文章编号:1009-9603(2020)01-0081-08 DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2020.01.012

# 超深层低渗透稠油$CO_2$增溶降黏体系研发与应用

邓宏伟
(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:**目前采用$CO_2$吞吐开采超深层低渗透稠油油藏无法达到经济产能,即使使用降黏剂和$CO_2$辅助热采开发也存在降黏效果差、单井产能低和油藏开发难度大等问题。通过使用分子体系设计和实验验证,对$CO_2$增溶降黏剂进行研发,利用化学剂本身降黏功能和增强$CO_2$溶解原油的能力,将化学降黏与$CO_2$开采两种稠油开采技术进行有机结合,达到降低稠油黏度以及增强稠油流动性的目的。研制的增溶降黏剂可使$CO_2$溶解度增大7倍,降黏率高达99.2%,有效解决了超深层低渗透稠油降黏范围小的难题。矿场应用结果表明,试验井周期平均日产油量达到原日产油量的2.5倍以上,取得了良好的效果。

**关键词:**深层低渗透稠油;$CO_2$增溶;降黏;渗流特征;作用机理
**中图分类号:**TE357.4 **文献标识码:**A

# Development and application of $CO_2$ solubilizing and viscosity reducing system for ultra-deep and low-permeability heavy oil reservoirs

DENG Hongwei
(*Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province*, 257015, *China*)

**Abstract:** $CO_2$ puff and huff cannot achieve commercial oil productivity for the ultra-deep and low-permeability heavy oil reservoirs at present. The thermal recovery assisted by viscosity reducer and $CO_2$ faces the issues of poor performance of oil viscosity reduction, low productivity of single well and large difficulty of reservoir development. $CO_2$ solubilizing and viscosity reducing system is developed according to molecular system design and experimental verification. In this technology, chemical viscosity reduction and $CO_2$ recovery for the heavy oil are combined to reduce oil viscosity and enhance heavy oil mobility through viscosity reduction effect of chemicals itself and the enhanced ability of $CO_2$ dissolved in oil. The developed $CO_2$ solubilizing and viscosity reducing system can increase the solubility of $CO_2$ by 7 times, and the viscosity reduction ratio is up to 99.2%, which effectively solves the problem of narrow range of oil viscosity reduction for the ultra-deep and low-permeability heavy oil reservoirs. The field application results show that the average daily oil production of the test well is higher than 2.5 times of the original daily oil production, which achieved a good performance.

**Key words:** heavy oil in deep and low permeability reservoir; $CO_2$ solubilization; oil viscosity reduction; flow characteristics; interaction mechanism

超深层低渗透稠油油藏埋深超过1 600 m,储层平均渗透率低于300 mD,油层条件下脱气原油黏度大于50 mPa·s,由于此类油藏注入压力高于蒸汽的临界条件,蒸汽注入至储层为高压热水,所携带的热焓及比容远小于饱和蒸汽,测算有效泄油半径小于15 m[1]。现场试油试采井使用蒸汽吞吐、油溶性降黏剂降黏、$CO_2$吞吐等成熟的稠油开采方法,产能均未突破。因此,需深入研究更为有效的超深层低

收稿日期:2019-07-05。
作者简介:邓宏伟(1974—),女,河北辛集人,高级工程师,从事油藏开发工作。E-mail:denghongwei.slyt@sinopec.com。
基金项目:中国石化科技项目"垦西油田罗322超深层低渗稠油有效开发技术"(P14009)。

渗透稠油油藏开采方法。

应用$CO_2$开发技术能够真实有效地提高油(气)采收率、改善油藏环境[2],对稠油而言,$CO_2$溶解于原油中,可显著降低原油黏度,增强原油流动性[3],但由于稠油溶解$CO_2$能力有限,$CO_2$单独作用于稠油开发,效果并不显著[4-7]。室内实验和现场试验结果表明,罗322块超深层低渗透稠油在原始地层温度为100 ℃时的脱气黏度为1 053 mPa·s,地层压力下饱和$CO_2$后黏度降为664.9 mPa·s,降黏率仅为36.9%,且降黏区域小。即使采用油溶性降黏剂和$CO_2$复合开发,开发效果也未能改善。若使用$CO_2$增溶降黏剂作为$CO_2$助剂,一方面可增强$CO_2$在原油中的溶解能力,达到较大范围降黏的目的,另一方面该剂具有稠油降黏功能,可被$CO_2$携带到地层深部与原油充分有效接触,溶解于原油,达到降黏剂和$CO_2$双重降黏的目的。据调研,目前在$CO_2$提高采收率研究中,主要针对$CO_2$驱最小混相压力开展了影响因素分析[8],对降低混相压力有一定的认识[9-10],对于稠油$CO_2$增溶降黏剂还没有相关研究,而降黏剂一般只具有降黏功能,达不到增强原油溶解$CO_2$能力的目的,因此有必要对$CO_2$增溶降黏剂进行深入开发和研究。为此,以垦西油田沙三段超深层低渗透稠油油藏为研究对象,研发适合的$CO_2$增溶降黏剂,既可提高原油中$CO_2$的溶解能力,又具有较好的降黏功能,实现一剂双效,大幅度提高降黏效果和动用范围,从而达到降低开发成本、提高单井产能、提高采收率的目的。

