

文章编号: 0253-2697(2024)06-0999-10 DOI:10.7623/syxb202406009

丙烷与二甲醚辅助 SAGD 开采规律二维物理模拟实验

石兰香¹ 彭栋梁^{2,3} 席长丰¹ 冯世博^{2,3} 李松岩^{2,3}

(1. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 2. 中国石油大学(华东)石油工程学院 山东青岛 266580;
3. 中国石油大学(华东)非常规油气开发教育部重点实验室 山东青岛 266580)

摘要:蒸汽辅助重力泄油技术(SAGD)是一种成熟的稠油热采技术,但其开采后期,随着蒸汽腔与盖层接触面积进一步增大,散热量增加,驱油效率降低,累计油气比下降。在 SAGD 中、后期采用转轻烃溶剂辅助的接替技术,选择二甲醚作为辅助溶剂,并选取丙烷作为对照,进行了 3 组二维可视化实验,全程监测产油和产液速率、产出液含水率、原油采收率、累计油气比和溶剂回收率,并揭示了温度场和蒸汽腔的变化规律。实验结果表明,SAGD 开采主要分为蒸汽腔向上发育、蒸汽腔横向扩展以及蒸汽腔向下发育 3 个阶段。蒸汽腔扩展到盖层边界,即达到 SAGD 开采中一后期,产油速率下降明显。在 SAGD 中一后期加入溶剂后,产油、产液速率均有明显上升。SAGD 的采收率为 53.67%,累计油气比为 0.141,相比之下丙烷辅助 SAGD 采收率提高了 11.91%,累计油气比提高了 0.012;二甲醚辅助 SAGD 采收率提高了 19.26%,累计油气比提高了 0.027。二甲醚的回收率为 86.6%,比丙烷回收率高出 6.9%。

关键词:二甲醚;丙烷;蒸汽辅助重力泄油技术;二维模型;物理模拟

中图分类号:TE357.4

文献标识码:A

Two-dimensional physical simulation experiment of propane and dimethyl ether assisted SAGD

Shi Lanxiang¹ Peng Dongliang^{2,3} Xi Changfeng¹ Feng Shibo^{2,3} Li Songyan^{2,3}

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China; 2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Shandong Qingdao 266580, China; 3. Key Laboratory of Unconventional Oil and Gas Development, Ministry of Education, China University of Petroleum, Shandong Qingdao 266580, China)

Abstract: Steam-assisted gravity drainage (SAGD) is a mature thermal recovery technology for heavy oil. However, in the later stage of exploitation, as the contact area between steam chamber and cap rock further increases, the heat dissipation is increased, the oil displacement efficiency is decreased, and the cumulative oil-steam ratio declines. This paper investigated the replacement technology for injecting light hydrocarbon solvent in the mid-late period of SAGD. Using dimethyl ether as the auxiliary solvent and propane as the control, three sets of two-dimensional (2-D) visualization experiments were carried out to monitor the oil production, liquid production rate, water cut of produced liquid, crude oil recovery, cumulative oil-steam ratio and solvent recovery, and also discover the changes of temperature field and steam chamber. The experimental results show that SAGD recovery is mainly divided into three stages: upward development of steam chamber, lateral expansion of steam chamber, and downward development of steam chamber. When the steam chamber has extended to the boundary of cap rock, i. e., in the mid-late stage of SAGD production, the oil production rate is decreased significantly. After adding solvent in the mid-late stage of SAGD, oil production and liquid production rate are increased significantly. Compared with the oil recovery of 53.67% and accumulative oil-steam ratio of 0.141 in SAGD process, propane- and dimethyl ether- assisted SAGD can increase the oil recovery by 11.91% and 19.26%, as well as the accumulative oil-steam ratio by 0.012 and 0.027, respectively. The recovery of dimethyl ether is 86.6%, which is 6.9% higher than that of propane.

Key words: dimethyl ether; propane; SAGD; two-dimensional model; physical simulation

引用:石兰香,彭栋梁,席长丰,冯世博,李松岩.丙烷与二甲醚辅助 SAGD 开采规律二维物理模拟实验[J].石油学报,2024,45(6):999-1008.

Cite:SHI Lanxiang,PENG Dongliang,XI Changfeng,FENG Shibo,LI Songyan.Two-dimensional physical simulation experiment of propane and dimethyl ether assisted SAGD[J].Acta Petrolei Sinica,2024,45(6):999-1008.

全球稠油资源储量非常丰富,在中国稠油主要分布在辽河油田、新疆油田、胜利油田、渤海油田等,目前

对稠油以及超稠油的勘探开发正在稳步发展^[1-4]。新疆风城地区稠油储层具有埋深较浅、原油黏度高、流动

基金项目:中国石油天然气股份有限公司前瞻性基础性科技专项(2023ZZ0405)资助。

第一作者及通信作者:石兰香,女,1987年4月生,2019年获中国石油勘探开发研究院博士学位,现为中国石油勘探开发研究院高级工程师,主要从事稠油油藏开采理论与技术研究。Email:shilanxiang@petrochina.com.cn

阻力大等特点,不适合水驱开采。新疆风城地区主要储层的稠油黏度超过 20 000 mPa·s,针对稠油黏度对温度敏感的性质,主要采取热采的方法。蒸汽辅助重力泄油(SAGD)是应用广泛且最成功的热采方法之一^[5-6],SAGD 开采的关键在于重力,对于埋深较浅的油层,由于注入压力较小,蒸汽饱和温度较低,采用 SAGD 开采具有显著优势^[7-10]。

为了进一步提高采油速率,提高累计油气比和降低能源消耗而引入了溶剂辅助 SAGD(ES-SAGD)技术。该技术主要将溶剂和水蒸汽共同注入油藏,在蒸汽腔边缘,溶剂冷凝溶解到油相,结合水蒸汽的加热,共同降低稠油黏度^[11-13]。烷烃类溶剂 C₃—C₈ 与蒸汽共注,驱油效率提高明显。ES-SAGD 的采收率可以提高约 20%,采油速率提高约 1 倍^[14]。其中,丁烷作为 ES-SAGD 的溶剂与丁烷的溶剂萃取稠油(VAPEX)实验对比发现,由于纯溶剂的汽化潜热较低,溶剂腔的发育较缓慢,经济效益低于溶剂辅助 SAGD^[15]。高挥发性的溶剂会使得溶剂—蒸汽腔边缘温度降低,导致产油速率减慢,且溶剂滞留在地层无法回收,经济效益变差^[16-18]。而水溶性的溶剂二甲醚具有从水相优先溶解扩散到油相,并使原油膨胀降黏的性质,已被用作水驱油的溶剂^[19]。二甲醚在 30 °C 下饱和压力为 0.676 MPa,容易被压缩为液体形态,且二甲醚无毒、无腐蚀性,物性与液化石油气相近,在国外部分地区被用作清洁燃料,目前具有成熟的储存和运输条件^[20]。现在 CO₂ 催化转化制备二甲醚逐渐成为主流,这更加贴合了当前“碳中和”的大背景^[21]。将二甲醚辅助 SAGD 与丁烷辅助 SAGD 对比发现,二甲醚溶剂回收率更高,使得经济效益明显提高^[22-26]。在 SAGD 开采过程中,当蒸汽腔横向扩展至油层顶部两侧边界时,即 SAGD 开采中一后期;随着开采的继续,蒸汽腔逐渐向下扩展,而采油井上方基本被蒸汽腔充满,产油量急剧下降,含水率迅速上升。SAGD 开采中、后期热损失大,蒸汽腔发育缓慢,产油速率低等问题是制约 SAGD 进一步发展的重要因素^[27]。选择合适的溶剂来改善 SAGD 开采中、后期的开采现状具有较高的研究价值。对于二甲醚这一既溶于水也溶于油的驱油溶剂,国内外对其研究主要集中在在水驱方面;部分学者通过数值模拟进行了二甲醚辅助蒸汽开采的可行性研究,但鲜有二甲醚辅助 SAGD 在物理模拟方面的研究。

