

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.221>



超临界二氧化碳喷射破碎页岩试验

杜玉昆^{1,2}, 庞飞³, 陈科⁴, 林拓⁴, 陈晓红^{5*}, 王瑞和^{1,2}

1. 中国石油大学非常规油气开发教育部重点实验室, 山东青岛 266580
2. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580
3. 中国地质调查局, 北京 100083
4. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083
5. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

摘要: 高效开发页岩气有利于满足日益增长的能源需求, 但页岩储层的开发极为困难, 超临界二氧化碳作为一种新型页岩气钻采流体, 可以有效保护页岩储层, 置换吸附提高页岩气采收率, 并同时实现二氧化碳的埋存. 研发了一套超临界二氧化碳喷射开发页岩气装置, 并开展了超临界二氧化碳喷射破碎页岩室内试验. 发现超临界二氧化碳射流喷射后岩石强度降低, 且射流压力和温度越高, 降低幅度越大; 本实验条件下超临界二氧化碳射流破岩体积是水射流的 1.73~6.51 倍, 破岩优势显著, 井底环境温度对超临界二氧化碳射流的破岩性能有较大影响. 表明超临界二氧化碳可显著提高页岩气钻井速度, 有望形成一种高效的页岩气开发方法, 应用潜力广阔.

关键词: 页岩气; 超临界二氧化碳; 喷射钻井; 采收率; 油气地质.

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2019)11-3749-08

收稿日期: 2019-06-17

Experiment of Breaking Shale Using Supercritical Carbon Dioxide Jet

Du Yukun^{1,2}, Pang Fei³, Chen Ke⁴, Lin Tuo⁴, Chen Xiaohong^{5*}, Wang Ruihe^{1,2}

1. Key Laboratory of Unconventional Oil & Gas Development, Ministry of Education, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China
2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China
3. China Geological Survey, Beijing 100083, China
4. Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China
5. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

Abstract: The efficient development of shale gas with abundant resources is conducive to meeting the growing energy demand. However, it is very difficult to develop shale reservoirs because of their low porosity and low permeability in China. Supercritical carbon dioxide is a new kind of drilling and production fluid for shale gas which can effectively protect shale reservoirs, enhance shale gas recovery by displacement adsorption, and realize the geological storage of carbon dioxide. A set of device for developing shale gas by using supercritical carbon dioxide is developed, and the laboratory tests were carried out. Tests show that the rock strength decreases after the injection of supercritical carbon dioxide, and the higher the injection pressure and temperature, the greater the decreasing range. Under the experimental conditions, the rock-breaking volume of supercritical carbon dioxide jet is 1.73–6.51 times that of water jet, and the rock-breaking advantage is remarkable. The bottom ambient temperature has great

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(No.18CX02072A); 国家自然科学基金项目(No.51404287).

作者简介: 杜玉昆(1983—), 男, 博士, 硕士生导师, 研究方向为非常规能源钻探开发和高压水射流理论与应用. ORCID: 0000-0001-5356-9186. E-mail: duyukun@upc.edu.cn

*通讯作者: 陈晓红, E-mail: 123456789cxh@163.com

引用格式: 杜玉昆, 庞飞, 陈科, 等, 2019. 超临界二氧化碳喷射破碎页岩试验. 地球科学, 44(11):3749–3756.

influence on rock-breaking performance of supercritical carbon dioxide jet. It shows that the supercritical carbon dioxide can significantly improve the drilling speed of shale gas, and is expected to form an efficient shale gas development method with broad application potential.

Key words: shale gas; supercritical carbon dioxide; jet drilling; recovery; petroleum geology.

0 引言

作为一种主要的接替能源,世界范围内页岩气储量巨大,广泛分布于北美、中亚和中国等地区.但由于页岩气储层普遍存在着特低孔低渗的特征(孔隙度一般为 4%~6%,渗透率小于 $0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),并且储层中页岩气主要以吸附态存在于岩石颗粒和有机质表面(翟光明, 2008; 陈更生等, 2009),导致页岩气的开发难度大,采收率较低,因此亟需开展新型高效的页岩气开发技术研究.

超临界二氧化碳既具有接近气体的低粘度和易扩散性,也具有接近液体的高密度和溶解性,渗透和传递性能强,在驱替页岩气的过程中可通过竞争吸附的方式有效置换储层中的页岩气,并同时实现二氧化碳的埋存(徐同台等, 2007; 王在明, 2008; 王进, 2019).利用超临界二氧化碳流体的特殊物理化学性质,将其作为破岩钻井和压裂流体,可以降低页岩强度和页岩层起裂压力,提高破岩钻井速度和强化储层压裂效果,应用潜力巨大.为此,本文通过建立超临界二氧化碳喷射开发页岩气装置,开展超临界二氧化碳喷射后岩石强度变化试验和破碎性能试验,为超临界二氧化碳在页岩气藏开发过程中的应用提供依据.

