0°,试验加载条件为样品裂纹面与加载点共线;II型断裂韧性测试的临界加载角约为30°,试验加载条件为样品裂纹面与加载点角度为30°。断裂韧性试验加载结束的标志为样品裂纹发生扩展破坏。

3 三轴抗压强度特征和声波波速变化特征

3.1 三轴抗压强度试验

3.1.1 应力-应变曲线特征

局部脆性或局部塑性的岩石样品应力-应变加载曲线特征表现为由弹性形变过渡为破裂变形,在峰前阶段以线弹性变形和弹塑性变形为主;随着温压的升高,到达峰值应力的速率更慢,样品破裂后也保持较大的残余应力(图3)。围压越大,页岩样品内部孔隙和微裂缝受到的挤压作用越大;温度越高,黏土矿物越易发生错位滑移,岩石塑性越强;受温压增大的影响,页岩样品的延性增强,裂纹的产生和扩展受到较大的抑制,岩石脆性减弱。

在高温、高压条件下,T3井龙马溪组一段③号层页岩样品的硅质含量较高,峰后阶段应力-应变曲线具有波动特征,表明样品局部脆性更强(图3a);T3井①号层页岩样品塑性增强,有效限制裂纹的离散扩展,破裂能量

集中在主裂缝的扩展上,峰后阶段应力-应变曲线变化较为平稳(图3b)。

3.1.2 实验结果分析

基于研究区五峰组—龙马溪组一段页岩样品的应力-应变曲线分析,计算并统计其样品的岩石力学参数(静态杨氏模量、静态泊松比和抗压强度),如表1所示。在15 MPa、30 °C的条件下,页岩样品的静态杨氏模量、静态泊松比和抗压强度均值分别为31.28 GPa、0.212和190.61 MPa;在30 MPa、60 °C条件下,其均值分别为33.24 GPa、0.232和226.59 MPa;在50 MPa、90 °C条件下,其均值分别为34.82 GPa、0.248和286.11 MPa,由此得出岩石力学参数(静态杨氏模量、静态泊松比和抗压强度)随温压的增加而增加。结合地层埋深分布特征(图1),在30 MPa、60 °C的实验条件下测得的岩石力学参数更符合地层实际情况;在此条件下,T3井、T4井和T5井的③号层页岩样品抗压强度低、静态杨氏模量大、静态泊松比小,表明其样品的脆性较强,可压性较好。

研究区五峰组—龙马溪组一段多数页岩样品的岩石力学参数(抗压强度、静态杨氏模量和静态泊松比)与温度、压力呈线性正相关(图4)。T3井③号层页岩样品抗压强度相对较低,表明其具有较强的脆性;受埋深、构造和断裂的影响,T5井页岩样品的抗压强度均较低(图4a);T3井①号层的2个页岩样品的静态杨氏模量和静态泊松比具有较大的差异,可能与取样方式具有较大的关系;T4井的静态杨氏模量较大,静态泊松比较小,表明其脆性较强(图4b、图4c)。

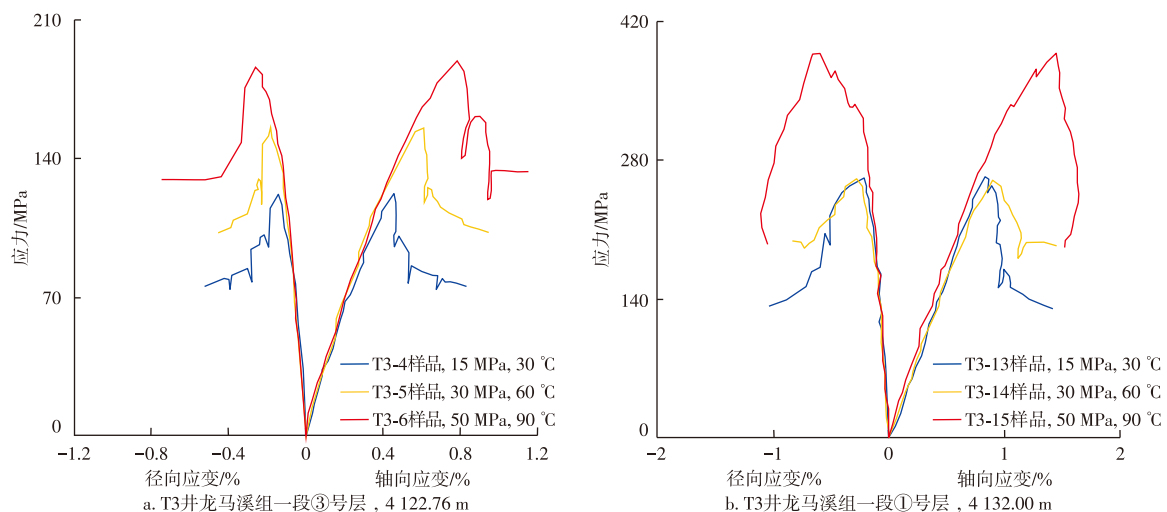


图3 川东南五峰组—龙马溪组一段T3井深层页岩样品在不同温压下的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of deep shale samples from well T3, the first member of Wufeng-Longmaxi Formation, southeastern Sichuan, at different temperatures and pressures

表1 页岩样品不同温压条件下三轴岩石力学实验结果

Table 1 Experimental results of triaxial rock mechanical tests on shale samples at different temperatures and pressures

