

文章编号: 1001-4888(2025)04-0493-13

塔里木盆地富满地区深层碳酸盐岩储层 岩石力学特性实验研究*

刘永福^{1,2,3}, 张承泽^{1,2,3}, 袁晓满^{1,2,3}, 孙冲^{1,2,3}, 李静⁴, 裴晨阳⁴, 吴明扬⁴

(1. 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田公司, 新疆库尔勒 841000; 2. 中国石油天然气集团有限公司超深层复杂油气藏勘探开发技术研发中心, 新疆库尔勒 841000; 3. 新疆维吾尔自治区超深层复杂油气藏勘探开发工程研究中心, 新疆库尔勒 841000; 4. 中国石油大学(华东)深层油气全国重点实验室, 山东青岛 266580)

摘要: 缝洞型碳酸盐岩储层孔隙度、渗透率、弹性模量等岩石物理力学参数是影响油气开采效果的关键因素, 为此, 本文以塔里木盆地富满地区奥陶系缝洞型碳酸盐岩储层为研究对象, 通过单轴、三轴压缩实验、声发射实验和应力敏感性实验等, 系统研究了储层岩石力学参数以明确原位条件下的储层受力状态。结果表明: 1) 随着围压的增加, 岩石的抗压强度和弹性模量逐渐增大, 岩石从脆性转变为塑性, 表现出应变硬化特性。2) 碳酸盐岩储层渗透率随着围压的增大而逐渐降低, 且在围压 30 MPa 以下变化显著。3) 研究区最大水平主应力为 186.14 MPa, 最小水平主应力为 150.82 MPa, 垂向应力为 172.89 MPa, 表现出走滑断层应力特征。本文研究结果可为深层缝洞型碳酸盐岩储层高效勘探开发提供技术支撑。

关键词: 岩石力学; 塔里木盆地; 缝洞型; 深层碳酸盐岩储层

中图分类号: TE344

文献标志码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-24-122

0 引言

随着油气勘探的不断深入, 其开发的重点逐渐由常规向非常规、浅层向深层油气藏转变^[1-4]。深层缝洞型碳酸盐岩油气作为一种重要的非常规油气资源, 已成为油气增储上产的重要新领域^[5-8]。为此, 国内外诸多学者开展了相关研究。GEIGER 等^[9]、MENG 等^[10]基于室内实验, 在研究碳酸盐岩不同矿物组成、颗粒大小及胶结结构对深层碎屑岩力学性能影响的基础上, 探讨了单轴压缩强度和变形破坏特性。潘林华等^[11]对塔河碳酸盐岩开展不同围压、孔隙压力条件下的三轴压缩实验, 得到了其破坏方式主要为脆性破坏、塑性破坏、延性破坏的结论。周汉国等^[12]基于油田测井资料及岩石力学实验, 根据第三强度理论研究了深层碳酸盐岩围岩应力分布状态。姚军等^[13]根据深层油气藏开发中的关键力学问题, 开展了深层油气藏开采中的关键力学问题研究。HOSA 等^[14]对巴西桑托斯盆地的成岩和沉积过程进行研究, 得到了岩石孔隙度、渗透率等关键岩石力学特性。张晓悟等^[15]通过不同温度下石灰岩三轴压缩实验, 建立了岩石破坏形式和损伤评价指标。张程^[16]根据塔中Ⅱ区碳酸盐岩岩样孔隙度、渗透率等岩石力学特性, 分析了碳酸盐岩断控缝洞型油气藏油层的物理特征。李新勇等^[17]针对缝洞型碳酸盐岩储层提出了“缝洞沟通系数”的概念, 并建立了人造岩样符合缝洞型碳酸盐岩压裂特征的评价标准。MEHRGINI 等^[18]通过不同温度下的单轴、三轴压缩实验, 得到了抗压强度、杨氏模量、泊松比、摩擦角

* 收稿日期: 2024-08-11; 修回日期: 2024-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(42472195); 中国石油塔里木油田公司揭榜挂帅项目(671023060003); 中国石油天然气集团有限公司科技项目(2023ZZ16YJ02, 2023ZZ16YJ04)

通信作者: 李静(1967-), 女, 教授, 博士生导师。主要从事地质力学方面的教学与研究工作。Email: lijing0681@163.com

等岩石力学特性随温度变化的特征。PARISA 等^[19]通过测定碳酸盐岩不同类型裂缝的渗透率、孔隙度,对碳酸盐岩储层可压性进行了研究。王焱钊等^[20]、YANG 等^[21]通过开展碳酸盐岩真三轴酸压物理模拟实验,研究了裂缝型和缝洞型碳酸盐岩酸压后缝面粗糙程度、表面形态及压裂缝扩展规律。HOSA 等^[22]通过岩石物理实验、历史拟合等方法,发现成岩事件的顺序对碳酸盐岩储层的孔隙度和渗透率有显著影响。KORNEVA 等^[23]通过岩石力学特性实验研究了白云石化对碳酸盐岩的岩石物理性质和裂缝分布的影响。

尽管已经取得了不少成果,但由于塔里木盆地富满油田缝洞型碳酸盐岩储层埋藏深、地质环境复杂、非均质性极强^[24-26],岩石力学特性不明,因此,本文将通过岩石力学特性实验、应力敏感性实验和储层地应力测试实验,系统开展塔里木盆地富满地区深层缝洞型碳酸盐岩储层岩石力学特性研究,以期为深层缝洞型碳酸盐岩油气高效勘探开发提供技术支撑。

1 储层岩石力学特性实验

1.1 研究区概况

研究区富满油田跃满区块位于新疆维吾尔自治区塔里木盆地“三隆四坳”7个一级构造单元中北部坳陷与塔北隆起之间的过渡部位,其中奥陶系一间房组和鹰山组为主要勘探开发目的层位,其碳酸岩储层岩性主要为灰岩,且易溶性矿物成分较多。由于构造断裂及易溶矿物溶蚀作用,造成研究区孔洞缝发育,形成大规模缝洞型碳酸盐岩储层,勘探开发潜力巨大。

1.2 实验材料及制备

实验岩样取自跃满区块一间房组 7265 m 处,根据国家标准《天然石材试验方法 第 12 部分:静态弹性模数的测定》(GB/T 9966.12-2021)将岩样切割成直径为 25 mm、高度为 50 mm 的圆柱体(图 1),实验前将岩样进行清洁和干燥处理。试样的直径、长度、质量等基本物理参数见表 1。