## 1 体系研发与性能评价

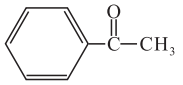
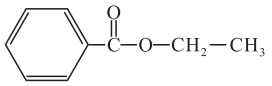
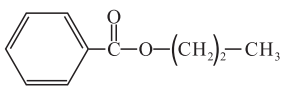
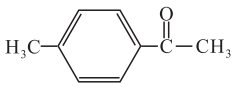
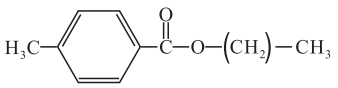
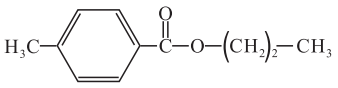
### 1.1 $CO_2$增溶降黏剂的体系设计

分析研究区原油组成可知,其$C_1$含量为25.582%,$C_2$—$C_6$含量为4.271%,$C_{12+}$含量为67.983%,属于重质组分偏高的稠油,因此设计体系时,考虑常用增溶剂和降黏剂结构与$CO_2$的匹配,化学剂结构需要符合以下条件:①因$CO_2$分子偶极矩为零,属于非极性化合物,若加入的化学剂极性过高,则会影响与$CO_2$的溶解,化学剂的极性应适中。②地层中有大量的束缚水和可动水,若化学剂易溶于水,则会造成药剂的大量损失,降低驱替效率,应选用不易溶于水的化学剂。③为满足$CO_2$注入的要求,化学剂的凝点不宜过高,相对分子质量不宜过大,否则伴注时容易凝固。④化学剂应具有较好的稳定性,即物理性质和化学性质稳定,同时耐温性能好且无毒性[11]。据以上要求,结合文献调研,具备$CO_2$增溶作用的化学剂特征基团应包含苯基、酯基以及一定长度的碳链,同时化学剂分子质量适宜,否则不易溶解于$CO_2$中[12-13]。据此选定S1—S6六种化学剂作为增溶剂的备选(表1)。

目前中国市场已有大量降黏性能良好的油溶性降黏剂,其中大部分降黏剂为含有酯基、醚基、酰胺基及苯环等多元极性基团的三元共聚物[14-15]。通过文献调研以及考虑成本、降黏率等指标后,选定V1—V6六种降黏剂作为增溶降黏剂中降黏剂的备

表1 初选二氧化碳增溶剂和降黏剂与二氧化碳的混溶压力

Table1 Miscible pressure between originally selected $CO_2$ solubilizer and viscosity reducer and $CO_2$

| 增溶剂 | | | 降黏剂 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 名称 | 分子结构式 | 完全混溶压力(MPa) | 名称 | 分子组成 | 完全混溶压力(MPa) |
| S1 |  | 12.52 | V1 | 丙烯酸酯类-苯乙烯-马来酸酐共聚物 | |
| S2 |  | 13.01 | V2 | 甲基丙烯酸酯类-苯乙烯-丙烯酰胺共聚物 | 15.94 |
| S3 |  | | V3 | 烯烃-醋酸烯酯类-乙烯醇聚醚共聚物 | |
| S4 |  | 13.19 | V4 | 乙二醇-环氧烷类-十八酰氯胺共聚物 | 15.33 |
| S5 |  | 13.65 | V5 | 烯烃-醋酸烯酯类共聚物 | |
| S6 |  | | V6 | 丙烯酸酯类-丙烯酰胺类共聚物 | |

选(表1)。

化学剂与$CO_2$的混溶实验结果(表1)表明:增溶剂S3和S6无法与$CO_2$完全混溶,这是因S3和S6碳链较长且分子极性较大所致。而降黏剂分子碳链一般较长,且含有较多的极性基团,因此相比于增溶剂较难与$CO_2$完全混溶,只有V2和V4能够与$CO_2$混溶,其混溶压力也高于增溶剂。由于增溶剂和降黏剂均需与$CO_2$具备一定的溶解能力,否则将影响化学剂随$CO_2$的渗流,进而影响采收率。故确定增溶剂为S1,S2,S4和S5,降黏剂为V2和V4。通过增溶剂与降黏剂两两组合的方式以一定比例复配成所需化学剂,应用于$CO_2$增溶降黏剂的研发中。

### 1.2　$CO_2$增溶降黏剂的筛选

首先采用旋转黏度计,测试不同化学剂复合体系中原油黏度的变化,筛选出降黏性能较好的增溶剂和降黏剂,在此基础上,通过室内高温高压相平衡实验,测定不同增溶剂和降黏剂组合下$CO_2$在稠油中溶解度的变化,评估其对稠油的溶解性,据此优选出增溶剂与降黏剂的最优组合和最佳配比。

根据研究区的地质条件和研发增溶降粘剂的需求,设定基础实验温度为100 ℃,压力为15 MPa,增溶降粘剂的功能以增溶$CO_2$为主,以降黏为辅,增溶剂与降黏剂质量比为4:1,$CO_2$增溶降黏剂质量分数为5%。

#### 1.2.1　降黏特性

降黏率可以直观地反映不同化学剂组合方式下原油黏度的变化,其计算式为:

$$n = \left(1 - \frac{\mu_2}{\mu_1}\right) \times 100\% \qquad (1)$$

式中:$n$为降黏率,%;$\mu_1$和$\mu_2$分别为$CO_2$增溶降黏剂加入前、后原油的黏度,mPa·s。

由图1可以看出,在实验测试温度范围内,S4V2降黏率最高,S4V4次之,均能达到70%以上。而增溶剂S2和S5与降黏剂V2和V4复配后降黏效果均不理想,说明增溶剂S2和S5本身不具备较好的降黏能力。因此,化学剂选择范围缩小到S1,S4,V2和V4。