笔者针对 SAGD 开采中一后期,采用二甲醚作为辅助溶剂,由于二甲醚挥发性介于丙烷和丁烷之间,选取了丙烷作为对照溶剂;利用二维可视化模型,进行了不同溶剂辅助 SAGD 中一后期开采实验,并与 SAGD 作对照,研究了注入溶剂后模型内蒸汽腔、温度场和残

余油饱和度场的变化,对比了溶剂回采率,分析了不同溶剂辅助 SAGD 中一后期的作用机理。在物理模拟层面通过与丙烷的对比验证了二甲醚辅助 SAGD 中一后期开采的优势和可行性,并对生产动态和温度场的变化规律进行了较为系统的描述。

1 实 验

1.1 实验材料

油样取自新疆重 32 井区 SAGD 开发区块,该区块油层厚度为 30 m,埋藏深度为 190 m,用 MCR302 型流变仪测量 50~140 °C 下稠油的黏度(图 1)。油样在 50 °C 下黏度为 20 000.51 mPa·s,属于超稠油。测定了油样四组分,得到原油中各组分的质量分数,其中饱和分的质量分数为 48.08%、芳香分的质量分数为 27.16%、胶质的质量分数为 24.05%、沥青质的质量分数为 0.71%。

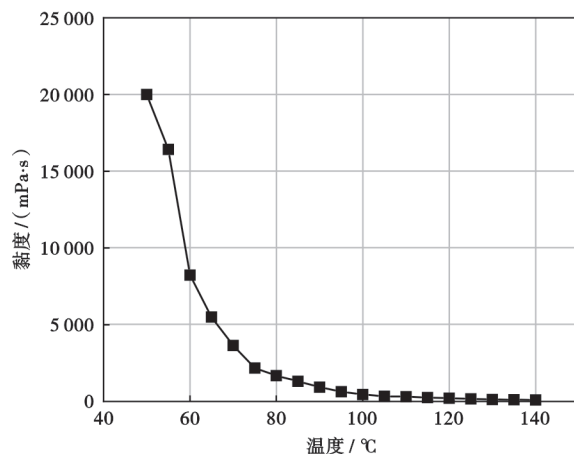


图 1 稠油黏度随温度变化

Fig. 1 Changes in viscosity of heavy oil with temperature

从测定结果可以看出,轻质组分含量较高,沥青质含量较低。由于轻烃溶剂会促进轻质组分的流动能力,而胶质和沥青质在溶剂的作用下胶束结构会发生改变,在静电作用下发生聚集,流动能力变弱^[28]。故重 32 区块油藏在 SAGD 开采中一后期采用溶剂辅助的方法更有优势。

为了将实际现场规模的油藏与实验模型相结合,根据石油天然气行业标准《注蒸汽采油二维比例物理模拟实验技术要求》SY/T 7068—2016^[29]进行相似准则设计,结合 Butler^[30]提出的判断依据得到 4 个相似准则数。

首先是相似准则数 R 联系模型和储层的几何尺寸,主要物性参数为井距和储层宽度:

$$R = L/W \quad (1)$$

其次,地层渗透率是 SAGD 开采过程中蒸汽腔扩展的关键因素,无量纲参数 B_3 主要实现模型和储层渗透

率的转化:

$$B_3 = \sqrt{\frac{Kgh\rho_s}{\alpha\phi S_o n\mu_s}} \times 10^{-6} \quad (2)$$

为了模拟实验过程中的生产时间,引入准则数 t_D 来实现模型和实际原型生产时间的转化:

$$t_D = \frac{t}{h} \sqrt{\frac{K\rho_s g\alpha}{\phi S_o n\mu_s h}} \times 10^{-6} \quad (3)$$

最后,根据水平井段的射孔长度,得到相似准则数 q_s ,实现了储层注汽速率与模型注汽速率的转换:

$$q_s = 0.086\omega \sqrt{\frac{2K\rho_s g\alpha\phi h}{n\mu_s}} \quad (4)$$

实验过程中为了满足相似准则,将稠油与煤油混合,降低黏度。实验用油样在 50 ℃ 下黏度为 1489.24 mPa·s。实验用水为超纯水,实验溶剂为纯度 99.6% 的二甲醚和丙烷。在 SAGD 开采过程中,由于高温和剪切等作用,产出液状态主要为 O/W 型和 W/O 型乳状液。用质量分数为 10% 的巴斯夫 9935 油溶性破乳剂和质量分数为 10% 的巴斯夫 9935 水溶性破乳剂对产出液进行破乳,破乳后油水界面清晰,提取破乳后的油相检测几乎不含水。二维模型采用质量比为 1:1 的 26 目和 40 目石英砂填充。油藏参数和模型参数见表 1。

表 1 油藏参数和模型参数计算

Table 1 Calculation of reservoir parameters and model parameters

物理参数	几何尺寸/ (m×m)	注采井距/ m	孔隙度/ %	渗透率/ mD	含油饱和度/ %	170 ℃ 原油黏度/ (mPa·s)	原油密度/ (kg/m ³)	岩石导热系数/ [10 ⁻⁶ W/(m·K)]	原油黏度 参数	生产时间/ a	水平井射 孔段长度/ m	注汽 速率/ (m ³ /d)
油藏 参数	35×28	5	30.7	1939	74.78	24	960	3	2.9	11	0.6	0.22
模型 参数	0.25×0.50	0.05	42.5	12800	90.00	2.4	990	0.88	2.3	0.0007 (6.1h)	0.01	0.009

1.2 实验装置

实验流程如图 2 所示。实验仪器包括注入系统、二维模型、加热保温系统、数据收集系统。注入系统由 1 台 ISCO 高精度柱塞泵(流量精度为 ±0.25 mL/min, 压力精度为 ±0.5%)、蒸汽发生器、气体流量计、压力表、中间容器等设备组成;保温系统为恒温烘箱;数据采集系统由计算机、温度传感器(温度范围为 500 ℃, 温度精度为 ±0.2 ℃)、压力传感器(压力范围为 68 MPa,

压力精度为 ±0.25% FSO)、回压阀组成。

二维模型正面可视,模型尺寸为 0.25 m×0.25 m×0.013 m,注入井和采出井井距为 0.05 m,采出井距离模型下边缘长度为 0.03 m。从模型边缘插入 25 根温度探头进行测温,模型背面设置石棉等绝热保温材料包裹以减少热损失,将模型主体置于 50 ℃ 烘箱中进行保温并模拟地层温度。蒸汽发生器与二维可视化模型之间的蒸汽注入管线用加热带加热,以减少注蒸汽过

