



超临界CO₂水平环空携砂试验研究

孙晓 王海柱 李英杰 郑永 陆群

Sand-Carrying Experiments with Supercritical CO₂ in a Horizontal Annulus

SUN Xiao, WANG Haizhu, LI Yingjie, ZHENG Yong, LU Qun

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021099>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超临界二氧化碳钻井基础研究进展

The Development of Fundamental Research on Supercritical Carbon Dioxide Drilling

石油钻探技术. 2018, 46(2): 1-9 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018040>

CO₂响应性增强泡沫体系室内试验研究

Laboratory Test Study of CO₂ Responsive Enhanced Foam System

石油钻探技术. 2021, 49(5): 88-93 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021119>

超低渗透油藏CO₂吞吐利用率实验研究

CO₂ Utilization Ratio Simulation during a CO₂ Huff-and-Puff Process in Ultra-Low Permeability Oil Reservoirs

石油钻探技术. 2018, 46(6): 77-81 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018147>

CO₂泡沫双子表面活性剂清洁压裂液研究与试验

Research and Experiments of a Clean Fracturing Fluid System with CO₂ Foam Gemini Surfactant

石油钻探技术. 2018, 46(2): 92-97 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018021>

草舍油田CO₂驱高气油比井举升新技术

New Lifting Technology for CO₂ Flooding Wells with High GOR in Caoshe Oilfield

石油钻探技术. 2017, 45(2): 87-91 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201702014>

渤海P油田层内生成CO₂调驱技术

In-Situ CO₂ Generation Technology in Bohai P Oilfield

石油钻探技术. 2020, 48(2): 108-112 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020015>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2021099

引用格式: 孙晓, 王海柱, 李英杰, 等. 超临界 CO₂ 水平环空携砂试验研究 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(3): 17-23.

SUN Xiao, WANG Haizhu, LI Yingjie, et al. Sand-carrying experiments with supercritical CO₂ in a horizontal annulus [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(3): 17-23.

超临界 CO₂ 水平环空携砂试验研究

孙 晓¹, 王海柱², 李英杰³, 郑 永², 陆 群²

(1. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西西安 710075; 2. 油气资源与探测国家重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249; 3. 中国石油集团海洋工程有限公司, 北京 100176)

摘 要: 为明确超临界 CO₂ 在水平段环空的携砂性能, 分析关键施工参数对其携砂性能的影响, 根据相似原理设计了超临界 CO₂ 水平环空携砂试验装置, 试验研究了超临界 CO₂ 注入质量流量、砂比、出口压力和流体温度对砂粒在水平环空中运移的影响。试验结果表明: 超临界 CO₂ 能够以悬浮输送的方式在水平环空内有效携砂, 增大其质量流量, 会增强环空内流体的紊流强度, 进而提高悬浮携砂效果; 在较高砂比下, 水平环空底部更容易出现砂床, 使过流面积减小, 从而使砂粒运移速度增大; 在相同注入条件下, 环空内砂粒运移速度随出口压力升高而降低, 但降低幅度逐渐减小; 在合理温度范围内提高流体温度, 有利于减少环空内砂粒的堆积。研究结果可为超临界 CO₂ 钻井和超临界 CO₂ 压裂优化设计关键施工参数提供参考。

关键词: 超临界 CO₂; 水平环空; 携砂; 相似原理; 钻井; 压裂

中图分类号: TE21 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2022)03-0017-07

Sand-Carrying Experiments with Supercritical CO₂ in a Horizontal Annulus

SUN Xiao¹, WANG Haizhu², LI Yingjie³, ZHENG Yong², LU Qun²

(1. Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum(Group) Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710075, China; 2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 3. CNPC Offshore Engineering Company Limited, Beijing, 100176, China)

Abstract: According to the similarity principle, a device for sand-carrying tests was developed to determine the sand-carrying performance of supercritical CO₂ in the horizontal annulus and analyze the effects of key operating parameters on the sand-carrying performance. The device was employed to explore the influence of the injection mass flow, sand concentration, outlet pressure, and fluid temperature of supercritical CO₂ on the sand migration in the horizontal annulus. The results showed that supercritical CO₂ could effectively carry sand in the horizontal annulus by means of suspension transport, and the increase in its mass flow could enhance the turbulence intensity of the fluid in the annulus and improve the sand-carrying effect by suspension transport. In a high sand concentration, sand beds were likely to occur at the bottom of the annulus, which reduced the open area and raised the sand transport velocity. Under the same injection condition, the sand transport velocity in the annulus decreased with the increase of outlet pressure, but the amplitude of reduction is gradually lowering. In addition, a rise in fluid temperature was conducive to the accumulation reduction of sand in the annulus in an appropriate temperature range. The research results can provide a reference for optimizing the key construction parameter design in drilling and fracturing with supercritical CO₂.