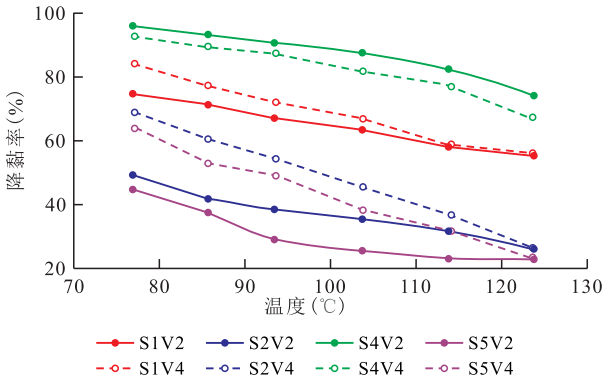



图1　不同温度下不同$CO_2$增溶降黏剂的原油降黏率

Fig.1　Viscosity reduction rate of crude oil in different $CO_2$ solubilizing and viscosity reducing system at different temperatures

分别改变上述4种化学剂组合方式下的增溶剂质量分数,由稠油降黏率(图2)可见:当增溶剂质量分数为0时,即全为降黏剂时,V2和V4的降黏率分别为94.2%和90.2%,V2的降黏效果略好于V4。当增溶剂质量分数为100%时,即全为增溶剂时,S4的降黏效果远优于S1。尽管在增溶剂质量分数小于30%时,S1V2的降黏效果好于S4V4,但是由于在此浓度区间内对降黏起支配作用的是降黏剂而非增溶剂,而增溶剂含量小不利于增溶降黏剂中$CO_2$对稠油的增溶作用,因此从降黏性能考虑,优选S4与V2为首选化学剂组合。

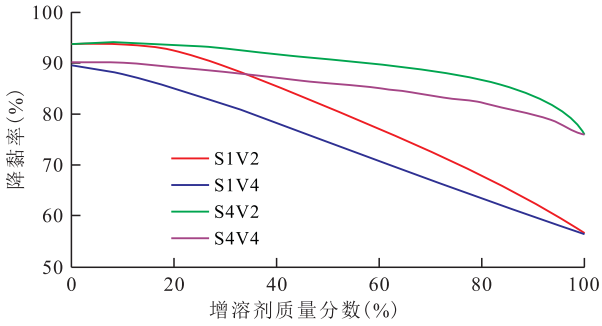



图2　$CO_2$增溶降黏剂中增溶剂质量分数对降黏率的影响

Fig.2　Effect of mass fraction of solventizer on viscosity reduction rate in $CO_2$ solubilizing and viscosity reducing system

#### 1.2.2　增溶特性

随着增溶降黏剂加入量的增加,$CO_2$在稠油中的溶解量也不断增大(图3),当加入量大于5%时溶解量基本不变,其中S4V2加入量为5%时,可使$CO_2$在稠油中溶解度提高7倍。四个增溶降黏剂的增溶

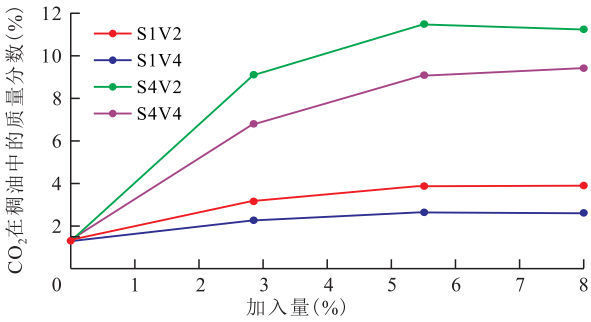



图3　$CO_2$在稠油中的质量分数随$CO_2$增溶降黏剂加入量变化

Fig.3　Changes of $CO_2$ mass fraction in heavy oil with the dosage of $CO_2$ solubilizing and viscosity reducing system

能力从强到弱依次为S4V2，S4V4，S1V2和S1V4，说明S4增溶$CO_2$的作用更强，这是S4的分子结构对称性高于S1所致。

1.2.3 最佳配比

通过将$CO_2$增溶降黏剂中增溶剂质量分数由0增至100%，考察$CO_2$增溶降黏剂的配比对$CO_2$增溶特性的影响。测试结果（图4）表明，随着增溶剂质量分数的增加，$CO_2$在稠油中的溶解量也逐渐增大；增溶剂S4的增溶效果强于S1，而降黏剂V2和V4对$CO_2$溶解于稠油的促溶效果较差，因为降黏剂分子极性较大，碳链长，对稠油中$CO_2$的溶解影响小。对于增溶而言，增溶剂质量分数应越高越好，然而综合考虑降黏指标，增溶剂质量分数应不大于80%。因此，结合降黏实验结果，研究区稠油最适合的增溶降黏剂为S4V2，其中增溶剂质量分数应为80%，即增溶剂S4与降黏剂V2质量比为4∶1。

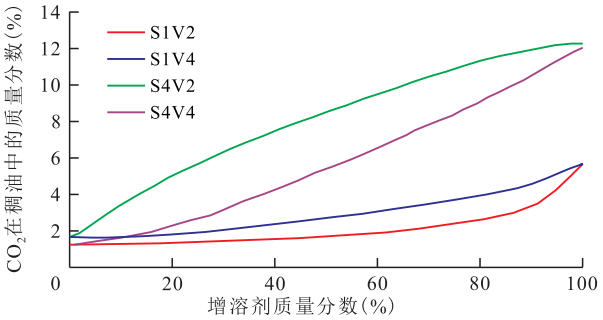



图4 $CO_2$增溶降黏剂中增溶剂质量分数对$CO_2$溶解性的影响

Fig.4 Effect of mass fraction of solventizer on solubility of $CO_2$ in $CO_2$ solubilizing and viscosity reducing system

