

超临界二氧化碳浸泡对页岩力学性质影响的实验

倪红坚¹, 郭 兴², 丁 璐¹, 白 冰¹, 孙 晓², 杨全枝²

(1. 中国石油大学(华东)非常规油气与新能源研究院, 山东青岛 266580;

2. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西西安 710075)

摘要:超临界二氧化碳在页岩油气等非常规油气藏的勘探开发中极具潜力,通过室内二氧化碳浸泡实验系统,对不同压力和温度浸泡下页岩岩心力学性质变化进行实验研究和机制阐释。结果表明:浸泡初期岩心膨胀,随后有所收缩,最后趋于平缓;浸泡后页岩弹性模量和泊松比均增大;在临界压力附近,力学性质发生急剧变化,压力继续增大,力学性质变化平缓,弹性模量和泊松比平均增幅分别为 43.4% 和 36.6%;随着温度增加,弹性模量和泊松比逐渐增大,最大增幅分别为 138.4% 和 24.7%。页岩力学性质变化对 CO₂ 压力变化不敏感,而 CO₂ 温度影响较为明显和复杂,对力学参数随温度变化给出了定量化描述,为超临界二氧化碳勘探开发页岩气在岩石力学等方面提供了一定数据支撑和理论依据。

关键词:超临界二氧化碳;页岩;二氧化碳浸泡;力学性质;岩石力学

中图分类号:TU 45 **文献标志码:**A

引用格式:倪红坚,郭兴,丁璐,等.超临界二氧化碳浸泡对页岩力学性质影响的实验[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(2):77-84.

NI Hongjian, GUO Xing, DING Lu, et al. Experiment on mechanical properties of shale soaked with supercritical carbon dioxide[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(2): 77-84.

Experiment on mechanical properties of shale soaked with supercritical carbon dioxide

NI Hongjian¹, GUO Xing², DING Lu¹, BAI Bing¹, SUN Xiao², YANG Quanzhi²

(1. Research Institute of Unconventional Oil & Gas and Renewable Energy in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Company Limited, Xi'an 710075, China)

Abstract: Supercritical carbon dioxide as fracturing or displacement fluid has great potential in exploration and development of unconventional reservoirs such as shale oil and gas. In this study, the mechanical properties of shale rocks soaked with carbon dioxide soaking were investigated via indoor experiments under different pressure and temperature conditions. The experimental results show that the shale rock core expanded in the beginning of the soaking, then contracted, and finally leveled off. Its elastic modulus and Poisson's ratio increased after the soaking. At near the critical pressure of CO₂, the mechanical property of the core changes sharply, and then it becomes stable as pressure further increases. The average increments of the elastic modulus and the Poisson's ratio are of 43.4% and 36.6%, respectively. With the increase of temperature, the elastic modulus and Poisson's ratio increases gradually, and the maximum increase for the two parameters is of 138.4% and 24.7% respectively. The change of the mechanical properties of shale is not very sensitive to CO₂ pressure, but the influence

收稿日期:2018-11-15

基金项目:“973”国家重大专项(2014CB239202);山东省自然科学基金项目(ZR2018BEE002)

作者简介:倪红坚(1972-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为超临界二氧化碳钻井基础理论、流体力学和钻井工具。E-mail: 9039790@qq.com。

通信作者:郭兴(1991-),男,助理工程师,硕士,研究方向为油气井力学、信息与控制以及二氧化碳压裂和钻井技术。E-mail:1174508734@qq.com。

of temperature is obvious and complex. A quantitative description of the mechanical parameters of shale rocks soaking in CO_2 under high temperature and pressure conditions was given, which can provide guidelines for the application of supercritical carbon dioxide in shale gas exploitation in terms of rock mechanics.

Keywords: supercritical carbon dioxide; shale; carbon dioxide soaking; mechanical properties; rock mechanics

世界页岩气资源总量约为 $456 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 中国页岩气资源极其丰富, 资源量约为常规天然气量的两倍, 对页岩气进行高效勘探开发对于保障能源安全具有十分重要的意义^[1-4]。页岩气藏低孔低渗, 黏土和泥质含量高, 易发生水化膨胀而堵塞孔隙喉道, 其特殊性决定了现阶段高效开发十分困难^[5]。二氧化碳由于其无毒、不爆炸、廉价和溶解有机物等特点而应用广泛^[6]。以页岩气为代表的非常规能源发展以及二氧化碳埋存作为减缓温室气体增加已经引起能源企业、环境和公共组织以及相关学者和工程师的重视和研究^[7]。超临界二氧化碳具有高密度低黏度, 对储层无伤害、高效射流破岩、降低原油黏度和置换页岩气等优点, 因而在开采非常规页岩油气藏方面应用前景十分广阔^[8-11]。研究表明, 超临界二氧化碳射流破岩效率显著高于水射流, 能获得更高的钻井速度^[12-13]。二氧化碳井筒流动及控制、高效破岩和井壁稳定等基础问题的研究是超临界二

