

文章编号:1000-4092(2020)01-185-06

# 改善蒸汽辅助重力泄油技术研究进展\*

舒展,裴海华,张贵才,葛际江,蒋平,曹旭

(中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛266580)

**摘要:**蒸汽辅助重力泄油(SAGD)技术广泛应用于超稠油油藏开采,但在开发过程中存在汽窜严重、热利用率低等问题。通过总结目前改善SAGD开发效果的主要技术方法,如气体辅助SAGD技术、溶剂辅助SAGD技术、泡沫辅助SAGD技术、化学添加剂辅助SAGD技术,介绍了改善SAGD技术的作用机理和提高采收率效果,指出了存在的问题并提出了使用建议。应综合考虑油藏地质条件与施工条件的差异,选择不同的辅助SAGD技术使经济效益最大化。参45

**关键词:**稠油;蒸汽辅助重力泄油(SAGD);超稠油油藏;采收率;综述

**中图分类号:**TE345 **文献标识码:**A **DOI:** 10.19346/j.cnki.1000-4092.2020.01.032

蒸汽辅助重力泄油(SAGD)技术是通过注汽井注入高温蒸汽加热地层,原油加热降黏后在重力作用主导下泄油,流入注汽井下方的生产井<sup>[1-3]</sup>。目前SAGD技术是一种有效的超稠油开采方式,在超稠油油藏开采得到了广泛的应用<sup>[4-6]</sup>。然而随着SAGD技术的应用,其不足之处也显现出来。由于地层的非均质性导致汽窜的发生,降低蒸汽的波及系数;在稠油油藏开采的中后期,蒸汽的用量大幅上升、油气比高、热利用率低、后期的含水量上升等一系列问题,最终会导致成本上升,开采效果变差<sup>[7-10]</sup>。为了改善SAGD技术,近年来研究人员也提出了很多改进措施以及一些新型SAGD技术<sup>[11-16]</sup>,比如添加非凝析气体、溶剂、泡沫等辅助SAGD技术。本文综述了近年来改善SAGD开发稠油效果方法的研究进展,总结了各种方法的优势和存在的问题,最后提出相应的建议和应用前景。

## 1 气体辅助SAGD技术

气体辅助SAGD(SAGP, Steam and Gas Push)技术即蒸汽辅助重力泄油过程中加入气体驱动的开采方式<sup>[17-18]</sup>。该生产过程是在SAGD注入蒸汽过程中加入少量的非凝析气体,如N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>和烟道气等。虽然只添加了少量的非凝析气体,但与传统的SAGD相比,SAGP过程中蒸汽腔的温度、压力以及形态和泄油过程都有了很大的变化。不同非凝析气体的加入对改善SAGD开发效果的影响及其作用机理如下。

### 1.1 氮气辅助SAGD技术

氮气辅助SAGD技术近年来得到了广泛关注,其作用机理主要包括:形成隔热层,降低热损失,提高热效率;维持系统压力,改善流度比。针对氮气辅助SAGD技术的机理及可行性,国内外学者展开

\* 收稿日期:2019-06-27;修回日期:2019-08-23。

**基金项目:**国家重点研发计划“稠油化学复合冷采基础研究与工业示范”(项目编号2018YFA0702400),山东省自然科学基金项目“纳米颗粒稳定乳状液在油藏孔隙介质中形成条件及流度控制机理研究”(项目编号ZR2019MEE085),中央高校基本科研业务费专项资金“多孔介质中化学驱油体系在稠油中的粘性指进机制及调控方法研究”(项目编号18CX02096A)。

**作者简介:**舒展(1995-),男,中国石油大学(华东)油气田开发专业在读硕士研究生(2017-),研究方向为提高采收率与采油化学, E-mail:864518785@qq.com。裴海华(1984-),男,副教授,硕士生导师,本文通讯联系人,中国石油大学(华东)油气田开发工程专业博士(2013),从事油气田开发工程的教学和科研工作,通讯地址:266580 山东省青岛市黄岛区长江西路66号中国石油大学(华东)石油工程学院, E-mail:peihaihua@upc.edu.cn。