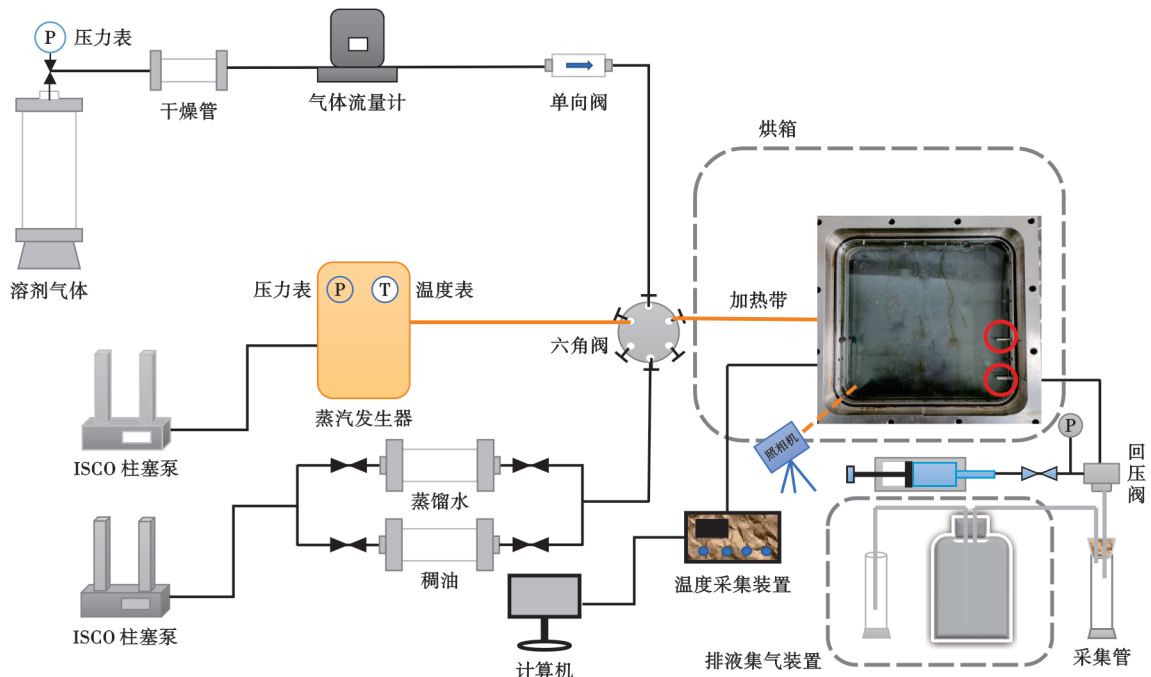


图 2 二维实验流程

Fig. 2 Two dimensional experimental flow chart

程中热损失。该系统耐压为 2 MPa。

由于 SAGD 蒸汽腔的对称性,将注入井和生产井布置在模型右边界处,模拟 1/2 的蒸汽腔发育,这与 Huang 等^[31]的布井方式一致。

1.3 实验步骤

(1) 加热准备好二维模型和实验用油,模型准备包括检测气密性、填砂、抽真空、饱和水,然后将模型加热至 80 °C、实验用油加热至 100 °C。

(2) 以 0.5 mL/min 的速率对模型进行饱和油,并计算模型初始含油饱和度。

(3) 将二维模型置于烘箱中,设置环境温度为 50 °C,采出口设置回压为 0.8 MPa,在蒸汽注入口端连接测压管线,设置蒸汽的注入速率为 5 mL/min(当量水)。

(4) Sheng 等^[24]在二甲醚辅助 SAGD 数值模拟研究中,设置的溶剂在蒸汽中的摩尔浓度为 2%。笔者设计溶剂的摩尔浓度为 1.35%,对应的实验气水比为 3.5:1,注入时机为 SAGD 开采中一后期,注入方式为与蒸汽混注。

(5) 实验过程中由温度数据采集器自动记录模型温度数据,采出液利用破乳剂破乳后,计量产油数据和产水数据,并拍摄蒸汽腔形态变化。

(6) 对于溶剂辅助 SAGD 实验,按照实验方案在步骤(3)中注入溶剂气体,其他步骤和参数与 SAGD 实验保持相同;注入溶剂后,产出口采用排液集气法收集产气,集气瓶内装满硅油,通过测量排出硅油的体积,得到产气体积。

(7) 注入溶剂后的实验采出液充分搅拌后打开试管塞,放置在 50 °C 烘箱中 2 h,期间不时搅拌,以确保采出液中溶剂充分析出。

(8) 实验结束后,选取 9 个位置,并测定残余油饱和度,取样位置如图 3 所示。

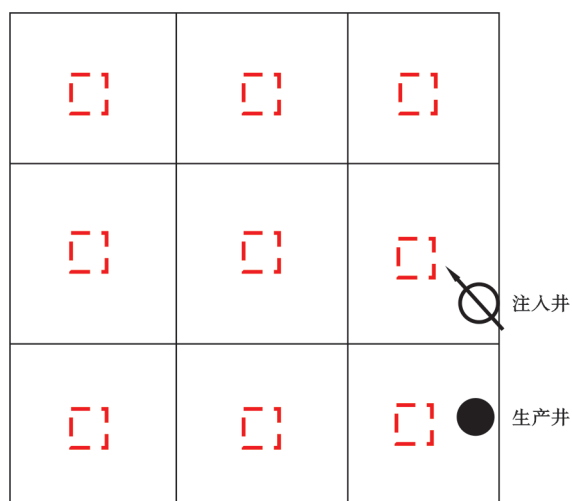


图 3 测定残余油饱和度取样示意

Fig. 3 Schematic diagram of sampling for determination of residual oil saturation

2 实验结果及讨论

2.1 蒸汽腔发育规律和温度场

在 SAGD 开采过程中,SAGD 蒸汽腔发育主要包括蒸汽腔向上发育,蒸汽腔横向扩展以及蒸汽腔向下发育 3 个阶段(图 4)。这与王选茹等^[32]的蒸汽腔划分一致:①0~35 min 属于蒸汽腔向上发育阶段,蒸汽注入后注入井周围稠油黏度下降,井间压差增大,生产井周围稠油受压差驱动被采出。此时,井间压差较大,产出液几乎不含水。随着蒸汽的聚集,饱和蒸汽腔逐渐形成,被加热的稠油与冷凝的水在重力作用下流向生产井,此时注入井与生产井间逐渐建立热连通,产液状态变为 O/W 型和 W/O 型乳状液小液滴,共同呈喷射状态产出。②35 min 后,蒸汽腔开始接触到模型顶端,受顶端限制,蒸汽腔开始横向扩展。随着蒸汽腔进一步发育,模型顶部温度开始达到 150 °C,由于蒸汽超覆,蒸汽腔内热量集中在模型上部,蒸汽腔逐渐呈倒三角形。③170 min 时,蒸汽腔达到模型左边界,蒸汽腔波及面积约占模型面积的 50%,此时判断达到 SAGD 开采中一后期。测得蒸汽腔内部温度为 180 °C,约等于蒸汽在该压力下的饱和温度。随着生产的继续进行,蒸汽腔受到模型左侧边界的限制开始逐渐向下发育。由于蒸汽腔波及范围较大,热量散失严重,盖层的左侧已无法达到蒸汽饱和温度;且由于产出液含水率升高,高黏度的 W/O 型乳状液含量减小,导致井间压差减小;蒸汽腔波及速率和产油速率开始下降。随着开采继续,当产出液含水率达到 95% 以上时,SAGD 开采结束。

由图 5—图 6 可以看出,在溶剂辅助 SAGD 中一后期过程中也分为蒸汽腔向上发育,蒸汽腔横向扩展,以及蒸汽腔向下发育 3 个阶段。其中,蒸汽腔向上发育以及蒸汽腔横向扩展阶段,在相同的开采时间内,溶剂辅助 SAGD 蒸汽腔发育状况与 SAGD 相似。在 SAGD 开采中一后期(160~180 min)加入溶剂辅助后,蒸汽腔发育速度相比 SAGD 开采明显提高,蒸汽腔波及区域明显增大,驱油效率更高,开采时间延长。