1 页岩气勘探开发现状

美国是最早开发页岩气的国家,自 20 世纪 90 年代以来,针对页岩气储层的特点开发了页岩气储层评价技术、射孔优化技术、压裂技术和水平井技术,率先实现了页岩气藏的商业开发(Montgomery *et al.*, 2005, 2006; Roche, 2006).

继美国之后,加拿大选择西部沉积盆地上白垩统 Wilrich 组及其同时代地层、侏罗系 Nordegg/Fernie 组、三叠系 Doig/Doig Phosphate/Montney 组、Exshaw/Bakken 组和泥盆系 Ireton/Duvernay 组,也开展了页岩气勘探潜力评价(Faraj *et al.*, 2004).

中国页岩气资源丰富,根据美国能源信息局(EIA)评估储量超过了 $130 \times 10^{12} \text{m}^3$,其中技术可采资源量超过 $31 \times 10^{12} \text{m}^3$.国内研究机构也开展了页岩气资源量评估,我国页岩气主要层系均为良好

的烃源岩,且演化程度普遍较高,具备页岩气成藏的地质条件(Lu *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017, 2018; 于智博等, 2018).

2004 年我国开始组织页岩气调研工作,2006 年开始在四川、重庆、贵州等地区打了一批调查井、示范井,多井见气显示或气流.2010 年,中国石油天然气集团在四川盆地长宁首次实现下志留统页岩气重大突破,形成长宁—威远探明储量超 $2 000 \times 10^8 \text{m}^3$ 的页岩气田;2012 年,中国石油化工集团在四川盆地发现涪陵页岩气田,探明储量超 $6 000 \times 10^8 \text{m}^3$.另外,近年来还陆续发现永川、丁山、彭水及昭通等储量规模较大的页岩气田.2017 年在湖北宜昌地区鄂阳页 1 井于寒武系实现页岩气重大突破,在志留系与震旦系获页岩气流(徐丽等, 2017; 康玉柱, 2018).预计到 2020 年,川渝地区的页岩气总产量可望达到 $250 \times 10^8 \text{m}^3$.“十四五”以后,四川盆地的天然气供应将主要依靠页岩气资源.

目前普遍采用水平井多段压裂技术改造页岩储层,但将该技术应用于开发我国的页岩气资源存在如下难题:一是耗水量巨大,单口页岩气井需要 $2 000 \text{m}^3$ 左右水(国内外页岩气区块主要指标对比见表 1),根据中国水利水电科学研究院以及水利部水文局对水资源分析显示,我国页岩气富集区大多处于全国重点缺水或其邻近区域,水资源的缺乏制约着工业化开采,国家能源局也明确指出勘探开发过程应坚持开发与生态保护并重,注重水资源节约利用;二是我国页岩气赋存地质条件复杂,普遍具有埋藏深、低孔、低渗等特征,所需水力压裂的施工压力大,部分井位施工压力超过 100 MPa,压裂效果仍不理想,对设备能力要求过高,不利于压裂作业的安全进行;三是水力压裂造缝能力不够,压裂液混砂比小,支撑剂尤其是大粒径支撑剂不能进入裂缝起到有效的支撑作用,裂缝导流能力不足.

因此,在继续完善水平井压裂技术等现有技术手段的基础上,还应探索新型页岩气钻采方法.研究发现,利用超临界二氧化碳特殊的物理化学性质及在储层保护方面的巨大优势,将超临界二氧化碳作为钻井液及压裂液,可以避免储层伤害,解决在

表 1 国内外页岩气区块主要指标对比

Table 1 Comparison of main indicators of shale gas blocks at home and abroad

区块	垂深(m)	井深(m)	单井砂量(m ³)	单井液量(m ³)	施工压力(MPa)	排量(m ³ /min)
Eagle Ford	3 500~3 658	4 800~5 000	70~110	1 500~2 000	50~70	10~12
Haynesville	3 500~4 312	5 000~5 600	100~110	1 800	70~80	11~13
Woodford	3 500~4 484	4 500~5 784	80~90	2 800~2 900	80~90	13~14
中石化涪陵	3 600~4 300	5 400~5 600	30~75	1 500~2 000	75~95	10~14
中石化丁山	4 100~4 400	5 300~5 700	20~34	2 400~2 700	80~95	12~13
中石化永川	4 000~4 200	5 600~5 870	28~61	1 400~1 800	75~90	12~15
中石油威远	3 600~3 900	4 880~5 700	70~90	>2 000	70~90	10~12

