

超临界 CO₂ 射流在石油工程中应用研究与前景展望

李根生, 王海柱, 沈忠厚, 田守嵘, 黄中伟, 程宇雄

(中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249)

摘要: 阐述超临界 CO₂ 流体物理特性, 分析超临界 CO₂ 射流在喷射钻井、喷射压裂、驱油提采、冲砂解堵和油套管除垢等作业中的原理和技术优势, 探讨超临界 CO₂ 开发非常规油气藏的可行性, 展望超临界 CO₂ 射流在石油工程中的应用前景。

关键词: 超临界 CO₂; 水射流; 钻井; 压裂; 非常规油气; 前景展望

中图分类号: TQ 028 **文献标志码:** A

Application investigations and prospects of supercritical carbon dioxide jet in petroleum engineering

LI Gen-sheng, WANG Hai-zhu, SHEN Zhong-hou, TIAN Shou-ceng,
HUANG Zhong-wei, CHENG Yu-xiong

(State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The physical properties of supercritical CO₂ fluid was explained firstly. Then the principle and predominance of supercritical CO₂ jet application to jet drilling, jet fracturing, oil displacement and enhanced recovery, sand plug removing, as well as scale removing in drill pipe and casing operations were analyzed. The feasibility of supercritical CO₂ fluid in developing unconventional oil and gas reservoir was also discussed and the outlook of supercritical CO₂ jet application to petroleum engineering was viewed.

Key words: supercritical CO₂; water jet; drilling; hydraulic fracturing; unconventional oil and gas; application prospect

高压水射流技术在油气钻井、压裂增产等技术方面发挥了重要作用, 如高压喷射钻井, 水射流冲砂洗井和水力喷射压裂等。近年来浅层和易采油气资源日益减少, 油气开发向深层、深水以及非常规油气迈进, 而这些油气藏, 尤其是非常规油气, 开发风险较大、成本较高。水射流技术已无法很好地满足这类油气藏的开发技术需求。超临界 CO₂ 流体具有高密度、低黏度和高扩散性等特性, 超临界 CO₂ 射流相比于水射流, 不仅破岩门限压力低, 而且破岩速度快^[1-2]。超临界 CO₂ 流体中不含液相(水), 也不含固相(固体颗粒), 利用它进行油气驱替时, 不仅不会对储层造成污染和损害, 相反还能进一步增大储层孔隙度和渗透率, 增强原油的流动性, 改善油、水流度比, 增加储层能量, 置换吸附在储层中的页岩

气和煤层气(CO₂ 与储层的吸附能力强于 CH₄), 从而提高油气单井产量和采收率^[3-4]。另外, 还可以利用超临界 CO₂ 射流进行储层无水压裂改造, 尤其适合黏土含量较高的页岩气藏压裂改造, 能从根本上解决储层污染问题。在驱替和置换的同时, 还能实现 CO₂ 的永久埋存^[5]。笔者阐述超临界 CO₂ 流体的相态与热物理性质, 分析超临界 CO₂ 射流在喷射钻井、喷射压裂、驱油提采、冲砂解堵和油套管除垢等作业中的原理和技术优势, 探讨超临界 CO₂ 开发非常规油气藏的可行性, 并展望超临界 CO₂ 射流在石油工程中的应用前景。

1 超临界 CO₂ 相态与热物理性质

CO₂ 广泛存在于自然界中, 是导致地球变暖的

主要温室气体。CO₂ 是无色无臭、无毒无害,其水溶液略呈酸性的气体。它不能燃烧,易被液化,也容易回收循环利用,在化工领域被称为环境友好型绿色溶剂,在大气中含量为 0.03% ~ 0.04%,但随着工业化发展,在大气中的含量不断增高^[6]。

图 1 所示,CO₂ 的三相点为 -56.56 °C、0.52 MPa,临界点为 31.1 °C、7.38 MPa,也就是 CO₂ 的温度和压力同时大于临界点温度和压力时达到超临界状态^[1]。