从温度场可以看出,二甲醚辅助 SAGD 蒸汽腔前缘温度相比 SAGD 低 3~4 °C,相比丙烷辅助 SAGD 高 5~6 °C。因此,温度由低到高依次为丙烷辅助 SAGD 的蒸汽腔边缘、二甲醚辅助 SAGD 的蒸汽腔边缘、SAGD 的蒸汽腔边缘。这是由于二甲醚可溶于水,不会在蒸汽腔前缘形成高浓度的气体聚集带,在蒸汽腔内分压较小。根据共同凝析理论^[13],由于在一定压力下二甲醚冷凝温度高于丙烷,二甲醚—水蒸汽体系在蒸汽腔边缘的冷凝温度高于丙烷—水蒸汽体系冷凝

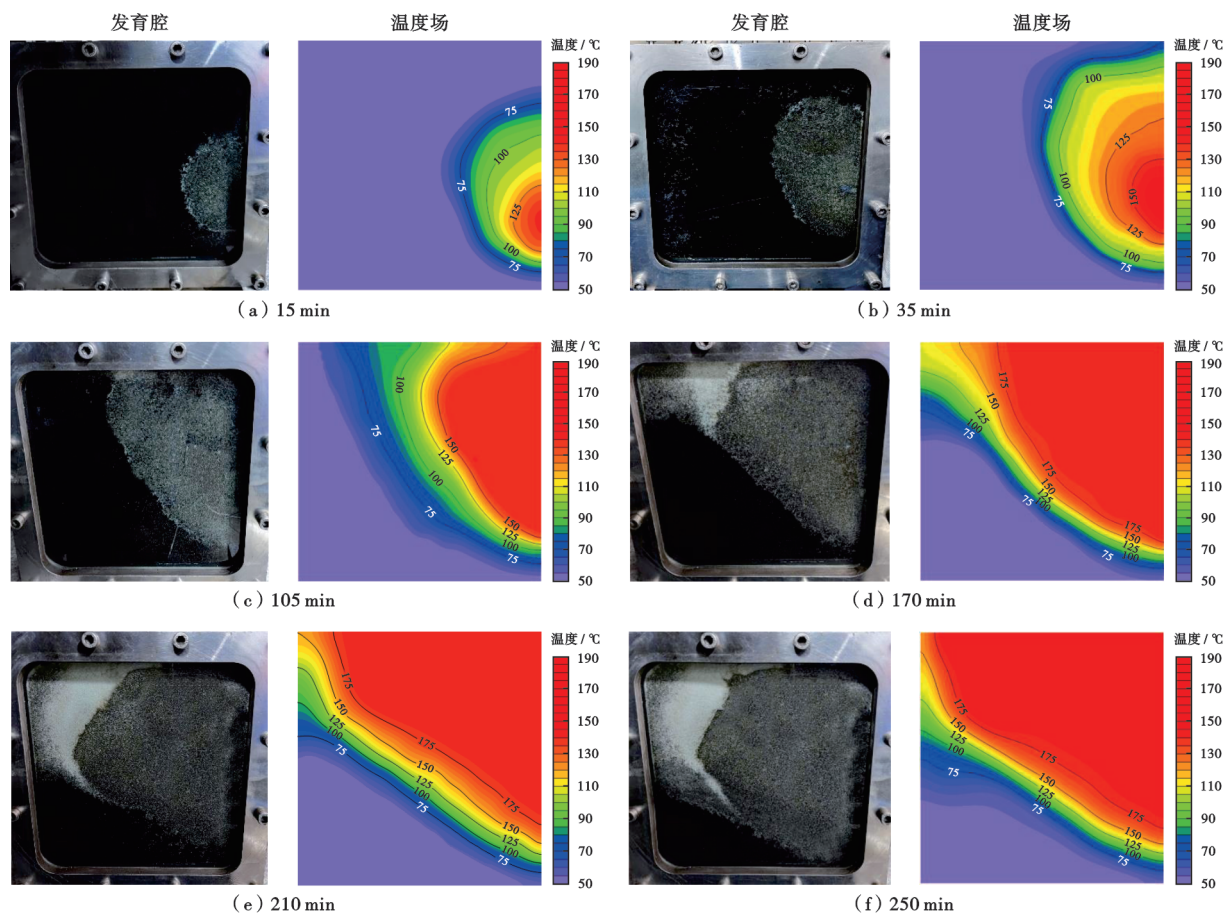


图 4 SAGD 实验蒸汽腔发育和温度场

Fig. 4 Development of steam chamber and temperature field of SAGD experiment

温度,二甲醚辅助 SAGD 中、后期蒸汽腔向油相传热效率要高于丙烷辅助 SAGD 中一后期。

将蒸汽腔波及面积与模型整体面积的比值定义为蒸汽腔波及系数:

$$\varphi = [(S - S_L) / S] \times 100\% \quad (5)$$

其中,剩余油面积利用 Matlab 对图像像素点测量得到。

由蒸汽腔波及系数随时间的变化(图 7)可以看出,在 SAGD 中一后期加入溶剂后,丙烷辅助 SAGD 的蒸汽腔扩展速率初期要高于二甲醚,后期要低于二甲醚。这是由于在注溶剂初期,丙烷不溶于水,丙烷在蒸汽腔边缘气相中的浓度要高于二甲醚;而部分二甲醚要经历先溶于水相,再从水相扩散至油相的过程;随着开采的继续,蒸汽腔开始向下发育,丙烷在蒸汽腔前缘的气相浓度逐渐降低,在稠油中溶解量减小。

最终 SAGD 的蒸汽腔波及系数为 62.07%,丙烷辅助 SAGD 的蒸汽腔波及系数为 78.14%,二甲醚辅助 SAGD 蒸汽腔波及系数为 83.32%。丙烷辅助 SAGD 蒸汽腔波及区域颜色比二甲醚辅助 SAGD 蒸

汽腔波及区域颜色深。这表明,丙烷辅助 SAGD 中一后期开采残余油饱和度要高于二甲醚辅助 SAGD 中一后期开采。

2.2 生产动态分析

由产油速率随产液量变化(图 8)可以看出,在注溶剂前,各组实验产油速率相差不大。在 SAGD 中、后期注溶剂后,二甲醚辅助开采的产油速率增长最快。注二甲醚后,产液 0.63 PV 后达到最高值 1.58 mL/min;注丙烷后,产液 0.46 PV 后达到最高值 1.29 mL/min。

由图 9 可以看出,丙烷辅助 SAGD 的产液速率要高于二甲醚辅助 SAGD。这是由于丙烷不溶于水,大量丙烷聚集在模型上部形成气顶,增大了井间压差,使得产液速率增大。

由图 10 可以看出,在 SAGD 中一后期加入溶剂后,产出液含水率均降低。这是由于溶剂的加入,改善了原油的流动性,使得原来不能动用和难动用的稠油得以流动被采出;产出液含油量升高,含水率降低。二甲醚辅助 SAGD 开采的产出液含水率最低。