Key words: supercritical CO₂; horizontal annulus; sand-carrying; similarity principle; drilling; fracturing

收稿日期: 2021-09-08; 改回日期: 2022-01-15。

作者简介: 孙晓(1985—), 男, 山东泰安人, 2006年毕业于中国石油大学(华东)热能与动力工程专业, 2013年获西安交通大学动力工程及工程热物理专业博士学位, 高级工程师, 主要从事低渗致密油气藏 CO₂ 压裂技术研究。E-mail: yanchangsunxiao@163.com。

通信作者: 王海柱, whz0001@126.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目“超临界 CO₂ 缝内携砂机理研究”(编号: 51874318)、陕西省创新能力支撑计划“CO₂ 压裂井筒温压及地层波及规律研究”(编号: 2019KJXX-023)、国家自然科学基金项目“油气井流体力学与工程”(编号: 51922107)联合资助。

超临界 CO_2 具有类似气体的低黏度和接近液体的高密度,同时具有高扩散系数和良好的溶解性,因此,在非常规油气开发中具有巨大的优势^[1-11],有望形成集钻井、压裂、采气和 CO_2 埋存为一体的高效油气开采技术。采用超临界 CO_2 作为钻井流体钻井具有破岩门限压力低、机械钻速快的特点,能够缩短钻井周期^[12-16]。此外,超临界 CO_2 用于无水压裂时易形成复杂裂缝网络,并且能够在提高油气采收率的同时实现 CO_2 的地下埋存^[2, 17-18]。

超临界 CO_2 水平环空携砂是超临界 CO_2 钻井及压裂技术应用中的基础问题,涉及井眼清洁及压裂支撑剂泵注的水力参数优化设计^[19-20]。与常规工作流体相比,超临界 CO_2 物性参数对温度和压力敏感,工程参数对其在井筒内流动和传热影响的规律复杂。沈忠厚等人^[20]通过模拟发现,超临界 CO_2 水平环空携岩存在一个临界密度,可根据最小动能准则来确定不同密度超临界 CO_2 携岩的最小流动速度。李良川等人^[21]通过试验研究了超临界 CO_2 在井筒内的携岩能力,发现试验数据与 Angel 理论模型的计算结果基本吻合。霍洪俊等人^[22-23]通过数值模拟发现超临界 CO_2 携带岩屑在水平环空中运移时会出现分层流动的现象,并分析了超临界 CO_2 在斜井临界环空上返速度的变化规律。宋维强等人^[24-25]模拟了超临界 CO_2 在直井段和水平段环空中携带岩屑的运移规律,发现温度和压力对岩屑粒径的分布有影响。

由于进行超临界 CO_2 携砂试验时压力、温度比较难控制,因此当前多采用模拟手段研究水平段环空中超临界 CO_2 的携砂性能,并且已有试验研究由于试验装置尺寸和性能参数的限制,试验参数选取范围较窄,仅对超临界 CO_2 的井筒携砂性能进行了初步探索,关键参数的影响规律尚不明确。基于此,笔者运用相似原理,设计了超临界 CO_2 水平环空携砂试验装置,并以环空中砂粒运移速度和砂床高度为标准,利用该试验装置研究了注入质量流量、砂比、出口压力和流体温度对超临界 CO_2 水平环空携砂能力的影响。研究结果可为超临界 CO_2 钻井和压裂过程中水力参数的设计提供理论基础。

1 超临界 CO_2 水平环空携砂试验装置

试验过程涉及 CO_2 存储、超临界 CO_2 生成及泵注、水平环空井筒、安全控制及循环管路等,其中水

平环空井筒是携砂试验的关键。为了模拟现场水平环空流体携砂运移过程,笔者结合现场实际和室内试验条件,运用相似原理,设计了水平环空携砂模拟试验装置,其主要由水平环空井筒、加砂装置和除砂除水装置组成,如图1所示。

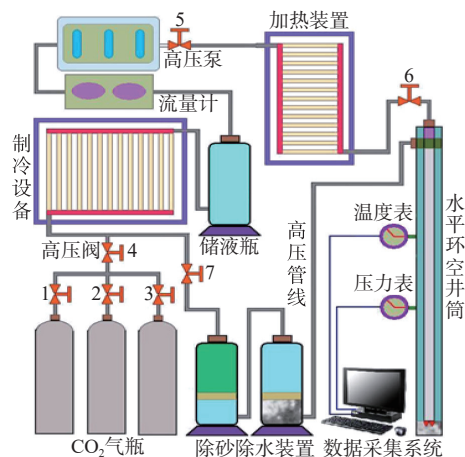


图1 水平环空携砂模拟试验装置

Fig.1 Simulation device for sand-carrying tests in horizontal annulus

1) 水平环空井筒。井筒外管为 1Cr18Ni9Ti 薄壁管,标准承压 30 MPa,总长 3.50 m,环空内径 38.0 mm、外径 62.0 mm;内管主要为有机玻璃管,为防止砂粒碰撞摩擦而使有机玻璃管表面变粗糙导致透光性变差,正对可视窗口处的内管使用有机耐磨玻璃管。井筒上分布有压力传感器、温度传感器,并设有直径 20.0 mm 的对开耐高压石英玻璃观察窗,距井筒出口 0.32 m。试验中可通过数据采集系统自动采集压力、流体温度等数据,并利用高速摄影装置监测记录砂粒在环空中的运移过程、流体相态变化、砂粒运动速度和砂床高度等相关试验数据。