氧化碳勘探开发页岩气技术发展的关键和难点^[14-16]。超临界二氧化碳接触下页岩力学性质是用其进行钻完井、压裂等设计的基础数据。笔者对不同压力和温度浸泡下页岩力学性质变化进行实验研究和机制阐释, 以期促进相关开采工艺与技术发展。

1 实验

1.1 实验设备

二氧化碳浸泡实验系统示意图如图1所示, 主要包括计算机数据记录与控制系统、超临界二氧化碳喷射致裂地层实验系统、岩心浸泡测试装置、TST3822E 静态电阻应变测试仪、二氧化碳加热装置、增压系统(全无油静音空压机、液体增压泵)、二氧化碳气瓶、二氧化碳回收装置、高压管线等, 另外岩心制取还需要的设备为岩石取芯机(Z1Z-200 工程钻机)、双端面磨平机。

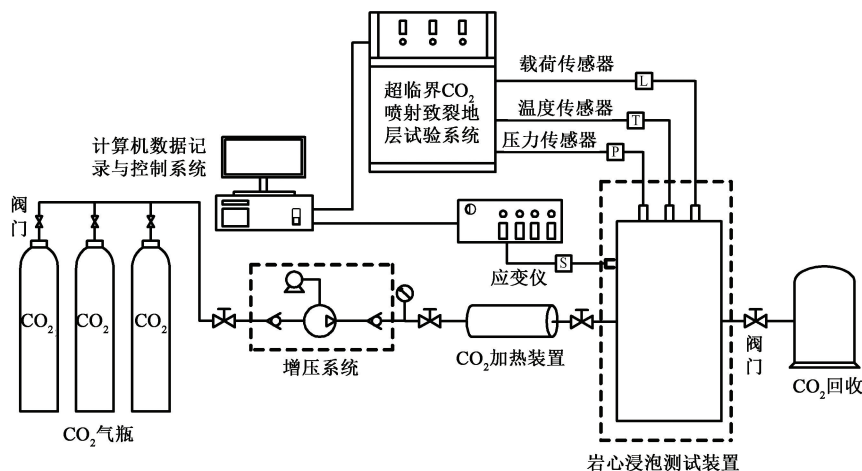


图1 二氧化碳浸泡实验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of CO_2 soaking test system

岩心浸泡测试装置是实验的最主要仪器, 实验装置适用于 2.5 cm 的标准岩心, 最高可测岩石抗压强度 400 MPa。岩心夹持器耐压 80 MPa, 耐温 300 $^{\circ}\text{C}$ 。内部与温度传感器以及压力传感器相连, 在超临界二氧化碳喷射致裂地层实验系统面板上显示和控制温度、压力以及载荷。载荷传感器可测岩心轴向受压载荷, 最高可测载荷 20 t。可以完成岩心在超临界二氧化碳条件下的浸泡实验以及岩石破碎实验, 测试装置如图2所示。

由于实验量较大且地下岩心取芯困难, 因此本次实验所用两批页岩均取自四川宜宾长宁地区。由于所取页岩位置和深度有所差异, 其物理化学性质有较大差异。为了能够从微观角度为超临界二氧化碳对页岩力学性质影响的机制解释提供一定的依据, 对页岩样品矿物成分进行分析。页岩呈灰黑色, 具有比较明显的平行层理。首先将页岩样品进行研磨, 呈粉末状, 制成测试样品如图3所示, 然后对样品用X射线衍射仪进行矿物成分分析。

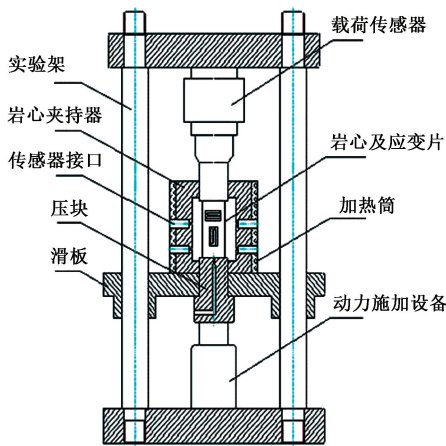


图 2 岩心浸泡测试装置

Fig. 2 Core immersion test device

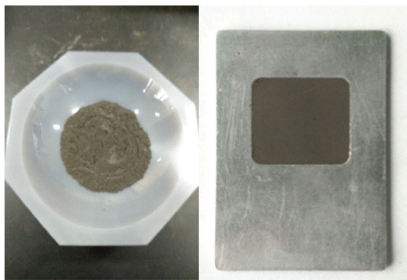


图 3 页岩粉末和测试样品

Fig. 3 Shale powder and test sample

1.2 实验过程

制取岩心的标准性对岩石力学实验有很大的影响,因此需要大量取芯,进行精细的岩心加工,岩心端面的平行度决定了岩石力学单轴压缩实验的准确性,选取符合标准的岩心作为实验样品,本次实验取芯角度均为岩心轴向垂直页岩层理方向。根据国际岩石力学学会的推荐,设计岩心直径为 25 mm,高径比为 2 : 1,如图 4 所示。