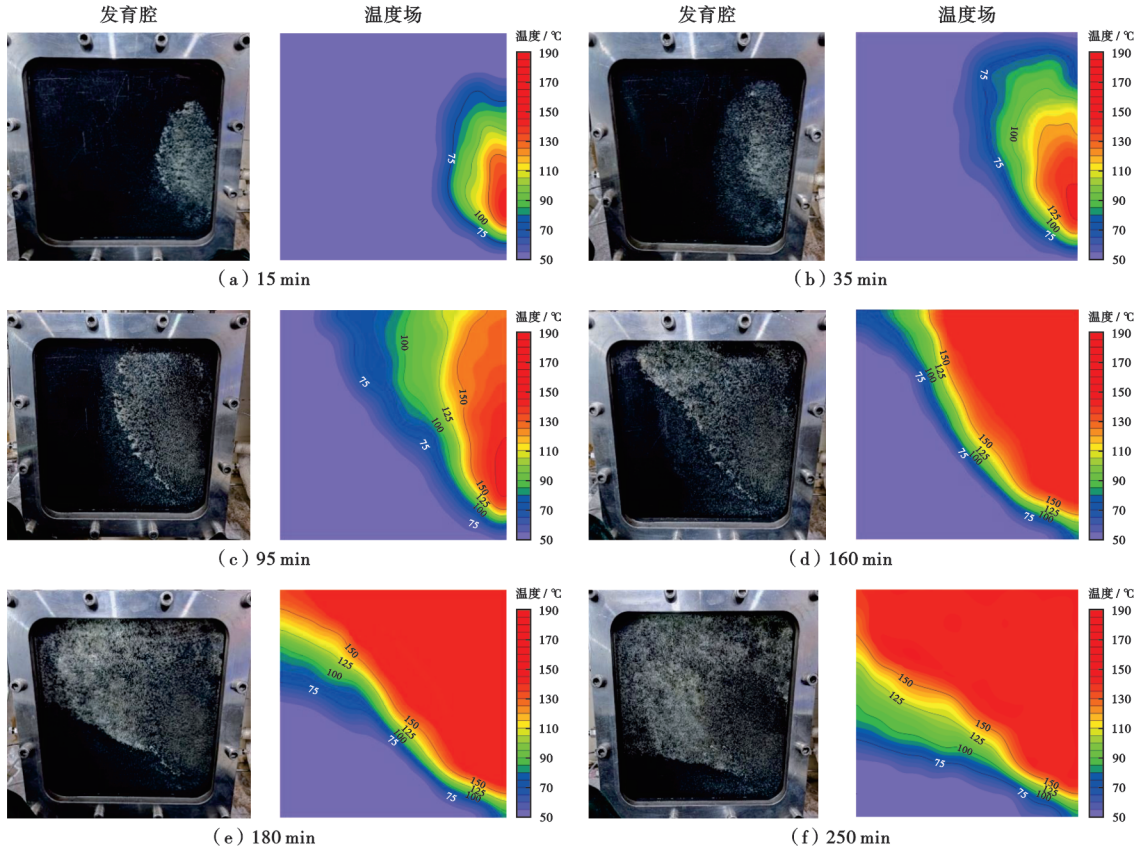


图5 丙烷辅助SAGD中-后期开采实验蒸汽腔发育和温度场

Fig. 5 Development of steam chamber and temperature field of propane assisted SAGD production experiment in the mid-late stage

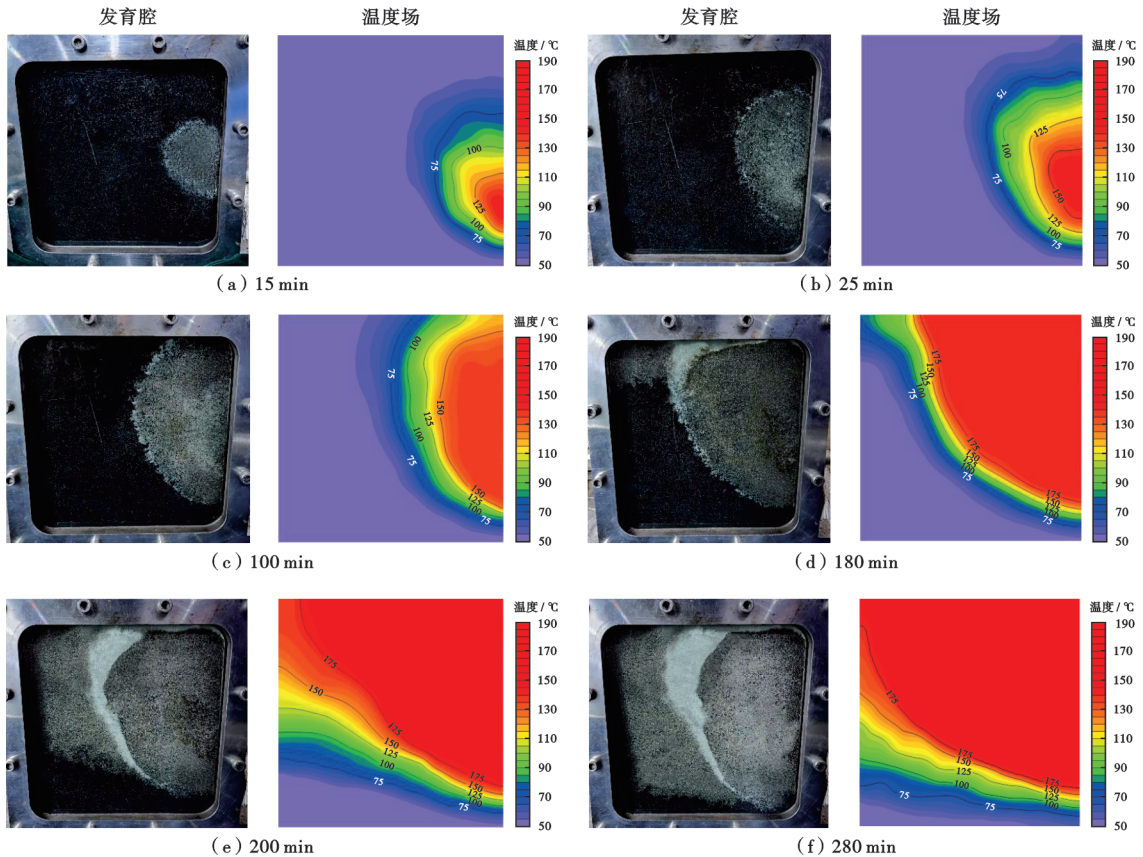


图6 二甲醚辅助SAGD中-后期开采实验蒸汽腔发育和温度场

Fig. 6 Development of steam chamber and temperature field of dimethyl ether assisted SAGD production experiment in the mid-late stage

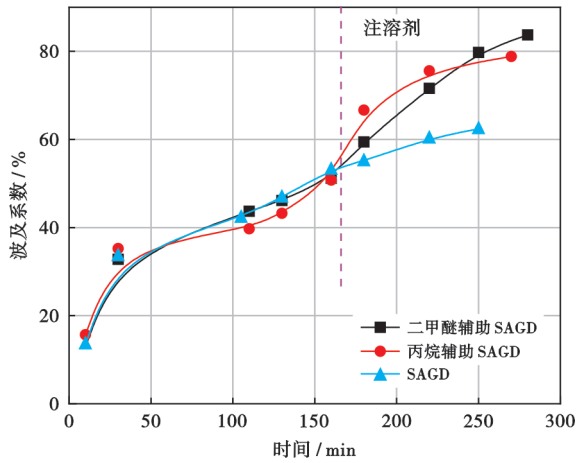


图 7 不同溶剂辅助 SAGD 中一后期开采波及系数
Fig. 7 Sweep coefficient in the mid-late stage of SAGD assisted by different solvents