水平井筒的设计满足几何相似和动力相似:模拟环空井筒的尺寸与现场油套环空尺寸满足几何相似;动力相似选择雷诺数,用于研究封闭系统内流体的运动,并考虑了流体的质量惯性力和黏性力。

a) 几何相似。选择现场油套环空尺寸作为原型,套管外径 d_{co} 为 139.7 mm、内径 d_{ci} 为 121.5 mm,油管外径 d_{to} 为 74.5 mm、内径 d_{ti} 为 62.0 mm,水力直径 d_{cf} 为 46.9 mm;模拟井筒外管内径 d_{oi} 为 62.0 mm,内管外径 d_{io} 为 38.0 mm,水力直径 d_{mf} 为 24.0 mm,满足几何相似条件:

$$\frac{d_{ci} - d_{to}}{d_{oi} - d_{io}} = \frac{d_{cf}}{d_{mf}} = 1.96 \quad (1)$$

b) 雷诺数相似。雷诺数相似的关系式为:

$$\frac{\rho_f v_f l_f}{\mu_f} = \frac{\rho_m v_m l_m}{\mu_m} \quad (2)$$

式中: ρ_f 为实际流体密度, kg/m³; v_f 为实际环空流体流速, m/s; l_f 为实际流场特征长度, m; μ_f 为实际流体黏度, Pa·s; ρ_m 为模拟流体密度, kg/m³; v_m 为模拟环空流体流速, m/s; l_m 为模拟流场特征长度, m; μ_m 为模拟流体黏度, Pa·s。

假设现场施工和室内模拟试验用超临界 CO₂ 的密度和黏度相同, 则式(2)可变为:

$$\frac{v_m}{v_f} = \frac{l_f}{l_m} = \frac{d_f}{d_m} = 1.96 \quad (3)$$

由于试验所用泵排量的限制, 试验过程中注入超临界 CO₂ 的质量流量较小, 相当于模拟现场低排量下超临界 CO₂ 携带支撑剂运移的情况。

2) 加砂装置。加砂装置由加砂罐、加砂套筒、加砂电机和搅笼等组成。搅笼与加砂电机连接, 并置于加砂套筒内部, 可通过加砂电机控制加砂速度, 实现对砂比的精确控制, 最高加砂速度 350 L/h。试验中的砂比为加砂排量与携砂液的总排量之比。

3) 除砂除水装置。除砂除水装置主要由砂粒收集装置和净化装置组成, 砂粒收集装置用来分离 CO₂ 和砂粒, 收集的砂粒可取出称重; 净化装置主要用来对除砂后的 CO₂ 进行干燥净化, 以满足循环使用的要求。

此外, 试验所用泵注系统的最大排量为 30 L/min, 额定压力为 100 MPa, 限定安全压力为 50 MPa。超临界 CO₂ 生成系统采用循环水浴加热, 水温可在 0~100 °C 间任意调节, 误差±0.5 °C。

2 试验方案及试验步骤

2.1 试验材料及方案

试验选用纯度为 99.9% 的瓶装 CO₂, 使用的模拟砂为 20/40 目的陶粒, 平均粒径为 0.6 mm, 使用前进行洗净干燥, 以避免杂质对试验结果和循环系统造成影响。

水平环空携砂试验主要研究不同泵注参数对砂粒在水平环空中的运移速度及砂床高度的影响。具体方案为: 1) 保持井筒流体温度为 50 °C, 井筒流体出口压力为 12 MPa, 砂比为 9%, 观察超临界 CO₂ 质量流量分别为 0.135, 0.160, 0.178, 0.223 和 0.268 kg/s 时水平环空中砂粒的运移情况, 以分析超临界 CO₂ 质量流量对砂粒运移的影响; 2) 保持超临界 CO₂ 泵注质量流量为 0.26 kg/s, 井筒流体出口压力为 12 MPa,