井号	样品号	小层	深度/m	围压/MPa	温度/°C	抗压强度/MPa	静态杨氏模量/GPa	静态泊松比
T2	T2-1	①	3 026.26	15	30	175.99	31.69	0.233
	T2-2	①	3 026.26	30	60	246.16	32.56	0.238
	T2-3	①	3 026.39	50	90	311.03	33.89	0.243
T3	T3-4	③	4 122.76	15	30	163.59	29.54	0.218
	T3-5	③	4 122.76	30	60	186.89	31.19	0.235
	T3-6	③	4 122.76	50	90	230.98	32.78	0.251
	T3-16	②	4 127.50	15	30	236.67	30.94	0.213
	T3-17	②	4 127.50	30	60	288.84	31.08	0.231
	T3-18	②	4 128.20	50	90	339.94	31.83	0.269
	T3-13	①	4 132.00	15	30	261.51	31.36	0.209
	T3-14	①	4 132.00	30	60	261.96	32.73	0.234
	T3-15	①	4 132.00	50	90	387.65	34.43	0.237
	T3-19	①	4 134.45	15	30	192.86	30.70	0.214
	T3-20	①	4 134.45	30	60	255.53	35.76	0.251
T3-21	①	4 134.45	50	90	316.96	38.71	0.282	
T4	T4-21	③	3 905.39	15	30	243.24	35.71	0.176
	T4-23	③	3 905.39	30	60	272.86	39.79	0.196
	T4-24	③	3 906.48	50	90	300.79	40.78	0.207
T5	T5-25	③	2 874.35	15	30	123.23	29.80	0.225
	T5-26	③	2 874.35	30	60	156.32	31.02	0.239
	T5-27	③	2 874.42	50	90	190.25	32.51	0.248
	T5-28	①	2 884.31	15	30	127.82	30.48	0.207
	T5-29	①	2 884.31	30	60	144.17	31.82	0.232
	T5-30	①	2 884.31	50	90	211.25	33.59	0.249

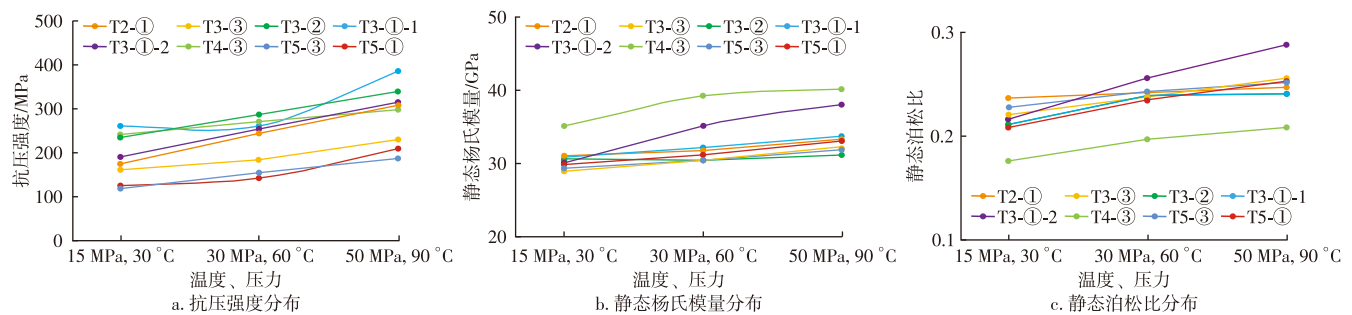


图4 不同温度、压力条件下岩石力学参数分布

Fig. 4 Distribution of rock mechanical parameters at different temperatures and pressures

3.2 声波波速实验

3.2.1 纵、横波波速特征

T3井五峰组一龙马溪组一段埋深大于4 000 m,位于林滩场背斜倾没端;T5井五峰组一龙马溪组一段埋深小于3 000 m,位于林滩场背斜翼部。受埋深差异和构造的影响,T3井(埋深大于4 000 m)页岩样品的纵、横波波速(4 644.61 m/s和2 674.74 m/s)均小于T5井(4 936.51 m/s和2 894.03 m/s)。T3井③号层(表2)横波波速介于2 582.43~2 884.27 m/s,纵波波速介

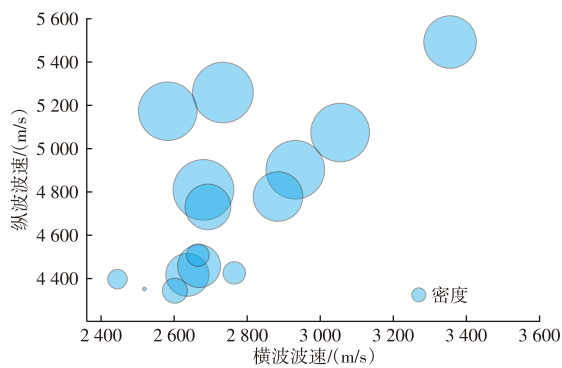
于4 417.48~5 259.15 m/s,分布范围较广,非均质性相对较强;T5井纵向上纵、横波波速均表现为先增加后减少再增加的特征,能够对其纵向上力学性质变化特征进行一定的反映,表明研究区五峰组一龙马溪组一段页岩储层纵向上可能存在多个岩石力学性质薄弱面。

研究区五峰组一龙马溪组一段深层页岩样品的纵、横波波速具有正相关的关系,横波波速为纵波波速的58%,符合深层页岩储层岩石波速变化的实际情况。页岩样品的密度越大(气泡越大),其纵、横波波速越大;气泡大小纵向变化更快,其纵波波速受页岩密度变化的影响更大(图5)。