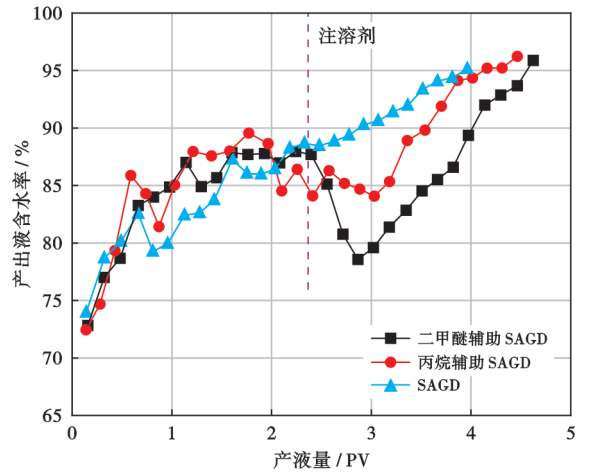


图 10 不同溶剂辅助 SAGD 中一后期开采产出液含水率
Fig. 10 Water cut of produced liquid in the mid-late stage of SAGD assisted by different solvents

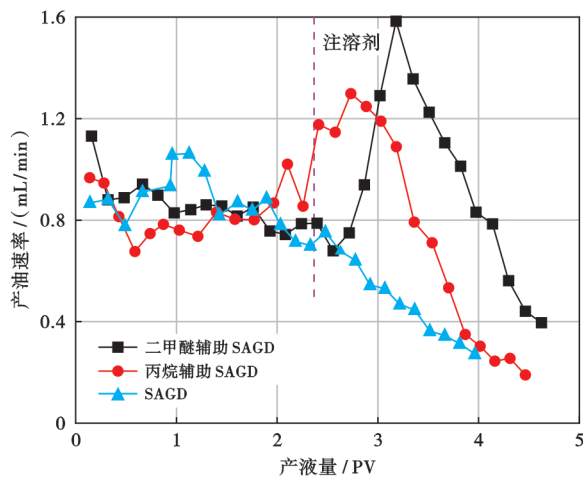


图 8 不同溶剂辅助 SAGD 中一后期开采产油速率
Fig. 8 Oil production rate in the mid-late stage of SAGD assisted by different solvents

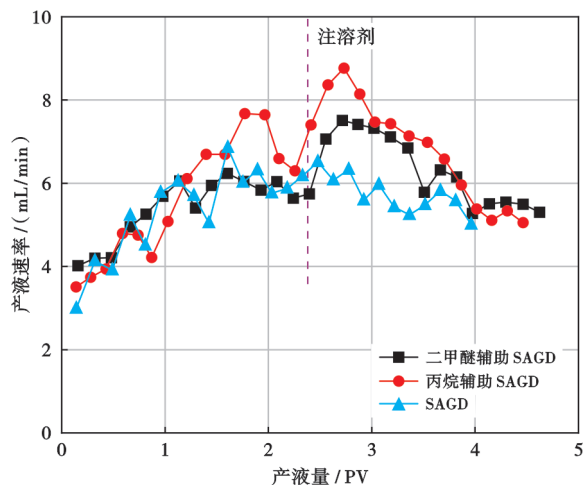


图 9 不同溶剂辅助 SAGD 中一后期开采产液速率
Fig. 9 Liquid production rate in the mid-late stage of SAGD assisted by different solvents

这是由 3 个原因造成:①二甲醚降黏率更高,改善稠油流动能力更强,使得产油速率更高;②二甲醚既溶于水也溶于油,这减小了蒸汽腔边缘油相和水相密度差异,减缓了两相流的重力分异,阻碍了蒸汽在蒸汽腔边缘的窜流;③二甲醚辅助 SAGD 中一后期井间压差较小。这都在一定程度上抑制了汽窜现象,降低了产出液含水率。SAGD 开采的最终采收率为 53.67%;丙烷辅助开采的最终采收率为 65.58%,相比 SAGD 开采提高了 11.91%;二甲醚辅助开采的最终采收率为 72.93%,相比 SAGD 开采提高了 19.26%。

由图 11 可以看出,二甲醚辅助 SAGD 中一后期的采收率高于丙烷辅助 SAGD 中一后期采收率,高于 SAGD 采收率。在中一后期注入溶剂后,产液为 1.12 PV,二甲醚辅助开采的累计油气比从 0.17 达到最高 0.191;产液为 0.77 PV,丙烷辅助开采的累计油气比从 0.168

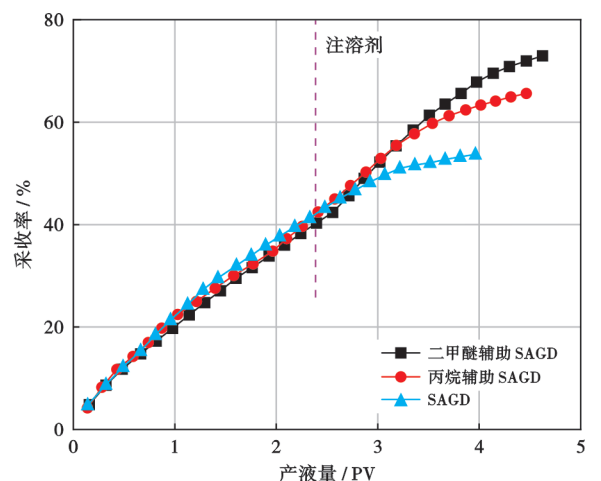


图 11 不同溶剂辅助 SAGD 中一后期开采采收率
Fig. 11 Oil recovery efficiency in the mid-late stage of SAGD assisted by different solvents

达到最高 0.181。SAGD 的最终累计油气比为 0.141，二甲醚辅助开采相比增加了 0.027，丙烷辅助开采相比增加了 0.012。

由图 12 可以看出，在 SAGD 中一后期加入溶剂后，由于产油速率升高迅速，在一定注汽速率下，相同注汽量的换油效率增加，使得累计油气比升高。其中，二甲醚辅助 SAGD 的累计油气比最高，这表明在地层条件下二甲醚改善稠油流动的能力高于丙烷。溶剂回收率定义为回收的溶剂的量与注入溶剂的总量比值：

$$C = (V_s / V_{\text{spro}}) \times 100\% \quad (6)$$

由图 13 可以看出，在实验前期，由于溶剂注入量少，且大部分溶剂溶于油或水中，导致溶剂回收率较低。随着实验进行，大量气相溶剂随着产出液产出，溶剂回收率随之升高。二甲醚的最终溶剂回收率为 86.6%，高于丙烷的溶剂回收率 79.7%。这是由于二

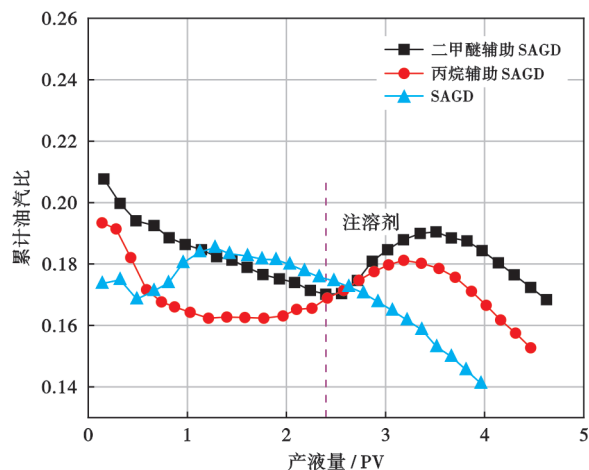


图 12 不同溶剂辅助 SAGD 中一后期开采累计油气比
Fig. 12 Accumulated oil-steam ratio in the mid-late stage of SAGD assisted by different solvents