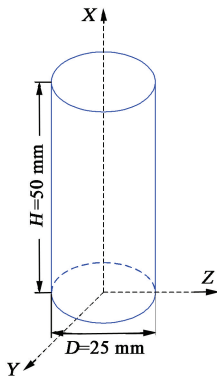


图 4 岩心设计

Fig. 4 Sample design

实验在测量岩心轴向和径向应变时采用电阻传感器,所用的电阻应变片为横纵应变一体片,阻值为

120 Ω 。一般使用 502 胶水进行应变片粘贴,涂胶量要严格控制,防止出现过多导致粘结力降低,而过少又导致岩心与应变片之间粘结不牢脱落或者应变变化传递误差大等^[17]。在贴完应变片之后涂上一层硅胶,目的是减少外界因素对敏感应变片的影响以及防止出现短路的现象,实验岩心成品如图 5 所示。

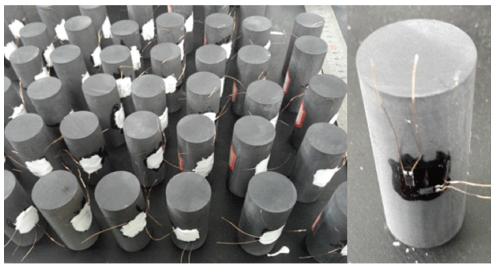


图 5 岩心成品

Fig. 5 Core finished product

岩心浸泡实验基本流程:①通过软件或面板调节浸泡容器温度;②岩心应变片引出线和应变仪的导线进行连接和线路检测;③将制取并加工完成的岩心成品放入岩心夹持器并进行应变调零;④浸泡容器内通入一定温压条件下的超临界二氧化碳;⑤进行预定时间的浸泡并对浸泡过程中的应变进行采集;⑥浸泡结束后,应变清零,进行页岩的单轴压缩实验,并同时采集页岩的应变和载荷数据;⑦将岩心夹持器里面的二氧化碳排放至回收装置,取出所压碎的岩心,清理实验仪器,对实验后的岩心进行记录和存储;⑧将不同实验条件下浸泡后并做单轴压缩实验后的岩心碎屑进行分类整理。

考虑到压力和温度对胶黏剂和岩心本身的影响,设置了应变对比实验,采用控制变量法,应变对比实验为将页岩岩心浸泡在一定温度和压力条件下的超临界二氧化碳中,但与浸泡实验不同的是连续进行不同条件下的浸泡实验,每隔 1 h 改变温度(或者压力)条件,多次读取应变数据取平均值得到不同温度的应变对比数据,探寻不同浸泡温度和压力对页岩岩心应变变化的影响。

1.3 实验方案

(1)超临界二氧化碳浸泡岩心过程中应变变化实验。在一定温度和压力条件下,对岩心在二氧化碳浸泡过程中随时间变化的横纵应变变化进行测试。

(2)超临界二氧化碳浸泡应变对比实验。分别设置不同压力和温度条件下的应变对比实验,测量在连续改变实验条件下的岩心横纵应变变化,每个实验点浸泡一定时间,直至应变基本达到稳定,记录数据之后改变条件继续浸泡,每隔一定时间进行记录并改变条件,连续进行实验并记录,采用多次测量

(3~5次)取平均值的方法。

(3)超临界二氧化碳浸泡对页岩力学参数影响的实验。在不同CO₂压力和温度条件下对页岩岩心进行浸泡,然后在浸泡环境中进行单轴压缩实验,记录实验过程中的应力、应变和载荷等数据并进行处理,剔除奇异数据点,每组实验取3组数据结果,采用求平均值的方法得到浸泡之后页岩岩心弹性模量和泊松比参数结果。

2 实验结果

2.1 岩石力学参数计算方法

根据国际岩石力学与工程学会的推荐,进行弹性模量和泊松比的计算。

弹性模量体现了材料的刚性,值越大代表材料越能抵抗外界拉压造成的形变。弹性模量定义为弹性变形范围内应力-应变曲线的斜率,表达式为

$$\lambda = \frac{\text{det } \sigma_{\text{stress}}}{\varepsilon_{\text{strain}}} \quad (1)$$

式中, λ 为应力-应变曲线斜率,即弹性模量; σ_{stress} 为正向应力值; $\varepsilon_{\text{strain}}$ 为正向应变值。

泊松比等于横向膨胀量除以轴向压缩量。对于各向同性弹性材料,泊松比的取值一般为-1~0.5。对于大多数的材料,比如岩石,取值在0~0.5范围内。假设材料沿轴向拉伸或者压缩(图4中的X轴),则

$$\nu = \frac{d\varepsilon_{\text{trans}}}{d\varepsilon_{\text{axial}}} = -\frac{d\varepsilon_y}{d\varepsilon_x} = -\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_x} \quad (2)$$