表2 页岩样品声波波速实验结果

Table 2 Experimental results of acoustic wave velocity test on shale samples

井号	样品号	小层	深度/m	密度/(g/cm ³)	横波波速/(m/s)	纵波波速/(m/s)	动态杨氏模量/GPa	动态泊松比
T3	T3-S-1	③	4 119.66	2.61	2 884.27	4 778.90	29.33	0.286
	T3-S-2	③	4 120.77	2.58	2 692.43	4 730.85	27.82	0.240
	T3-S-3	③	4 120.94	2.69	2 582.43	5 172.92	33.55	0.166
	T3-S-4	③	4 121.55	2.71	2 733.53	5 259.15	35.24	0.185
	T3-S-5	③	4 122.06	2.56	2 636.15	4 417.48	24.47	0.277
	T3-S-6	③	4 122.76	2.56	2 668.44	4 457.61	24.95	0.279
	T3-S-7	②	4 127.18	2.46	2 602.04	4 343.69	22.77	0.280
	T3-S-8	②	4 127.52	2.41	2 518.65	4 351.35	22.11	0.252
	T3-S-9	①	4 130.09	2.45	2 764.54	4 426.19	23.96	0.320
	T3-S-10	①	4 132.04	2.45	2 664.92	4 507.86	24.30	0.269
T5	T5-S-11	⑤	2 859.97	2.44	2 444.68	4 397.21	22.55	0.224
	T5-S-12	④	2 868.44	2.61	3 054.44	5 074.42	32.98	0.284
	T5-S-13	③	2 880.05	2.71	2 680.25	4 809.55	29.97	0.225
	T5-S-14	②	2 881.59	2.69	2 931.65	4 902.47	31.74	0.278
	T5-S-15	①	2 884.19	2.61	3 359.14	5 498.88	37.45	0.298



注:图中气泡越大,密度越大。

图5 川东南五峰组—龙马溪组一段深层页岩样品密度和纵、横波波速气泡图

Fig. 5 Bubble chart showing distribution of density, P-waves velocity, and S-waves velocity of deep shale samples from the first member of Wufeng-Longmaxi Formation in southeastern Sichuan

3.2.2 动态杨氏模量、泊松比

依据声波波速实验测得的岩心样品的纵波时差和横波时差,结合岩心样品的密度测井等资料,对岩石力学动态参数(动态杨氏模量和动态泊松比)进行计算,纵、横波时差经验公式计算动态岩石力学参数的公式如下:

$$E = \frac{\rho}{\Delta t_s^2} \frac{3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{1}{2} \frac{\Delta t_s^2 - 2\Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2} \quad (2)$$

式中: E 为动态杨氏模量,单位GPa; ρ 为岩石密度,单位g/cm³; Δt_s 和 Δt_p 分别为横波时差和纵波时差,单位μs/m; μ 为动态泊松比。

T3井③号层页岩样品的动态杨氏模量大于T3井的①号层和②号层,动态泊松比相对较小,表明T3井③号层页岩样品的脆性较强;T5井③号层和⑤号层页岩样品的动态杨氏模量和动态泊松比均相对较小,表明其局部脆性较强(表2)。动态杨氏模量和泊松比反映瞬时加载下的地层岩石力学性质,静态杨氏模量和泊松比的测定是一个持续加载的过程,能够反映地层持续受力条件下的岩石力学性质。因此,动、静态杨氏模量和泊松比需要进行相互校正,才能准确评价页岩储层岩石力学性质。研究区五峰组—龙马溪组一段深层页岩样品的声波波速实验结果(动态杨氏模量、泊松比)与三轴抗压强度试验结果(静态杨氏模量、泊松比)具有较好的匹配性,线性相关系数均大于0.75,线性的动、静态转换规律可信度较强,由此校正的杨氏模量和泊松比更准确(图6)。

4 抗拉强度与断裂韧性特征

4.1 抗拉强度

在室内实验中采用间接法(巴西劈裂试验)对岩石力学性质重要指标之一的抗拉强度进行测定,以0.15 mm/s的加载速率增加压力,并在试样被破坏的那一刻记录最大破坏载荷,研究区五峰组—龙马溪组一段页岩样品最大载荷介于2~6 kN。依据最大载荷和式(3)计算样品的抗拉强度,其抗拉强度介于2.5~5.5 MPa,受埋深、构造和断裂的影响,T5井页岩样品的抗拉强度相对较小;T3井③号层样品的抗拉强度较小,抗拉能力与T5井页岩样品相当,与其局部脆性较强的特征相符(表3)。

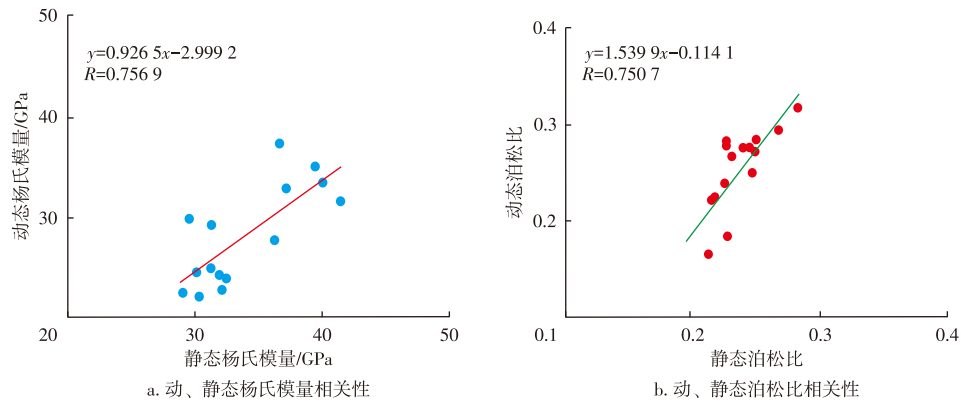


图6 动、静态杨氏模量和动、静态泊松比的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis between dynamic and static Young's moduli and Poisson's ratios