### 1.3 $CO_2$增溶降黏剂性能评价

通过测定稠油在不同条件下的黏度，即可评价增溶降黏剂的降黏增溶性能。在地层温度下（100 ℃），若单独加入质量分数为5%的S4V2增溶降黏剂，黏度降至224 mPa·s，降黏率为78.7%，若继续注$CO_2$至饱和，黏度降至8.4 mPa·s，降黏率高达99.2%（图5）。$CO_2$增溶降黏体系的降黏率比饱和$CO_2$提高62.3%，比单一应用增溶降黏剂提高20.5%。实验结果亦表明，$CO_2$增溶降黏剂可大幅度促进$CO_2$溶解于原油，具有良好的增溶和降黏性能，其性能指标见表2。

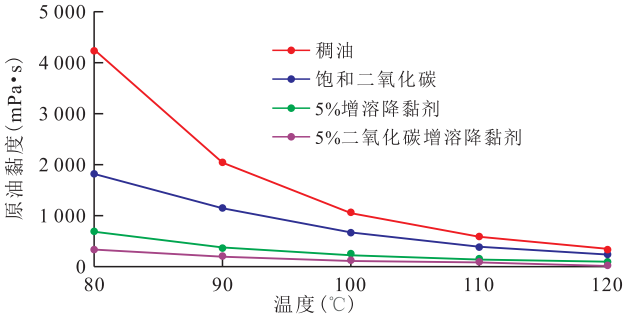



图5 $CO_2$增溶降黏剂降黏性能评价结果

Fig.5 Evaluation of viscosity reduction performance of $CO_2$ solubilizing and viscosity reducing system

表2 $CO_2$增溶降黏剂性能指标

Table2 Performance indicators of $CO_2$ solubilizing and viscosity reducing system

| 参数名称及单位 | 数值或描述 | 参数名称及单位 | 数值 |
|---|---|---|---|
| 溶解性 | 油溶，易溶于有机溶剂 | 耐温性能(℃) | 300 |
| 25 ℃密度(g/cm³) | 0.85～0.95 | $CO_2$溶解度提高值 | 7倍 |
| pH值 | 7 | 增溶降黏剂降黏率(%) | 78.7 |
| 沸点(℃) | 115 | $CO_2$增溶降黏体系降黏率(%) | 99.2 |
| 凝点(℃) | ≤-30 | 有机氯含量(%) | 0 |

## 2 $CO_2$增溶降黏体系的作用机理

为了明晰$CO_2$增溶降黏体系在多孔介质中的作用机理，开展了直井$CO_2$吞吐和$CO_2$增溶降黏吞吐开发实验，研究不同降黏方法下油气的渗流特征和开采规律[16-20]，并通过数值模拟方法拟合上述实验的实验过程和实验结果，评价其作用范围和开发效果。

### 2.1 吞吐阶段渗流特征

以研究区油层碎屑砂岩加胶结物烧结成孔隙度和渗透率与研究区油层一致的30 cm×30 cm×20 cm的三维岩心模型，根据相似原则，确定模拟井的井网井距和注采、返排等参数，开展直井$CO_2$吞吐和$CO_2$增溶降黏吞吐开发实验，模拟不同方式的开发过程。通过研究实验过程中模拟井井底压力、采油速度以及不同生产阶段的产出油状态变化，进而分析超深层低渗透稠油不同开发方式的渗流规律。

从图6可以看出，$CO_2$吞吐和$CO_2$增溶降黏吞吐两种开发方式均呈现出明显的阶段性。注入、焖井后开井初期为生产泄压阶段，井底压力迅速下降，采油速度低，井筒附近过饱和$CO_2$先被采出，并带出少量原油，产出原油的黏度较低，流动性较好，$CO_2$吞吐和$CO_2$增溶降黏吞吐两种方式相差不大；吞吐主力阶段采油速度均有所提高，溶解过饱和$CO_2$的流体被采出，并且由于模型中压力下降，溶解在原油中的$CO_2$析出，产出油呈泡沫状态（图7a），具有较

低的黏度和密度；因$CO_2$增溶降黏吞吐降黏率高，降黏范围更广，因此其采油速度远高于$CO_2$吞吐，但压力下降幅度更大；吞吐阶段末采油速度降低，压力基本保持稳定，模型远端未被$CO_2$波及到的原油克服启动压力梯度，流至井筒产出，此时产出液的状态如图7b所示。

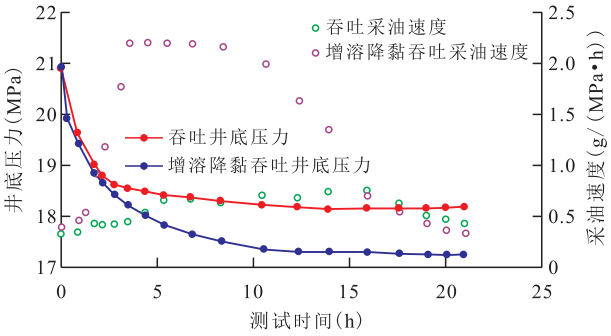
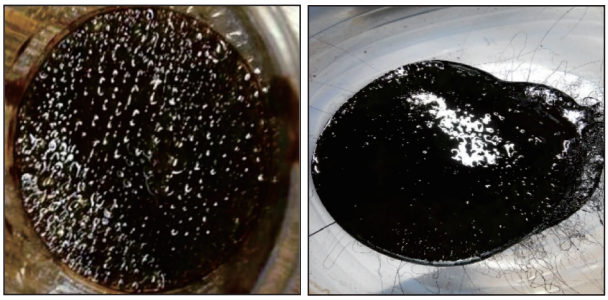