井筒流体温度为 50 °C, 观察砂比分别为 3.5%、4.5%、5.5%、6.5% 和 7.5% 时水平环空中砂粒的运移情况, 以分析砂比对砂粒运移的影响; 3) 保持超临界 CO₂ 泵注质量流量为 0.26 kg/s, 砂比为 9%, 井筒流体温度为 50 °C, 观察出口压力分别为 9, 10, 12, 14 和 16 MPa 时水平环空中砂粒的运移情况, 以分析出口压力对砂粒运移的影响; 4) 保持井筒流体出口压力为 12 MPa, 超临界 CO₂ 泵注质量流量为 0.26 kg/s, 砂比为 9%, 观察井筒流体温度分别为 40, 45, 50, 55 和 60 °C 时水平环空中砂粒的运移情况, 以分析井筒流体温度对砂粒运移的影响。

2.2 试验步骤

1) 打开气源, 利用制冷机组将 CO₂ 液化存储在液态 CO₂ 储罐中, 启动柱塞泵, 将液态 CO₂ 泵至缓冲罐中进行加热, 生成超临界 CO₂;

2) 将超临界 CO₂ 缓慢注入井筒, 同时打开井筒循环水浴保温装置, 将柱塞泵排量调至设计流量;

3) 关闭气源, 开启井筒出口与储液罐间的节流阀, 使系统内部流体达到循环状态, 通过调节井筒出口回压控制井筒内部流体压力;

4) 井筒内流体循环达到稳定状态后, 开启加砂电机, 通过调节电机转速调整加砂速度;

5) 监测记录水平环空内颗粒的运动;

6) 针对不同的试验参数重复以上各步骤。

3 砂粒运移影响因素分析

3.1 超临界 CO₂ 质量流量

流速是影响环空内流体携岩输砂效果的主要因素, 不同超临界 CO₂ 质量流量下水平环空内砂粒的运移速度如图 2 所示。从图 2 可以看出, 随着超临界 CO₂ 注入质量流量增大, 砂粒在环空内的运移速度明显提高。此外, 随着砂粒不断注入, 不同质量流量下砂粒的运移速度均表现为逐渐增大并趋于稳定的趋势。这是因为环空中的砂粒以悬浮、跃移的形式输送, 随着砂粒持续注入, 砂粒会逐渐沉降在底部形成砂床(见图 3), 导致环空过流面积逐渐减小, 使得超临界 CO₂ 流速不断增大, 直至达到砂粒能够克服沉降阻力的临界流速并保持稳定。

不同超临界 CO₂ 质量流量下水平环空内砂床的平衡高度如图 4 所示。从图 4 可以看出, 砂床平衡高度随超临界 CO₂ 质量流量增大整体上呈线性减小趋势。由于超临界 CO₂ 在环空上部的流动速度比下部快, 且高速区的范围会随超临界 CO₂ 质量流

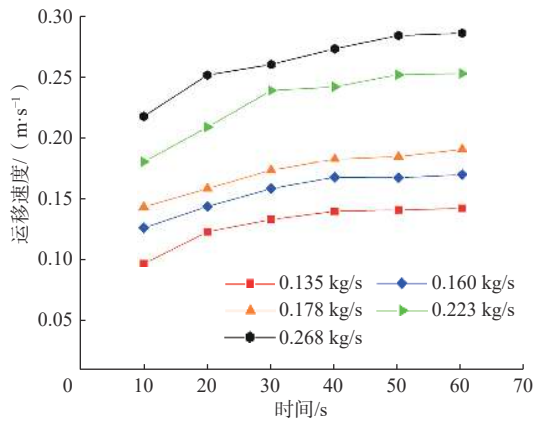


图2 超临界CO₂质量流量对水平环空中砂粒运移速度的影响

Fig.2 Effect of supercritical CO₂ mass flow on sand transport velocity in horizontal annulus

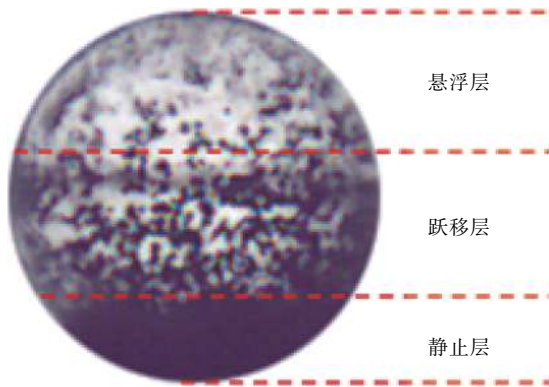


图3 水平环空中超临界CO₂输送砂粒形态

Fig.3 Shape of sand transported by supercritical CO₂ in horizontal annulus

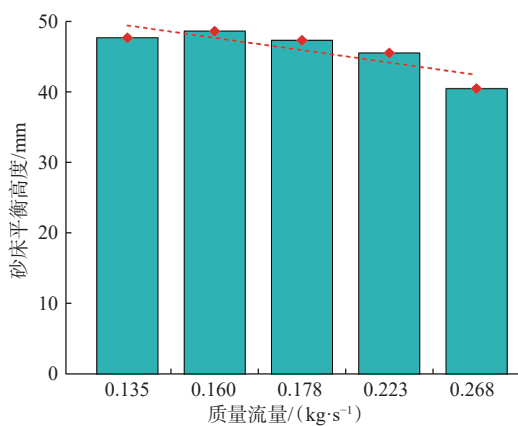


图4 不同超临界CO₂质量流量下水平环空中砂床的平衡高度

Fig.4 Equilibrium height of sand bed in horizontal annulus with different mass flow of supercritical CO₂