$$S_t = \frac{2P_u}{\pi Dt} \quad (3)$$

式中: S_t 为抗拉强度, 单位 MPa; P_u 为样品破坏时的载荷 (最大载荷), 单位 kN; D 和 t 分别为小柱体样品的直径和厚度, 单位 m。

研究区五峰组—龙马溪组一段页岩样品抗拉强度与其被破坏时的载荷 (最大载荷) 相关性好, 相关系数大于 0.9 (图 7a); T3 井和 T5 井五峰组—龙马溪组一段页岩储层纵向抗拉强度变化比 T2 井大, 整体表现为正弦曲线特征, T5 井的曲线振幅相对较大 (图 7b), 表明其储层纵向非均质性较强, 力学性质变化大。

表3 页岩样品巴西劈裂试验结果

Table 3 Experimental results of Brazilian splitting test of shale samples

井号	样品号	小层	深度/m	最大载荷/kN	抗拉强度/MPa
T2	T2-L-1	③	3 011.01	3.721	4.41
	T2-L-2	②	3 023.96	5.237	4.98
	T2-L-3	①	3 025.56	5.719	5.04
T3	T3-L-4	⑦	4 090.76	5.005	5.31
	T3-L-5	③	4 120.81	2.752	3.89
	T3-L-6	②	4 128.95	4.083	4.81
	T3-L-7	①	4 130.25	3.756	4.28
T5	T5-L-8	⑤	2 856.05	3.262	3.58
	T5-L-9	④	2 868.44	2.469	2.99
T5	T5-L-10	③	2 871.72	2.455	2.71
	T5-L-11	②	2 881.59	4.194	4.80
	T5-L-12	①	2 884.19	3.596	4.03

4.2 断裂韧性指数

通过多功能的程控伺服岩石力学试验系统的断裂韧性试验模块对页岩样品的 I 型和 II 型断裂韧性进行测

试, I 型断裂韧性平均值为 $0.471 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$, II 型断裂韧性平均值为 $0.654 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$, I 型断裂韧性低于 II 型断裂韧性; 样品纹层垂直于页理方向 (径向取样) 的 I 型和 II 型断裂韧性值较低; T3 井③号层页岩样品的 I 型和 II 型断裂韧性值较低, 脆性较强 (表 4)。

I 型断裂沿样品截面的人字槽裂纹形成断裂, 破裂宽度增加, 贯穿程度增强 (图 8a); II 型断裂形成的子裂纹与人字槽裂纹两端相交 (图 8b、图 8c) 或垂直于人字槽裂纹 (图 8d), 贯穿程度受取样方向影响较大。页岩样品纹层与页理平行 (轴向取样) 时, 破裂宽度较小, 贯穿程度较弱 (图 8c); 与页理垂直 (径向取样) 时, 样品的层理较为明显, 裂纹扩展不仅仅沿着人字槽裂纹两端起裂, 更会沿着层理面起裂, 起裂宽度更大, 破裂程度更强 (图 8d)。

在页岩气压裂过程中通常产生 I 型和 II 型断裂, 对 I 型和 II 型断裂韧性进行归一化处理, 得到断裂韧性指数:

$$P_{KIC} = \frac{1}{2} \left(\frac{K_{I, \max} - K_I}{K_{I, \max} - K_{I, \min}} + \frac{K_{II, \max} - K_{II}}{K_{II, \max} - K_{II, \min}} \right) \quad (4)$$

式中: P_{KIC} 为断裂韧性指数; K_I 为 I 型断裂韧性值, 单位 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$; K_{II} 为 II 型断裂韧性值, 单位 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$; $K_{I, \max}$ 和 $K_{I, \min}$ 分别为 I 型断裂韧性的最大值和最小值, 单位 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$; $K_{II, \max}$ 和 $K_{II, \min}$ 分别为 II 型断裂韧性的最大值和最小值, 单位 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 。

断裂韧性是与岩石破坏紧密相关的重要参数, 它表征岩石材料抵抗裂纹扩展的能力。断裂韧性越小, 裂纹扩展越容易, 岩石越容易发生脆性破坏, 在压裂过程中形成裂缝越加复杂, 且裂缝形成后越容易向前延伸, 反之则产生裂缝所需能量越大, 越不易进行压裂改造。