图 1 实验岩样

Fig. 1 Experimental rock sample

表 1 实验岩样参数

Tab. 1 Experimental rock sample parameters

岩样编号	深度/m	长度/mm	直径/mm	质量/g	密度/(g/cm ³)
1	7108.41	49.68	24.64	62.59	2.64
2	7204.34	50.70	24.56	64.36	2.68
3	7267.12	49.48	24.84	63.41	2.65
4	7263.68	49.90	24.72	63.94	2.67
5	7238.33	49.82	24.64	64.22	2.79

1.3 实验仪器

本文三轴压缩实验使用的仪器是美国 GCTS(Geotechnical Consulting and Testing Systems)公司生产的 RTR-2000 高温高压岩石三轴仪,在仪器应力控制模式下进行加载,轴向加载速率为 100 N/s,围压加载速率为 5 MPa/min。

1.4 实验结果分析

岩样编号如图 1 所示。对 1~5 号岩样分别施加 0 MPa、10 MPa、30 MPa、50 MPa、70 MPa 的围压，同时采用 0.002 mm/s 的加速速率来施加轴向压力，直至岩样发生破裂。

1) 岩石压缩应力-应变特性分析

1~5 号岩样在不同围压下岩石的应力-应变曲线如图 2 所示，由图可以看出，不同围压下岩石应力-应变曲线存在相同之处，1~5 号岩样在轴向荷载作用下，应力-应变曲线均经历压密阶段(OA)、弹性阶段(AB)及塑性变形阶段(BC)，不同之处在于 1~4 号岩样在经历塑性变形阶段到达峰值强度后，应力-应变曲线开始下降，岩石开始发生破坏，而 5 号岩样在到达峰值强度后应力-应变曲线下降幅度不显著。

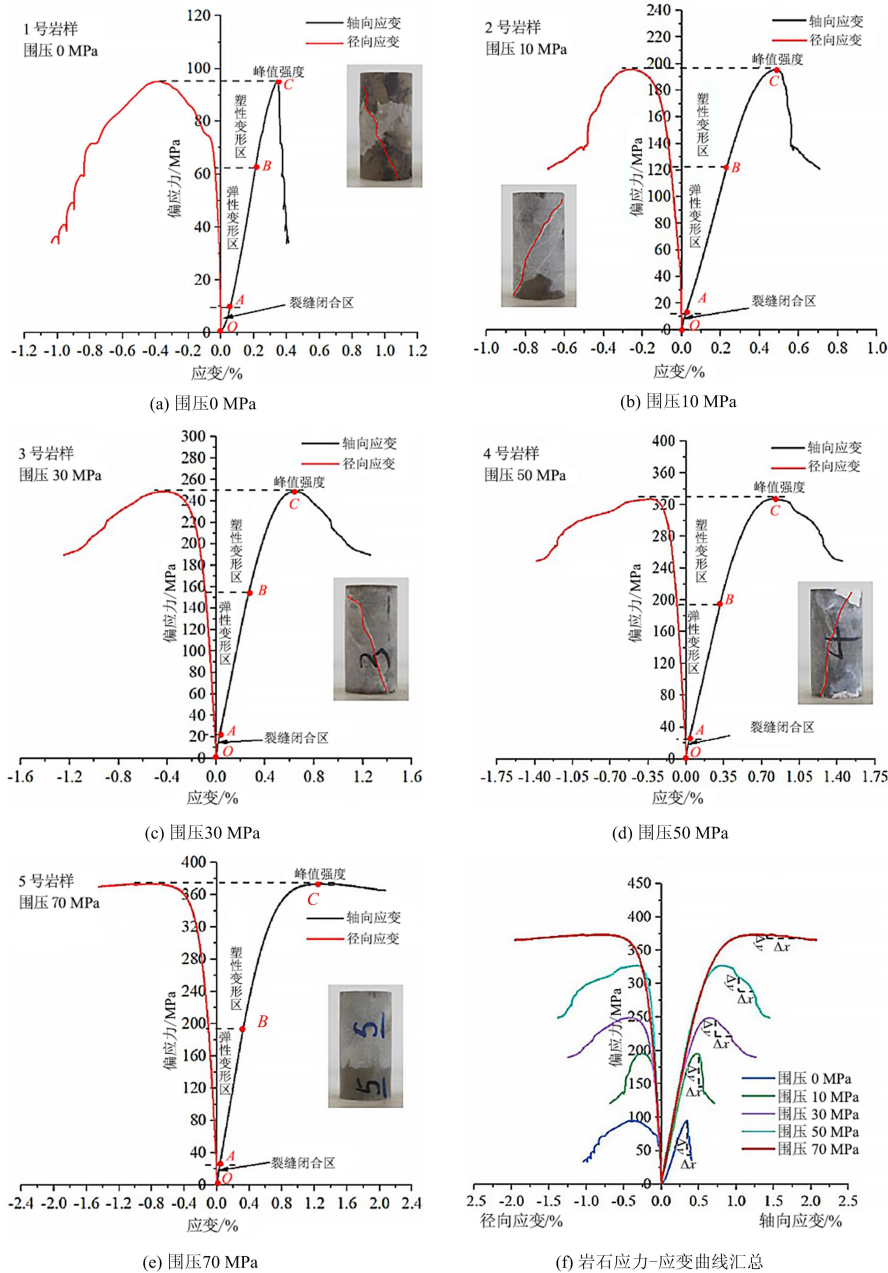


图 2 不同围压作用下岩石应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of rock under different confining pressures

从图 2(f)可以看出，峰值强度对应的轴向应变随着围压的增加而逐渐增大，峰后应力-应变曲线的斜率则逐步减小。岩石表现出从脆性向塑性转变的趋势，其应变软化特性逐渐减弱，塑性特征不断增强。随着围压的增大，试样的破坏模式由脆性逐渐过渡至脆-塑性破坏，最终表现为塑性破坏。在三轴