式中, ν 为泊松比; $\varepsilon_{\text{trans}}$ 为横向应变(轴向压缩为正,轴向拉伸为负); $\varepsilon_{\text{axial}}$ 为轴向应变(轴向拉伸为正,轴向压缩为负)。

2.2 岩心浸泡过程应变变化

二氧化碳浸泡条件为温度60℃和压力8MPa。将页岩岩心成品放入岩心夹持器,注入超临界二氧化碳并使其达到浸泡条件,岩心在二氧化碳环境中浸泡时间为120min,浸泡开始后连续记录浸泡期间岩心的应变变化。每隔5min取一组应变数据点,采用多次读数取平均值的方法,得到如图6所示的应变变化。

由图6可以发现,浸泡开始阶段应变急剧增大,到达最高点后开始缓慢减小,约1h之后达到相对平衡,基本不再变化。由于超临界二氧化碳密度大但黏度低,表面张力几乎为0,很容易进入页岩纳米级的微孔隙中,由于CO₂吸附引起的微孔隙内额外压力也称为溶剂化力^[18],导致页岩发生膨胀。岩心具有平行于两端面的层理和天然微裂缝,在二氧化

碳气体压力作用下层理裂缝会发生一定的扩展,因此在岩心纵向上的应变会明显大于横向上的应变。Özgen等^[19-20]认为煤中的黏土组分对CO₂吸附速率比有机组分更快,CO₂会使有机组分发生膨胀,而使黏土组分发生收缩^[21-22]。从图6中还可看出,横、纵应变在达到最大值后降幅较大,说明黏土组分收缩的影响很大,这是一个相对缓慢的过程。

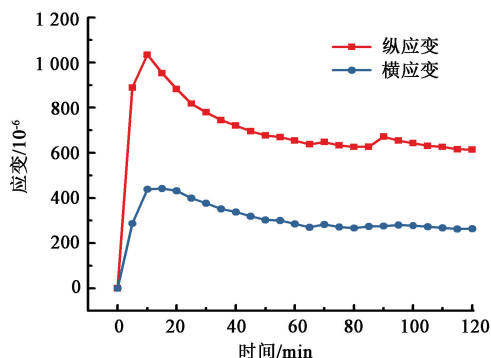


图6 浸泡过程中的应变变化

Fig. 6 Strain changes in soaking procedure

2.3 浸泡压力对页岩力学性质的影响

首先将本批灰黑色的层理性页岩样品进行研磨,呈粉末状,制成测试样品,对样品用X射线衍射仪进行矿物成分分析,得到其主要矿物成分,其中石英占50%,方解石占19%,白云石占18%,黏土矿物含量占10%,斜长石和黄铁矿含量较少,分别为2%和1%。本批岩心黏土矿物含量为10%,含量较高。

2.3.1 应变对比结果

首先以不锈钢(2Cr13)标准岩心,在35℃浸泡温度下,测量不同压力下的横、纵应变,每个实验点浸泡60min,之后增大压力继续浸泡,每隔60min进行记录并增大压力,连续实验并记录,得到不锈钢岩心的横、纵应变数据,即胶黏剂随压力变化的应变变化,如图7所示。

再用页岩岩心在相同浸泡温度下,测其在不同浸泡压力下的应变变化,对数据进行记录和处理,页岩岩心随浸泡压力变化的应变变化减去胶黏剂随浸泡压力变化的应变变化,即消除胶黏剂的影响得到岩心的真实应变如图8所示。

由图8可以看出,开始较小压力浸泡下,岩心横纵向都处于膨胀状态。主要由于CO₂进入纳米级的微孔隙中引起的溶剂化力^[23]导致岩心膨胀,纵应变较大,主要由于岩心存在平行于端面的层理和天然裂缝,在气体压力下引起的扩展作用导致。随着压力增大和浸泡进行,横纵应变均减小,尤其在临界压力(7.38MPa)附近,急剧减小,这与CO₂由气态

转变为超临界状态,流体性质发生突变有关,此时收缩反应占据主要影响。纵向降幅更大,说明天然裂缝和层理与 CO₂ 接触面积更大,收缩反应更为剧烈。随着压力和时间增加,尤其进入超临界状态之后,CO₂ 可以在较低的压力下达到饱和,因此增大压力并不能起到明显的促进作用。