了研究。高永荣等<sup>[19]</sup>利用物理模拟及数值模拟方法研究了在SAGD过程中添加氮气提高顶水超稠油藏开发效果的生产机理<sup>[20-21]</sup>,优选出了氮气注入方式、氮气与蒸汽比和氮气总注入量。研究结果表明:(1)氮气注入后主要分布在蒸汽腔的上部,形成热隔层。因此热量向顶部岩石的传递减少,热利用效率明显提高;(2)氮气的注入能有效降低原油黏度,增大超稠油的流动能力;(3)蒸汽腔中因为注入了氮气在横向上得到扩展,蒸汽所能波及到的体积增大;(4)在优选的氮气/蒸汽注入比、氮气体积和蒸汽注入速度条件下,SAGD阶段生产时间和最终采收率都得到了提高。

针对氮气辅助SAGD技术的现场应用也开展了诸多实验。为提高辽河油田杜84块馆陶油藏SAGD开发的效果,刘振宇等<sup>[22]</sup>开展了针对注N<sub>2</sub>辅助SAGD开发技术的研究,对SAGD开发中的氮气注入方式、氮气/蒸汽注入比、段塞尺寸和注入位置等参数进行了优化设计。现场实施结果表明:SAGD技术有效解决了蒸汽热损失严重的问题,提高了蒸汽利用率;充填气腔的蒸汽量减少,克服了蒸汽冷凝所造成的含水量增加的问题,降低了含水率。相比于SAGD开发,采收率基本不变的情况下,成本下降,取得较好的经济效益。

氮气辅助SAGD技术可以有效减少蒸汽的热损失,维持系统压力;在稠油油藏中,氮气的注入可以降低原油黏度,提高原油开采速度,这项技术早已被推广普及。

## 1.2 烟道气辅助SAGD技术

原油开采过程中产生的烟道气若直接排入大气会造成严重的污染,因此对于烟道气的处理一直是油田生产中所面临的问题。研究人员提出了烟道气辅助SAGD技术,在改善SAGD开发效果的同时充分利用好烟道气也符合环保要求。烟道气辅助SAGD技术的主要机理为:(1)烟道气溶于稠油后能大幅降低稠油黏度;(2)在蒸汽腔上部形成隔热层,减少热量损失,提高热利用率;(3)加快蒸汽腔的横向扩展;(4)充分利用烟道气,减少环境污染。

李兆敏等<sup>[23]</sup>研究了烟道气在超稠油中的溶解度以及超稠油的体积系数、黏度等物性参数,发现实验温度下烟道气体积系数较小,在超稠油中的溶解度较小;并且在溶于超稠油之后,油气混合物黏

度大幅下降,降黏率基本线性增加。此研究对今后的数值模拟技术提供了较为可靠的物性参数。针对辽河油田杜84块馆陶油层进行烟道气辅助SAGD技术的模拟实验结果表明,使用常规SAGD技术可使采收率由30.06%提高到38.06%<sup>[24]</sup>;而使用烟道气辅助SAGD技术并进行参数优化,注入量为75 m<sup>3</sup>/d,烟道气/蒸汽注入比为1:1,蒸汽腔的扩展范围明显扩大,最终采收率达到47.39%,延长了开采时间。在优化的烟道气辅助SAGD注入参数条件下,使用烟道气辅助SAGD技术的累计采油量比常规SAGD技术增加了2000 t,采收率提高了7%,汽油比增加了0.7%<sup>[25]</sup>。烟道气辅助SAGD的开发效果好于常规SAGD。

烟道气辅助SAGD技术中,烟道气的注入可以在蒸汽腔上部形成隔热层,提高热利用率;加快蒸汽腔的横向扩展,提高蒸汽波及体积,提高采收率;最重要的是能减少环境污染,与国家的环保要求相呼应,应大力推广应用。