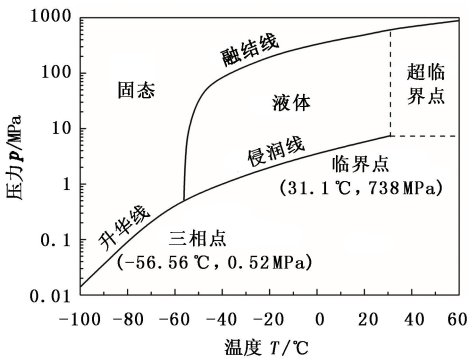


图 1 CO₂ 相态图(ChemicaLogic Corporation, 1999)

Fig.1 Phase diagram of carbon dioxide

超临界流体既不同于气体,也不同于液体,具有许多独特的物理化学性质。超临界流体的密度接近于液体,它与温度和压力呈非线性关系,随压力升高而增大,随温度升高而减小,同时其黏度与气体接近,扩散系数也比液体大,因此它的传热和传质能力较强^[7]。表 1^[7] 为超临界流体、气体及液体不同性质对比。

表 1 超临界流体、气体及液体性质

Table 1 Properties of supercritical fluid, gas and liquid

形态	密度 $\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	黏度 $\mu/$ ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	扩散系数/ ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
气体(常温、常压)	0.000 6 ~ 0.002	10^{-2}	10^{-1}
超临界流体	0.2 ~ 0.9	0.03 ~ 0.1	10^{-4}
液体(常温、常压)	0.6 ~ 1.6	0.2 ~ 3.0	10^{-5}

2 超临界 CO₂ 射流破岩钻井

超临界 CO₂ 钻井是利用超临界 CO₂ 流体作为钻井液的一种新型钻井方式,它利用高压泵将低温液态 CO₂ 泵送到钻杆中,液态 CO₂ 下行到一定深度后达到超临界态,利用超临界 CO₂ 射流辅助破岩达到快速钻井的目的^[3]。超临界 CO₂ 钻井较常规钻井优势主要有两点:一是喷射破岩门限压力低,破岩速度快;二是对储层无污染。

超临界 CO₂ 射流能够破碎坚硬的页岩、大理岩以及花岗岩,其破岩门限压力比水射流要小得多。Kolle 等^[1]实验表明,在 55 ~ 193 MPa 的喷射压力下,岩样为坚硬的页岩和大理岩,超临界 CO₂ 射流破岩的门限压力在大理岩样中为水射流破岩门限压力的 2/3,在页岩中为 1/2 或更小。此外,还在页岩中进行了小尺寸喷射钻井实验,利用带刮刀的微型钻头进行辅助破岩,结果表明,在曼柯斯页岩中利用超临界 CO₂ 的钻进速度是用水的 3.3 倍,破岩所需比能(比能为破岩所需水力、机械能量与破碎剥落的岩石体积比)仅为用水力钻井时的 20%^[8-9]。由中国石油大学研制了超临界 CO₂ 射流破岩实验系统(图 2),得到超临界 CO₂ 射流在人造水泥岩心上破碎深度随喷距的变化曲线(图 3)。可以看出,超临界 CO₂ 射流破岩存在最优破岩范围,当喷距在 2 ~ 4 倍喷嘴直径范围内时,破岩孔眼最深。

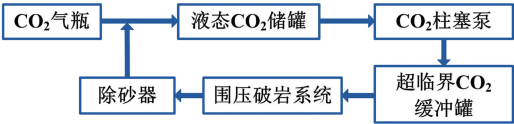


图 2 超临界 CO₂ 射流破岩实验系统流程图

Fig.2 Flow diagram of SC-CO₂ jet breaking rock experiment system

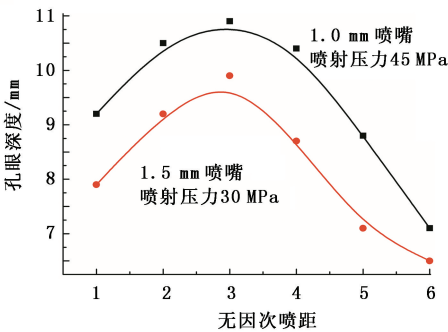


图 3 喷射距离对超临界 CO₂ 射流破岩深度的影响

Fig.3 Effect of jet distance on erosion depth of SC-CO₂ jet

利用功率 100 kW、直径 50 mm 的钻井设备进行喷射钻井,射流介质为水和超临界 CO₂,所钻岩石为曼柯斯页岩。在压力低于 124 MPa 的时候,水力射流不能破岩,而超临界 CO₂ 喷射破岩的有效压力却低至 55 MPa^[1]。