压缩实验后,1~4 号岩样出现了明显的破裂面,5 号岩样未出现明显破裂面,而是表现出鼓胀现象(图 3)。

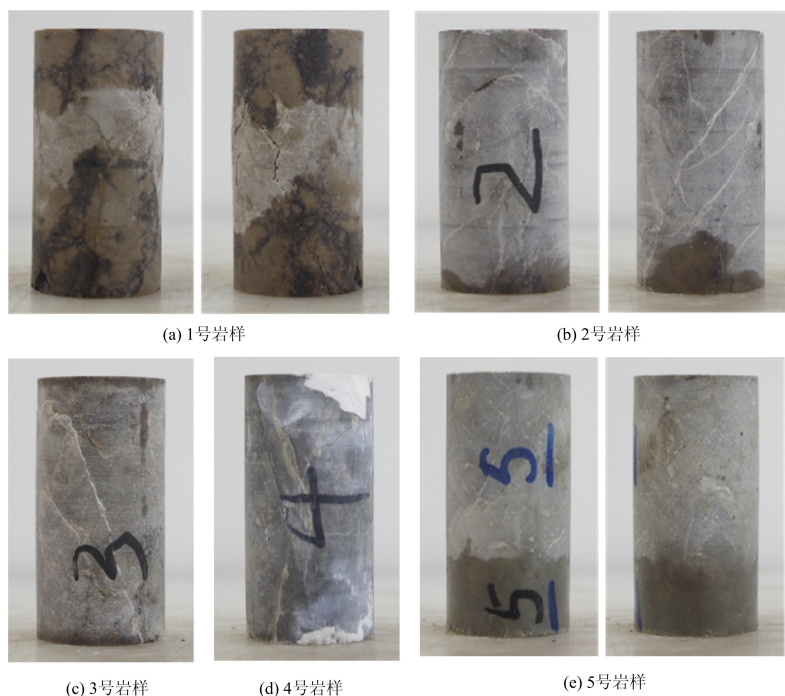


图 3 压缩后的实验岩样

Fig. 3 Test sample after compression

通过式(1)、式(2)计算得到 1~5 号岩样在不同围压下的弹性模量、泊松比及抗压强度等力学参数(表 2),根据表 2 中每组岩样的抗压强度和弹性模量绘制了 5 组岩样随围压变化的曲线,如图 4 所示。

$$E = \frac{\sigma_{ea}}{\epsilon_{ea}} \quad (1)$$

$$\nu = \frac{\epsilon_{er}}{\epsilon_{ea}} \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量; σ_{ea} 为弹性阶段的轴向应力; ϵ_{ea} 为弹性阶段的轴向应变; ν 为泊松比; ϵ_{er} 为弹性阶段的径向应变。

表 2 岩石三轴实验结果

Tab. 2 Results of rock triaxial experiment

岩样编号	围压/MPa	峰值应力/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
1	0	95.22	34.18	0.213
2	10	205.77	54.22	0.321
3	30	278.90	56.89	0.322
4	50	378.72	59.68	0.274
5	70	443.63	58.90	0.358

由图 4 可以看出,随着围压的增大,岩石峰值强度逐渐增大,这是因为围压的存在阻碍了岩样中微孔和裂隙的扩展,围压越大,阻力越大,从而令试样破坏所需要的应力越大;岩样的弹性模量随着围压的增大,总体上呈现上升的趋势。

2) 岩石莫尔应力圆分析

根据库仑强度准则,岩石的抗剪强度由黏聚力 c 和内摩擦角 φ 决定,其强度包络线为直线,即

$$\sigma_t = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (3)$$

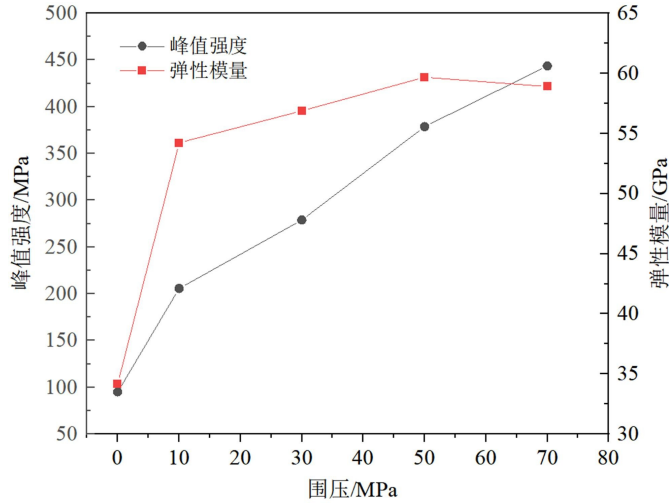


图 4 岩石试样峰值强度、弹性模量变化趋势

Fig. 4 Variation trend of peak strength and elastic modulus of rock samples

式中： σ_t 和 σ_n 分别为破坏面上的切向和法向应力； c 为岩石的黏聚力； φ 为岩石的内摩擦角。

根据图 5 中的几何关系(图中 a 为线性回归分析的中间参数)，由式(3)可得出

$$\sigma_t = \sigma_1 - \sigma_3 - 2c \cos \varphi - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi \tag{4}$$

式中： σ_1 为最大主应力； σ_3 为最小主应力； σ_t 为临界应力。

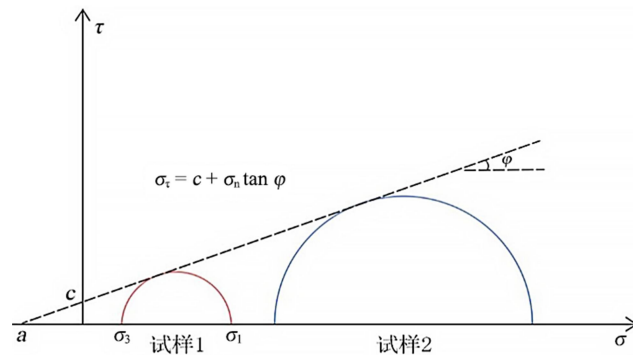


图 5 莫尔应力圆示意图

Fig. 5 Diagram of Mohr's stress circle

黏聚力 c 和内摩擦角 φ 是衡量岩石强度的参数指标，可通过在几个不同围压下的抗压强度实验结果，借助最小二乘法回归分析获得，故将莫尔-库仑破坏准则改写为

$$\sigma_1 = a + b\sigma_3 \tag{5}$$

式中： $a = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$ ； $b = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$ 。