## 1.3 二氧化碳辅助SAGD技术

二氧化碳能改善SAGD的开发效果,主要机理如下:能保持蒸汽腔压力;能在蒸汽腔上部形成隔热层有效减少热量损失;二氧化碳能溶于油中,降低原油黏度,提高开采速度;能有效减少温室气体的排放。

针对二氧化碳改善SAGD技术的机理研究发现注入二氧化碳气体可以提高蒸汽的热利用效率,并且不会明显降低采收率;注入的二氧化碳气体可以在蒸汽之前进入沥青质,给沥青质带来热量和压力降低沥青质的黏度<sup>[26]</sup>;对于小井距,随着二氧化碳注入量的增加,蒸汽凝析温度和汽油比降低,开发效果得以改善<sup>[27]</sup>。Law<sup>[28]</sup>发现在进行二氧化碳和蒸汽混注的前3年中,油藏的平均压力从初始的800 kPa逐步增至2500 kPa,并且稳定在2.5 MPa,表明注入的二氧化碳气体可以用于保持油藏压力。在注入二氧化碳气体3、4、5年后,油藏平均温度分别降至106、137、160℃。如果不进行二氧化碳气体混注,油藏温度可以维持在220℃,但是在相对低的温度下蒸汽腔没有坍塌,主要原因是二氧化碳气体和蒸汽在蒸汽腔中分压<sup>[29-30]</sup>。同时还发现在这个过程中注入二氧化碳比注入烟道气和纯氮气所得采收率都高。

在该项技术中,二氧化碳能在蒸汽腔中分压,避免蒸汽腔的坍塌;二氧化碳的注入也能给稠油油层带去热量和压力,降低稠油黏度,提高开采速度,同时降低温室气体的排放,满足环保要求,应大力推广。但是二氧化碳属于酸性气体,会对设备管线造成腐蚀,应提前做好防腐措施。

#### 1.4 空气辅助 SAGD 技术

随着对 SAGD 技术研究的深入,研究人员发现在 SAGD 开发后期向成熟的蒸汽腔中注入空气能有效开发残余油,同时还能减少蒸汽损失。高永荣等<sup>[31]</sup>利用 3D 实验仪对 SAGD 开发后的空气注入进行动态模拟,发现燃烧现象从注入井开始沿着蒸汽腔向前推进。通过填砂管实验结果分析了空气辅助 SAGD 技术的机理:(1)燃烧过程中在蒸汽腔周围形成连续的硬焦壳,可以有效地阻止蒸汽的损失;(2)在注入后期,燃烧产生的热量有效降低了原油黏度,提高了其流动性进而提高采收率。Rahnama 等<sup>[32]</sup>研究了 SAGD 开发后期注空气开发的可行性及开发效果,发现在 SAGD 后期采用注空气高温燃烧方法可以有效避免热损失,提高采收率,延长油藏开发时间,具有较强的可行性。Belgrave 等<sup>[33]</sup>首先使用常规 SAGD 方法预热油层,随后注入空气,发现注入空气后体积波及系数增加,原油采收率提高。作者认为空气在油层中经过高温氧化会生成二氧化碳,再加上空气中原有的氮气,实际上反应后的空气起到了和烟道气一样的效果;在蒸汽腔中,空气的加入使残余油进入蒸汽腔,可以有效驱替加热的油。

空气辅助 SAGD 技术中,空气的注入可以使蒸汽腔中发生燃烧,弥补 SAGD 过程中的热损失,同时产生的热量能降低原油黏度,提高开采速度;其次空气自身的氮气组分以及燃烧后产生的二氧化碳使得空气辅助 SAGD 技术同时起到氮气和二氧化碳辅助 SAGD 技术的效果。但是空气的注入会对管线设备造成较为严重的氧化腐蚀,应当做好防腐措施。

## 2 溶剂辅助 SAGD 技术

溶剂辅助 SAGD (ES-SAGD, Expanding Solvent-SAGD Process) 技术是将蒸汽和溶剂混合注入 SAGD 的过程,蒸汽作为溶剂的载体,将溶剂携带进