在采用常规钻井液打开储层时,钻井液中的固相颗粒进入油气层会堵塞孔隙喉道,泥浆滤液也会侵入到油气层中,导致油气层中的黏土膨胀,进一步堵塞地层孔隙喉道。同时还会引发水锁效应,增加油气流动阻力。超临界 CO₂ 流体既无固相也无液

相,在利用超临界 CO₂ 流体钻开油气储层时,从根本上避免了上述危害发生。此外,利用连续油管输送超临界 CO₂ 钻井是一种有前途的高效、低成本、无污染钻井方法,它可以实现带压起下作业,同时避免了接单根,能进一步提高钻井效率(图 4)。

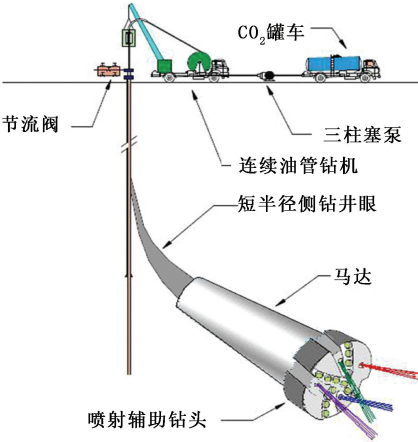


图 4 连续油管输送超临界 CO₂ 钻井示意图
Fig. 4 Schematic drawing of coiled tubing drilling with SC-CO₂

3 超临界 CO₂ 喷射压裂增产

水力压裂技术为低渗特低渗油田、页岩气藏和煤层气藏等非常规油气藏增产的主要措施之一。对于非常规油气压裂改造,需要探索低水量、低成本、无污染、高效率的压裂方法。超临界 CO₂ 喷射压裂原理如图 5 所示。中国石油大学开展了超临界 CO₂ 射流压裂的机制和方法研究,图 6 表明,在 3 种喷嘴压降条件下,超临界 CO₂ 射流的孔内压力均比相同条件下水射流的高,说明利用超临界 CO₂ 进行喷射压裂具有比水射流更强的射流增压效果,有利于在较低的环空压力条件下压开地层。

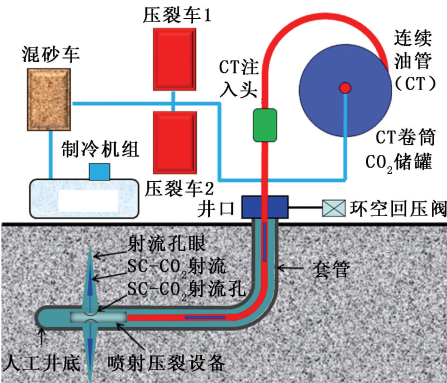


图 5 超临界 CO₂ 连续油管喷射压裂的原理示意图
Fig. 5 Schematic drawing of SC-CO₂ jet fracturing with coiled tubing

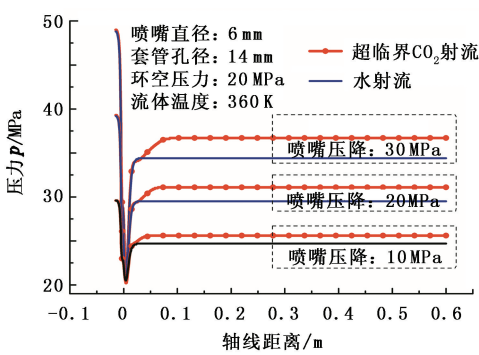


图 6 水射流与超临界 CO₂ 射流的孔内增压效果对比
Fig. 6 Pressure comparison between water jet and SC-CO₂ jet

