

文章编号:1009-9603(2020)01-0057-05

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2020.01.008

CO₂-原油混相带形成机理与表征方法

陈志豪¹,郝永卯¹,季迎春²,韦馨林¹,曾旭智¹

(1.非常规油气开发教育部重点实验室 中国石油大学(华东),山东 青岛 266580;

2.中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院,山东 东营 257015)

摘要:CO₂-原油混相带对CO₂驱开发效果具有重要影响,目前尚未提出合理的混相带表征方法。通过理论分析和组分数值模拟,对CO₂-原油混相带形成机理与表征方法进行系统研究,结果表明:混相带的形成受CO₂与原油间的汽化-凝析作用主导,混相带形成之后的演化主要受水动力弥散作用影响;将油气界面张力等于0.1 dyn/cm的等值线作为混相带后缘,将油相中CO₂含量为0.2的等值线作为混相带前缘,混相带宽度等于无因次混相带面积与混相带前缘包络线的长度之比;随着累积注入量的增大,在混相带前缘突破之前,混相带宽度逐渐增大,但增速会逐渐减慢,在混相带前缘突破之后到混相带后缘突破之前,混相带宽度迅速下降,之后趋于平稳。基于混相带的准确表征,可为开展混相带调控改善CO₂驱开发效果提供基础。

关键词:CO₂驱;混相带;形成机理;宽度;组分模拟

中图分类号:TE357.45

文献标识码:A

Formation mechanism and characterization method of CO₂-crude oil miscible zone

CHEN Zhihao¹, HAO Yongmao¹, JI Yingchun², WEI Xinlin¹, ZENG Xuzhi¹

(1.Key Laboratory of Unconventional Oil & Gas Development, Ministry of Education, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China; 2.Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: The CO₂-crude oil miscible zone has an important influence on the development effect of CO₂ flooding. At present, no reasonable miscible zone characterization method has been proposed. Through the theoretical analysis and component numerical simulation, the formation mechanism and characterization method of CO₂-crude oil miscible zone are systematically studied. The results show that the formation of the miscible zone is dominated by the vaporization-condensation between CO₂ and crude oil, and the evolution after the formation of the miscible zone is mainly affected by the hydrodynamic dispersion. The isoline with the oil-gas interfacial tension equal to 0.1 dyn/cm is taken as the trailing edge of the miscible zone, and the isoline with the CO₂ content in the oil phase equal to 0.2 is taken as the leading edge of the miscible zone. The width of the miscible zone is equal to the ratio of the area of the dimensionless miscible zone to the length of the envelope of the leading edge of the miscible zone. As the cumulative injection volume increases, the width of the miscible zone gradually increases but the growth rate gradually decreases before the leading edge of the miscible zone breaks. After the leading edge of the miscible zone breaks through and before the trailing edge of the miscible zone breaks, the width of the miscible zone decreases rapidly and then stabilizes. Based on the accurate characterization of the miscible zone, it can provide a basis for the regulation of the miscible zone to improve the development effect of CO₂ flooding.

Key words: CO₂ flooding; miscible zone; mechanism; width; compositional simulation

CO₂混相驱提高采收率的效果明显高于CO₂非混相驱^[1-2]。CO₂非混相驱条件下,黏性指进和重力

收稿日期:2019-10-25。

作者简介:陈志豪(1995—),男,山东济南人,在读硕士研究生,从事油藏工程相关科研工作。E-mail:chenzhishao_upc@163.com。

通信作者:郝永卯(1976—),男,河北深州人,副教授,博士。E-mail:haoyongmao@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“渤海湾盆地济阳坳陷致密油开发示范工程”(2017ZX05072-006)。