**图6　直井$CO_2$吞吐与$CO_2$增溶降黏吞吐对比曲线**

Fig.6　Contrast curves between $CO_2$ huff and puff and $CO_2$ solubilizing and viscosity reducing system in vertical wells



a—主力阶段　　b—阶段末

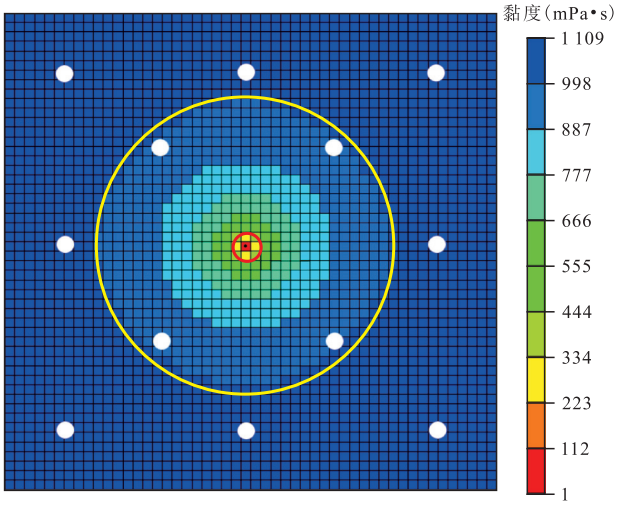
**图7　不同阶段产出油特征**

Fig.7　Characteristics of oil production at different stages

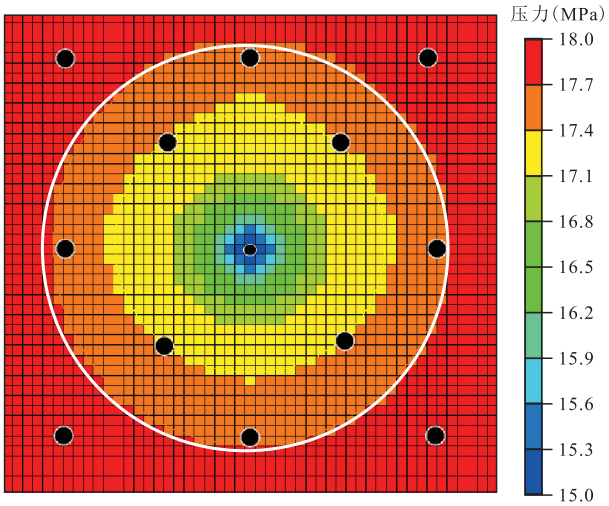
### 2.2　$CO_2$增溶降黏吞吐不同区域作用机理

利用数值模拟方法对$CO_2$增溶降黏吞吐物理模拟实验过程和结果进行拟合，得到黏度及压力的分布规律，根据结果将井筒到地层远端划分为$CO_2$增溶降黏体系饱和区、$CO_2$增溶降黏体系扩散区和压力响应区3个不同的区域(图8)，进一步评价其不同区域的作用机理和开发效果。

近井地带为$CO_2$增溶降黏体系饱和区(图8a红色圈内)，范围在10 m左右，原油黏度大幅度降低，对应开井生产的泄压阶段，产出物主要为井筒附近未能溶解进原油的$CO_2$，少量原油被带出，产出原油黏度较低，以气相渗流为主，采油速度低，井底压力迅速下降。其外围为$CO_2$增溶降黏体系扩散区(图8a黄色圈内)，范围在50 m左右，由于$CO_2$在地层和原油中的扩散能力为水的10倍以上，$CO_2$以其超强的扩散能力，以更快的速度穿过降黏区，同时推动




a—焖井过程中黏度分布




b—生产过程中压力分布

**图8　$CO_2$增溶降黏体系吞吐黏度和压力分布**

Fig.8　Distribution of viscosity and pressure of $CO_2$ solubilizing and viscosity reducing system

更易溶于原油的$CO_2$增溶降黏剂向外扩散，不断扩大降黏范围，其为原油主要的渗流区域，对应为周期吞吐的主力阶段，该阶段降压稳产，产出液为扩散区被降黏的原油，压力降至饱和压力后，溶解的$CO_2$析出，呈泡沫油状态。采油速度高且稳定，压力下降慢。最外围近30 m的区域(图8b白色圈内)为压力响应区，该区域$CO_2$增溶降黏体系未波及，原油黏度不变，但地层压力发生变化，流体克服了原油的启动压力梯度后参与渗流，对应生产阶段为吞吐末期，降黏不充分，因此采油速度较低，流体流动以油水两相渗流为主，压力处于拟平衡状态。

## 3　矿场应用

### 3.1　降黏方式优化

$CO_2$增溶降黏体系在胜利油田的一口低效热采

井开展适应性评价，该区油藏埋深约为1 500 m，平均渗透率为300 mD，有效厚度为8 m，地面脱气原油黏度为20 941 mPa·s，因泥质含量高（强水敏）且油稠，注汽压力高达19.4 MPa，注汽干度仅为48.7%，注汽量为1 326 $m^3$，投产后，日产油量峰值为4.6 t/d，后期无法注汽，一直低液间开生产，平均日产油量为1.3 t/d，累积产油量为2 269 t，开发效果差，为改善开发效果，通过数值模拟方法优化其有效的降黏体系。