超临界 CO₂ 喷射压裂方法具有独特的优势和广阔的发展前景。首先,超临界 CO₂ 喷射破岩效率高,破岩门限压力低,因此可以在超临界 CO₂ 流体中添加磨料,进行套管开窗喷射压裂,这样不仅降低了系统注入压力要求,而且提高了压裂施工的安全性;其次,超临界 CO₂ 流体黏度较低,在储层原有的微裂缝中,高黏压裂液无法进入,而超临界 CO₂ 流体却可以随意流动,有助于井筒中压力的传递,降低压裂系统压力,且能使储层产生多而复杂的微裂缝,在储层内形成裂缝网络,提高单井产量和采收率^[10]。此外,超临界 CO₂ 对储层无污染,当它进入储层时,能够避免孔隙喉道堵塞、储层黏土膨胀、岩石润湿反转和水敏等危害的发生。同时,在其超强溶剂化能力作用下,能够溶解近井地带的重油组分和其他污染物,减小近井地带油气流动阻力。因此,超临界 CO₂ 喷射压裂完毕后,无需注入破胶剂也无需返排,可直接投产,不仅减少作业工序,降低成本,还可以防止裂缝中支撑剂回流井筒。如果储层原油黏度较高,还可以选择闷井,使超临界 CO₂ 与原油充分作用,增加储层能量,降低原油黏度,增强其流动性,从而进一步提高原油采收率^[11]。超临界 CO₂ 流体的表面张力为零,因此它能够进入到任何大于超临界 CO₂ 分子的空间。同时对于页岩层和煤层来说,CO₂ 分子对其吸附能力远大于 CH₄ 分子,因此在进行页岩气藏和煤层气藏压裂时,超临界 CO₂ 进入储层还能置换吸附气含量高达 85% 的煤层气和页岩气,进一步提高气藏采收率和气井产量,最重要的是这类气藏渗透率极低,滤失性相对较小,更有利于裂缝的形成。因此超临界 CO₂ 非常适合于页岩气藏、煤层气藏和致密砂岩气藏的压裂改造^[12]。

4 超临界 CO₂ 驱替提高采收率

超临界 CO₂ 流体在油气驱采时能够取得较好的

效果。CO₂ 溶于原油后能够降低原油黏度,改善油、水流量比,同时超临界 CO₂ 流体在油气藏中容易流动扩散,能够扩大油藏波及面积。CO₂ 溶于原油后能够使原油体积膨胀,增加原油流动能量,大幅降低油水界面张力,减小残余油饱和度,从而提高原油采收率。CO₂ 与原油混相后,不仅能萃取和汽化原油中轻质烃,而且还能形成 CO₂ 和轻质烃混合的油带,油带移动驱油可大幅提高原油采收率。大量的 CO₂ 溶于原油中具有溶解气驱的作用,随着压力下降,CO₂ 从液体中逸出,液体内产生气体驱动力,提高了驱油效果。图 7 为超临界 CO₂ 高效驱替油气示意图。CO₂ 与页岩和煤岩的吸附强度远大于 CH₄ 与页岩和煤岩的吸附强度^[13],图 8 为超临界 CO₂ 驱替置换原理示意图。当利用超临界 CO₂ 进行页岩气或煤层气强化驱采时,CO₂ 能够置换吸附在岩石上的 CH₄,同时将游离的 CH₄ 驱入井筒,从而在提高单井产量和采收率的同时,实现 CO₂ 永久封存。