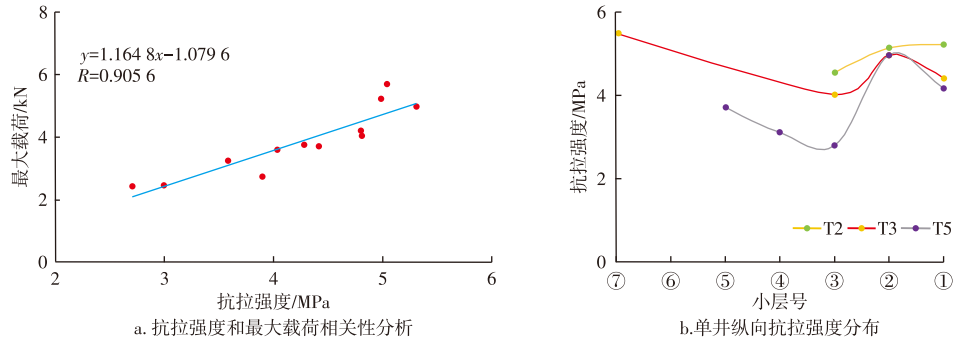


图7 巴西劈裂试验结果分析

Fig. 7 Analysis of Brazilian splitting test results

表4 断裂韧性试验结果

Table 4 Fracture toughness test results

井名	深度/m	小层	取样方向	与页理方向的关系	$K_I / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5})$	$K_{II} / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5})$
T2	3 011.00	③	轴向(0°)	平行	0.145	
	3 016.58	③	轴向(0°)	平行		0.369
T3	4 122.76	③	轴向(0°)	平行	0.241	0.285
	4 126.41	③	径向(90°)	垂直	0.212	0.243
	4 127.30	②	径向(90°)	垂直	0.412	0.697
	4 128.20	②	轴向(0°)	平行	0.538	0.819
T4	3 907.54	③	径向(90°)	垂直	0.483	0.612
	3 905.31	③	轴向(0°)	平行	0.584	0.635
	3 917.57	①	径向(90°)	垂直	0.526	0.651
T5	3 917.79	①	轴向(0°)	平行	0.582	0.705
	2 877.49	③	径向(90°)	垂直	0.515	0.712
	2 878.89	③	轴向(0°)	平行	0.631	0.841
	2 880.76	②	径向(90°)	垂直	0.566	0.832
	2 881.59	②	轴向(0°)	平行	0.728	0.937

注: K_I 和 K_{II} 分别为I型和II型断裂韧性值,单位 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 。

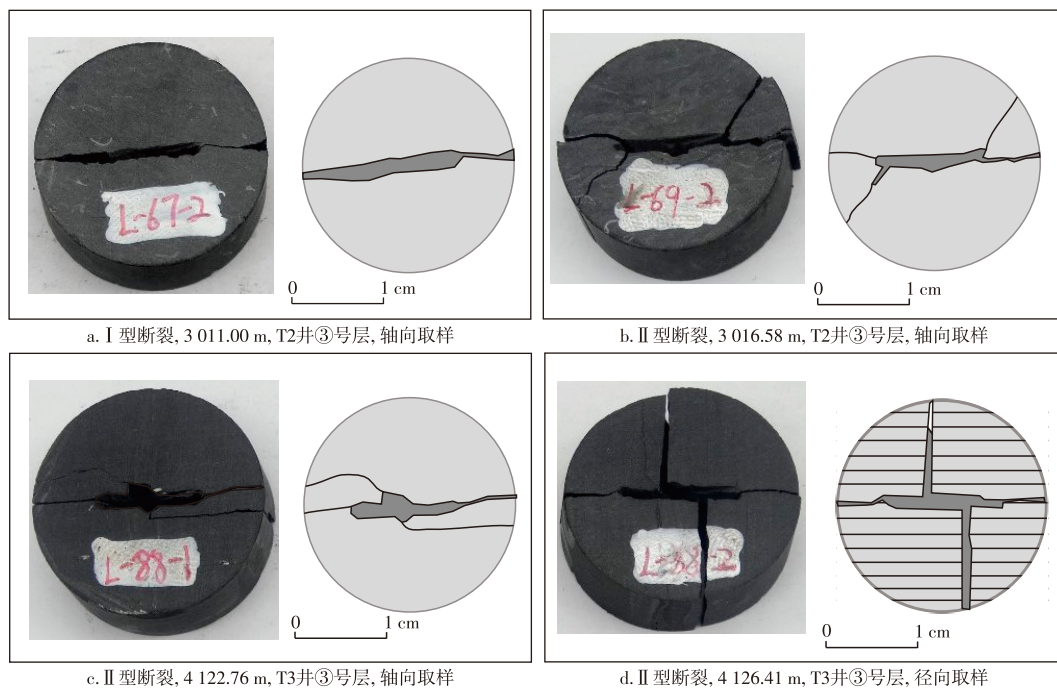


图8 断裂韧性试验中五峰组—龙马溪组一段深层页岩样品破坏结果

Fig. 8 Fracture failure results of deep shale samples from the first member of the Wufeng—Longmaxi Formation in fracture toughness tests

5 井剖面岩石力学特征

利用式(1)、式(2)和动、静态线性转换公式对杨氏模量和泊松比进行计算后,可以由式(5)和式(6)对体积模量和剪切模量进行准确预测。

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (5)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)} \quad (6)$$

式中: G 为剪切模量,单位GPa; K 为体积模量,单位GPa。

基于三轴抗压强度试验结果、声波波速实验、自然伽马测井曲线和纵、横波时差测井曲线,利用Hoek-Brown强度准则建立岩石抗压强度测井解释模型^[24]:

$$\sigma_c = \frac{a(\rho V_p)(b\rho V_s)}{e^{1/100}} \quad (7)$$

式中: σ_c 为抗压强度,单位MPa; a 为抗压强度校正因子,数值为0.8(由三轴抗压强度试验得出); V_p 、 V_s 分别为纵波波速和横波波速,单位m/s; b 为波速校正因子,取值为1.72; e 为自然常数。

基于巴西劈裂试验测得的抗拉强度结果,建立基于抗压强度和总有机碳含量的页岩抗拉强度经验公式^[25]:

$$\sigma_t = 0.02867e^{-0.591\omega(\text{TOC})}\sigma_c + 0.7136\omega(\text{TOC}) + 0.8362 \quad (8)$$