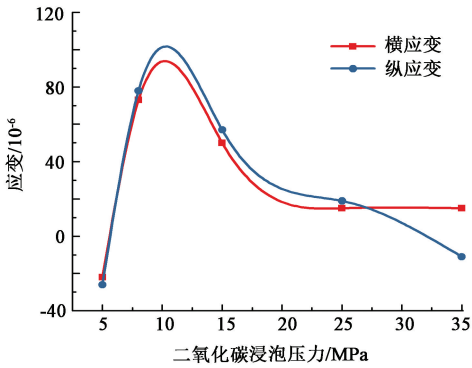


图 7 35 °C 条件下不锈钢岩心应变变化
Fig.7 Strains of stainless steel core at 35 °C

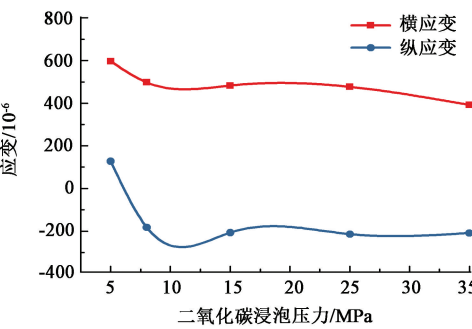


图 8 35 °C 条件下页岩岩心应变变化
Fig.8 Strains of shale core at 35 °C

2.3.2 力学参数结果

以 60 °C、浸泡 120 min 的实验条件,设定对比实验(即大气压)和不同压力下的浸泡实验,浸泡之后进行单轴压缩实验,将记录的数据进行处理,分别求弹性模量和泊松比,结果如图 9 所示。

由图 9 可以看出,二氧化碳浸泡使页岩弹性模量和泊松比均增大,弹性模量和泊松比平均增幅分别为 43.4% 和 36.6%。在超临界二氧化碳临界点(临界压力 7.38 MPa,临界温度 31.26 °C)附近都发生明显的波动,这与二氧化碳在临界压力前后其性质变化有关,临界压力之后,整体变化趋势平稳。

浸泡压力对天然裂缝和微孔隙造成的扩展作用、黏土组分的收缩反应和二氧化碳吸附造成的溶剂化力等综合作用对页岩结构影响复杂;Radlinski 等^[22]认为煤在 CO₂ 浸泡下的弹性模量变化与黏土基质收缩有关。黏土组分相比于其他组分更软^[23],能够更

好地对压力进行缓冲,收缩后使同样压力载荷下产生的应变变小,即弹性模量增大;平行于端面的天然裂缝和层理性使岩心纵向上与 CO₂ 有更大接触面积,其收缩反应造成的收缩远大于横向,因此同等载荷作用下,岩石达到破碎时纵向压缩量会相对更小,导致泊松比增大;但随着压力不断增大,力学性质变化平缓,主要由于二氧化碳达到超临界后由于其特殊性质在较低的压力下在岩心内部达到饱和,即使压力增大,其对页岩力学性质的影响变化平缓。

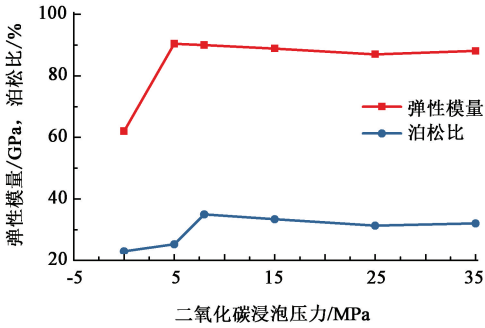


图 9 不同浸泡压力下的岩心力学性质变化
Fig.9 Variation of mechanical property of shale with soaking pressure

在一定温度条件下,并不是压力越高二氧化碳对井周页岩力学性质的影响越大,当到达超临界状态之后二氧化碳压力的影响趋于稳定。

2.4 浸泡温度对页岩力学性质的影响

本批灰黑色的层理性页岩,其主要矿物成分石英占 59%,比之前的岩心石英含量增加了 9%;方解石占 16%,比之前的岩心方解石含量减少了 3%;白云石占 15%,比之前的岩心白云石含量减少了 3%;黏土矿物含量占 8%,比之前的岩心黏土含量减少了 2%;斜长石和黄铁矿含量较少,都为 1%,其中斜长石相比之前岩心减少了 1%。不难看出,本批岩心黏土矿物整体含量依旧较高。

2.4.1 应变对比实验

首先以不锈钢(2Cr13)标准岩心,在大气压条件下,测量得到不同温度下不锈钢岩心的原始应变数据,采用多次读数取平均值的方法,再减去不锈钢在不同温度下的理论膨胀应变,得到温度对胶黏剂的影响如图 10 所示。

同样实验条件下,用页岩岩心代替不锈钢岩心,测得不同温度下的页岩岩心应变,减去胶黏剂随温度变化的应变,即消去温度对胶黏剂影响,得到页岩本身在不同温度下的应变变化,结果如图 11 所示。可以看出,温度增加,岩心膨胀,与常规认识一致,说明了应变对比实验方法的正确性。