页岩气开发方面遇到的很多难题,有望形成一种高效的页岩气藏的钻井、完井和增产一体化开发方法。

2 超临界二氧化碳开发页岩气技术

超临界二氧化碳钻井技术研究起始于美国,最初的研究主要是针对老油田挖潜,1998年完成了“采用超临界二氧化碳连续管钻井”项目,2000年进行了超临界二氧化碳射流破岩实验,证实了其具有较强的破岩优势;1996年Kabir建立了井筒流动模型,计算分析了井筒内超临界二氧化碳的压耗特性和携岩特性等;2007年路易斯安娜州立大学建立了井筒内超临界二氧化碳流体物性模型,分析了井筒内流体物性分布特点(Faisal, 2007; Faisal *et al.*, 2009)。

国内2006年开始进行超临界二氧化碳钻井可行性研究,在沈忠厚等(2010)的策划和推进下,王在明等(2010)研究了井筒中超临界二氧化碳的传热传质特性,杜玉昆等(2012)研制了超临界二氧化碳钻完井试验系统,探索了超临界二氧化碳射流破岩和井筒流动特性,李昊(2010)考虑油气相变、地层产出等参数的影响,对存在超临界二氧化碳的井筒多相流动规律进行了研究,王海柱等(2011)数值模拟研究发现密度是影响超临界二氧化碳运移岩屑的重要因素,黄飞等(2015)开展了超临界二氧化碳射流冲蚀页岩探索性试验,Li *et al.*(2017)对比分析了超临界二氧化碳射流和水射流的应力特性,发现超临界二氧化碳射流会产生较大温差,热应力与射流压力协同破岩,Wang *et al.*(2018, 2019)研究了在不同几何裂缝中超临界二氧化碳和支撑剂的运移规律。

超临界二氧化碳强化页岩气开采具有以下技术优势:(1)提高页岩气井钻井速度。由于水的存在,常规钻井过程中页岩层发生水化作用,易产生

缩颈、扩径、井壁失稳等问题,采用超临界二氧化碳流体作为钻井流体,可解决上述问题,降低钻井风险,并获得更快的喷射钻进速度(Du *et al.*, 2012; 黄飞等, 2015)。(2)对页岩气储层无伤害。超临界二氧化碳流体钻井液侵入储层后,能够使其中的粘土脱水收缩,增大孔隙度,改善渗透性,完井后能够得到比常规欠平衡钻井液更高的油气采收率,具有良好的页岩层保护性能。(3)竞争吸附置换页岩气,提高采收率。页岩对CO₂的吸附能力约为CH₄的数倍(Humayun and Tomasko, 2000; Nikolai and Andrea, 2007; 卢双舫等, 2018),由于页岩气的赋存状态以吸附气为主,因而CO₂注入页岩层后,可通过竞争吸附的方式置换CH₄,提高采收率。(4)兼顾二氧化碳封存。页岩本身既是烃源岩又是储层、甚至盖层,具有典型的低孔低渗特征,产层厚度一般为15~100 m,将CO₂封存于页岩层中,可有效地防止CO₂渗漏,适合地下长期封存。

3 超临界二氧化碳喷射开发页岩气装置

采取模块化设计方法研制了超临界二氧化碳喷射开发页岩气实验装置(图1,图2),包括储罐、增压泵组、加热换热器、粒子注入罐、试验井筒、固体分离器、液体分离器、制冷换热器和数据采集控制系统。

试验流程是将储罐中的液态二氧化碳经过增压泵和加热换热器后调制成超临界态,粒子注入罐可根据需要在超临界流体中注入不同粒子(形成磨料射流破岩钻进或作为支撑剂支撑致裂的裂缝),试验井筒中超临界二氧化碳喷射页岩岩心后经过固体分离器分离粒子和岩屑等颗粒,再经过液体分离器分离水蒸气等液相,最后二氧化碳流体经过冷却换热器降温成液态后再回到



图1 超临界二氧化碳喷射开发页岩气装置

Fig.1 Experiment device of developing shale gas by using supercritical carbon dioxide