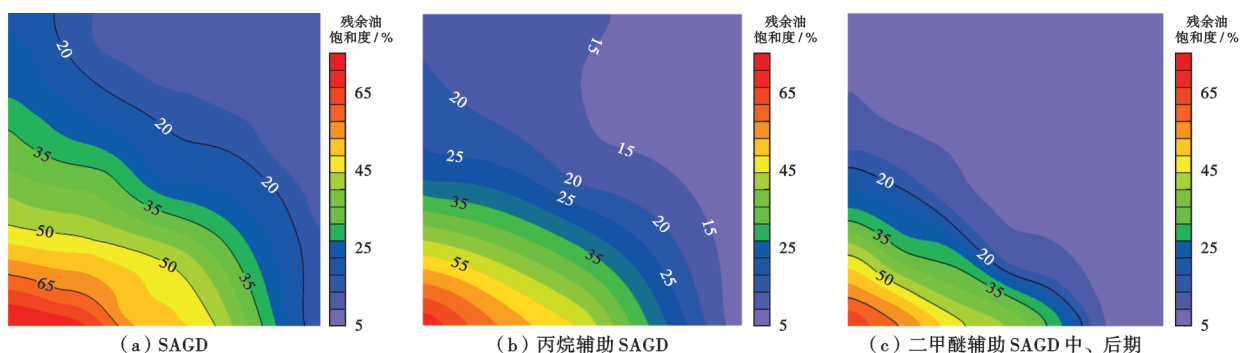


图 14 SAGD 开采与溶剂辅助 SAGD 中、后期开采残余油饱和度场对比

Fig. 14 Comparison of residual oil saturation field between SAGD and solvent-assisted SAGD in the mid-late stage

3 结论

(1) 在 SAGD 中一后期加入溶剂辅助后，驱油效率增加，蒸汽利用效率升高。SAGD 采收率为 53.67%，

甲醚既溶于油也溶于水，部分二甲醚溶于产出液一起产出后再析出；而丙烷由于较轻，随着蒸汽腔的扩展，大量丙烷聚集在蒸汽腔上部无法采出，导致溶剂回收率低于二甲醚。

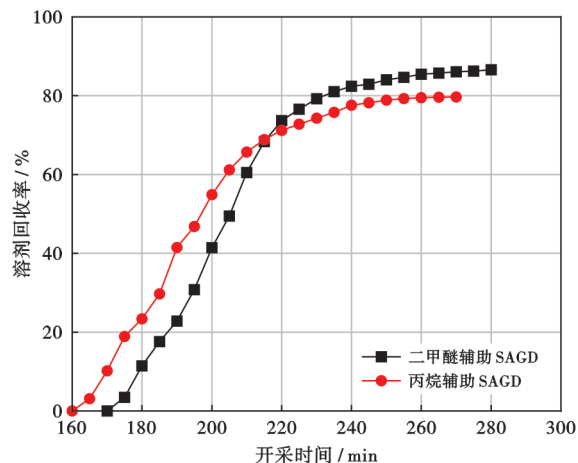


图 13 不同溶剂辅助 SAGD 中一后期开采溶剂回收率
Fig. 13 Solvent recovery rate in the mid-late stage of SAGD assisted by different solvents

根据图 3 所标注的 9 个位置，取样测定残余油饱和度后，从形成残余油饱和度场(图 14)可以看出，相比 SAGD 开采，溶剂辅助 SAGD 中一后期开采残余油饱和度明显下降。加入溶剂后，蒸汽腔波及范围内残余油饱和度下降了 4%~6%。二甲醚辅助开采的残余油饱和度场相比丙烷辅助开采，残余油饱和度低于 15% 的区域更大。这表明，在蒸汽腔波及区域内，二甲醚仍有较强的驱油效率。这是由于：①二甲醚在高温条件下降黏率高于丙烷；②二甲醚可以很好地降低界面张力，使得稠油在多孔介质中流动的毛细管力和黏附力减小，得以在重力的作用下流向生产井被采出。

累计油气比为 0.141；丙烷辅助 SAGD 中一后期采收率提高了 11.91%，累计油气比提高了 0.012；二甲醚辅助 SAGD 中一后期采收率提高了 19.26%，累计油气比提高了 0.027。

(2) 由蒸汽腔发育和温度场可以看出,在 SAGD 中一后期加入溶剂辅助后,丙烷辅助初期蒸汽腔扩展速率要高于二甲醚辅助,后期扩展速率低于二甲醚辅助。SAGD 蒸汽腔波及系数为 62.07%,丙烷辅助开采相比提高了 16.07%,二甲醚辅助开采相比提高了 21.25%。溶剂气体与蒸汽共注会降低蒸汽腔前缘温度;SAGD 蒸汽腔前缘温度为 180℃,丙烷辅助 SAGD 开采的蒸汽腔前缘温度下降了约 9℃,二甲醚辅助 SAGD 开采的蒸汽腔前缘温度下降了约 4℃。

(3) 对比二甲醚和丙烷辅助 SAGD 中一后期开采生产动态看出,二甲醚辅助开采的产油速率高于丙烷辅助开采,产液速率和产出液含水率低于丙烷辅助开采。二甲醚的溶剂回收率 86.6% 相比丙烷提高了 6.9%。这是由于二甲醚既溶于油也溶于水,可随着产出液一起产出而被回收。二甲醚辅助开采的残余油饱和度低于丙烷辅助开采,且残余油饱和度低于 15% 的区域更大,这表明地层条件下二甲醚驱油效率更高。

符号注释: R —无量纲线性尺寸; B_3 —SAGD 无量纲参数; t_D —无量纲时间; q_s —蒸汽注入率比值; L —注采井之间的井距, m; W —油藏宽度, m; ρ_s —原油密度, kg/m^3 ; ϕ —孔隙度; K —渗透率, mD; μ_s —溶剂腔边缘温度下原油的黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; S_o —初始含油饱和度; h —油藏厚度, m; g —重力加速度, m/s^2 ; α —油藏热扩散系数, m^2/s ; n —原油黏度参数; t —生产时间, a; ω —水平井射孔段长度, m; C —溶剂回收率; V_{spro} —注入的溶剂体积, cm^3 ; V_s —产出的溶剂体积, cm^3 ; φ —蒸汽腔波及系数; S —二维模型面积, m^2 ; S_L —二维模型中剩余油面积, m^2 。