入地层,随后溶剂会在蒸汽腔边界发生凝析,从而降低原油黏度。ES-SAGD 技术除了具有 SAGD 的改善油气比、低能耗和低耗水(与 SAGD 相比)的优点,还有一个突出优点就是溶剂以液相或者气相的形式与原油结合起到辅助降黏的作用,可有效改善 SAGD 开发的效果。

研究人员针对溶剂辅助 SAGD 技术提高采收率的机理以及相较于常规 SAGD 技术的优势展开了研究。针对国内某超稠油藏,王连刚<sup>[34]</sup>通过二维试验装置进行了 ES-SAGD 试验,研究了溶剂辅助 SAGD 技术对蒸汽腔的发育特征以及采收率的影响。实验结果表明溶剂中的气相组分和液相组分共存,溶剂的浓度越高,气相的含量也越高;气相组分在油藏中可以有效减少蒸汽在上覆岩层的热损失,提高蒸汽腔扩展的均匀性。因此,溶剂辅助 SAGD 技术相较于常规 SAGD 技术能显著提高采收率并且降低能耗,具有很大的应用潜力。在 2013 年,Souraki 等<sup>[35]</sup>针对 Athabasca 沥青储层性质进行了几项模拟试验,以比较 SAGD 与 ES-SAGD 的开采效果。利用阿萨巴斯卡和 Cold Lake 沥青的实验黏度数据进行研究,另外对注入溶剂的时间间隔和溶剂的浓度进行参数敏感性分析。结果表明两种技术的采收率和油气比相差不大,但随着注入溶剂浓度的增加,原油黏度越低,采油速度越快,汽油比越低。李魏<sup>[36]</sup>针对溶剂辅助 SAGD 技术对原油的降黏效果展开研究,通过加入溶剂对辽河油田的超稠油进行降黏实验得到稠油的降黏规律。随着溶剂的注入比例增加,降黏率呈线性增加。正戊烷,正己烷和异己烷 3 种实验溶剂中,正戊烷的降黏效果最好。在优化的 ES-SAGD 注入参数条件下,最终采收率达到 74.91%,比常规 SAGD 的采收率提高了 14%,说明 ES-SAGD 技术在稠油开采领域具有较高的可行性。不同类型的溶剂对 ES-SAGD 技术开采效果的影响不同。贾江涛等<sup>[37]</sup>研究了不同分子质量的轻质溶剂对 ES-SAGD 技术的影响机理。对  $C_2H_6$  和  $C_9H_{20}$  两种轻质溶剂的研究结果表明:注入  $C_2H_6$  可以有效保持蒸汽腔的压力,但总体上无法明显降低原油黏度,提高采收率的整体效果较差;而  $C_9H_{20}$  能充分溶解于稠油中,从而大幅降低稠油黏度,增强稠油的流动能力,降低能耗,有效地提高了稠油的开采速度,提高了最终采收率。注  $C_9H_{20}$  辅助

SAGD技术具有一定的经济价值,并且对加快稠油开采具有重要的意义。除了这些室内实验之外,针对ES-SAGD技术也展开了一些现场先导试验。EnCana公司于2004年在Christina Lake地区进行了ES-SAGD现场试验<sup>[38]</sup>。在加入溶剂后,汽油比从5降至1.6,日产油量从167 m<sup>3</sup>增至240 m<sup>3</sup>,产量提升超过40%<sup>[39]</sup>。

溶剂辅助SAGD技术提高采收率的关键是溶剂能降低原油黏度,提高洗油效率进而提高原油开采速度和采收率。可以考虑在气体辅助SAGD过程中加入溶剂,两者协同辅助SAGD技术,可大幅提高采收率。