在注入费用均为$20\times10^4$元的前提下，对比不同降黏方式的降黏效果，当只注$CO_2$增溶降黏剂时，由于化学剂费用较高，注入量仅为20 t，$CO_2$增溶降黏剂扩散范围较小，降黏效果差，黏度低于500 mPa·s的区域比例为0.8%，黏度低于50 mPa·s的区域比例为0.4%（图9a），油井生产后净增油量为−1 411 t，开发效果差。单注$CO_2$时，由于$CO_2$成本较低，$CO_2$注入量达200 t，可扩散至较大范围（图9b），但受限于$CO_2$的溶解度及降黏率，降黏区间内黏度较高（>600 mPa·s），其净增油量为519 t，有一定效果。注入$CO_2$增溶降黏体系时（$CO_2$注入量为150 t，增溶降黏剂注入量为12 t），由于增溶降黏作用明显，低黏区域大幅增加，区域达到11.9%（图9c），净增油量达到2 614 t，在三种降黏方式中开发效果最好。

### 3.2 应用效果

在2018年1月，试验井注入$CO_2$增溶降黏体系，优化增溶降黏剂注入量为12 t，$CO_2$注入量为150 t，焖井时间参照井口压力扩散状况，在20 d左右，开井后日产油量峰值为5.7 t/d，周期生产天数为230 d，平均日产油量为3.3 t/d，开发效果明显改善。2018年9月第1周期结束后，该井又注入$CO_2$增溶降黏体系，注入参数同第1周期，随着降黏范围和泄油半径逐渐扩大，开井后日产油量峰值达到8.0 t/d，周期生产天数为204 d，平均日产油量为4.5 t/d，开发效果进一步提高（图10），目前该井已进入第3周期，周期平均日产油量均达到原日产油量的2.5倍以上，取得了良好的效果。矿场应用结果证实，$CO_2$增溶降黏剂达到了一剂双效的效果，既增大了$CO_2$的溶解度，达到大幅降黏的目的，又充分发挥了$CO_2$的扩散作用，扩大了降黏范围，拓展了$CO_2$在稠油领域的应用。

## 4 结论

结合理论分析与实践经验，将注$CO_2$开发与化学降黏两种技术进行有机结合，开发出适用于深层稠油开采的一剂双效增溶降黏剂，该剂促使$CO_2$溶解于稠油的溶解能力提高7倍、降低稠油黏度99.2%。