参 考 文 献

- [1] 鹿腾,李兆敏,顾子涵,等. 超深层稠油降黏泡沫体系微观作用机理及其矿场应用[J]. 石油学报,2023,44(8):1344-1355.
LU Teng, LI Zhaomin, GU Zihan, et al. Microcosmic mechanism of viscosity-reducing foam system in ultra-deep heavy oil and its field application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(8): 1344-1355.
- [2] 陈刚强,张磊,王东勇,等. 准噶尔盆地乌尔禾地区稀油—稠油—油砂—沥青立体成藏(成矿)模式[J]. 石油学报,2023,44(7):1072-1084.
CHEN Gangqiang, ZHANG Lei, WANG Dongyong, et al. A stereo model of accumulation from normal oil to heavy oil to oil sand to bitumen in Wuerhe area, Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(7): 1072-1084.
- [3] 蒋琪,游红娟,潘竞军,等. 稠油开采技术现状与发展方向初步探讨[J]. 特种油气藏,2020,27(6):30-39.
JIANG Qi, YOU Hongjuan, PAN Jingjun, et al. Preliminary discussion on current status and development direction of heavy oil recovery technologies[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(6): 30-39.
- [4] 李博良,李宾飞,冀延民,等. 烟道气辅助注蒸汽开采稠油增效机理及应用[J]. 石油学报,2024,45(3):574-585.
LI Boliang, LI Binfei, JI Yanmin, et al. Mechanism and application of flue gas-assisted steam injection for heavy oil recovery[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(3): 574-585.
- [5] 王益民,王贵毅. 新疆风城油砂沥青粘裂化反应研究[J]. 化工管理,2019(5):147-149.
WANG Yimin, WANG Guiyi. Study on viscosity reduction and cracking reaction of Fengcheng oil sand asphalt in Xinjiang[J]. Chemical Engineering Management, 2019(5): 147-149.
- [6] 关文龙,蒋有伟,郭二鹏,等. “双碳”目标背景下的稠油开发对策[J]. 石油学报,2023,44(5):826-840.
GUAN Wenlong, JIANG Youwei, GUO Erpeng, et al. Heavy oil development strategy under the “Carbon Peaking and Carbon Neutrality” target[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(5): 826-840.
- [7] 方吉超,李晓琦,计秉玉,等. 中国稠油蒸汽吞吐后提高采收率接替技术前景[J]. 断块油气田,2022,29(3):378-382.
FANG Jichao, LI Xiaoqi, JI Bingyu, et al. Prospect of replacement technology for enhanced oil recovery after cyclic steam stimulation of heavy oil in China[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2022, 29(3): 378-382.
- [8] 东晓虎,王剑,刘慧卿,等. 高含水层油砂 SAGD 相似物理模拟实验[J]. 石油学报,2022,43(5):658-667.
DONG Xiaohu, WANG Jian, LIU Huiqing, et al. SAGD scaled physical simulation experiment for oilsands reservoirs with high water-bearing layer[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(5): 658-667.
- [9] 葛明曦. 辽河油田中深层超稠油 SAGD 开发技术[J]. 特种油气藏,2021,28(4):175.
GE Mingxi. SAGD development technology of medium deep super heavy oil in Liaohe oilfield[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(4): 175.
- [10] 鹿腾,班晓春,李兆敏,等. 烟道气辅助 SAGD 蒸汽腔扩展机理[J]. 石油学报,2021,42(8):1072-1080.
LU Teng, BAN Xiaochun, LI Zhaomin, et al. Mechanisms on expansion of SAGD steam chamber assisted by flue gas[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(8): 1072-1080.
- [11] 罗健,李秀雷,王红庄,等. 溶剂辅助蒸汽重力泄油技术研究综述[J]. 石油钻采工艺,2014,36(3):106-110.
LUO Jian, LI Xiuluan, WANG Hongzhuang, et al. Research on ES-SAGD technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36(3): 106-110.
- [12] 思娜,安雷,邓辉,等. SAGD 重油、油砂开采技术的创新进展及思考[J]. 石油钻采工艺,2016,38(1):98-104.
SI Na, AN Lei, DENG Hui, et al. Innovation progress and thinking of SAGD technology in heavy oil and oil sand[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(1): 98-104.
- [13] NASR T N, BEAULIEU G, GOLBECK H, et al. Novel expanding solvent-SAGD process “ES-SAGD”[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2003, 42(1): PETSOC-03-01-TN.
- [14] ZARE A, HAMOUDA A A. Coinjection of C_6 , C_7 , and CO_2 with steam to improve low-pressure SAGD process[J]. Fuel, 2019, 238:394-401.
- [15] SHENG Kai, AMER H, LIU Young, et al. A new experimental

- method for comparing solvents in steam-solvent coinjection for bitumen recovery under controlled thermodynamic conditions [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 213: 110377.
- [16] LIU Hao, CHENG Linsong, WU Keliu, et al. Performance of solvent-assisted thermal drainage process and its relationship to injection parameters: a comprehensive modeling [J]. *Fuel*, 2018, 225: 388-402.
- [17] GATES I D, CHAKRABARTY N. Design of the steam and solvent injection strategy in expanding solvent steam-assisted gravity drainage [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2008, 47(9): 12-20.
- [18] 刘昊, 程林松, 黄世军, 等. 稠油油藏溶剂辅助蒸汽驱前缘预测模型 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2017, 41(1): 110-117.
LIU Hao, CHENG Linsong, HUANG Shijun, et al. A mathematical model for steam frontier prediction in solvent enhanced steam flooding process [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2017, 41(1): 110-117.
- [19] CHERNETSKY A, MASALMEH S, EIKMANS D, et al. A novel enhanced oil recovery technique: experimental results and modelling workflow of the DME enhanced waterflood technology [R]. SPE 177919, 2015.
- [20] RAOOF F, TAGHIZADEH M, ELIASSI A, et al. Effects of temperature and feed composition on catalytic dehydration of methanol to dimethyl ether over γ -alumina [J]. *Fuel*, 2008, 87(13/14): 2967-2971.
- [21] SPADARO L, PALELLA A, ARENA F. Copper-Iron-Zinc-Cerium oxide compositions as most suitable catalytic materials for the synthesis of green fuels via CO₂ hydrogenation [J]. *Catalysis Today*, 2021, 379: 230-239.
- [22] YAMCHI H S, ZIRRAHI M, HASSANZADEH H, et al. Effect of additives on liquid-liquid equilibrium properties of butane/bitumen systems with applications to solvent aided bitumen recovery processes [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, 137: 452-460.
- [23] KESHAVARZ M, OKUNO R, BABADAGLI T. Efficient oil displacement near the chamber edge in ES-SAGD [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, 118: 99-113.
- [24] SHENG Kai, OKUNO R, WANG Mingyuan. Dimethyl ether as an additive to steam for improved steam-assisted gravity drainage [J]. *SPE Journal*, 2018, 23(4): 1201-1222.
- [25] RATNAKAR R R, DINDORUK B, WILSON L C. Phase behavior experiments and PVT modeling of DME-brine-crude oil mixtures based on Huron-Vidal mixing rules for EOR applications [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2017, 434: 49-62.
- [26] BAEK K H, SHENG K, ARGUELLES-VIVAS F J, et al. Comparative study of oil-dilution capability of dimethyl ether and hexane as steam additives for steam-assisted gravity drainage [J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2019, 22(3): 1030-1048.
- [27] ZHANG Xiaokun, ZHOU You, DU Xuan, et al. Fuzzy methods to evaluate the development effects of SAGD technology and its application during the middle and later stages of super-heavy oil reservoirs [J]. *Fuel*, 2022, 313: 122644.
- [28] 孙晓娜. 烟道气-溶剂辅助 SAGD 开采机理研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
SUN Xiaona. Study on the production mechanism of flue gas-solvent assisted SAGD [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2014.
- [29] 国家能源局. 注蒸汽采油二维比例物理模拟实验技术要求: SY/T 7068—2016 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2016.
National Energy Administration. Technical requirements of oil recovery for two-dimensional proportional physical simulation experiments by steam injection: SY/T 7068-2016 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016.
- [30] BUTLER R M. A New Approach to the modelling of steam-assisted gravity drainage [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1985, 24(3): 42-51.
- [31] HUANG Jingjing, BABADAGLI T. Mechanics of SAGD efficiency improvement using combination of chemicals: an experimental analysis through 2D visual models [J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2021, 24(1): 80-97.
- [32] 王选茹, 程林松, 刘双全, 等. 蒸汽辅助重力泄油渗流机理研究 [J]. *西南石油学院学报*, 2006, 28(2): 44-47.
WANG Xuanru, CHENG Linsong, LIU Shuangquan, et al. Study of the seep mechanism of steam assisted gravity drainage [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2006, 28(2): 44-47.

(收稿日期 2023-03-24 改回日期 2024-01-02 编辑 王培玺)