### 3 泡沫辅助SAGD技术

将蒸汽和表面活性剂溶液一起注入后,在井间区域产生非常强的泡沫聚集,但是在蒸汽腔顶部却是相对较弱的泡沫,因此,泡沫辅助SAGD(FA-SAGD)技术的蒸汽腔的形状更像一个大碗。FA-SAGD技术机理如下:(1)产生的泡沫对大孔道进行封堵,可以控制蒸汽的汽窜现象,从而提高蒸汽的波及体积,取得比常规SAGD更好的开发效果;(2)蒸汽腔内泡沫的存在可以降低蒸汽的流度,削弱重力泄油作用;(3)由于井间区域存在很强的泡沫,可以增加蒸汽的流动阻力,从而延缓蒸汽的突破时间,降低蒸汽的采出量。FA-SAGD的热效率高于SAGD,但其采油速度明显降低。

Chen等<sup>[40]</sup>在蒸汽中加入起泡剂,在地下生成泡沫,对蒸汽进行流度控制并研究泡沫的生成、破灭和运移机理,尝试让大量稳定的泡沫在井内生成并聚集。结果表明产生的泡沫蒸汽有效地抑制了汽窜现象,提高了蒸汽波及系数;相较于常规SAGD技术,FA-SAGD技术提高采收率近30%,有较高的经济效益;参数敏感性分析表明这种方法有较强的可行性。任宝铭<sup>[41]</sup>通过二维可视化模型研究注入的氮气泡沫的封堵机理,发现由于油水黏度差异较大以及地层的非均质性,注采井间易发生窜流,产生明显的主流通道,注入的氮气泡沫首先进入大孔道,在喉道处形成大量气泡,泡沫沿窜流通道运移并聚集,起到封堵大孔道的作用,有利于抑制井间汽窜,提高蒸汽波及系数。鹿腾等<sup>[42]</sup>利用数值模拟方法得出常规SAGD和FA-SAGD在油藏中的温度

场分布图,对这两种不同技术下的蒸汽腔扩展过程进行描述,并对比开发效果。相较于常规SAGD,FA-SAGD的蒸汽腔横向扩展速度更快,纵向扩展速度较慢,在非均质储层的SAGD开发过程中,蒸汽易沿高渗透层窜流,导致蒸汽腔在水平井筒方向扩展不均匀,波及面积较小。而在FA-SAGD开发过程中,由于泡沫对蒸汽流度的控制作用,蒸汽腔在地层内的扩展更加均匀,可以降低能耗,减少热损失,提高采收率。

在FA-SAGD技术中,起泡剂在地层中形成泡沫,能有效提高蒸汽流动的阻力,改善蒸汽流度,并且能封堵大孔道进而减缓汽窜现象,提高蒸汽波及系数,提高采收率。

### 4 化学添加剂辅助SAGD技术

采用化学添加剂辅助SAGD技术是超稠油热采技术的重要发展方向。在此项技术中,蒸汽作为载体携带化学添加剂进入油藏,使化学剂与地层流体和岩石发生相互作用,可以改变岩石与储层流体之间的界面性质,在一定程度上可以降低原油的黏度和油水界面张力,提高洗油效率;也可以在井下生成泡沫在一定程度上控制蒸汽汽窜,提高蒸汽波及系数,抑制蒸汽超覆现象,减少热损失从而提高经济效益。

在油砂的开发过程中,由于其黏度较大,导致开采难度增加,仅仅通过SAGD技术也无法较好地采出油砂中的沥青。Srivastava等<sup>[43]</sup>发现在蒸汽中加入化学添加剂,可以大幅提高沥青的采收率。在实验室中模拟利用SAGD技术热采油砂的过程,将200℃、2000 kPa的蒸汽和1000 mg/L的化学添加剂注入油砂样品。在加入添加剂后形成水包油的乳状液,大幅降低原油黏度,并且蒸汽的冷凝水可以运移这些乳状液,使油砂中沥青的采收率相较于无添加剂时提高13.5%,经济效益提高。针对加拿大阿尔伯塔地区的稠油开发,Li等<sup>[44]</sup>提出了在蒸汽开发过程中同时加入泡沫和其他化学添加剂比如表面活性剂的方法来改善稠油开发效果。该方法有效降低了原油的黏度,形成了水包油乳状液,提高了洗油效率;同时泡沫的形成对于蒸汽的流度控制起到很大的作用,较为稳定的泡沫在蒸汽腔边缘处聚集使蒸汽腔稳定扩展<sup>[45]</sup>,有效提高了蒸汽波及系