将不同围压的强度实验数据结果绘制到 $\sigma_1 - \sigma_3$ 平面上，用线性最小二乘法进行线性回归分析，确定参数 a 、 b ，由式(6)、式(7)计算出内聚力 c 和内摩擦角 φ 。

$$c = a \frac{1 - \sin \varphi}{2 \cos \varphi} \tag{6}$$

$$\varphi = \sin^{-1} \frac{b - 1}{b + 1} \tag{7}$$

通过线性回归分析得到岩样的黏聚力 c 为 40 MPa，内摩擦角 φ 为 38.58° ，见表 3，不同围压条件下跃满工区一间房组岩石莫尔应力圆如图 6 所示。从图 6 可以看出随着围压的增加，岩样莫尔应力圆逐渐向坐标轴正向移动，表明围压越大，岩样破坏所需要的轴向应力越大。

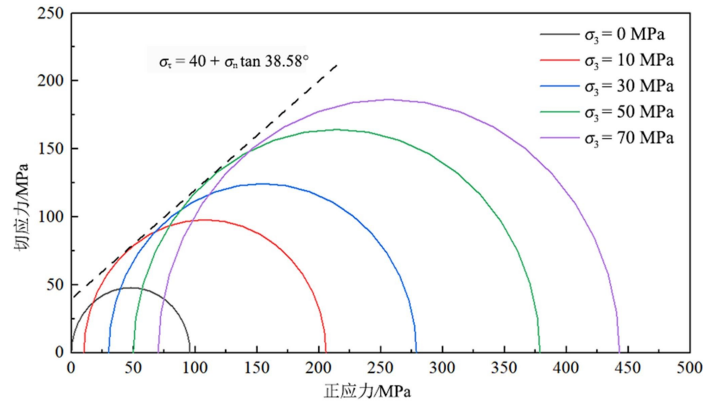


图6 跃满工区一间房组岩石莫尔应力圆

Fig. 6 Mohr's stress circle of rock in a room group of jumping blocks

表3 跃满工区一间房组岩石抗剪强度参数

Tab. 3 Shear strength parameters of Yijianfang Formation rock in Yueman Block

岩样编号	最小主应力 σ_3 /MPa	偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ /MPa	最大主应力 σ_1 /MPa	黏聚力 c /MPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)
1	0	95.22	95.22		
2	10	195.77	205.77		
3	30	248.90	278.90	40	38.58
4	50	328.72	378.72		
5	70	373.63	443.63		

2 储层岩石应力敏感性实验

2.1 实验原理

法国著名工程师 DARCY 于 1856 年通过垂向砂体渗流实验发现,流体流量与横截面积和水力坡度的乘积成正比,基于此,DARCY 提出了著名的达西定律,而后人对达西定律进行了一定的修正,将水力坡度替换成了压力梯度,即现今常用的达西定律^[19]:

$$Q = \frac{kA}{\mu L} \Delta P \tag{8}$$

式中: Q 为某横截面上的流体流量; k 为岩石的渗透率; A 为岩石的横截面面积; μ 为流体的黏度; L 为岩石的长度; ΔP 为进出口端的压力梯度。

达西定律适用于岩石、混凝土等多孔介质材料,由于材料内部结构存在差异,渗透率 k 也不相同,因此式(8)可写为

$$k = \frac{Q\mu L}{A\Delta P} \tag{9}$$

根据气体的状态方程(式(10))、波义耳定律(式(11))及流体流动方程(式(12)),可以将达西定律方程(式(9))改写为基于本文实验的渗透率计算公式(式(13))。

$$PV = nRT \tag{10}$$

式中: P 为气体压强; V 为气体体积; n 为气体的摩尔量; T 为温度; R 为摩尔气体常数。

$$P_1V_1 = P_2V_2 \tag{11}$$

式中: P_1 为入口流体压强; P_2 为出口流体压强; V_1 为入口流体体积; V_2 为出口流体体积。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \tag{12}$$

式中: ρ 为流体密度; \mathbf{u} 为流体速度矢量; t 为时间。

$$k = \frac{2Q_0 P_0 \mu L}{A(P_1^2 - P_2^2)} \tag{13}$$

式中： Q_0 为气体出口端流量； P_0 为标准大气压强； L 为岩样长度。

2.2 实验仪器

实验采用岩石渗透率测定仪，该测定仪主要包括气体压力加载系统、岩石围压加载系统及渗透率高精度测定系统，其围压泵和回压泵最大可加载至 90 MPa，压力精度为 0.01 MPa。

2.3 试样制备及实验方案

渗透率应力敏感性测试岩样取自跃满区块一间房组碳酸盐岩储层，将岩样制备成直径为 25 mm、高度为 50 mm 的圆柱体试样(图 7)，在实验前需进行彻底的清洁和干燥处理。在渗透率测试前将岩石试样放置在烘干箱中干燥 24 h，烘干箱的温度设置为 60 ℃，烘干后将岩样封存在密封袋中，以防止岩样中存在束缚水影响渗透率的测试，岩样的具体物理参数见表 4。



图 7 应力敏感性测试岩样

Fig. 7 Stress sensitivity test rock samples

应力敏感性测试岩样 1、岩样 2 如图 7 所示。氮气作为一种惰性气体，其化学性质稳定，相比其他实验气体更容易进入细微孔隙而不易被吸附，从而能使渗透率实验得到

更准确的结果，故本文采用氮气作为渗流气体测量不同围压条件下的渗流率，以探究不同围压下的碳酸盐岩渗流机理。对岩样 1、岩样 2 依次增加围压测试其渗透率，围压设置为 5 MPa、10 MPa、20 MPa、30 MPa、40 MPa、50 MPa、60 MPa、70 MPa、80 MPa。

表 4 渗透率测试岩样参数

Tab. 4 Permeability test rock samples parameters

岩样	深度/m	长度/mm	直径/mm	密度/(g/cm ³)
1	7200.59	51.05	24.50	2.61
2	7263.68	50.93	24.46	2.73

2.4 实验结果及分析

岩样 1 和岩样 2 在不同围压条件下的渗透率见表 5，渗透率随围压的变化关系如图 8 所示。从图 8 可以看出，在围压从 5 MPa 增加至 30 MPa 的过程中，渗透率降低较为明显。当围压超过 30 MPa 后，随着围压的增大，渗透率下降幅度变缓。造成该现象的主要原因是随着岩样围压的逐渐增大，作用在岩石骨架上的应力也在逐渐增大，岩样内部的微裂缝和孔隙逐渐闭合，从而导致岩样渗透率逐渐减小。