超覆使CO₂驱波及系数较低,同时油气之间存在界面张力,洗油效率较低。而CO₂混相驱条件下,CO₂与原油多次接触逐步混相,可有效改善黏性指进和重力超覆,从而提高波及系数;CO₂与原油界面张力消失,毛管力为0,理论上洗油效率可达100%。因此,相比于CO₂非混相驱,CO₂混相驱更有利于提高采收率^[3-9]。CO₂-原油混相带是表征混相驱和非混相驱的重要依据,但目前研究主要集中在混相过程方面,而对混相带的研究较少。赵越超等运用核磁共振成像技术研究CO₂混相驱驱油过程^[10],结果表明驱替前缘保持匀速推进,有效地抑制指进和窜流。章星等通过细管实验研究CO₂与原油的混相动态,并量化分析了混相带的特征^[11]。BOOTH等运用数值模拟研究混相驱驱油过程中混相带的变化特征^[12],结果表明混相带面积增大并存在黏性指进现象。李南等运用数值模拟技术,将流体黏度和油气界面张力作为划分混相带的指标,研究混相驱驱油过程中混相带的波及规律^[13]。为此,笔者在系统研究CO₂-原油混相带形成机理基础上^[14],建立混相带划分标准和表征方法,以期CO₂混相驱提供理论指导。

1 CO₂-原油相态模型

1.1 拟组分划分

根据胜利油田G区块原油的组成,并按照性质相似相近原则,对原油组分进行合并,考虑各组分的相态、摩尔分数、目标区块复配油的黏度等,将原油划分为CO₂, N₂+C₁, C₂-NC₄, IC₅-C₇, C₈-C₁₂, C₁₃-C₂₀及C₂₁₊,共7个拟组分,减少模型运算时间。各拟组分摩尔分数分别为0.004 4, 0.239 5, 0.080 7, 0.176 7, 0.262 3, 0.184 7和0.052 4。

1.2 PVT实验数据拟合

利用CMG-Winprop相态模拟软件包对PVT实验数据进行拟合来调整状态方程参数,建立真实的流体相态模型。主要调整数据包括各拟组分的相互作用系数、偏心因子、黏度系数等,主要拟合实验参数包括相对体积系数、膨胀系数、黏度等(图1)。从图1中可以看出,各实验参数的拟合效果较好,相态模型可以准确表征地层流体性质。

2 CO₂-原油混相带形成机理

CO₂与原油的混相过程一般为多级接触混相,且压力越大,CO₂与原油间的汽化-凝析作用强度和

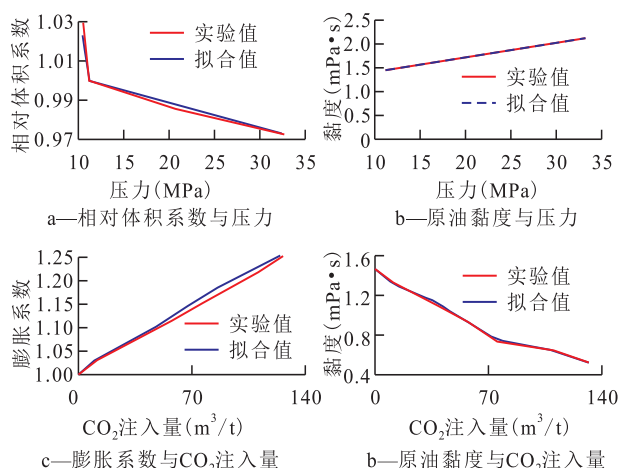


图1 各实验参数拟合结果

Fig.1 Fitting results of each parameter

速率越大,越易形成混相。从CO₂混相驱驱油过程中的多级接触混相示意图(图2)中可以看出,当CO₂注入油藏时,第一次与原油O接触、混合并经闪蒸分离产生平衡气相Y₁和平衡液相X₁。由于气相的流量大于液相的流量,且平衡气相Y₁将向前运移与原油接触,而平衡液相X₁与后方的注入气G相接触,为了方便表示,将平衡气相Y₁放在平衡液相X₁之前,这是油气第1次接触结果。