数,减少了蒸汽超覆现象造成的热损失。

在化学添加剂辅助 SAGD 技术中,化学添加剂的注入能在地下与原油形成水包油乳状液,大幅降低界面张力,提高洗油效率进而提高采收率。同时化学添加剂也适合与起泡剂或其他溶剂一同辅助 SAGD 技术。

## 5 结论与建议

针对 SAGD 存在较为严重的热损失问题,以及在蒸汽冷凝后蒸汽腔压力降低导致腔体坍塌的问题,可以选择使用气体辅助 SAGD 技术。氮气、烟道气、二氧化碳和空气等气体的注入可以在蒸汽腔上部形成隔热层减少热损失,并且可以弥补蒸汽冷凝后腔体内压力的缺失。同时,二氧化碳、烟道气的注入也能满足环保要求,应大力推广应用。

对于 SAGD 技术开发较为成熟的稠油油藏,建议采用溶剂辅助 SAGD(ES-SAGD)技术或化学添加剂辅助 SAGD 技术来大幅降低原油黏度,以提高产量和采油速度,选用效果好并且成本较低的化学剂是此项技术可行性的关键。

针对部分地层 SAGD 中存在的较为严重的汽窜现象,可以采用泡沫辅助 SAGD(FA-SAGD)技术。起泡剂在地层中形成泡沫,可有效提高蒸汽流动的阻力,改善蒸汽流度,并能封堵大孔道进而减缓汽窜现象。

不同的油藏地质条件与施工条件差异较大,应综合考虑成本、地质特征和储层分布等因素选择不同的辅助 SAGD 技术使经济效益最大化。

### 参考文献:

- [1] DANIEL A R, IAN G. SAGD circulation phase: thermal efficiency evaluation of five wellbore completion designs in Lloydminster reservoir [C]//SPE Thermal Well Integrity and Design Symposium. Canada, 2018: 27-29.
- [2] YANG M, HARDING T G, CHEN Z X. Numerical investigation of the mechanisms in co-injection of steam and enriched air process using combustion tube tests [J]. Fuel, 2019, 242: 638-648.
- [3] 罗池辉,赵睿,杨智,等.浅层超稠油油藏 FAST-SAGD 提高采收率技术研究[J].特种油气藏,2017,24(3):119-122.
- [4] SHI Lanxiang, MA Desheng, LI Xiuluan. Analytical modeling of oil production rate during the entire steam-assisted gravity drainage process in heavy oil reservoirs [J]. J Pet Sci Eng, 2018, 175: 190-199.
- [5] ZARGAR Z, ALI S M F. Analytical modelling of steam chamber rise stage of steam-assisted gravity drainage (SAGD) process [J]. Fuel, 2018, 233: 732-742.
- [6] SUDIPTYA B, BERNA H. Flow control devices in SAGD completion design: enhanced heavy oil/bitumen recovery through improved thermal efficiency [J]. J Pet Sci Eng, 2018, 169: 297-308.
- [7] HUANG Shijun, XIA Yun, XIONG Hao. A three-dimensional approach to model steam chamber expansion and production performance of SAGD process [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2018, 127: 29-38.
- [8] 斯绍雄,王亮,吴永花,等.超稠油蒸汽辅助重力泄油开采不同阶段采出液的性能特征[J].油田化学,2016,33(1):155-160.
- [9] KIM M, SHIN H. Development and application of proxy models for predicting the shale barrier size using reservoir parameters and SAGD production data [J]. J Pet Sci Eng, 2018, 170: 525-540.
- [10] HU L X, LI H Z, BABADAGLI T. A semianalytical model for simulating combined electromagnetic heating and solvent-assisted gravity drainage [J]. Soc Pet Eng J, 2018, 23(4): 1248-1270.
- [11] 董宏,何万军,蒋雪峰,等.微地震监测在新疆稠油 SAGD 开发中的应用[J].特种油气藏,2017,24(3):114-118.
- [12] 陶亮,李凌铎,袁玉晓,等.超稠油非均质油藏直井-水平井 SAGD 精细化调控研究[J].特种油气藏,2018,25(2):80-84.
- [13] 林日亿,齐尚超,沈文丽,等. SAGD 循环预热水平段注汽参数规律[J].中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(1):134-141.
- [14] LI Xiuluan, SHI Lanxiang, LI Haozhe. Experimental study on viscosity reducers for SAGD in developing extra-heavy oil reservoirs [J]. J Pet Sci Eng, 2018, 166: 25-32.
- [15] EHSAN R, ALIREZA N, VAHIDODDIN F, et al. Numerical assessment of the maximum operating pressure for SAGD projects considering the effects of anisotropy and natural fractures [J]. J Pet Sci Eng, 2017, 157: 196-206.
- [16] LIU Hao, CHENG Linsong, HUANG Shijun. Evolution characteristics of SAGD steam chamber and its impacts on heavy oil production and heat consumption [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2018, 121: 579-596.
- [17] 刘志波,程林松,纪佑军,等.蒸汽与天然气驱(SAGP)开采特征-与蒸汽辅助重力泄油(SAGD)对比分析[J].石油勘探与开发,2011,38(1):79-83.
- [18] 张小波,郑学男,邵德军,等. SAGD 添加非凝析气技术研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2010,32(2):113-117.
- [19] GAO Yongrong, WANG Hongyuan, SHEN Dehuang, et al. Research on improving thermal efficiency of SAGD process [C]//SPE Heavy Oil Conference. Canada, 2012: 72-77.