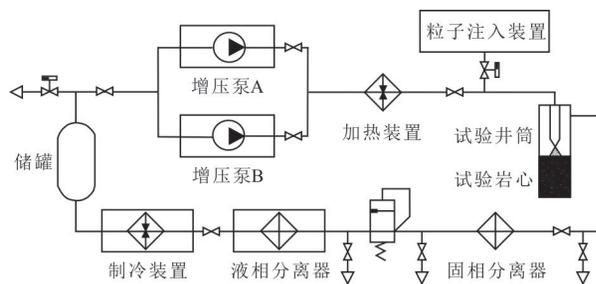


图2 试验流程

Fig.2 Experimental flow chart

储罐,整个试验过程是通过数据采集控制系统在密闭环境中循环往复运行。

试验井筒由外筒、模拟钻杆、射流喷嘴和岩心夹持器等组成,通过在井筒轴向、岩石侧壁和井底径向上布置的高灵敏温度、压力传感器实时采集超临界二氧化碳流体在喷射以及井筒流动过程中各位置处的流动参数。其中试验采用圆锥形喷嘴(图3),收缩段锥度为 13.5° ,圆柱稳定段长度 H_0 为2倍的喷嘴出口直径 d_0 ,喷嘴出口直径 d_0 设计有1~10 mm十个系列,本文采用的喷嘴直径 d_0 为1 mm,喷嘴出口至岩心表面的喷射距离为2 mm。本文所开展的超临界二氧化碳喷射破碎页岩及对页岩强度的影响试验,在相同条件下每组实验均重复5次取平均值,以消除页岩非均质性的影响。

整个实验流程通过数据采集控制系统远程控制,并实时采集井筒轴向、岩石侧壁和井底径向上传感器传回的数据,确保实验过程的安全有序。

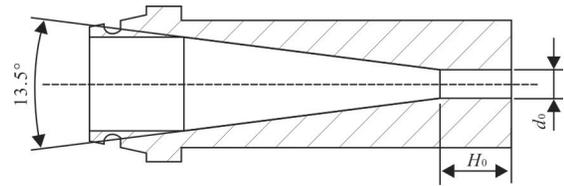


图3 喷嘴结构示意图

Fig.3 Experimental nozzle

4 超临界二氧化碳喷射破碎页岩试验

4.1 实验岩心

试验岩样取自四川盆地下志留统龙马溪组页岩,平行层理比较明显,X-射线衍射分析发现该页岩所含矿物成分中方解石较多,粘土矿物含量为10%,结果见表2,其所含粘土矿物以伊利石为主,单轴抗压强度为57 MPa,孔隙度为1.1%,渗透率为 $0.0023 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,弹性模量为 1.86×10^4 MPa,泊松比为0.2。

4.2 超临界二氧化碳喷射对页岩强度的影响试验

4.2.1 射流喷射时间对岩石强度的影响 超临界二氧化碳射流喷射后岩心抗压强度与射流时间的关系如图4所示,实验条件为射流压力30 MPa、温度 70°C 。本实验条件下在射流喷射到岩心表面的瞬间岩心强度大幅度降低,射流喷射1 s后岩心强度即降低了26.52%。而随着射流时间的延长,岩心抗压强度降低的趋势减缓。可见超临界二氧化碳射流喷射后可以瞬间降低岩石强度,有利于高效破岩。分析认为岩石内部包含有大量的微孔隙和微孔洞,岩石破坏是从微小裂纹开始,而超临界二氧化碳射流喷射到岩石表面后,易于瞬间渗透楔入到岩石内部,射流压力可以传递到岩石内部微孔隙,造成微孔隙和微孔洞边缘上应力集中,在边缘局部产生较大拉应力,使原有微裂纹扩展,从而降低了岩石强度。