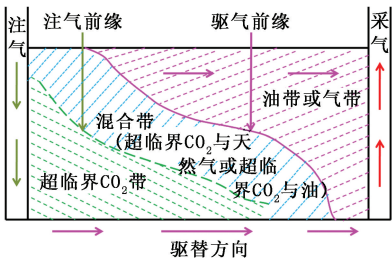


图 7 超临界 CO₂ 驱替示意图

Fig.7 Schematic drawing of SC-CO₂ displacement in reservoirs

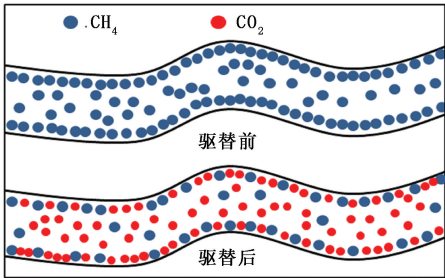


图 8 超临界 CO₂ 驱替置换原理图

Fig.8 Schematic drawing of SC-CO₂ displacement and replacement

5 超临界 CO₂ 射流冲砂洗井和油套管除垢

5.1 超临界 CO₂ 射流冲砂洗井

油气井出砂、压裂砂残留、井壁污染堵塞等一直倍受关注。目前一般采用水(必要时加入一些添加剂)进行洗井作业,在遇到压力衰竭储层时,常采用

氮气泡沫、二氧化碳泡沫或者空气泡沫进行欠平衡洗井,在一定程度上缓解了因井筒堵塞造成的产量递减问题。然而这类洗井方式并没有从根本上解决井筒堵塞问题,例如,水进入储层后,对水敏性油气藏会造成较大伤害,尽管采用泡沫洗井能够降低井底压力,但泡沫质量难以控制,很容易造成井底压力波动伤害储层;此外,沥青等高分子有机物夹杂砂粒、黏土等的堵塞物具有很强的黏弹性,水射流很难破碎这类物质,也很难将这类物质彻底清除。

超临界 CO₂ 射流洗井原理示意图如图 9 所示。

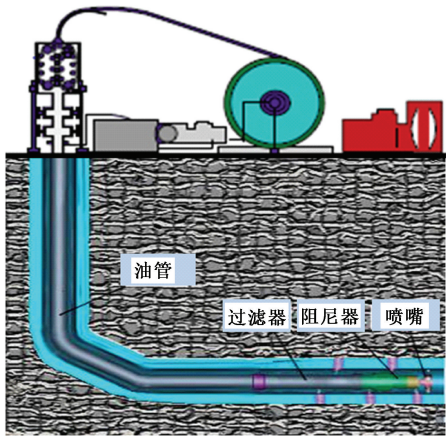


图 9 超临界 CO₂ 射流洗井原理示意图

Fig.9 Schematic drawing of SC-CO₂ jet sand plug removing

超临界 CO₂ 射流破岩门限压力较低,同时它又具有较强的溶剂化能力,能以较低的喷射压力破碎并溶解这些高分子有机物,并轻易地携带出井筒。

超临界 CO₂ 流体黏度低、表面张力接近于零、扩散系数大,这些特点使得它在洗井过程中很容易进入到微小孔隙及裂缝中,溶解高分子有机物及其他杂质,清洗更彻底。

超临界 CO₂ 流体密度可调范围较宽,在井筒温度和压力条件下,调节井口回压便可控制井底压力,实现欠平衡、平衡或者过平衡洗井作业。

5.2 超临界 CO₂ 射流油套管除垢

在油气井长时间生产过程中,由于地层水矿化度较高,很容易在油套管上结垢,结垢厚度过大将导致无法正常生产。传统除垢有机械、化学药剂、水射流等方式。机械除垢很容易对油套管造成损伤;化学药剂除垢也会对油套管造成腐蚀;水射流除垢虽然对油套管损伤小,但是遇到坚硬水垢却无法彻底清除,同时它要求的泵压也较高,若采用磨料射流除垢,压力控制不好会射穿油套管。

由于超临界 CO₂ 射流破岩门限压力低,破岩速

度快,因此它不仅降低了除垢所需泵压,而且除垢速度快、效率高,对油套管本身却不会造成任何伤害。因此用超临界 CO_2 射流进行油套管除垢会取得满意的效果^[14]。图 10 为超临界 CO_2 油套管除垢示意图。