式中: σ_t 为页岩抗拉强度,单位MPa; $\omega(\text{TOC})$ 为总有机碳含量,%。

基于断裂韧性试验测得的I型和II型断裂韧性值,利用式(4)计算断裂韧性指数(因变量),建立地球物理测井数据与断裂韧性指数之间的直接关系。以页岩密度、纵、横波时差、自然伽马和深、浅侧向电阻率差值的归一化数据为自变量,多元回归拟合得到断裂韧性指数测井计算公式,见式(9)。回归相关性系数 R 值为0.86,拟合程度较高。

$$d_{\text{KIC}} = 0.803 - 0.235GR_{\text{nor}} - 0.123\rho_{\text{nor}} - 0.299\Delta t_{\text{snor}} + 0.420\Delta t_{\text{pnor}} - 0.389IRD - RSI_{\text{nor}} \quad (9)$$

式中: d_{KIC} 为断裂韧性指数测井值; GR_{nor} 、 ρ_{nor} 、 Δt_{snor} 、 Δt_{pnor} 和 $IRD - RSI_{\text{nor}}$ 分别为自然伽马、体积密度、横波时差、纵波时差和深、浅侧向电阻率差值的归一化值。

基于前述研究建立研究区深层页岩储层岩石力学特征纵向剖面,图9为T4井五峰组—龙马溪组一段深层页岩储层岩石力学特征分析综合柱状图。利用岩石力学参数曲线叠合法对其进行岩石力学特征评价,T4井③号层底部杨氏模量较高,泊松比较低,抗压强度低,表明其脆

性较强;剪切模量和体积模量曲线叠合结果表明,T4井①号层中部、③号层底部—②号层、③号层中部的岩石抗压缩(体积模量较小)和抗剪切应变(剪切模量较小)的能力均较低;抗拉强度和断裂韧性指数叠合结果表明,T4井①号层中部、③号层中下部的岩石更易发生破裂,裂缝更易扩展,压裂过程形成的缝网更复杂。综合评价得出:T4井五峰组—龙马溪组一段③号层底部脆性较强,易发生压缩和剪切应变,力学性质表现为弱挤压—拉张态;具有良好的工程改造条件,压裂过程更易形成压裂缝网,是后期深层页岩气开发的主力层段。

总而言之,川东南林滩场地区构造复杂,断裂发育,埋深差异大,同一构造单元的单井产能相差达 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$,但其五峰组—龙马溪组一段页岩储层的勘探开发潜力巨大,已提交千亿级的预测储量,是下一个增储上产的新阵地。因此,基于多元力学实验对该区五峰组—龙马溪组一段页岩储层岩石力学特征进行研究是具有开创性意义的,也有助于指导该区后期开发及产能建设。

6 结论

1) 研究区五峰组—龙马溪组一段深层页岩样品受局部脆性的影响,其应力—应变加载曲线在到达峰值应力时,破裂后的残余应力会随着温度和压力的升高而增大,且峰后阶段应力—应变曲线具有较强的波动特征。30 MPa、60 °C的实验条件下测得的岩石力学参数更符合地层实际情况,抗压强度低、静态杨氏模量大、泊松比小的页岩样品的脆性较强,可压性较好。

2) 埋深差异和构造会对深层页岩岩石波速产生较大的影响,五峰组—龙马溪组一段底部页岩动态杨氏模量和泊松比均相对较小;动、静态杨氏模量和动、静态泊松比的线性相关系数均大于0.75,经线性的动、静态转换规律校正,岩石力学参数(杨氏模量和泊松比)更符合岩石样品的真实情况。

3) 深层页岩样品最大载荷介于2~6 kN,五峰组—龙马溪组一段底部页岩抗拉强度相对较小,与其局部脆性较强的特征相符。I型断裂沿样品截面的人字槽裂纹形成断裂,贯穿程度增强;II型断裂形成的子裂纹与人字槽裂纹两端相交或垂直于人字槽裂纹,贯穿程度受取样方向影响较大。

4) 研究区五峰组—龙马溪组一段底部深层页岩样品硅质含量较高,局部脆性更强,峰后阶段应力—应变曲线波动更强烈;抗压强度较小,抗拉强度也相对较小,断裂韧性指数较低;具有更佳工程改造特性,是后期深层页岩气开发的主力层段。