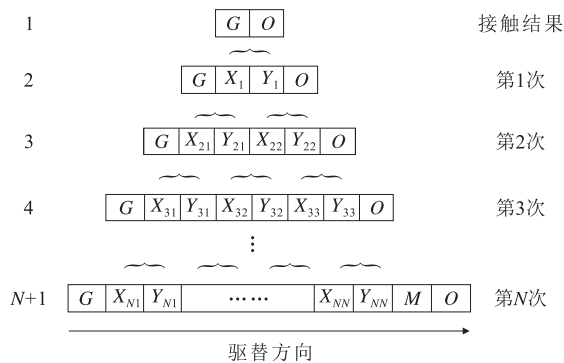


图2 CO₂混相驱驱油过程中多级接触混相示意

Fig.2 Diagram of multiple-contact miscibility during CO₂ miscible flooding

第2次接触包括注入气G向前运移时与平衡液相X₁的接触和平衡气相Y₁向前运移时与原油O的接触。驱替过程中,注入气G向前运移与平衡液相X₁接触、混合并经闪蒸分离产生平衡液相X₂₁和平衡气相Y₂₁,平衡气相Y₁向前运移和原油O接触、混合并经闪蒸分离产生平衡液相X₂₂和平衡气相Y₂₂,这是第2次接触结果。同理,第N次接触结果,将产生一系列平衡气相Y_{N1}, Y_{N2}, ..., Y_{NN}以及平衡液相X_{N1}, X_{N2}, ..., X_{NN}。

由图2可知,在CO₂混相驱驱油过程中,沿驱替方向,一开始油藏中的组成只有注入气G和原油O,这2个组成是不连续的、离散的,经过一系列的汽

化-凝析作用,逐渐产生一系列连续分布的平衡气相 $Y_{N1}, Y_{N2}, \dots, Y_{NN}$ 以及平衡液相 $X_{N1}, X_{N2}, \dots, X_{NN}$,且随着接触次数的增加,气相组成 Y_{NN} 和液相组成 X_{NN} 越来越接近,最终达到一致并实现混相,形成混相带。因此,在混相过程中,汽化-凝析作用使油藏中气相的组成从注入气 G 的组成逐渐的、连续的变化为一系列连续的组成 $Y_{N1}, Y_{N2}, \dots, Y_{NN}$,从而实现注入气性质(黏度、密度等)到混相带性质的平稳过渡。

在混相带形成之前,气相前缘的组成 Y_{NN} 逐渐靠近临界点,被富化的程度越来越高,与原油 O 组成也越来越接近,因此气相前缘与原油间的汽化-凝析作用在混相带形成过程中越来越弱。当混相带 M 形成之后,位于混相带之后的平衡气相 Y_{NN} 无法与原油 O 直接接触,而是与混相带 M 后缘相接触。混相带后缘的组成位于气液相平衡的临界点,而气相前缘的组成 Y_{NN} 也非常靠近临界点,即可认为气相前缘组成与混相带后缘的组成非常接近,因此在混相带 M 形成后,气相前缘与混相带后缘间的汽化-凝析作用非常弱。

另一方面,当混相带刚形成时,可认为混相带前缘的组成也位于气液相平衡的临界点,混相带前缘与原油相接触。由于混相带前缘的组分含量(CO₂和轻质组分)和原油组分含量存在差异,混相带前缘中CO₂含量较高,轻质组分含量较低,造成混相带和原油组分浓度和流速分布不均,且混相带和原油是可以互溶的,从而引起分子扩散和机械弥散带前缘和原油之间存在水动力弥散现象。与汽化-凝析作用使注入气组成到临界点组成连续变化作用类似,水动力弥散作用的结果将使混相带组成与原油的组成连续的变化。

综上所述,CO₂与原油的混相过程可以分为2个步骤:①混相带形成之前,CO₂前缘不断向前运移,不断与原油接触,通过多次的、较强的汽化-凝析作用实现油气混相,形成混相带。在这个过程中汽化-凝析作用使油藏中注入气组成到临界点组成连续变化,汽化-凝析作用逐渐减弱。②混相带形成之后,由于混相带前缘与原油组分浓度存在差异,在混相带前缘将出现水动力弥散现象,最终使得混相带与原油间的组成连续变化。

3 混相带表征方法

3.1 数值模拟模型的建立

建立二维平面油藏模型,尺寸为200 m×200 m×8 m,对角设置一注一采井组。油藏顶深为3 000 m,

温度为126 ℃,初始地层压力为28.9 MPa,孔隙度为10%,渗透率为10 mD,含水饱和度为30%。流体模型采用胜利油田G区块的流体模型,原油组分划分成7个拟组分。模拟连续CO₂驱,注气井定流量为0.001 PV/d进行注入,采油井定流压为28.9 MPa进行生产,保证整个油藏区域内压力高于最小混相压力。