量增大而扩大^[26], 导致环空内紊流区的范围和强度随超临界CO₂质量流量增大而增大, 作用在砂粒上的曳力和升力随之增大, 使更多的砂粒进入悬浮

层, 并且运移距离也随之增大, 最终使砂床平衡高度降低。因此, 施工过程中在设备能力允许的情况下, 应尽量提高超临界CO₂的注入质量流量, 以在环空内产生范围较大的能悬浮运移砂粒的高速流动区, 避免井下砂埋和砂卡等的发生。

3.2 砂比

由上文分析可知, 砂粒运移速度趋于稳定时形成了高度稳定的砂床。而不同砂比下水平环空中砂粒的运移速度如图5所示。

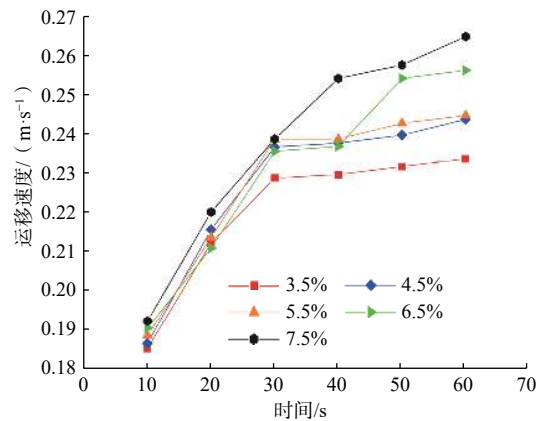


图5 砂比对水平环空砂粒运移速度的影响

Fig.5 Effect of sand concentration on sand transport velocity in horizontal annulus

由图5可知: 环空内形成高度稳定的砂床前, 砂比对砂粒在环空中运移速度的影响较弱; 环空内形成高度稳定的砂床后, 随着砂比增大, 砂粒在环空中的运移速度加快, 这说明砂比增大, 形成稳定砂床的高度增大, 使得过流面积减小, 导致砂粒运移速度随砂比增大而加快。

不同砂比条件下, 水平环空砂床的平衡高度如图6所示。

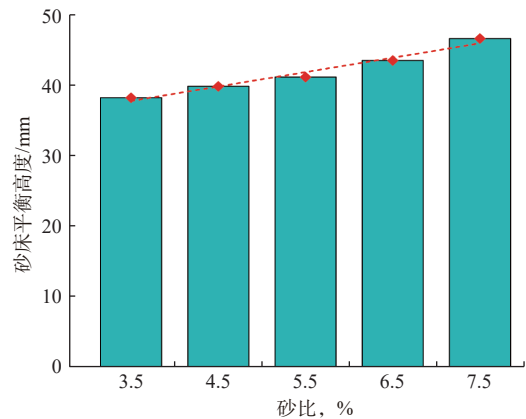


图6 不同砂比下水平环空砂床的平衡高度

Fig.6 Equilibrium height of sand bed in horizontal annulus at different sand concentrations

由图 6 可知, 砂床的平衡高度随砂比增大呈线性增大。这是因为环空内砂比增大, 会使砂粒与砂粒、砂粒与管壁之间的相互作用增大, 导致砂粒运移需要更大的驱动力; 同时, 砂比增大, 超临界 CO₂ 和砂粒之间的动量交换相对减少^[24], 砂粒更容易沉积在环空底部, 最终导致砂床平衡高度增大。