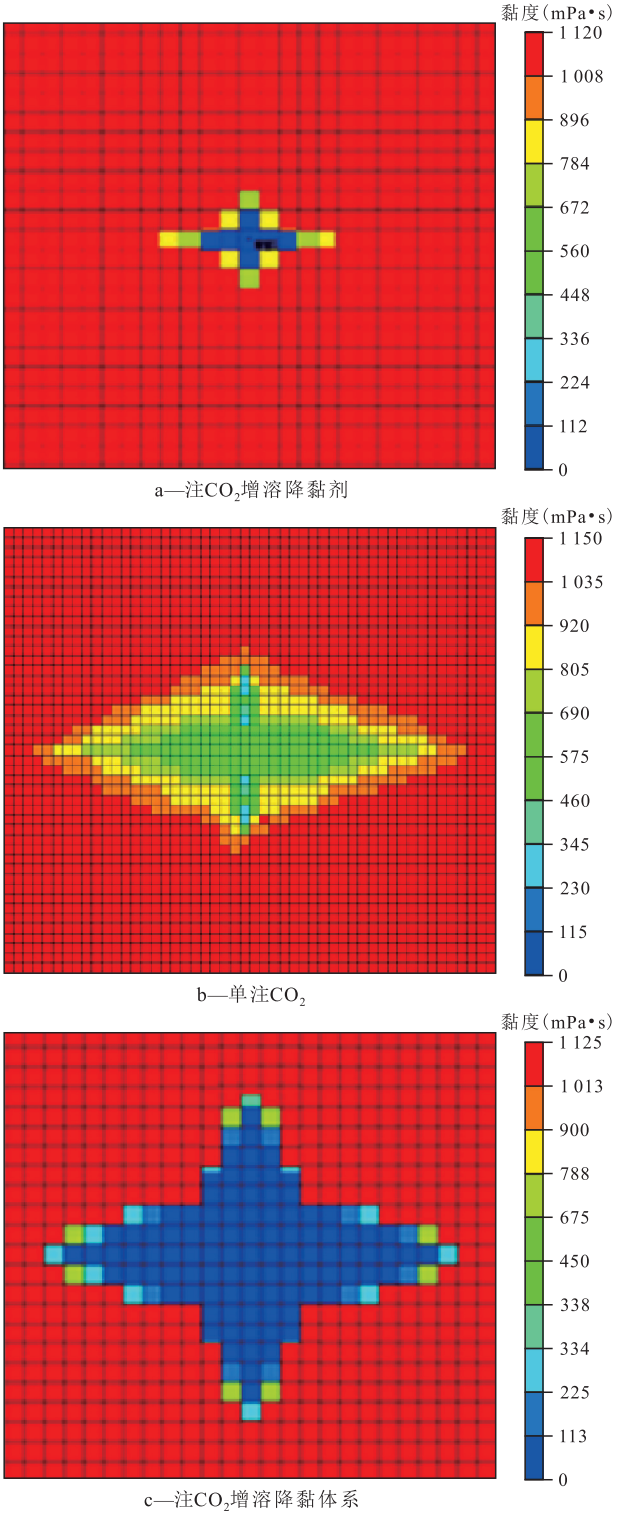



图9 不同开发方式黏度场分布

Fig.9 Viscosity distribution under different development methods

物理模拟和数值模拟结果显示，$CO_2$增溶降黏体系开采时具有明显的阶段性，其作用范围划分为3个区域，可在较大范围内降低稠油的黏度，提高稠

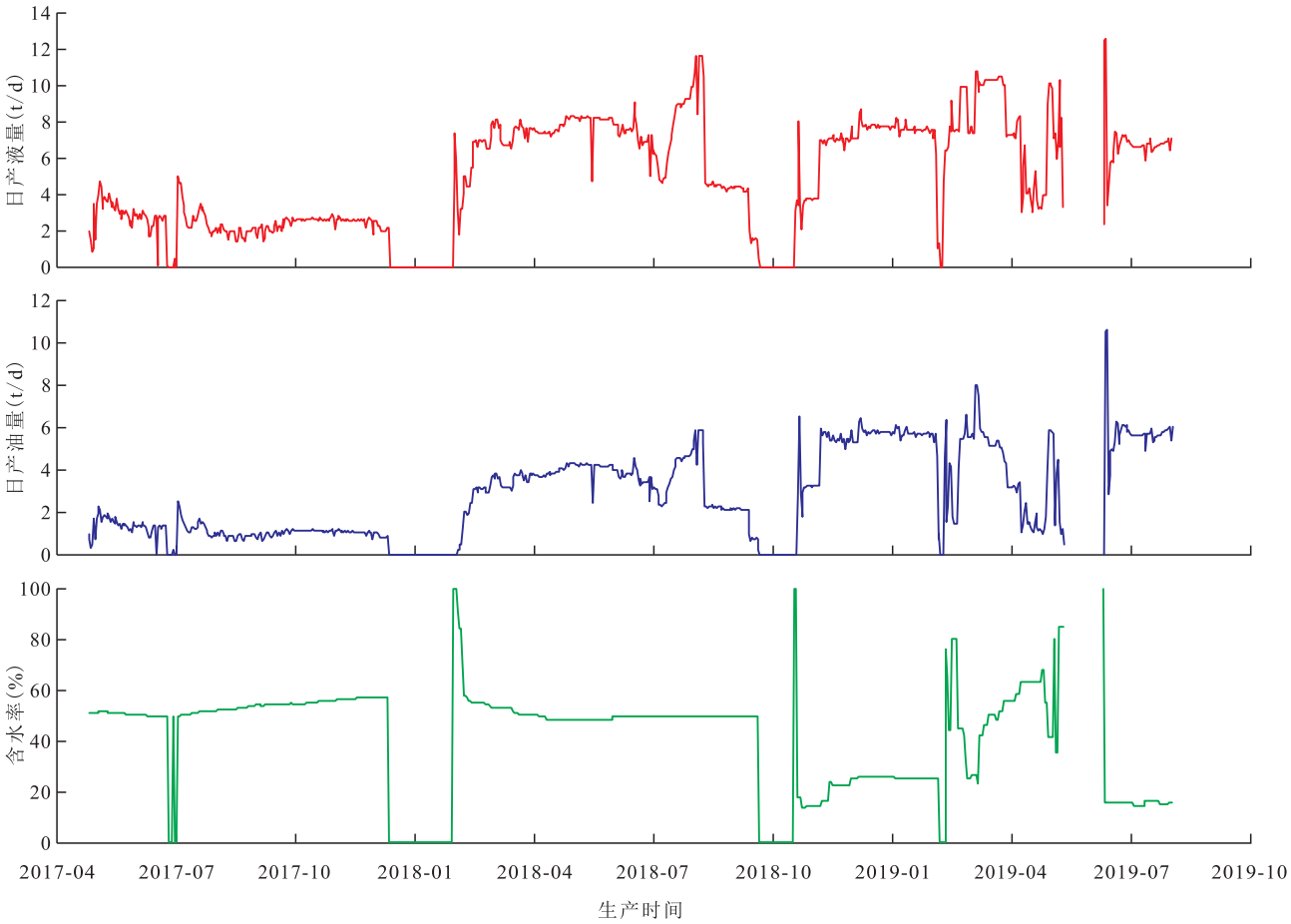



**图10　试验井$CO_2$增溶降黏剂开发曲线**

Fig.10　Development curves of test well using $CO_2$ solubilizing and viscosity reducing system

油的流动性，有效解决超深层低渗透稠油的开发难题。

矿场试验结果证实，采用$CO_2$增溶降黏体系可明显提高单井产能，是一种有效的稠油开发技术。与热采、蒸汽吞吐等方式相比，$CO_2$增溶降黏体系能耗小，适用范围广，效率高，在稠油开发中具有良好的应用前景。

致谢：感谢厦门大学沙勇副教授等为本论文提供的研究和数据支持。

## 参考文献

[1]　王一平.深层低渗稠油有效开发方式[J].承德石油高等专科学校学报，2016，18(1)：8-11.
WANG Yiping. Effective method for development of deep heavy oil in low permeability reservoir[J].Journal of Chengde Petroleum College，2016，18(1)：8-11.

[2]　柏明星，贺凯，段永伟，等.$CO_2$在能源开发中的应用进展[J].现代化工，2018，38(1)：26-29，31.
BAI Mingxing，HE Kai，DUAN Yongwei，et al. Application progress of $CO_2$ in energy development[J].Modern Chemical Industry，2018，38(1)：26-29，31.

[3]　郝敏，宋永臣.利用$CO_2$提高石油采收率技术研究现状[J].钻采工艺，2010，33(4)：59-63.
HAO Min，SONG Yongchen. Research status of $CO_2$-EOR[J]. Drilling & Production Technology，2010，33(4)：59-63.