- [20] GAO Yongrong, LIU Shangqi, SHEN Dehuang, et al. Improving oil recovery by adding N<sub>2</sub> in SAGD process for super-heavy crude reservoir with top-water [C]//SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition. Russia, 2008: 66–72.
- [21] 高永荣, 刘尚奇, 沈德煌, 等. 氮气辅助SAGD开采技术优化研究[J]. 石油学报, 2009, 30(5): 717–721.
- [22] 刘振宇, 张明波, 周大圣, 等. 曙光油田杜84块馆陶超稠油油藏SAGP开发研究[J]. 特种油气藏, 2013, 20(6): 96–99.
- [23] 李兆敏, 王勇, 李宾飞, 等. 烟道气在超稠油中的溶解特性[J]. 特种油气藏, 2010, 17(5): 84–87.
- [24] 李兆敏, 王勇, 高永荣, 等. 烟道气辅助SAGD数值模拟研究[J]. 特种油气藏, 2011, 18(1): 58–60.
- [25] 林日亿, 李魏, 李兆敏, 等. 烟气-蒸汽辅助重力泄油模拟技术[J]. 中国石油大学学报, 2012, 36(5): 136–140.
- [26] ALBAHLANI A M, BABADAGLI T. A critical review of the status of SAGD: where are we and what is next [C]//SPE Western Regional and Pacific Section AAPG Joint Meeting. USA, 2008: 22–24.
- [27] CANBOLAT S, AKIN S, KOVSCEK, et al. A study of steam assisted gravity drainage performance in the presence of noncondensable gases [C]//SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium. USA, 2002: 78–89.
- [28] LAW D H. Disposal of carbon dioxide, a greenhouse gas, for pressure maintenance in a steam-based thermal for recovery of heavy oil and bitumen [C]//SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium and Western Regional Meeting. USA, 2004: 394–406.
- [29] BAGCI A S, OLUSHOLA S, MACKAY E. Performance analysis of SAGD wind-down process with CO<sub>2</sub> injection [C]//SPE Symposium on Improved Oil Recovery. USA, 2008: 349–362.
- [30] CAROLINE H, HARALD T, LAURA S, et al. NCG behavior in SAGD-A numerical simulation analysis [C]//SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium. Canada, 2008: 718–726.
- [31] 高永荣, 郭二鹏, 沈德煌, 等. 超稠油油藏蒸汽辅助重力泄油后期注空气开采技术[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 1–7.
- [32] RAHNEMA H, BARRUFET M, MAMORA D. Experimental study of air injection in SAGD chamber [C]//SPE Canadian Unconventional Resources Conference. Canada, 2011: 1612–1620.
- [33] BELGRAVE J D M, NZEKWU B, CHHINA H S. SAGD optimization with air injection [C]//SPE Latin American & Caribbean Petroleum Engineering Conference. Argentina, 2007: 174–181.
- [34] 王连刚. 溶剂辅助蒸汽重力泄油室内试验研究[J]. 特种油气藏, 2018, 25(5): 151–155.
- [35] SOURAKI Y, ASHRAFI M, JAHANBANI A, et al. Application of solvent alternating SAGD process to improve SAGD performance in Athabasca bitumen reservoir [C]//SPE Western Regional & Pacific Section AAPG Joint Technical Conference. USA, 2013: 143–158.
- [36] 李魏. 溶剂-蒸汽辅助重力泄油(ES-SAGD)驱油机理研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013: 1–69.