3.3 出口压力

超临界 CO₂ 具有较强的压缩性, 其物性参数对温度和压力的变化比较敏感。不同出口压力下水平环空中砂粒运移速度的变化如图 7 所示。

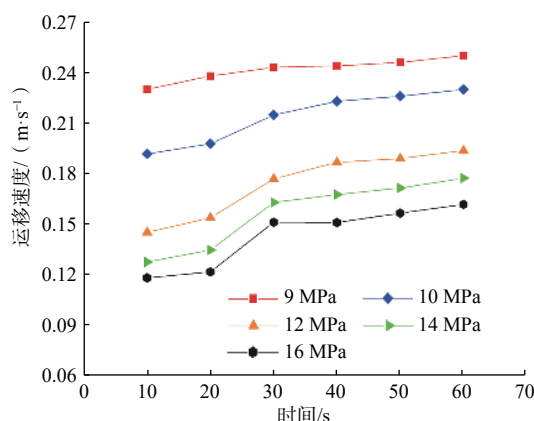


图 7 出口压力对水平环空砂粒运移速度的影响

Fig.7 Effect of outlet pressure on sand transport velocity in horizontal annulus

由图 7 可知, 砂粒运移速度随出口升高而降低, 但出口压力升至 10 MPa 后, 砂粒运移速度的降低幅度逐渐减小。这是因为出口压力升高, 导致环空内超临界 CO₂ 的密度增大, 而超临界 CO₂ 的质量流量不变, 因此根据质量守恒定律, 可知其流速减小, 使得砂粒的运移速度降低; 另外, 在高压条件下超临界 CO₂ 的密度和黏度对压力变化的敏感性较低, 使压力升高对砂粒运移速度的影响减弱。

不同出口压力下砂床的平衡高度如图 8 所示。由图 8 可知, 砂床平衡高度整体上呈现出随出口压力升高而升高的趋势, 这主要与不同出口压力下环空内流体的流速相关。现场应用中, 应合理调节环空内压力, 以使超临界 CO₂ 达到所需要的密度, 同时优化设计其他参数, 尽量降低压力升高对环空内流体流速的影响, 避免砂粒过多堆积。

3.4 流体温度

流体温度是利用超临界 CO₂ 开发非常规油气资源的关键参数, 涉及相态调控等多个方面。不同流体温度下水平环空中砂粒运移速度的变化情况如图 9 所示。

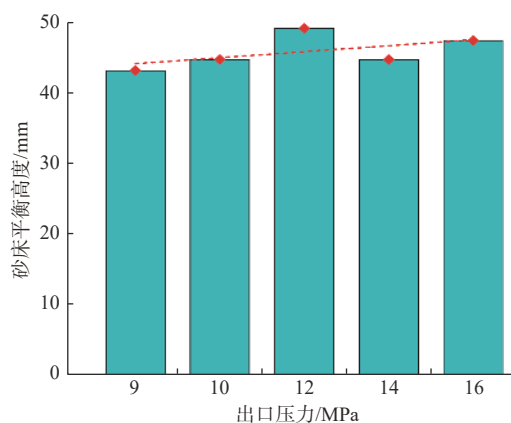


图 8 不同出口压力下水平环空砂床的平衡高度

Fig.8 Equilibrium height of sand bed in horizontal annulus under different outlet pressure

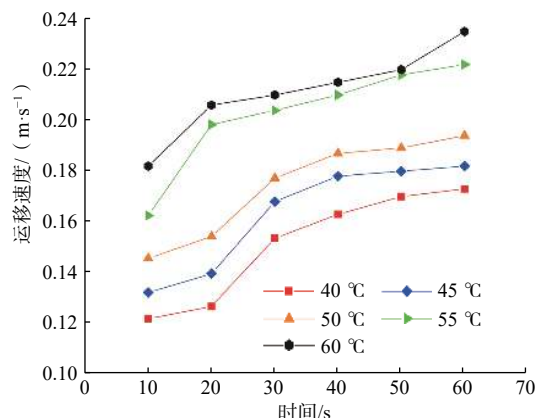


图 9 流体温度对水平环空砂粒运移速度的影响

Fig.9 Effect of fluid temperature on sand transport velocity in horizontal annulus

由图 9 可知, 在相同超临界 CO₂ 质量流量下, 砂粒的运移速度随着流体温度升高而增大。这是因为随着流体温度升高, 超临界 CO₂ 密度降低, 在质量流量相同的情况下会使环空流速增大, 砂粒获得了更大的驱动力, 进而使其运移速度增大。利用王海柱编制的超临界 CO₂ 物性参数计算软件^[26], 计算得到温度 40, 45, 50, 55 和 60 °C 下井筒内超临界 CO₂ 流体的密度分别为 717.49, 657.25, 583.99, 503.47 和 433.15 kg/m³, 即随着温度升高, 环空中流体的密度分别降低了 60.24, 73.26, 80.52 和 70.32 kg/m³。由此可知, 水平环空中超临界 CO₂ 的密度在温度由 50 °C 升至 55 °C 时降低幅度最大, 达 80.52 kg/m³, 导致砂粒的运移速度在该温度区间上有较大的增大幅度。

不同温度下水平环空砂床的平衡高度如图 10 所示。

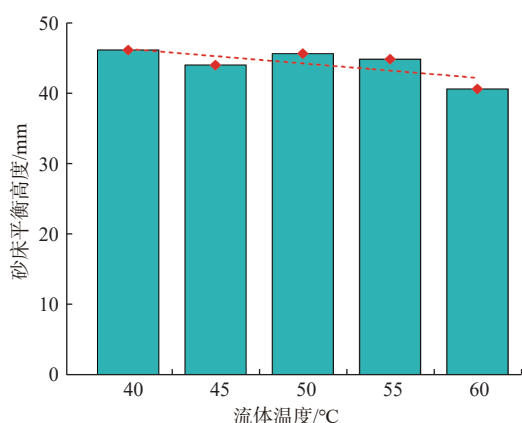


图 10 不同流体温度下水平环空砂床的平衡高度

Fig.10 Equilibrium height of sand bed in horizontal annulus with different temperature of fluids