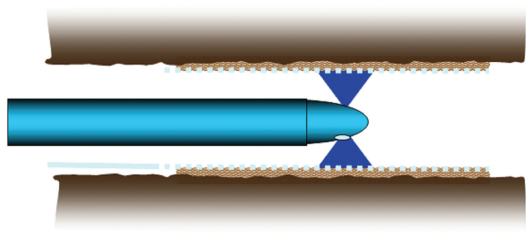


图 10 超临界 CO_2 油套管除垢示意图

Fig. 10 Schematic drawing of SC- CO_2 jet scale removing

6 超临界 CO_2 开发非常规油气藏可行性

非常规油气藏包括页岩气、煤层气、致密砂岩气以及天然气水合物等,其中天然气水合物尚未进入商业化开发。对于页岩气、煤层气和致密砂岩气来说,具有“三低”特征,即低压、低孔、低渗,这导致其自然产量极低,因此要严格控制钻采成本,才具有经济开采价值。为了降低钻井成本,页岩气和煤层气井大多采用水基钻井液,大大增加了井壁垮塌的风险。压裂增产时大部分采用滑溜水加砂作业,无法避免压裂液对储层的污染。此外,页岩气和煤层气的吸附气含量较高,开采周期长,且采收率低。

超临界 CO_2 流体不含液态水,钻井过程中不会使井壁岩层水化膨胀引发垮塌,相反 CO_2 溶解于水形成碳酸后,还可有效抑制黏土的膨胀,避免井壁垮塌^[15]。利用超临界 CO_2 流体进行储层压裂改造时,不会对储层造成水锁、岩石润湿反转和黏土膨胀等伤害,从根本上避免了储层伤害。因此超临界 CO_2 射流可望成为非常规油气开发的有力技术^[16]。

7 前景与展望

随着工业技术的快速发展,超临界 CO_2 流体的控制技术将更加成熟,超临界 CO_2 钻井、喷射压裂、

冲砂解堵和油套管除垢等技术将得到广泛应用。此外,超临界 CO_2 射流还能用于处理含油岩屑以及钻井液等废弃物,将废弃物中的油污等有机物萃取出来,减小环境污染,因此超临界 CO_2 射流也能在石油工程的环保方面发挥重要作用。

超临界 CO_2 流体将作为钻井液、压裂液和洗井液等在石油工程中发挥重要作用,从而在钻井、压裂和洗井等方面派生出多项新技术,如超临界 CO_2 钻超短半径水平井、超临界 CO_2 辅助连续油管钻井、超临界 CO_2 钻辐射水平井、超临界 CO_2 喷射分段压裂、超临界 CO_2 欠平衡洗井技术等,这些技术的出现将从根本上改变现有水射流技术由于其自身特性造成的缺陷,进一步提高工作效率,降低油气钻井及开发成本。

参考文献:

- [1] KOLLE J J. Coiled-tubing drilling with supercritical carbon dioxide [R]. SPE 65534, 2000.
- [2] GUPTA A P, GUPAT A, LANGLINAIS J. Feasibility of supercritical carbon dioxide as a drilling fluid for deep underbalanced drilling operation [R]. SPE 96992, 2005.
- [3] LI Gen-sheng, WANG Hai-zhu, SHEN Zhong-hou. Investigation and prospects of supercritical carbon dioxide jet in petroleum engineering[C]//Proceeding of 10th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology, Jeju, Koera, 2013:3-10.
- [4] 王在明. 超临界二氧化碳钻井液特性研究[D]. 东营:中国石油大学石油工程学院,2008.
WANG Zai-ming. Feature research of supercritical carbon dioxide drilling fluid [D]. Dongying: College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, 2008.
- [5] 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):30-34.
WANG Hai-zhu, SHEN Zhong-hou, LI Gen-sheng. Feasibility analysis on shale gas exploitation with supercritical CO_2 [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011,39(3):30-34.
- [6] 彭英利,马承愚. 超临界流体技术应用手册[M]. 北京:化学工业出版社,2005:378-405.

(下转第 87 页)