3.2 混相带的划分

一般划分混相区域的方法是比较压力是否大于最小混相压力,但是在驱替过程中,由于汽化-凝析作用,使得波及区内的油相组分在不断变化,因此油气的最小混相压力也在不断变化,因此需要寻找一个更加准确判定混相带的方法。拟采用油气界面张力和油相中CO₂含量作为主要指标来划分混相带。利用油气界面张力和油相中CO₂含量划分的方法来定义混相带。

从图3可知,混相带后缘位于油气两相区之中,利用油气界面张力确定其位置,油气组成越接近,油气界面张力越低。利用胜利油田G区块的流体模型,建立细管模型,CO₂累积注入量为0.4 PV时,油气界面张力随无因次距离(注气井的距离与井距之比)变化规律(图4)。根据油气界面张力的变化趋势,将油气界面张力等于0.1 dyn/cm定义为临界油气混相界面张力,即油气界面张力低于0.1 dyn/cm时,可认为CO₂与原油已达到混相状态。

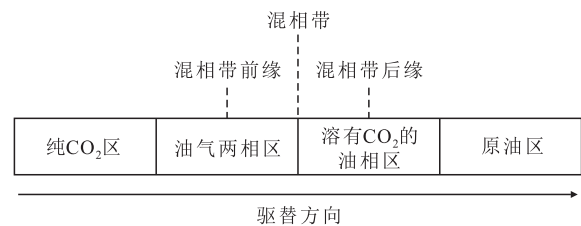


图3 CO₂混相驱过程中流体分布示意

Fig.3 Diagrammatic sketch of fluid distribution in CO₂ miscible flooding process

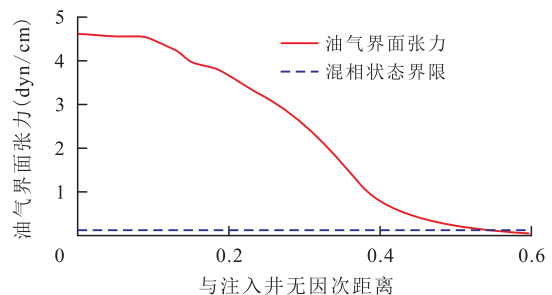


图4 油气界面张力随无因次距离变化规律

Fig.4 Interfacial tension variation with the dimensionless distance

混相带前缘位于溶有CO₂的油相区中,只存在液相,不存在油气界面张力,故需其他的指标。李

南等利用流体黏度确定其位置,即将油相黏度降低一定幅度的位置定义为混相带前缘^[13],但是压力的降低也会导致油相黏度降低,因此这种划分方法并不准确。油相中CO₂含量和油相黏度分布示意如图5所示,CO₂含量为0.2时,油相的黏度降幅约为25%,根据实验数据此时油相的膨胀系数约为1.1,可认为这已达到工程上所需的混相效果。因此,将油相中CO₂含量等于0.2的位置定义为混相带前缘。

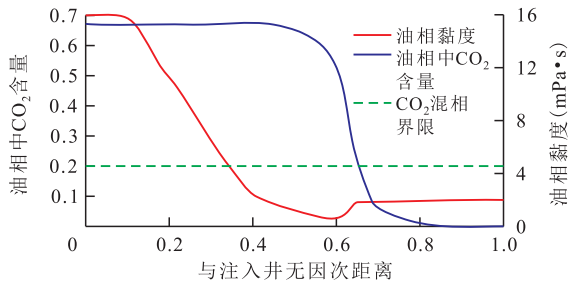


图5 油相中CO₂含量和油相黏度分布示意

Fig.5 Schematic diagram of CO₂ content in oil phase and oil viscosity distribution

3.3 混相带的表征方法

基于混相带的定义,在二维平面油藏模型基础上,分别说明混相带前缘和后缘的确定方法,进而建立混相带宽度表征方法。首先利用油气界面张力分布进行线性插值作出油气界面张力等于0.1 dyn/cm的等值线(图6a),即混相带后缘;然后利用油相中CO₂含量分布进行线性插值作出油相中CO₂含量为0.2的等值线,即混相带前缘(图6b)。将混相带展开等效为一个矩形,矩形的面积就是混相带的面积,矩形的长度等于混相带前缘与原油接触面的长度,即混相带前缘形成的包络线的长度,将矩形的宽度定义为混相带的宽度,即混相带的宽度等于无因次混相带面积与混相带前缘包络线的长度之比。