表 5 不同围压条件下岩石试样渗透率测试结果

Tab. 5 Permeability test results of rock under different confining pressure conditions

围压/MPa	渗透率(×10 ⁻¹⁷)/m ²	
	岩样 1	岩样 2
5	81.37	75.34
10	55.73	54.40
20	27.75	21.30
30	12.10	10.04
40	9.80	8.24
50	9.65	8.15
60	9.54	8.08
70	9.48	8.03
80	9.45	7.96

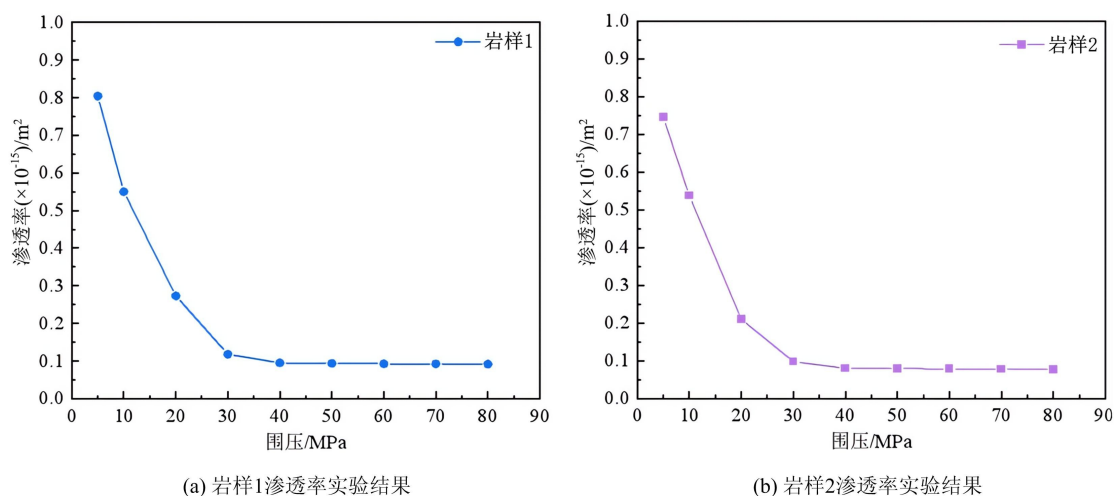


图 8 渗透率随围压的变化关系曲线

Fig. 8 Permeability curve with confining pressure

3 储层地应力实验测试

3.1 声发射基本原理

当地下岩石从原位取出时,由于应力得到释放,岩石内部裂缝开始扩展,同时会产生强烈的声发射信号(图 9),因此岩石从不产生或产生较弱的声发射信号到产生强烈声发射信号的转折点为 Kaiser 效应点,其所对应的应力值即为岩石在原位下的真实地应力值^[27-28]。

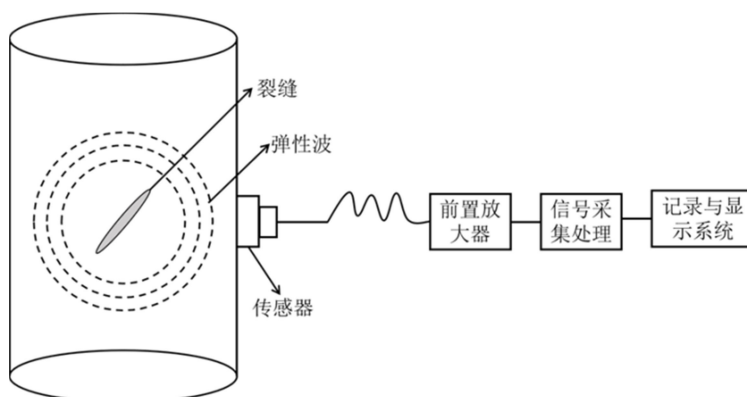


图 9 声发射监测原理示意图

Fig. 9 Schematic diagram of acoustic emission monitoring

3.2 试样制备及实验仪器

1) 岩样制备

本文声发射实验岩样取自跃满区块 7265 m 处,首先在全直径岩样上沿垂直方向钻取 1 块岩样,并在水平方向每隔 45°钻取 1 块岩样,共钻取 3 块岩样^[29](图 10(a))。然后,将岩样加工成直径为 25 mm、高度为 50 mm 的圆柱体试件,两端磨平,共制备 4 块圆柱体试样(图 10(b))。

2) 实验仪器

由于测试岩样埋藏深度较大,基于单轴压缩进行声发射实验测得的 Kaiser 效应点对应的应力值,并不是岩石原位条件下的真实应力,故需要采用三轴压缩实验系统测试岩样的声发射信号,以得到真实的地应力值。该三轴压缩实验系统带宽为 0.5 kHz~2.4 MHz,有 8 个可选参数通道,每个通道有 18 位 AD/C 转换器,信号转换速度为每秒 8000 个,可同步检测三轴压缩实验过程中的声发射信号(图 11)。

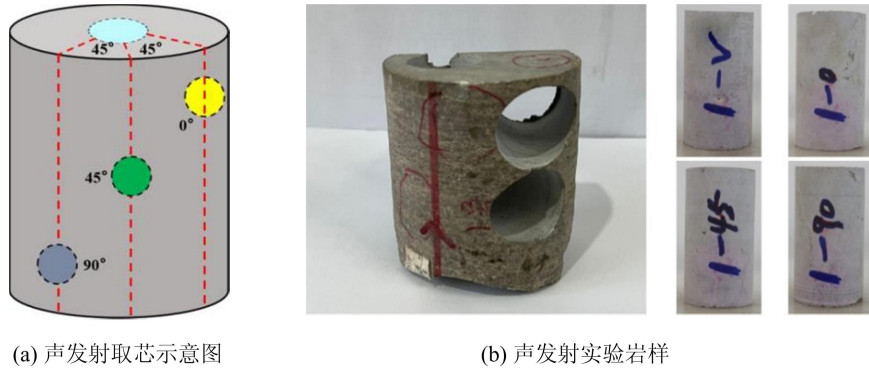


图 10 声发射取芯示意图及钻取后的岩样
 Fig. 10 Schematic diagram of acoustic emission coring and rock sample after drilling