- 53-55.
- [2] AADNΦ Y B S, EDLAND C. Borehole stability of multi-lateral junctions [R]. SPE 56757, 1999.
- [3] HOANG S, ABOUSLEIMAN Y, AL-TAHINI A M. Multilaterals drilling and sustainable openhole production from theory to field-case studies [R]. SPE 116138-PA, 2010.
- [4] MANRÍQUEZ A L, PODIO A L, SEPEHRNOORI K. Modeling of stability of junctions in multilateral wells using finite element; the 42nd US Rock Mechanics Symposium (USRMS), San Francisco, CA, June 29-July 2, 2008[R]. American Rock Mechanics Association, 2008.
- [5] FUENTES J A, ECONOMIDES M J, CARBONELL R S. Stability of junctures for multilateral/multibranched wells [R]. SPE 57279, 1999.
- [6] MANRIQUEZ A L, PODIO A, SEPEHRNOORI K. Modeling of the stability of multibranch horizontal open holes [R]. SPE 114117-MS, 2008.
- [7] LIU J X, LIU J, ZHU W C, et al. Simulation of borehole failure with impact of mud permeation at multilateral junction [R]. SPE 88605, 2004.
- [8] ZIENKIEWICZ O C, TAYLOR R L. The finite element method [J]. Butterworth-Heinemann, 2000, 4(23):71-73.
- [9] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A plastic-damage model for concrete [J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(3):299-326.
- [10] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124:892-900.
- [11] INC A. Abaqus analysis user's manual [R]. Rising Sun Mills; SIMULIA, 2010.
- [12] DIGGINS E. A proposed multi-lateral well classification matrix [J]. World Oil, 1997, 11(218):107.
- [13] 安克, 王敏生. 胜利油田分支井钻井技术现状及展望 [J]. 石油钻探技术, 2003, 31(6):7-9.
AN Ke, WANG Min-sheng. Shengli Oilfield branch wells drilling technology present situation and prospects [J]. Journal of Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31(6):7-9.
- [14] PAPANASTASIOU P, SIBAI M, HEILAND J, et al. Stability of a multilateral junction: experimental results and numerical modeling [R]. SPE/ISRM 78212, 2002.
- [15] 葛洪魁, 林英松. 油田地应力的分布规律 [J]. 断块油气田, 1998, 5(5):1-5.
GE Hong-kui, LIN Ying-song. In-situ stress distribution law of oil field [J]. Journal of Fault-Block Oil & Gas Field, 1998, 5(5):1-5.

(编辑 李志芬)

(上接第80页)

- [7] 韩布兴. 超临界流体科学与技术[M]. 北京:中国石化出版社, 2005:1-40.
- [8] AL-ADWANI F. Mechanistic modeling of an underbalanced drilling operation utilizing supercritical carbon dioxide [D]. Louisiana: Louisiana State University, 2007.
- [9] AL-ADWANI F, LANGLINAIS J P, HUGHES R. Modeling of an underbalanced drilling operation utilizing supercritical carbon dioxide [R]. SPE 114050, 2008.
- [10] 李孟涛, 单文文, 刘文贵. 超临界二氧化碳混相驱油机制实验研究[J]. 石油学报, 2006, 27(3):81-84.
LI Meng-tao, SHAN Wen-wen, LIU Wen-gui. Laboratory study on miscible oil displacement mechanism of supercritical carbon dioxide [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(3):81-84.
- [11] 郭万奎, 廖广志, 邵振波, 等. 注气提高采收率技术[M]. 北京:石油工业出版社, 2003:53-58.
- [12] WANG H, LI G, SHEN Z. A feasibility analysis on shale gas exploitation with supercritical carbon dioxide [J]. Energy Sources: Part A, 2012, 34(15):1426-1435.
- [13] 张杰, 林珊珊, 曲永林, 等. 煤层气气驱吸附及解吸规律实验研究[J]. 特种油气藏, 2012, 19(6):122-125.
ZHANG Jie, LIN Shan-shan, QU Yong-lin, et al. Experimental study on the regularity of absorption and desorption of coal seam gas [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2012, 19(6):122-125.
- [14] KOLLE J J. Coiled tubing drilling with supercritical carbon dioxide: US, 6347675[P]. 2002-02-19.
- [15] WANG Hai-zhu, SHEN Zhong-hou, LI Gen-sheng, et al. Shale gas exploitation with supercritical CO₂ technology [J]. Engineering Sciences, 2012, 10(4):13-17.
- [16] 沈忠厚, 王海柱, 李根生. 超临界 CO₂ 连续油管钻井可行性分析[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6):743-747.
SHEN Zhong-hou, WANG Hai-zhu, LI Gen-sheng. Feasibility analysis of coiled tubing drilling with supercritical carbon dioxide [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6):743-747.

(编辑 刘为清)