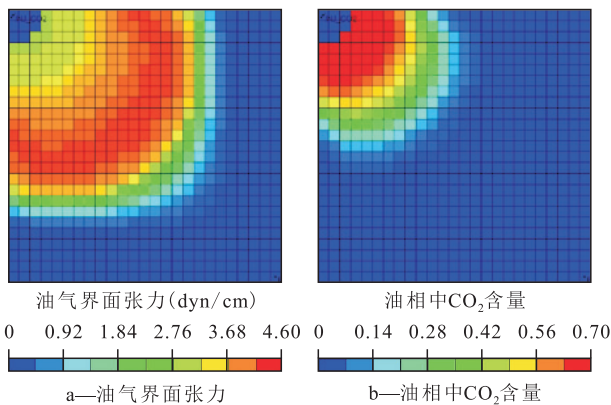


图6 油气界面张力和油相中CO₂含量分布

Fig.6 Oil-gas interfacial tension and CO₂ content distribution in oil phase

从混相带宽度随累积注入量的变化(图7)可以

看出,在混相前缘突破之前,随着累积注入量的增加,混相带的宽度一直在增大,说明混相带面积的增大不仅仅是因为混相带前缘与原油接触面在增大。混相带的宽度增大的主要原因是由于水动力弥散使混相带前缘的运移速度大于混相带后缘的运移速度,导致混相带的宽度在增加。同时可以看出,混相带宽度的增大趋于平缓,也就是混相带前缘与后缘之间的运移速度越来越接近。分析其原因主要包括:①随着混相带宽度的增大,气相与原油接触变难,即通过油气多级接触、汽化-凝析作用的方式增加混相带的宽度难度增大。②随着混相带宽度的增大,混相带之间的组分含量变化趋于平缓,即组分的浓度梯度变小,导致水动力弥散作用变弱,混相带前缘运移速度减慢。在混相带前缘突破时,混相带宽度达到最大,约为模型宽度的15%。在混相带前缘突破到混相带后缘突破之间,混相带宽度迅速下降,之后趋于平稳。

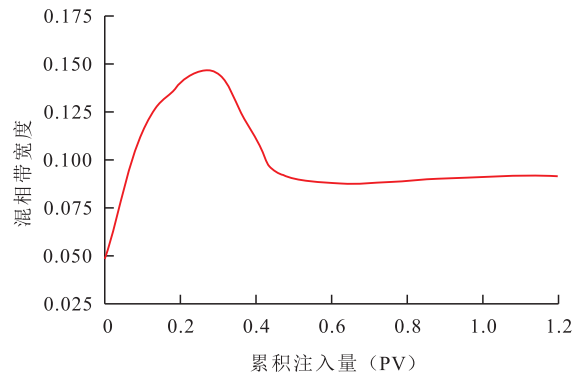


图7 混相带宽度随累积注入量变化

Fig.7 Curve of miscible zone width with cumulative injection volume

4 结论

CO₂-原油混相带形成之前,CO₂相前缘不断向前运移,通过多次较强的汽化-凝析作用实现油气混相,形成混相带,注入气组成到气液平衡临界点组成连续变化;CO₂-原油混相带形成之后,混相带前缘与原油组分浓度存在差异,在混相带前缘出现水动力弥散现象,结果使得混相带与原油间的组成连续变化。

CO₂-原油混相带的划分方法是将油气界面张力等于0.1 dyn/cm的等值线作为混相带后缘,将油相中CO₂含量为0.2的等值线作为混相带前缘。建立了CO₂-原油混相带宽度的表征方法,即混相带的宽度等于无因次混相带面积与混相带前缘包络线的长度之比;在混相带前缘突破之前,混相带宽度