- [37] 贾江涛, 施安峰, 王晓宏. 辅助溶剂对SAGD开采效率影响的数值研究[J]. 特种油气藏, 2014, 21(5): 99–102.
- [38] GUPTA S C, GITTINS S D. Christina lake solvent aided process pilot [J]. J Can Pet Technol, 2006, 45(9): 15–18.
- [39] BRYAN O. ES-SAGD; past, present and future [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. USA, 2009: 4756–4771.
- [40] CHEN Q, Gerritsen M G, Kovscek A R. Improving steam-assisted gravity drainage using mobility control foams: foam assisted-SAGD (FA-SAGD) [C]//17th SPE Improved Oil Recovery Symposium. USA, 2010: 851–868.
- [41] 任宝铭. 氮气泡沫抑制双水平井SAGD井间窜流可视化研究[J]. 中外能源, 2018, 23(11): 55–59.
- [42] 鹿腾, 李兆敏, 孙晓娜, 等. 泡沫辅助SAGD开发特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(3): 93–98.
- [43] SRIVASTAVA P, DEBORD J, SADETSKY V, et al. Laboratory evaluation of a chemical additive to increase production in steam assisted gravity drainage (SAGD) [C]//17th SPE Improved Oil Recovery Symposium. USA, 2010: 45–52.
- [44] LI R, Etminan S, CHEN Z. Chemical additives and foam to enhance SAGD performance [C]//SPE Canada Heavy Oil Technical Conference. Canada, 2015: 45–73.
- [45] LI Ran, WANG Danling, CHEN Zhangxin. Chemical additives and foam assisted SAGD model development [C]//SPE Canada Heavy Oil Technical Conference. Canada, 2017: 692–707.

### Research Progresses on Improving Steam-assisted Gravity Drainage Application for Heavy Oil Recovery

SHU Zhan, PEI Haihua, ZHANG Guicai, GE Jijiang, JIANG Ping, CAO Xu

(School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, P R of China)

**Abstract:** Steam-assisted gravity drainage (SAGD) technology is widely used in the production of ultra-heavy oil, but there are problems such as severe steam channeling and low heat utilization during the development process. By summarizing the current main technical methods to improve the development effect of SAGD, such as gas-assisted SAGD technology, solvent-assisted SAGD technology, foam-assisted SAGD technology and chemical additive-assisted SAGD technology, the mechanism of improving SAGD technology and the effect of improving recovery efficiency were introduced. The existing problems and suggestions for use were put forward. The differences between reservoir geological conditions and construction conditions should be considered comprehensively, and different auxiliary SAGD technologies should be selected to maximize the economic benefits.

**Keywords:** heavy oil; steam-assisted gravity drainage (SAGD); ultra-heavy oil reservoir; recovery; review