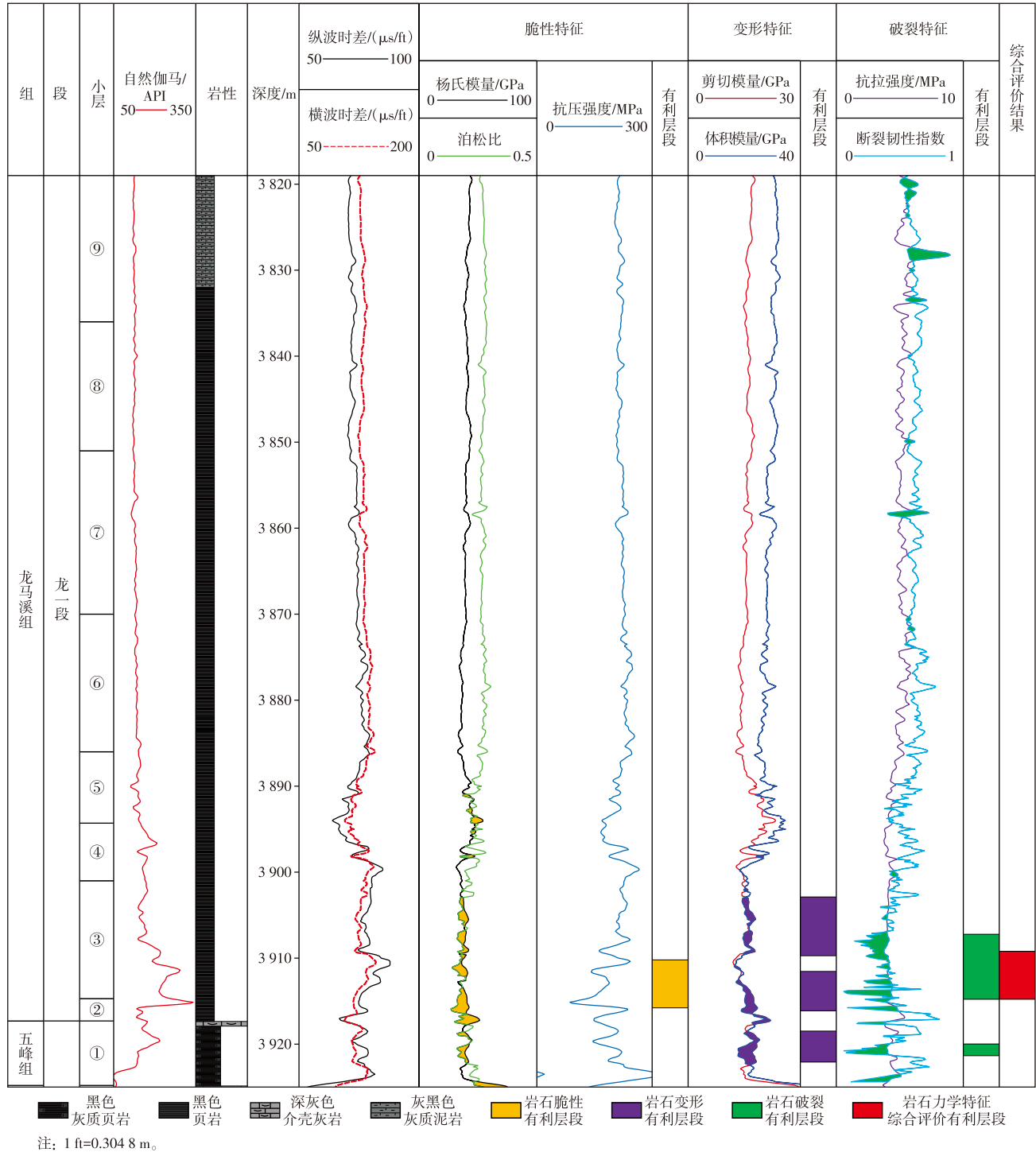


图9 川东南五峰组—龙马溪组一段T4井深层页岩储层岩石力学特征分析综合柱状图

Fig. 9 Comprehensive stratigraphic column of rock mechanical properties of deep shale reservoir from well T4, the first member of Wufeng-Longmaxi Formation

参考文献

[1] WANG Z Y, CHEN L, CHEN D X, et al. Characterization and evaluation of shale lithofacies within the lowermost Longmaxi-Wufeng Formation in the Southeast Sichuan Basin[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 193: 107353.

[2] 徐凤生, 王富平, 张锦涛, 等. 我国深层页岩气规模效益开发策略[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 205-213.

XU Fengsheng, WANG Fuping, ZHANG Jintao, et al. Strategies for scale benefit development of deep shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 205-213.

[3] 唐建明, 何建华, 魏力民, 等. 川东南林滩场地区五峰组—龙马溪组页岩气藏压力演化及其地质意义[J]. 石油实验地质, 2023, 45(4): 739-750.

TANG Jianming, HE Jianhua, WEI Limin, et al. Pressure evolution of shale gas reservoirs in Wufeng-Longmaxi formations, Lintanchang area, southeast Sichuan Basin and its geological significance[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(4): 739-750.