逐渐增大但增速逐渐减慢;在混相带前缘突破之后到混相带后缘突破之前,混相带宽度迅速下降,之后趋于平稳。

参考文献

- [1] 张银.江苏草舍油田CO₂-EOR及地质埋存研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2010.
ZHANG Yin.Study on CO₂-EOR and geological storage in Jiangsu Caoshe Oilfield [D].Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.
- [2] 胡伟,吕成远,王锐,等.水驱转CO₂混相驱渗流机理及传质特征[J].石油学报,2018,39(2):201-207.
HU Wei, LÜ Chengyuan, WANG Rui, et al.Porous flow mechanisms and mass transfer characteristics of CO₂ miscible flooding after water flooding[J].Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(2): 201-207.
- [3] 郝宏达,侯吉瑞,赵凤兰,等.低渗透非均质油藏二氧化碳非混相驱窜逸控制实验[J].油气地质与采收率,2016,23(3):95-100,115.
HAO Hongda, HOU Jirui, ZHAO Fenglan, et al.Experiments of gas channeling control during CO₂ immiscible flooding in low permeability reservoirs with heterogeneity[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(3):95-100, 115.
- [4] HOSSEINI S A, ALFI M, NICOT J P. Analysis of CO₂ storage mechanisms at a CO₂-EOR site, Cranfield, Mississippi[J].Greenhouse Gases Science & Technology, 2018, 26(3): 53-57.
- [5] 高敬善,但顺华,杨涛,等.CO₂在准噶尔盆地昌吉油田吉7井区稠油中的溶解性研究[J].中国石油勘探,2018,23(5):65-72.
GAO Jingshan, DAN Shunhua, YANG Tao, et al.Study on CO₂ solubility in heavy oil in Well Ji7, Changji oilfield, Junggar Basin [J].China Petroleum Exploration, 2018, 23(5): 65-72.
- [6] 吕成远,王锐,崔茂蕾,等.高含水条件下CO₂混相驱替实验[J].石油学报,2017,38(11):1 293-1 298.
LÜ Chengyuan, WANG Rui, CUI Maolei, et al.Displacement experiment of CO₂ miscible flooding under high water condition [J].Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(11): 1 293-1 298.
- [7] 王业飞,高苗,谭龙,等.裂缝-基质模型CO₂混相注入提高原油采收率[J].油气地质与采收率,2018,25(5):87-92.
WANG Yefei, GAO Miao, TAN Long, et al.Experimental investigation of miscible CO₂ injection for enhanced oil recovery in frac-
- ture-matrix model[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(5): 87-92.
- [8] 李志鹏,卜丽侠.二氧化碳驱油及封存过程中的地质安全界限体系[J].特种油气藏,2017,24(2):141-144.
LI Zhipeng, BU Lixia.Geological safety margins during CO₂ flooding and sealing[J].Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(2): 141-144.
- [9] 王福顺,牟珍宝,刘鹏程,等.超稠油油藏CO₂辅助开采作用机理实验与数值模拟研究[J].油气地质与采收率,2017,24(6):86-91.
WANG Fushun, MOU Zhenbao, LIU Pengcheng, et al.Experiment and numerical simulation on mechanism of CO₂ assisted mining in super heavy oil reservoirs[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(6): 86-91.
- [10] 赵越超,宋永臣,郝敏,等.磁共振成像在CO₂驱油实验中应用[J].大连理工大学学报,2012,52(1):23-28.
ZHAO Yuechao, SONG Yongchen, HAO Min, et al.Application of MRI to CO₂ displacement oil experiments [J].Journal of Dalian University of Technology, 2012, 52(1): 23-28.
- [11] 章星,韩磊,周栋华,等.CO₂细管驱油实验混相动态特征表征方法[J].大庆石油地质与开发,2018,37(1):122-127.
ZHANG Xing, HAN Lei, ZHOU Donghua, et al.Characterizing method of the dynamic characteristics of CO₂ slim-tube miscible oil flooding test [J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(1): 122-127.
- [12] BOOTH R J S.On the growth of the mixing zone in miscible viscous fingering [J].Journal of Fluid Mechanics, 2010, 16(15): 527-539.
- [13] 李南,田冀,任仲瑛.低渗透油藏CO₂混相区域波及规律研究[J].油气井测试,2014,23(4):1-3,8.
LI Nan, TIAN Ji, REN Zhongying.The research on spread rule of CO₂ miscible region in low permeability reservoir [J].Well Testing, 2014, 23(4): 1-3, 8.
- [14] 郭省学.高温高压条件下CO₂驱稠油微观运移特征[J].油气地质与采收率,2019,26(3):99-104.
GUO Xingxue.Study on microscopic migration characteristics of heavy oil by CO₂ flooding at high temperature and high pressure [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(3): 99-104.

编辑 王星