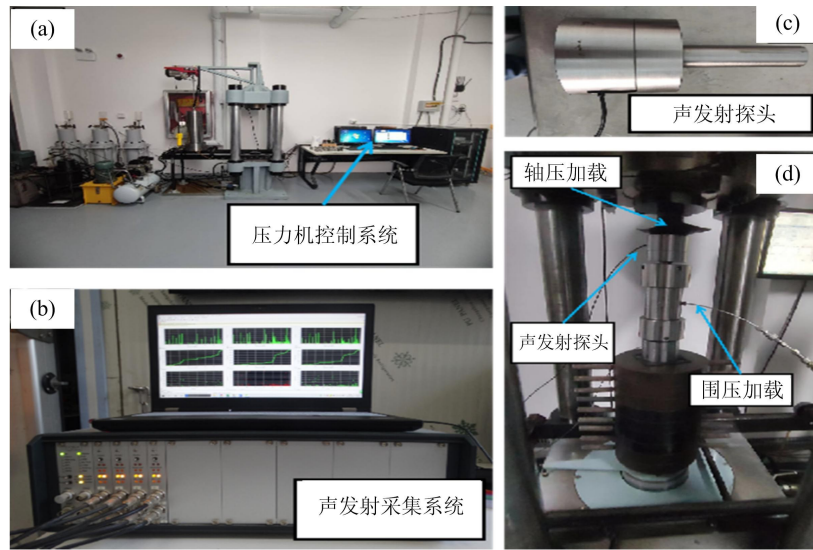


图 11 声发射实验系统
 Fig. 11 Acoustic emission experiment system

3.3 实验结果及分析

采用声发射采集系统同步监测了 4 组岩样三轴压缩下的声发射信号,如图 12 所示,由图可以看出,时序曲线有多个 Kaiser 效应点。为了能更加准确地判断应力大小所对应的 Kaiser 效应点,本文根据塔里木油田水力压裂测试的最大水平主应力、最小水平主应力的估算值,对 4 组岩样声发射所对应的 Kaiser 效应点进行分析,标定出最符合的 Kaiser 效应点如图 12(a)所示。

根据岩样三向主应力实验测试结果,基于式(14)求解得出地应力结果见表 6,最大水平主应力为 186.14 MPa,最小水平主应力为 150.82 MPa,垂向应力为 172.89 MPa。最大水平主应力明显大于垂向应力,同时垂向应力明显大于最小水平主应力,这种应力状态具有走滑断层的应力特征。

$$\begin{cases} \sigma_H = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \\ \sigma_h = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \\ \sigma_v = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \end{cases} \quad (14)$$

式中: σ_H 为最大水平主应力; σ_h 为最小水平主应力; σ_v 为垂向应力; σ_x 为 x 方向正应力; σ_y 为 y 方向正应力; τ_{xy} 为 xy 平面切应力; θ 为水平最大主应力与 x 方向的夹角。

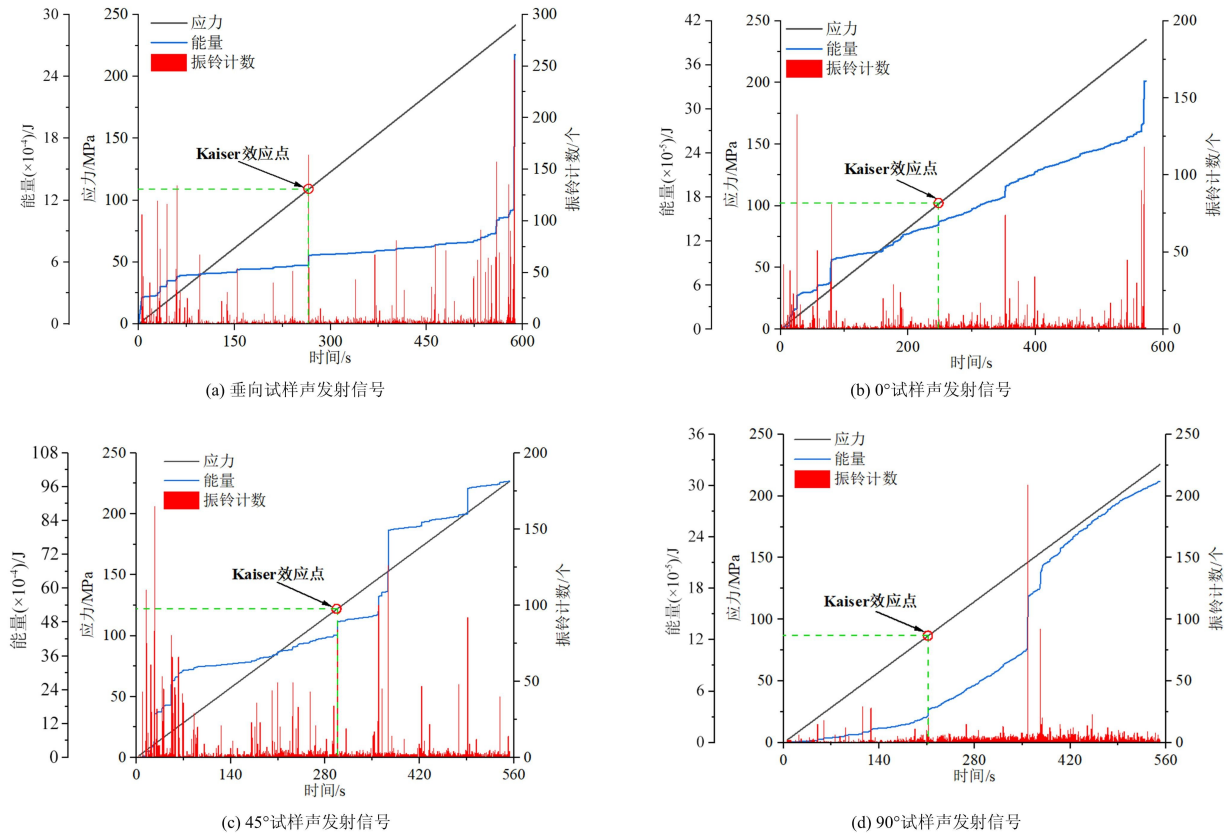


图 12 不同三轴压缩声发射信号

Fig. 12 Different triaxial compression acoustic emission signals

表 6 岩石声发射结果统计

Tab. 6 Rock acoustic emission statistics

深度/m	Kaiser 点应力值/MPa				最大水平 主应力 /MPa	最小水平 主应力 /MPa	垂向 应力 /MPa
	0°	45°	90°	垂向			
7265.73	101.60	122.14	86.82	108.89	186.14	150.82	172.89