从图 10 可以看出,在出口压力、质量流量相同条件下,砂床高度随着流体温度升高呈下降趋势。这表明,流体温度升高导致的流速增大影响程度要大于流体密度降低对携砂效果的影响程度。因此,进行压裂施工时,应在合理的温度范围内适当提高流体温度,以减少砂粒在环空中的堆积。

4 结 论

1)文中试验条件下,超临界 CO_2 能够在水平环空中有效输送砂粒。

2)超临界 CO_2 注入质量流量增大,能够扩大和增强水平环空内高速紊流区的范围和强度,使更多的砂粒进入悬浮层,从而降低砂床的平衡高度。

3)较高的砂比会增强砂粒间、砂粒与管壁之间的相互作用,导致砂粒运移需要更大的驱动力。

4)在相同的注入条件下,环空内砂粒的运移速度随出口压力升高而降低,并且降低幅度逐渐减小。

5)超临界 CO_2 质量流量和出口压力不变时,提高流体温度,会导致流体流速升高、密度降低,但前者对携砂效果的影响大于后者。因此,在合理的温度范围内提高流体温度,有利于减少环空内砂粒的堆积。

参 考 文 献

References

[1] 王海柱,沈忠厚,李根生.超临界 CO_2 开发页岩气技术[J].石油钻探技术,2011,39(3):30-35.
WANG Haizhu, SHEN Zhonghou, LI Gensheng. Feasibility analysis on shale gas exploitation with supercritical CO_2 [J]. Drilling Petro-

leum Techniques, 2011, 39(3): 30-35.

- [2] 王海柱,李根生,郑永,等.超临界 CO_2 压裂技术现状与展望[J].石油学报,2020,41(1):116-126.
WANG Haizhu, LI Gensheng, ZHENG Yong, et al. Research status and prospects of supercritical CO_2 fracturing technology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 116-126.
- [3] MIDDLETON R S, CAREY J W, CURRIER R P, et al. Shale gas and non-aqueous fracturing fluids: opportunities and challenges for supercritical CO_2 [J]. Applied Energy, 2015, 147: 500-509.
- [4] ZHOU Junping, NAN Hu, XIAN Xuefu, et al. Supercritical CO_2 fracking for enhanced shale gas recovery and CO_2 sequestration: results, status and future challenges[J]. Advances in Geo-Energy Research, 2019, 3(2): 207-224.
- [5] 王在明,邱正松,朱宽亮.超临界二氧化碳钻井流体井筒温度传递特性[J].钻井液与完井液,2010,27(6):1-3.
WANG Zaiming, QIU Zhengsong, ZHU Kuanliang. Research on features of wellbore temperature transmission for supercritical CO_2 drilling fluid[J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 2010, 27(6): 1-3.
- [6] 罗攀登,李涵宇,翟立军,等.塔河油田超临界 CO_2 压裂井筒与裂缝温度场[J].断块油气田,2019,26(2):225-230.
LUO Pandeng, LI Hanyu, ZHAI Lijun, et al. Supercritical CO_2 fracturing wellbore and fracture temperature field in Tahe Oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2019, 26(2): 225-230.
- [7] 张艳,楼一珊,牟春国,等.超临界二氧化碳压裂过程中注入压力对致密砂岩力学特征的影响[J].石油钻采工艺,2019,41(2):242-248.
ZHANG Yan, LOU Yishan, MOU Chunguo, et al. Effects of supercritical carbon dioxide fracturing on rock mechanics characteristics of tight sandstone gas reservoirs[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(2): 242-248.
- [8] 丁璐,倪红坚.超临界二氧化碳钻井瞬态波动压力[J].断块油气田,2020,27(1):117-121.
DING Lu, NI Hongjian. Transient surge and swab pressure analysis of supercritical carbon dioxide drilling[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2020, 27(1): 117-121.
- [9] 张越琪,苟利鹏,乔文波,等.致密油藏超临界二氧化碳吞吐开发特征实验研究[J].特种油气藏,2021,28(1):130-135.
ZHANG Yueqi, GOU Lipeng, QIAO Wenbo, et al. Experimental study on development characteristics of supercritical CO_2 huff and puff in tight oil reservoirs[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(1): 130-135.
- [10] 仲冠宇,左罗,蒋廷学,等.页岩气井超临界二氧化碳压裂起裂压力预测[J].断块油气田,2020,27(6):710-714.
ZHONG Guanyu, ZUO Luo, JIANG Tingxue, et al. Fracture initiation pressure prediction for shale gas well fracturing with supercritical carbon dioxide[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2020, 27(6): 710-714.
- [11] 程宇雄,李根生,王海柱,等.超临界 CO_2 连续油管喷射压裂可行性分析[J].石油钻采工艺,2013,35(6):73-77.
CHENG Yuxiong, LI Gensheng, WANG Haizhu, et al. Feasibility analysis on coiled-tubing jet fracturing with supercritical CO_2 [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(6): 73-77.
- [12] 王海柱,李根生,沈忠厚,等.超临界 CO_2 钻井与未来钻井技术发