4.2.2 射流喷射压力对岩石强度的影响 超临界二氧化碳射流喷射后岩心抗压强度与射流压力的关系如图5所示,实验条件为射流温度 70°C ,射流

表2 岩心全矿物分析结果

Table 2 Total mineral analysis of rock core by XRD

矿物类型	石英	钾长石	斜长石	方解石	黄铁矿	粘土矿物
含量(%)	18	1	2	68	1	10

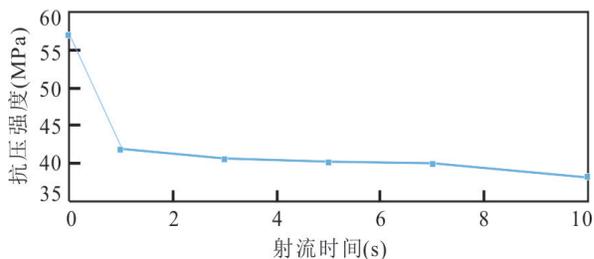


图 4 不同射流时间后岩心抗压强度

Fig.4 Effect of jet time on the rock strength

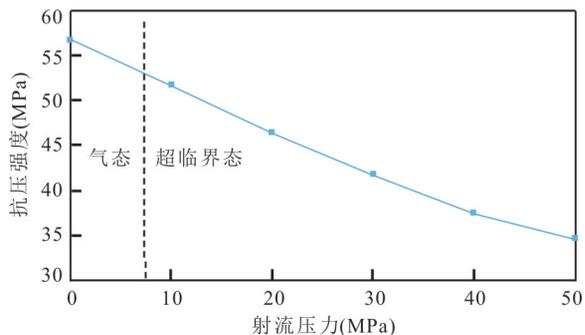


图 5 不同射流压力作用下岩心抗压强度

Fig.5 Effect of jet pressure on the rock strength

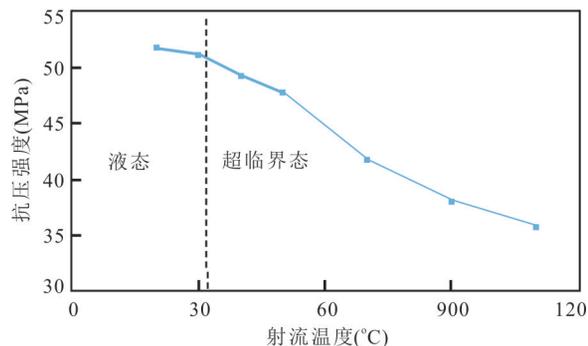


图 6 不同射流温度作用下岩心抗压强度

Fig.6 Effect of jet temperature on the rock strength

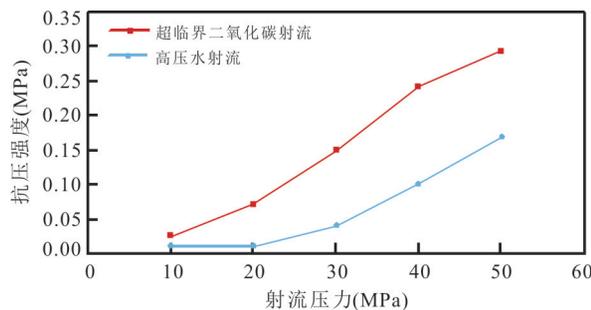


图 7 与高压水射流破岩性能对比

Fig.7 Rock-breaking property comparison with water jet

喷射时间 1 s. 研究发现,射流压力越大,岩心抗压强度越低,降低的趋势近似为线性.这是因为渗入到岩石微孔隙和裂缝的流体与高压射流流体为相互连通的压力体.当射流压力增大后,传递到岩石内部微孔隙的压力增大,微孔隙和微孔洞边缘上的拉应力增大,使原有微裂纹扩展的能力增强,岩石强度的降低幅度增大.

4.2.3 射流温度对岩石强度的影响 超临界二氧化碳射流喷射后岩心抗压强度与射流温度的关系如图 6 所示,实验条件为射流压力 30 MPa,射流喷射时间 1 s. 研究发现,射流温度越高,岩心抗压强度越低,且二氧化碳由液态转化为超临界态后(即温度超过了临界点),抗压强度降低的趋势越明显.因为超临界态的二氧化碳具有接近于气体的强扩散能力、渗透能力和低粘度,表面张力接近于零,传递性能较强,随着温度的升高,射流的渗透和传递性能增强,渗入到岩石内部微小结构的速度加快,影响范围增大,增强了岩石内微孔隙、微裂纹等损伤继续扩展的能力.

4.3 超临界二氧化碳喷射破碎页岩试验

4.3.1 与高压水射流破岩性能对比 高压水射流喷射破岩钻井技术是目前辅助机械破岩提高机械钻速的重要措施,为了探索超临界二氧化碳射流的破岩效率,进行了两者的破岩性能对比,实验条件

为射流压力 10~50 MPa,温度 70 °C. 研究发现,在射流压力低于 30 MPa 时,超临界二氧化碳射流的破岩性能是水射流破岩体积的 2.24~6.51 倍,当射流压力超过 30 MPa 后,破岩性能提高的幅度有所降低,射流压力为 50 MPa 时降到 1.73 倍,超临界二氧化碳射流的破岩优势显著(图 7).

分析认为破岩初期主要依靠射流的冲击作用造成岩石的宏观破坏,后期则依靠的是流体的准静态压力作用,使岩石内部已形成的微孔隙和微裂纹进一步扩展,由于超临界二氧化碳流体粘度低、扩散系数大、膨胀性好,而在微裂缝中流体的渗透能力与其粘度成反比,在同样条件下超临界二氧化碳的粘度比水低一个数量级,因此具有更强的渗透能力,更易向微孔隙、微裂纹等损伤继续扩展,射流作用的范围增大,强化了破岩效果.