4 结论

1) 通过单轴、三轴压缩实验发现,研究区碳酸盐岩的弹性模量为 34.18 GPa~58.90 GPa,泊松比为 0.213~0.358,抗压强度为 95.22 MPa~443.63 MPa,黏聚力为 40 MPa,内摩擦角为 38.58°。随着围压的逐渐增大,抗压强度和弹性模量逐渐增大,抗压强度所对应的轴向应变也随之增大。此外,随着围压的增大,峰后应力-应变曲线斜率逐渐减小,岩石从脆性转为塑性,岩石应变软化特性逐渐减弱,塑性特征不断增强,试样从脆性破坏逐渐过渡到脆-塑性和塑性破坏。

2) 研究区碳酸盐岩的渗透率随着围压的增大而逐渐降低,在围压从 5 MPa 增加至 30 MPa 过程中,岩石渗透率下降幅度较为显著,当围压大于 30 MPa 时渗透率变化幅度变缓并逐渐趋于平稳。

3) 通过声发射实验和水力压裂测试可推断出研究区域的应力状态。具体来说,研究区的最大水平主应力为 186.14 MPa,最小水平主应力为 150.82 MPa,而垂向应力为 172.89 MPa,呈现出最大水平主应力>垂向应力>最小水平主应力的走滑断层应力特征。

参考文献:

- [1] 杨学文, 田军, 王清华, 等. 塔里木盆地超深层油气地质认识与有利勘探领域[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 17-28 (YANG Xuewen, TIAN Jun, WANG Qinghua, et al. Geological understanding and favorable exploration fields of ultra-deep formations in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4):17-28 (in Chinese))
- [2] BAGRINTSEVA K I. Carbonate reservoir rocks[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2015.
- [3] 杨峰, 钟安海, 丁然, 等. 考虑油气运移的致密储层岩石流变损伤特性研究[J]. 实验力学, 2023, 38(6):741-750 (YANG Feng, ZHONG Anhai, DING Ran, et al. Study on the influence of hydrocarbon migration of tight reservoir rocks on rheological properties and damage[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2023, 38(6):741-750 (in Chinese))
- [4] WANG H S, WANG R J, ZHANG Y T, et al. Multi-mode flow simulation of fracture-cavity reservoirs and predicting oil accumulation based on hydro-mechanical-damage coupling model[J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2024, 38:100566.
- [5] 郑剑锋, 潘文庆, 沈安江, 等. 塔里木盆地柯坪露头区寒武系肖尔布拉克组储集层地质建模及其意义[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(3):499-511 (ZHENG Jianfeng, PAN Wenqing, SHEN Anjiang, et al. Reservoir geological modeling and significance of Cambrian Xiaerblak Formation in Keping outcrop area, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(3):499-511 (in Chinese))
- [6] 李青, 李小波, 杜春晖, 等. 缝洞型油藏开发流体势数学模型及调控效果影响因素[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(1):64-71 (LI Qing, LI Xiaobo, DU Chunhui, et al. Study on mathematic model of development fluid potential of fracture-cavity reservoir and influencing factors of adjustment effect[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(1):64-71 (in Chinese))
- [7] 田军, 杨海军, 朱永峰, 等. 塔里木盆地富满油田成藏地质条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2021, 42(8):971-985 (TIAN Jun, YANG Haijun, ZHU Yongfeng, et al. Geological conditions for hydrocarbon accumulation and key technologies for exploration and development in Fuman oilfield, Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(8):971-985 (in Chinese))
- [8] 张强勇, 王超, 向文, 等. 塔河油田超埋深碳酸盐岩油藏基质的力学试验研究[J]. 实验力学, 2015, 30(5):567-576 (ZHANG Qiangyong, WANG Chao, XIANG Wen, et al. Experimental study of matrix mechanical properties of ultra deep carbonate rock oil reservoir in Tahe Oilfield[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(5):567-576 (in Chinese))
- [9] GEIGER J, HUNYADFALVI Z, BOGNER P. Analysis of small-scale heterogeneity in clastic rocks by using computerized X-ray tomography (CT)[J]. Engineering Geology, 2009, 103:112-118.
- [10] MENG Z P, PAN J N. Correlation between petrographic characteristics and failure duration in clastic rocks[J]. Engineering Geology, 2007, 89:258-265.
- [11] 潘林华, 张士诚, 程礼军, 等. 围压-孔隙压力作用下碳酸盐岩力学特性实验[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2014, 29(5):17-20 (PAN Linhua, ZHANG Shicheng, CHENG Lijun, et al. Experimental study on mechanical property of carbonate under the effect of confining pressure and pore pressure[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2014, 29(5):17-20 (in Chinese))
- [12] 周汉国, 郭建春, 李静, 等. 深层碳酸盐岩储层溶洞围岩应力分布研究[J]. 地质力学学报, 2018, 24(1):35-41 (ZHOU Hanguo, GUO Jianchun, LI Jing, et al. Distribution of surrounding rock stress in deep carbonate reservoir karst cave[J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24(1):35-41 (in Chinese))
- [13] 姚军, 黄朝琴, 刘文政, 等. 深层油气藏开发中的关键力学问题[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2018, 48(4):5-31 (YAO Jun, HUANG Zhaoqin, LIU Wenzheng, et al. Key mechanical problems in the development of deep oil and gas reservoirs[J]. SCIENTIA SINICA: Physica, Mechanica & Astronomica, 2018, 48(4):5-31 (in Chinese))
- [14] HOSA A, WOOD R A, CORBETT P W M, et al. Modelling the impact of depositional and diagenetic processes on reservoir properties of the crystal-shrub limestones in the "Pre-Salt" Barra Velha Formation, Santos Basin,