- 展[J]. 特种油气藏, 2012, 19(2): 1-5.
- WANG Haizhu, LI Gensheng, SHEN Zhonghou, et al. Supercritical carbon dioxide drilling and the development of future drilling technology[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2012, 19(2): 1-5.
- [13] 李根生, 王海柱, 沈忠厚, 等. 超临界 CO₂ 射流在石油工程中应用研究与前景展望[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 76-80.
- LI Gensheng, WANG Haizhu, SHEN Zhonghou, et al. Application investigations and prospects of supercritical carbon dioxide jet in petroleum engineering[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, 37(5): 76-80.
- [14] WANG Haizhu, LI Gensheng, SHEN Zhonghou, et al. Experiment on rock breaking with supercritical carbon dioxide jet[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2015, 127: 305-310.
- [15] WANG Ruihe, DU Yukun, NI Hongjian, et al. Hydrodynamic analysis of suck-in pulsed jet in well drilling[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2011, 23(1): 34-41.
- [16] DU Yukun, WANG Ruihe, NI Hongjian, et al. Determination of rock-breaking performance of high-pressure supercritical carbon dioxide jet[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2012, 24(4): 554-560.
- [17] ZHENG Yong, WANG Haizhu, YANG Bing, et al. CFD-DEM simulation of proppant transport by supercritical CO₂ in a vertical planar fracture[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 84: 103647.
- [18] 金军, 王冉. 超临界 CO₂ 注入与页岩气储层相互作用的研究进展[J]. 断块油气田, 2018, 25(3): 363-366.
- JIN Jun, WANG Ran. Research progress of supercritical CO₂ injection and its interaction with shale gas reservoirs[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2018, 25(3): 363-366.
- [19] 王瑞和, 倪红坚, 宋维强, 等. 超临界二氧化碳钻井基础研究进展[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(2): 1-9.
- WANG Ruihe, NI Hongjian, SONG Weiqiang, et al. The development of fundamental research on supercritical carbon dioxide drilling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(2): 1-9.
- [20] 沈忠厚, 王海柱, 李根生. 超临界 CO₂ 钻井水平井段携岩能力数值模拟[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(2): 233-236.
- SHEN Zhonghou, WANG Haizhu, LI Gensheng. Numerical simulation of the cutting-carrying ability of supercritical carbon dioxide drilling at horizontal section[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(2): 233-236.
- [21] 李良川, 王在明, 邱正松, 等. 超临界二氧化碳钻井流体携岩特性实验[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 355-359.
- LI Liangchuan, WANG Zaiming, QIU Zhengsong, et al. An experimental study on carrying cuttings features for supercritical carbon dioxide drilling fluid[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(2): 355-359.
- [22] 霍洪俊, 王瑞和, 倪红坚, 等. 超临界二氧化碳在水平井钻井中的携岩规律研究[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(2): 12-17.
- HUO Hongjun, WANG Ruihe, NI Hongjian, et al. Cuttings carrying pattern of supercritical carbon dioxide in horizontal wells[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2014, 42(2): 12-17.
- [23] HUO Hongjun, WANG Ruihe, NI Hongjian, et al. Study of critical annulus up-returning velocity of cuttings carried by supercritical CO₂ in deviated well[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2017, 20: 105-112.
- [24] 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 capability of supercritical carbon dioxide in horizontal wells[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2015, 39(2): 63-68.
- [25] 宋维强, 霍洪俊, 王瑞和, 等. 直井段超临界二氧化碳携岩数值模拟分析[J]. 重庆大学学报, 2015, 38(3): 100-106.
- SONG Weiqiang, HUO Hongjun, WANG Ruihe, et al. Numerical simulation of cutting-carrying efficiency of supercritical carbon dioxide in vertical well[J]. *Journal of Chongqing University*, 2015, 38(3): 100-106.
- [26] 王海柱. 超临界 CO₂ 钻井井筒流动模型与携岩规律研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2011.
- WANG Haizhu. Research on Wellbore Flow Model and Cutting-carrying Law of Supercritical CO₂ Drilling [D]. Beijing: China University of Petroleum-Beijing, 2011.

[编辑 刘文臣]