4.3.2 射流压力对超临界二氧化碳射流破岩性能的影响 超临界二氧化碳射流压力对破岩性能的影响如图 8 所示,实验条件为射流压力 10~50 MPa,温度 70 °C. 研究发现,超临界二氧化碳射流的破岩性能随着射流压力的增大而增大.随着射流压力的增大,超临界二氧化碳射流作用在岩石表面

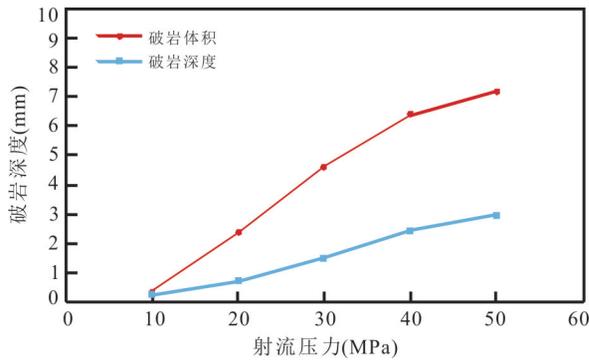


图8 射流压力对破岩性能的影响

Fig.8 Effect of jet pressure on the rock-breaking properties

上的冲击载荷增大,射流的破岩性能增强.

4.3.3 井底环境温度对超临界二氧化碳射流破岩性能的影响 在进行超临界二氧化碳钻完井工艺流程的设计时,首先需要在井口对液态二氧化碳加压泵送入钻柱,在沿钻柱下行时随着井深的增加,地层温度升高,地层与环空流体、环空流体与钻柱内流体之间不断发生热量传递,钻柱内二氧化碳温度不断升高,并在一定井深处钻杆内二氧化碳流体会达到超临界态,因此井底处环境温度的高低决定着二氧化碳流体自钻头喷出后的状态和破岩性能.井底环境温度对超临界二氧化碳射流破岩性能的影响如图9所示,实验条件为射流压力30 MPa,温度29~70 °C.

研究发现,超临界二氧化碳射流破岩性能随着井底环境温度的升高而增大.在井底环境温度未达到临界值时,尚处于液态的二氧化碳射流与水射流的破岩机理相同,都是主要依靠射流的冲击应力;随着井底环境温度的升高,二氧化碳相态由液态向超临界态转变,射流的渗透和传递性能增强,渗入

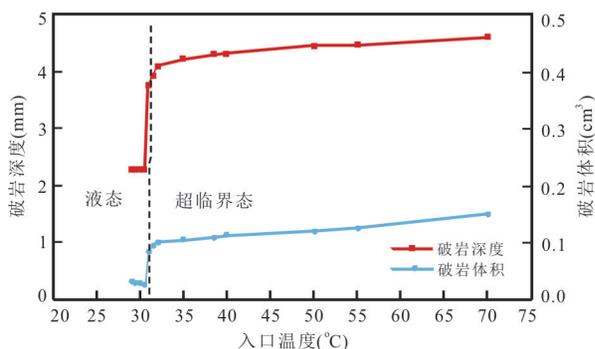


图9 井底环境温度对破岩性能的影响

Fig.9 Effect of bottom-hole temperature on the rock-breaking properties

到岩石内部微小结构的速度加快,影响范围增大,增强了岩石内微孔隙、微裂纹等损伤继续扩展的能力,射流的破岩性能急剧增强;当温度达到了临界值后,超临界二氧化碳流体具有了接近于气体的低粘度和高扩散系数,易于瞬间渗透楔入到岩石内部,渗入流体与高压射流流体为相互连通的压力体,射流压力可以传递到岩石内部微孔隙,降低岩石强度,射流的破岩性能增强;随着温度的继续升高超临界二氧化碳射流破岩性能增速随着二氧化碳流体密度的降低而变缓,破岩性能曲线出现了拐点.在实际钻井过程中,随着地层温度的升高和井筒换热过程的进行,钻杆内的二氧化碳流体在较小井深处即可以超过临界值,能够在井底的超临界状态喷射钻井.

5 结论

(1)超临界二氧化碳流体具有超强的流动、渗透和传递性能,将其作为页岩气层的钻采流体,可提高钻井速度,通过竞争吸附的方式提高页岩气的采收率,同时可兼顾二氧化碳埋存,在页岩气开发方面具有巨大的潜力.

(2)超临界二氧化碳流体对页岩强度的影响实验发现超临界二氧化碳射流喷射后页岩强度降低,且射流压力和温度越高,岩石强度降低的幅度越大.

(3)超临界二氧化碳射流喷射破碎页岩实验发现在本实验条件下超临界二氧化碳射流破岩体积是水射流的1.73~6.51倍,随着井底环境温度的升高,二氧化碳相态由液态向超临界态转变后,射流的渗透和传递性能增强,破岩性能也显著增强.