[4]　杨胜来，杭达震，孙蓉，等.$CO_2$对原油的抽提及其对原油黏度的影响[J].中国石油大学学报：自然科学版，2009，33(4)：85-88.
YANG Shenglai，HANG Dazhen，SUN Rong，et al.$CO_2$ extraction for crude oil and its effect on crude oil viscosity[J].Journal of China University of Petroleum：Edition of Natural Science，2009，33(4)：85-88.

[5]　郭省学.高温高压条件下$CO_2$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 $CO_2$ flooding at high temperature and high pressure[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency，2019，26(3)：99-104.

[6]　端祥刚，侯吉瑞，赵凤兰，等.$CO_2$在原油中的扩散及引起的沥青质沉积[J].油田化学，2011，28(4)：410-413.
DUAN Xianggang，HOU Jirui，ZHAO Fenglan，et al. Diffusion of $CO_2$ in crude oil and asphaltene deposition[J]. Oilfield Chemistry，2011，28(4)：410-413.

[7]　李亮.$CO_2$在孤岛稠油中的溶解性质分析[J].大庆石油地质与开发，2017，36(1)：134-137.
LI Liang. Analysis of the dissolution property of the $CO_2$ in Gudao

heavy oil[J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2017,36(1):134-137.

[8] 汤勇,赵雪梅,汪洋.$CO_2$驱最小混相压力影响因素研究[J].油气藏评价与开发,2018,8(4):42-45.
TANG Yong,ZHAO Xuemei,WANG Yang.Analysis of influence factor of minimum miscible pressure of $CO_2$[J].Reservoir Evaluation and Development,2018,8(4):42-45.

[9] 张广东,刘建仪,柳燕丽,等.混相溶剂法降低$CO_2$驱混相压力研究[J].特种油气藏,2013,20(2):115-117.
ZHANG Guangdong,LIU Jianyi,LIU Yanli,et al.Study on reducing miscibility pressure in $CO_2$ flooding by miscible solvent[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2013,20(2):115-117.

[10] 孙雷,罗强,潘毅,等.基于GA-SVR的$CO_2$驱原油最小混相压力预测模型[J].大庆石油地质与开发,2017,36(3):123-129.
SUN Lei,LUO Qiang,PAN Yi,et al.Predicting model of the oil minimal miscible pressure for the $CO_2$ flooding based on GA-SVR[J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2017,36(3):123-129.

[11] 陶磊,王勇,李兆敏,等.$CO_2$/降黏剂改进超稠油物性研究[J].陕西科技大学学报,2008,26(6):25-29.
TAO Lei,WANG Yong,LI Zhaomin,et al.Research on improving ultra-heavy oil properties by $CO_2$/viscosity reducer[J].Journal of Shaanxi University of Science & Technology,2008,26(6):25-29.

[12] 高敬善,但顺华,杨涛,等.$CO_2$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 $CO_2$ solubility in heavy oil in Well Ji7,Changji oilfield,Junggar Basin[J].China Petroleum Exploration,2018,23(5):65-72.

[13] RUDYK Svetlana,HUSSAIN Shahid,SPIROV Pavel.Supercritical extraction of crude oil by methanol-and ethanol-modified carbon dioxide[J].Journal of Supercritical Fluids,2013,78(5):63-69.

[14] 章星,王珍珍,王帅,等.可视装置中$CO_2$与正戊烷或原油接触特征和表征方法[J].石油实验地质,2017,39(3):402-408.
ZHANG Xing,WANG Zhenzhen,WANG Shuai,et al.Visual contact characteristics and characterization of the $CO_2$ and *n*-pentane/crude oil interface[J].Petroleum Geology & Experiment,2017,39(3):402-408.

[15] RUDYK Svetlana,SPIROV Pavel,HUSSAIN Shahid.Effect of co-solvents on SC-$CO_2$ extraction of crude oil by consistency test[J].Journal of Supercritical Fluids,2014,91(7):15-23.

[16] 姜瑞忠,张海涛,张伟,等.$CO_2$驱三区复合油藏水平井压力动态分析[J].油气地质与采收率,2018,25(6):63-70.
JIANG Ruizhong,ZHANG Haitao,ZHANG Wei,et al.Dynamic pressure analysis of three-zone composite horizontal well in oil reservoirs for $CO_2$ flooding[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2018,25(6):63-70.

[17] 唐万举,邓学峰,卢瑜林,等.致密储层$CO_2$驱油实验[J].断块油气田,2018,25(6):757-760.
TANG Wanju,DENG Xuefeng,LU Yulin,et al.Oil displacement experiment of $CO_2$ flooding in tight reservoir[J].Fault-Block Oil & Gas Field,2018,25(6):757-760.

[18] 郭省学.$CO_2$改善单56超稠油油藏蒸汽吞吐效果实验[J].大庆石油地质与开发,2018,37(4):122-126.
GUO Shengxue.Experiment of $CO_2$ improved steam huff and puff effects for Shan-56 ultra-heavy oil reservoir[J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2018,37(4):122-126.

[19] 李承龙.特低渗透油藏二氧化碳驱气窜影响因素及规律[J].特种油气藏,2018,25(3):82-86.
LI Chenglong.Gas channeling influencing factors and patterns of $CO_2$-flooding in ultra-low permeability oil reservoir[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2018,25(3):82-86.

[20] 蒋永平.$CO_2$复合驱油分子动力学模拟及微观机理研究[J].石油实验地质,2019,41(2):274-279.
JIANG Yongping.Molecular dynamics simulation and microscopic mechanism of $CO_2$ composite flooding[J].Petroleum Geology & Experiment,2019,41(2):274-279.

编辑 常迎梅