- Brazil[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 112:104100.
- [15] 张晓悟, 徐金海, 孙垒, 等. 三轴循环加卸载条件下热损伤石灰岩力学特性演化规律[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2022, 4(4):87-98 (ZHANG Xiaowu, XU Jinhai, SUN Lei, et al. Mechanical properties evolution of thermally damaged limestone under triaxial cyclic loading and unloading[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2022, 4(4):87-98 (in Chinese))
- [16] 张程. 塔中Ⅱ区碳酸盐岩断控缝洞型油气藏油层物理特征与效益开发[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021 (ZHANG Cheng. Physical characteristics and beneficial development of carbonate rock fault-controlled fracture-cavity reservoirs in Tazhong Ⅱ area[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021 (in Chinese))
- [17] 李新勇, 耿宇迪, 刘志远, 等. 缝洞型碳酸盐岩储层压裂效果评价方法实验研究[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(6):88-93 (LI Xinyong, GENG Yudi, LIU Zhiyuan, et al. An experimental study on evaluation methods for fracturing effect of fractured-vuggy carbonate reservoir[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(6):88-93 (in Chinese))
- [18] MEHRGINI B, MEMARIAN H, DUSSEAUULT M B, et al. Geomechanical characterization of a south Iran carbonate reservoir rock at ambient and reservoir temperatures [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 34:269-279.
- [19] PARISA B, KAMRAN G, EZATALLAH K. Stress-dependence of the permeability, porosity, and compressibility of fractured carbonate rock[J]. *Journal of Porous Media*, 2021, 24(5):21-45.
- [20] 王燧钊, 侯冰, 张鲲鹏, 等. 碳酸盐岩储层酸压室内真三轴物理模拟实验[J]. *石油科学通报*, 2020, 5(3):412-419 (WANG Yizhao, HOU Bing, ZHANG Kunpeng, et al. Laboratory true triaxial acid fracturing experiments for carbonate reservoirs[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2020, 5(3):412-419 (in Chinese))
- [21] YANG H Z, WANG L, BI Z H, et al. Experimental investigation into the process of hydraulic fracture propagation and the response of acoustic emissions in fracture-cavity carbonate reservoirs[J]. *Processes*, 2024, 12(4):660.
- [22] HOSA A, WOOD R. Order of diagenetic events controls evolution of porosity and permeability in carbonates[J]. *Sedimentology*, 2020, 67(6):3042-3054.
- [23] KORNEVA I, BASTESEN E, CORLETT H, et al. The effects of dolomitization on petrophysical properties and fracture distribution within rift-related carbonates (Hamman Faraun Fault Block, Suez Rift, Egypt)[J]. *Journal of Structural Geology*, 2018, 108(1):108-120.
- [24] 李相文. 富满油田致密灰岩断控储层地震预测方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022 (LI Xiangwen. Seismic prediction method of tight limestone fault controlled reservoir in Fuman oilfield [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2022 (in Chinese))
- [25] 李新林. 川南深层页岩气储层地应力测井评价方法研究[D]. 荆州: 长江大学, 2022 (LI Xinlin. Study on logging evaluation method of in-situ stress for deep shale gas reservoir in southern Sichuan [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2022 (in Chinese))
- [26] 宋传真, 马翠玉. 塔河油田奥陶系缝洞型油藏油水流动规律[J]. *岩性油气藏*, 2022, 34(4):150-158 (SONG Chuanzhen, MA Cuiyu. Oil-water flow law of ordovician fractured-vuggy reservoirs in Tahe Oilfield [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2022, 34(4):150-158 (in Chinese))
- [27] 郭红鑫, 程林松, 王鹏, 等. 碳酸盐岩油藏不同裂缝产状岩心水驱油实验及水驱规律[J]. *油气地质与采收率*, 2022, 29(6):105-112 (GUO Hongxin, CHENG Linsong, WANG Peng, et al. Water flooding experiment and law of carbonate reservoir cores with different fracture occurrences[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(6):105-112 (in Chinese))
- [28] 王子赫. 不同加载条件下岩石 Kaiser 效应方向独立性试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022 (WANG Zihe. Experimental investigation on direction independence of Kaiser effect on rock under different loading methods[D]. Changsha: Central South University, 2022 (in Chinese))
- [29] 黄滔, 刘岩, 何建华, 等. 川西孝泉—丰谷地区须二段深层致密砂岩储层地应力大小评价方法及其工程应用[J]. *中国地质*, 2024, 51(1):89-104 (HUANG Tao, LIU Yan, HE Jianhua, et al. Evaluation method and engineering

application of in-situ stress of deep tight sandstone reservoir in the second member of Xujiahe Formation in Xiaoquan-Fenggu area, western Sichuan[J]. *Geology in China*, 2024, 51(1):89-104 (in Chinese))

Experimental study on rock mechanical properties of deep carbonate reservoirs in the Fuman area of Tarim Basin

LIU Yongfu^{1,2,3}, ZHANG Chengze^{1,2,3}, YUAN Xiaoman^{1,2,3},
SUN Chong^{1,2,3}, LI Jing⁴, PEI Chenyang⁴, WU Mingyang⁴

(1. Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000, Xinjiang, China; 2. R&D Center for Ultra-Deep Complex Reservoir Exploration and Development, CNPC, Korla 841000, Xinjiang, China; 3. Engineering Research Center for Ultra-deep Complex Reservoir Exploration and Development, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Korla 841000, Xinjiang, China; 4. State Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China)

Abstract: Rock physico-mechanical parameters, such as porosity, permeability, and elastic modulus of fractured-vuggy carbonate reservoirs, are key factors affecting oil and gas extraction efficiency. Consequently, this paper examined the Ordovician fractured-vuggy type carbonate reservoir in the Fuman area of the Tarim Basin, and systematically studied the mechanical parameters of the reservoir rock through uniaxial and triaxial compression experiments, acoustic emission experiments, and stress sensitivity experiments to elucidate the stress state of the reservoir under in-situ conditions. The results indicate that: 1) as the confining pressure increases, the compressive strength and elastic modulus of the rock progressively increase, transitioning the rock from brittle to plastic and exhibiting strain hardening characteristics. 2) the permeability of the carbonate reservoir gradually decreases with increasing confining pressure, with significant changes observed below 30 MPa. 3) the maximum horizontal principal stress in the study area is 186.14 MPa, the minimum horizontal principal stress is 150.82 MPa, and the vertical stress is 172.89 MPa, reflecting the stress characteristics of a strike-slip fault. The results of this study can provide technical support for the efficient exploration and development of fractured-vuggy carbonate reservoirs.

Keywords: rock mechanics; Tarim Basin; fractured-vuggy; deep carbonate reservoirs