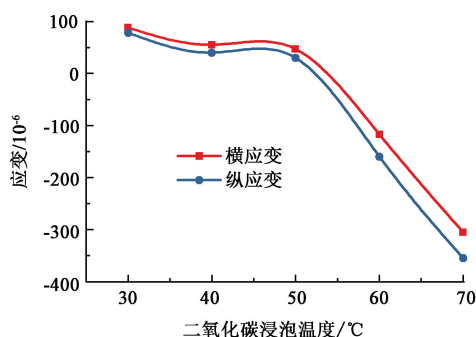


图 10 胶黏剂应变随温度变化

Fig. 10 Variation of adhesive strain with temperature

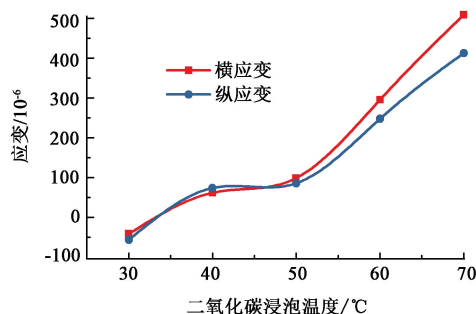


图 11 页岩岩心应变随温度变化

Fig. 11 Variation of shale core strain with temperature

在一定二氧化碳浸泡压力(30 MPa)下,测量不同浸泡温度下页岩岩心应变,每个实验点浸泡 60 min,之后增大温度继续浸泡,每隔 60 min 进行记录并增大温度,连续进行实验并记录,减去胶黏剂随温度变化的应变和页岩本身随温度变化的应变,即消除温度对胶黏剂和页岩本身影响,得到二氧化碳浸泡温度对页岩岩心应变的影响,结果如图 12 所示。

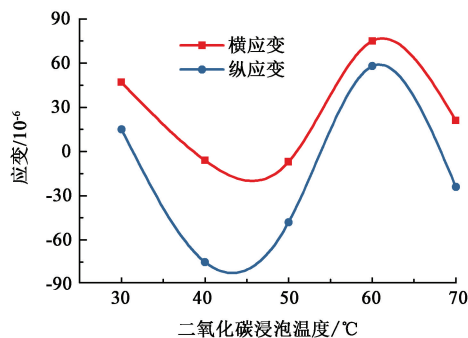


图 12 30 MPa 条件下页岩岩心应变随浸泡温度变化

Fig. 12 Variation of shale core strain with soaking temperature at 30 MPa

从图 12 可以看出,在较低二氧化碳浸泡温度下,页岩岩心膨胀,主要由于岩心微孔隙中二氧化碳吸附引起的溶剂化力以及天然裂缝中二氧化碳吸附引起的扩展作用导致;随着浸泡时间和温度增加,岩心发生收缩,因为较低温度下超临界二氧化碳可以萃取结合水,使页岩黏土组分失去结合水而收缩导

致,此外黏土组分的收缩反应是岩心收缩的另一个主要原因,并且随着浸泡时间增加,收缩反应逐渐减弱;当温度继续升高之后,岩心又开始慢慢发生膨胀,主要由于高温使 CO_2 浓度更小,并且促进了二氧化碳解吸并抑制了其吸附^[24-25],此时由于浸泡压力产生的扩展作用变大,造成岩心膨胀。不难说明二氧化碳温度对页岩性质的影响是比较复杂的。应变结果和分析为超临界二氧化碳浸泡压力对页岩力学性质的实验结果分析提供了机制上的有力支撑。

2.4.2 力学参数结果

本次实验以浸泡压力 20 MPa、浸泡 120 min 为实验条件,设定对比实验(即未浸泡)和不同温度的浸泡实验,浸泡一定时间之后进行单轴压缩实验,并进行数据处理,得到页岩的弹性模量和泊松比随二氧化碳浸泡温度变化规律,如图 13 所示。

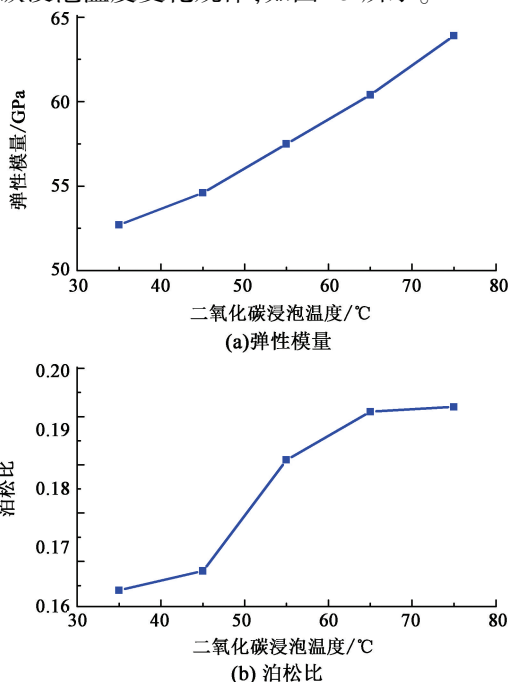


图 13 页岩岩心弹性模量和泊松比随浸泡温度的变化

Fig. 13 Variation of elastic modulus and Poisson's ratio of shale core with soaking pressure