[4] 葛勋, 郭彤楼, 马永生, 等. 四川盆地东南缘林滩场地区上奥陶统

- 五峰组—龙马溪组页岩气储层甜点预测[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 633–647.
- GE Xun, GUO Tonglou, MA Yongsheng, et al. Prediction of shale reservoir sweet spots of the Upper Ordovician Wufeng–Longmaxi Formations in Lintanchang area, southeastern margin of Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 633–647.
- [5] LI G F, JIN Z J, LI X, et al. Experimental study on mechanical properties and fracture characteristics of shale layered samples with different mineral components under cyclic loading[J]. Marine and Petroleum Geology, 2023, 150: 106114.
- [6] ALTINDAG R. Assessment of some brittleness indexes in rock–drilling efficiency[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(3): 361–370.
- [7] 方志坚, 巴晶, 熊繁升, 等. 利用机器学习与改进岩石物理模型预测页岩油层系横波速度[J]. 石油地球物理勘探, 2024, 59(3): 381–391.
- FANG Zhijian, BA Jing, XIONG Fansheng, et al. Shear wave velocity prediction of shale oil formations based on machine learning and improved rock physics model[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2024, 59(3): 381–391.
- [8] 赵进雍, 冀冬生, 吴见, 等. 准噶尔盆地四棵树凹陷侏罗系—白垩系储层岩石力学参数研究[J]. 地质力学学报, 2022, 28(4): 573–582.
- ZHAO Jinyong, JI Dongsheng, WU Jian, et al. Research on rock mechanics parameters of the Jurassic–Cretaceous reservoir in the Sikeshu sag, Junggar Basin, China[J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(4): 573–582.
- [9] 张庄, 宋晓波, 苏成鹏, 等. 四川盆地中二叠统茅口组一段岩石微相特征及储层成因: 以华蓥山二崖剖面为例[J]. 断块油气田, 2023, 30(3): 405–414.
- ZHANG Zhuang, SONG Xiaobo, SU Chengpeng, et al. Characteristics of rock microfacies and reservoir genesis of the first Member of Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin: A case study of Erya section of Huaying Mountain[J]. Fault–Block Oil & Gas Field, 2023, 30(3): 405–414.
- [10] 刘震, 张军华, 于正军, 等. 非常规储层脆性研究进展及展望[J]. 石油地球物理勘探, 2023, 58(6): 1499–1507.
- LIU Zhen, ZHANG Junhua, YU Zhengjun, et al. Progress and prospects of brittleness research in unconventional reservoirs[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2023, 58(6): 1499–1507.
- [11] CHANG C, ZOBACK M D, KHAKSAR A. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2006, 51(4): 223–237.
- [12] HOU L, LIU X, LIANG L, et al. Investigation of coal and rock geo–mechanical properties evaluation based on the fracture complexity and wave velocity[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 75: 103113.
- [13] MASRI M, SIBAI M, SHAO J F, et al. Experimental investigation of the effect of temperature on the mechanical behavior of Tournemire shale[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 70: 185–191.
- [14] 袁俊亮, 邓金根, 张定宇, 等. 页岩气储层可压裂性评价技术[J]. 石油学报, 2013, 34(3): 523–527.
- YUAN Junliang, DENG Jinggen, ZHANG Dingyu, et al. Fracability evaluation of shale–gas reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(3): 523–527.
- [15] 王聪, 黄世军, 赵凤兰, 等. 基于波前快速法的页岩气藏重复压裂储层动用评价方法[J]. 断块油气田, 2023, 30(6): 940–946.
- WANG Cong, HUANG Shijun, ZHAO Fenglan, et al. Reservoir evaluation method for refracturing in shale gas reservoir based on fast marching method[J]. Fault–Block Oil & Gas Field, 2023, 30(6): 940–946.
- [16] 唐俊方, 熊健, 刘向君, 等. 玛湖凹陷风城组岩石力学参数自适应权重组合预测[J]. 石油地球物理勘探, 2024, 59(1): 1–11.
- TANG Junfang, XIONG Jian, LIU Xiangjun, et al. Adaptive weight combination forecast of rock mechanical parameters in the Fengcheng Formation of Mahu Sag[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2024, 59(1): 1–11.
- [17] 刘建华, 吴超, 陶兴华. 钻井岩石力学参数三维建模方法及其现场应用[J]. 钻采工艺, 2020, 43(1): 13–16.
- LIU Jianhua, WU Chao, TAO Xinghua. Three–dimensional modeling method for drilling rock mechanics and its field application[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(1): 13–16.
- [18] 李夕兵, 宫凤强. 基于动静组合加载力学试验的深部开采岩石力学研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 846–866.
- LI Xibing, GONG Fengqiang. Research progress and prospect of deep mining rock mechanics based on coupled static–dynamic loading testing[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 846–866.
- [19] 王亮亮, 王杰祥, 张鹏, 等. 酸化气驱交变载荷对超深层岩石强度及出砂影响[J]. 断块油气田, 2023, 30(1): 136–142.
- WANG Liangliang, WANG Jiexiang, ZHANG Peng, et al. Influence of acidification, gas flooding and alternating load on rock strength and sand production in ultra–deep wells[J]. Fault–Block Oil & Gas Field, 2023, 30(1): 136–142.
- [20] 卢志远, 何治亮, 余川, 等. 复杂构造区页岩气富集特征: 以四川盆地东南部丁山地区下古生界五峰组—龙马溪组为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(1): 86–97.
- LU Zhiyuan, HE Zhiliang, YU Chuan, et al. Characteristics of shale gas enrichment in tectonically complex regions: A case study of the Wufeng–Longmaxi Formations of Lower Paleozoic in southeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1): 86–97.
- [21] 徐向, 辛志源, 刘超, 等. 深层常压页岩气富集机制研究: 以涪陵页岩气田白马区块为例[J]. 石油地质与工程, 2024, 38(3): 53–60.
- XU Xiang, XIN Zhiyuan, LIU Chao, et al. Enrichment law of deep atmospheric shale gas: A case study of Baima syncline in Fuling shale gas field[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2024, 38(3): 53–60.
- [22] HUANG H Y, HE D, LI Y, et al. Silurian tectonic–sedimentary setting and basin evolution in the Sichuan area, southwest China: Implications for palaeogeographic reconstructions[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 92: 403–423.
- [23] XIE H P, LU J, LI C B, et al. Experimental study on the mechanical and failure behaviors of deep rock subjected to true triaxial stress: A review[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(5): 915–950.
- [24] 尹帅, 单钰铭, 王哲, 等. Hoek–Brown准则在岩石抗压强度测井解释中的应用[J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34(4): 659–665.
- YIN Shuai, SHAN Yuming, WANG Zhe, et al. Application of Hoek–Brown criterion in rock compressive strength logging interpretation [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2014, 34(4): 659–665.
- [25] 张昊天. 海相高成熟页岩储层岩石力学特征及脆性评价技术[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- ZHANG Haotian. The evaluation technology of rock mechanics and brittleness characteristics for marine high mature shale reservoir[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.