致谢:感谢匿名审稿人提出的宝贵意见.

References

- Chen, G.S., Dong, D.Z., Wang, S.Q., et al., 2009. A Preliminary Study on Accumulation Mechanism and Enrichment Pattern of Shale Gas. *Natural Gas Industry*, 29(5): 17–21, 134–135 (in Chinese with English abstract).
- Du, Y. K., Wang, R.H., Ni, H.J., et al., 2012. Determination of Rock-Breaking Performance of High-Pressure Supercritical Carbon Dioxide Jet. *Journal of Hydrodynamics*, 24(4): 554–560. [https://doi.org/10.1016/s1001-6058\(11\)60277-1](https://doi.org/10.1016/s1001-6058(11)60277-1)
- Du, Y. K., Wang, R. H., Ni, H. J., et al., 2012. Rock-Breaking Experiment with Supercritical Carbon Dioxide

- Jet. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 36(4): 93–96 (in Chinese with English abstract).
- Faisal, A. A., 2007. Mechanistic Modeling of an Underbalanced Drilling Operation Utilizing Supercritical Carbon Dioxide (Dissertation). Louisiana State University, Baton Rouge, 1–100.
- Faisal, A. A., Julius, P., Richard, H., 2009. Modeling of an Underbalanced - Drilling Operation Using Supercritical Carbon Dioxide. *SPE Drilling and Completion*, 24(4): 599–610.
- Faraj, B., Williams, H., Addison, G., et al., 2004. Gas Potential of Selected Shale Formations in the Western Canadian Sedimentary Basin. *Gas TIPS*, 10(1): 21–25.
- Huang, F., Lu, Y. Y., Tang, J. R., et al., 2015. Research on Erosion of Shale Impacted by Supercritical Carbon Dioxide Jet. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34(4):787–794 (in Chinese with English abstract).
- Humayun, R., Tomasko, D. L., 2000. High-Resolution Adsorption Isotherms of Supercritical Carbon Dioxide on Activated Carbon. *AIChE Journal*, 46(10): 2065–2075. <https://doi.org/10.1002/aic.690461017>
- Kang, Y. Z., 2018. Significant Exploration Progress and Resource Potential of Unconventional Oil and Gas in China. *Oil Forum*, 37(4): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Li, H., 2010. Study on Multi-Phase Flow in Supercritical Wellbore Annular (Dissertation). China University of Petroleum, Qingdao, 1–121 (in Chinese with English abstract).
- Li, M. K., Ni, H. J., Wang, R. H., et al., 2017. Comparative Simulation Research on the Stress Characteristics of Supercritical Carbon Dioxide Jets, Nitrogen Jets and Water Jets. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 11(1): 357–370. <https://doi.org/10.13039/501100007129>
- Lu, S. F., Liu, W., Wang, M., et al., 2017. Lacustrine Shale Oil Resource Potential of Es₃L Sub-Member of Bonan Sag, Bohai Bay Basin, Eastern China. *Journal of Earth Science*, 28(6): 996–1005.
- Lu, S. F., Shen, B. J., Xu, C. X., et al., 2018. Study on Adsorption Behavior and Mechanism of Shale Gas by Using GCMC Molecular Simulation. *Earth Science*, 43(5): 1783–1791 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.430>
- Montgomery, S. L., Jarvie, D. M., Bowker, K. A., et al., 2005. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth Basin, North - Central Texas: Gas - Shale Play with Multi - Trillion Cubic Foot Potential. *AAPG Bulletin*, 89(2): 155–175. <https://doi.org/10.1306/09170404042>
- Montgomery, S. L., Jarvie, D. M., Bowker, K. A., et al., 2006. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth Basin, North - Central Texas: Gas - Shale Play with Multi - Trillion Cubic Foot Potential: Reply. *AAPG Bulletin*, 90(6): 967–969. <https://doi.org/10.1306/02090605186>
- Nikolai, S., Andrea, B., 2007. Measurement and Interpretation of Supercritical CO₂ Sorption on Various Coals. *International Journal of Coal Geology*, 69: 229–242.
- Roche, P., 2006. Technology and Prices Help Release Shale Gas from “Unconventional” Status. *New Technology Magazine*, Oct/Nov: 15–20.
- Shen, Z. H., Wang, H. Z., Li, G. S., 2010. Feasibility Analysis of Coiled Tubing Drilling with Supercritical Carbon Dioxide. *Petroleum Exploration and Development*, 37(6): 743–747 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. Z., Li, X. J., Sepehrnoori, K., et al., 2019. Calculation of the Wellbore Temperature and Pressure Distribution during Supercritical CO₂ Fracturing Flowback Process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 139: 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.109>
- Wang, H. Z., Shen, Z. H., Li, G. S., 2011. Feasibility Analysis on Shale Gas Exploitation with Supercritical CO₂. *Petroleum Exploration and Development*, 38(1): 97–102 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. Z., Wang, M., Yang, B., et al., 2018. Numerical Study of Supercritical CO₂ and Proppant Transport in Different Geometrical Fractures. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 8(5): 898–910. <https://doi.org/10.1002/ghg.1803>
- Wang, J., Bao, H. Y., Lu, Y. Q., et al., 2019. Quantitative Characterization and Main Controlling Factors of Shale Gas Occurrence in Jiaoshiba Area, Fuling. *Earth Science*, 44(3): 1001–1011 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.388>
- Wang, Z. M., 2008. Feature Research of Supercritical Carbon Dioxide Drilling Fluid (Dissertation). China University of Petroleum, Qingdao, 1–112 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. M., Qiu, Z. S., Zhu, K. L., 2010. Research on Features of Wellbore Temperature Transmission for Supercritical CO₂ Drilling Fluid. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 27(6): 1–3 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. S., Liang, C., Sun, X. N., 2017. Shale Oil Reservoir Characteristics and Enrichment in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, East China. *Journal of Earth Science*, 28(6): 977–986.