未浸泡岩心弹性模量为 26.8 GPa,超临界二氧化碳浸泡之后岩心弹性模量明显增大,并且随着浸泡温度的增加,弹性模量不断增大,最大增幅为 138.4%。Radlinski 等^[22]认为煤在二氧化碳浸泡下的弹性模量变化与黏土基质收缩常数有关,页岩矿物成分分析显示岩心含有较高的黏土矿物,也就是说浸泡后弹性模量增加是由黏土组分吸附二氧化碳后发生的收缩反应引起,黏土组分比方解石等更软,能够更好地对压力进行缓冲,收缩后使同样压力载荷下产生的应变变小,即弹性模量增大。

未浸泡岩心泊松比为 0.162,超临界二氧化碳浸泡之后岩心泊松比明显增大,并且随着浸泡温度的增加,泊松比不断增大,但增幅先增大后减小,最大增幅为 24.7%。平行于端面的天然裂缝和层理在浸泡过程中由于气体压力作用导致扩展,使浸泡初期纵向上膨胀,但正是由于其相比横向上与二氧化碳更大的接触面积,其收缩反应造成的收缩远大于横向,因此会使纵向上的收缩更大,当浸泡之后进行单轴压缩实验时,同等载荷作用下,纵向应变压缩量会相对更小,导致泊松比增大。

2.4.3 力学参数拟合

在一定压力条件下,温度越高,二氧化碳对页岩力学性质影响越大,即超临界二氧化碳温度变化对页岩地层井周岩石性质影响是比较复杂比较明显的,需要足够重视,有必要对参数随温度变化进行定量描述,以便于进行超临界二氧化碳钻完井和压裂的相关理论计算和研究。

通过 L-M method 对实验结果进行非线性拟合,首先对弹性模量随温度变化关系进行一阶指数增长拟合,然后对泊松比随温度变化关系进行 Boltzmann 函数 S 拟合,拟合曲线如图 14 所示。可以看出其误差系数接近 1,说明拟合度良好。

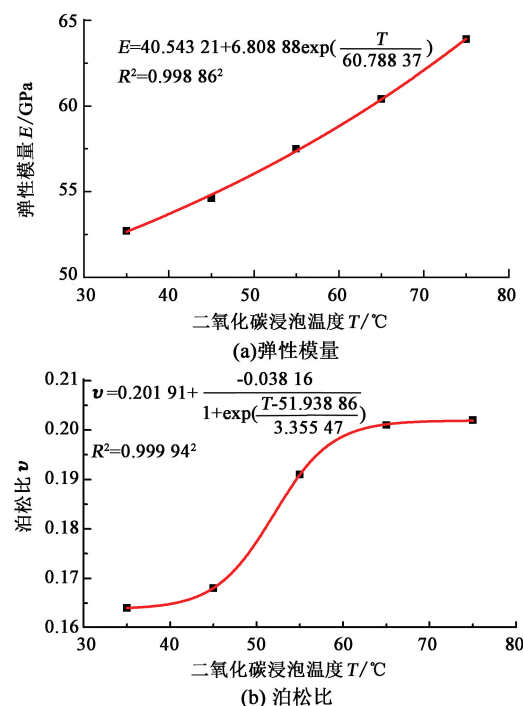


图 14 页岩岩心弹性模量和泊松比随二氧化碳温度变化拟合曲线

Fig.14 Fitting curves of variation of modulus of elasticity and Poisson's ratio of shale core with carbon dioxide temperature

3 结 论

- (1)在岩心浸泡过程中,浸泡初期应变急剧增大,到达最高点后缓慢减小,约 1 h 后达到相对平衡,2 h 后基本不再变化,纵向应变变化大于横向。
- (2)在压力应变对比实验中,在较小浸泡压力下岩心发生膨胀,随着浸泡进行和增压,应变在临界压力附近急剧减小,继续增压后应变变化平缓。
- (3)在温度应变对比实验中,随着浸泡进行和升温,岩心先膨胀,后有所收缩,最后恢复膨胀。
- (4)二氧化碳浸泡后页岩弹性模量和泊松比均增大,平均增幅分别为 43.4% 和 36.6%;在临界压力附近力学性质急剧变化,压力继续增大,力学性质变化平缓。
- (5)二氧化碳浸泡后页岩弹性模量和泊松比均增大;随着浸泡温度增加,弹性模量和泊松比逐渐增大,最大增幅分别为 138.4% 和 24.7%。

参考文献:

[1] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4):475-499.

[2] 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[J]. 石油学报,2012,33(增1):107-114. DONG Dazhong, ZOU Caineng, YANG Hua, et al. Progress and prospects of shale gas exploration and development in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(sup1):107-114.

[3] 贾承造,郑民,张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发,2012,39(2):129-136. JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012,39(2):129-136.

[4] DAMMEL J A, BIELICKI J M, POLLAK M F, et al. A tale of two technologies: hydraulic fracturing and geologic carbon sequestration[J]. Environmental Science & Technology, 2011,45(12):5075-5076.

[5] 崔思华,班凡生,袁光杰. 页岩气钻完井技术现状及难点分析[J]. 天然气工业,2011,31(4):72-75. CUI Sihua, BAN Fansheng, YUAN Guangjie. Status and difficulties analysis of shale gas drilling and completion technology[J]. Natural Gas Industry, 2011,31(4):72-75.

[6] FRIEDRICH J P, PRYDE E H. Supercritical CO₂ extrac-

- tion of lipid-bearing materials and characterization of the products[J]. *Am Oil Chemist's Soc*, 1984, 61(2): 223-228.
- [7] LEE J Y, WEINGARTEN M, GE S. Induced seismicity: the potential hazard from shale gas development and CO₂, geologic storage[J]. *Geosciences Journal*, 2016, 20(1): 137-148.
- [8] 李新景, 胡素云, 程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(4): 392-400.
- LI Xinjing, HU Suyun, CHENG Keming. Suggestions from the development of fractured shale gas in North America [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(4): 392-400.
- [9] FAISAL Aladwani. Mechanistic modeling of an underbalanced drilling operation utilizing supercritical carbon dioxide [D]. Baton Rouge: Louisiana State University, 2007.
- [10] FAISAL A, JULIUS P, RICHARD H. Modeling of an underbalanced-drilling operation using supercritical carbon dioxide[J]. *SPE Drilling and Completion*, 2009, 24(4): 599-610.
- [11] FERNØ M A, STEINSBØ M, ØYVIND Eide, et al. Parametric study of oil recovery during CO₂ injections in fractured chalk: influence of fracture permeability, diffusion length and water saturation[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2015, 27: 1063-1073.
- [12] GUPTA A P, GUPTA A, LANGLINAIS J. Feasibility of supercritical carbon dioxide as a drilling fluid for deep underbalanced drilling operation [R]. *SPE 96992*, 2005.
- [13] KOLLE J J. Coiled-tubing drilling with supercritical carbon dioxide[R]. *SPE 65534*, 2000.
- [14] 王瑞和, 倪红坚. 二氧化碳连续管井筒流动传热规律研究[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(5): 65-70.
- WANG Ruihe, NI Hongjian. Wellbore heat transfer law of carbon dioxide coiled tubing drilling[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, 37(5): 65-70.
- [15] 宋维强, 王瑞和, 倪红坚, 等. 水平井段超临界 CO₂ 携岩数值模拟[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(2): 63-68.
- SONG Weiqiang, WANG Ruihe, NI Hongjian, et al. Numerical simulation of cuttings transport efficiency of supercritical carbon dioxide in horizontal section [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2015, 39(2): 63-68.
- [16] DING L, NI H, LI M, et al. Wellbore collapse pressure analysis under supercritical carbon dioxide drilling condition[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2018, 161: 458-467.
- [17] 董伟. 电阻应变片粘贴技巧[J]. *山西建筑*, 2011, 37(28): 46-48.
- DONG Wei. Sticking technology of resistance strain gauge[J]. *Shanxi Architecture*, 2011, 37(28): 46-48.
- [18] 杨侃. 岩石微孔隙中气体吸附、链状分子运移的计算模拟及其油气地质意义[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- YANG Kan. Simulations of gas adsorption and chain-molecules transportation in microscaled pore of rocks and its preliminary application in petroleum geology [D]. Nanjing: Nanjing University, 2011.
- [19] ÖZGEN K C, MITCHELL G D. Behavior and effect of different coal microlithotypes during gas transport for carbon dioxide sequestration into coal seams[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2008, 74: 41-52.
- [20] ÖZGEN K C. Heterogeneous sorption and swelling in a confined and stressed coal during CO₂ injection[J]. *Energy Fuels*, 2003, 17: 1595-1608.
- [21] GOODMAN A L, FAVORS R N, HILL M M, et al. Structure changes in Pittsburgh No. 8 coal caused by sorption of CO₂ gas [J]. *Energy and Fuels*, 2005, 19(4): 1759-1960.
- [22] RADLINSKI A P, BUSBRIDGE T L, GRAY E M A, et al. Small angle X-ray scattering mapping and kinetics study of sub-critical CO₂ sorption by two Australian coals [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2009, 77(1/2): 80-89.
- [23] 刁海燕. 泥页岩储层岩石力学特性及脆性评价[J]. *岩石学报*, 2013, 29(9): 3301-3306.
- DIAO Haiyan. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale reservoir [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(9): 3301-3306.
- [24] 徐冬, 张军, 李刚. CO₂ 和 H₂O 在活性炭上的吸附平衡和吸附动力学研究[J]. *无机材料学报*, 2012, 27(2): 142-143.
- XU Dong, ZHANG Jun, LI Gang. Adsorption equilibrium and kinetics of CO₂ and H₂O on activated carbon [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2012, 27(2): 142-143.
- [25] 孙宝江, 张彦龙, 杜庆杰, 等. CO₂ 在页岩中的吸附解吸性能评价[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(5): 96-99.
- SUN Baojiang, ZHANG Yanlong, DU Qingjie, et al. Property evaluation of CO₂ adsorption and desorption on shale [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, 37(5): 96-99.