- Xu, L., Liu, F. Y., Zhang, R., et al., 2017. Status of Shale Gas Exploration and Development and Its Environmental Impact Risk. *Environmental Protection of Oil & Gas Fields*, 27(4): 6–10 (in Chinese with English abstract).
- Xu, T. T., Zhao, Z. J., Feng, J. H., 2007. Development in Drilling Fluid Technologies abroad in 2005. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 24(1): 61–70 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Z. B., Gong, C., Zhang, Y., et al., 2018. Prospect and Suggestions on Shale Gas Development in China. *Natural Gas Technology and Economy*, 12(6): 64–67, 84 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, G. M., 2008. Speculations on the Exploration and Development of Unconventional Hydrocarbon Resources. *Natural Gas Industry*, 28(12): 1–3, 133 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈更生, 董大忠, 王世谦, 等, 2009. 页岩气藏形成机理与富集规律初探. *天然气工业*, 29(5): 17–21, 134–135.
- 杜玉昆, 王瑞和, 倪红坚, 等, 2012. 超临界二氧化碳射流破岩试验. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 36(4): 93–96.
- 黄飞, 卢义玉, 汤积仁, 等, 2015. 超临界二氧化碳射流冲蚀页岩试验研究. *岩石力学与工程学报*, 34(4): 787–794.
- 康玉柱, 2018. 中国非常规油气勘探重大进展和资源潜力. *石油科技论坛*, 37(4): 1–7.
- 李昊, 2010. 超临界条件下井筒环空多相流动规律研究(博士学位论文). 青岛: 中国石油大学, 1–121.
- 卢双舫, 沈博健, 许晨曦, 等, 2018. 利用GCMC分子模拟技术研究页岩气的吸附行为和机理. *地球科学*, 43(5): 1783–1791.
- 沈忠厚, 王海柱, 李根生, 2010. 超临界CO₂连续油管钻井可行性分析. *石油勘探与开发*, 37(6): 743–747.
- 王海柱, 沈忠厚, 李根生, 2011. 超临界CO₂钻井井筒压力温度耦合计算. *石油勘探与开发*, 38(1): 97–102.
- 王进, 包汉勇, 陆亚秋, 等, 2019. 涪陵焦石坝地区页岩气赋存特征定量表征及其主控因素. *地球科学*, 44(3): 1001–1011.
- 王在明, 2008. 超临界二氧化碳连续管钻井液特性研究(博士学位论文). 青岛: 中国石油大学, 1–112.
- 王在明, 邱正松, 朱宽亮, 2010. 超临界二氧化碳钻井流体井筒温度传递特性. *钻井液与完井液*, 27(6): 1–3.
- 徐丽, 刘福云, 张戎, 等, 2017. 页岩气勘探开发现状及环境影响与风险. *油气田环境保护*, 27(4): 6–10.
- 徐同台, 赵忠举, 冯京海, 2007. 2005年国外钻井液新技术. *钻井液与完井液*, 24(1): 61–70.
- 于智博, 龚诚, 张羿, 等, 2018. 我国页岩气发展前景展望及开发策略建议. *天然气技术与经济*, 12(6): 64–67, 84.
- 翟光明, 2008. 关于非常规油气资源勘探开发的几点思考. *天然气工业*, 28(12): 1–3, 133.