

油砂 SAGD 热采中后期开发特点及其 SWOT 分析

郭凯 其那尔·胡山 李治 柳波 张浩

克拉玛依市富城能源集团有限公司, 中国·新疆 克拉玛依 834000

摘要: 目前全球多数 SAGD 项目已进入中后期, 面临产油速率降幅大、油气比持续走低、井间蒸汽窜流、水平段动用不均等问题, 传统技术难以平衡开发效率与低碳要求, 且当前研究缺乏协同框架, 在低碳战略背景下亟需突破高能耗瓶颈。鉴此, 构建“储层渗流模式分类-SWOT 战略分析-技术梯度适配”的三维研究框架, 首先界定 SAGD 开发阶段, 以蒸汽腔到顶且产油速率递减超 5% 为中后期起点, 并基于隔夹层渗流屏障作用的强弱程度, 将 SAGD 井组划分为三种渗流模式; 其次总结核心开发特点, 概括了 SAGD 开发中后期产量“两降一升”、蒸汽腔扩展与能耗上升、技术接替与成本压力等突出矛盾; 最后通过 SWOT 分析明确优势、劣势、机遇与威胁, 并据此提出“技术升级-成本优化-低碳转型”三位一体战略建议, 旨在为 SAGD 中后期开发提供支撑, 推动油砂开发向高效低碳可持续转型。

关键词: SAGD 中后期; 产量递减; 蒸汽窜流; SWOT 分析; 低碳转型

Characteristics and SWOT analysis of mid to late stage development of SAGD thermal recovery in oil sands

Guo Kai, Chinar · Hushan, Li Zhi, Liu Bo, Zhang Hao

Karamay Fucheng Oil Sand Mine Resources Development Co., Ltd, China Xinjiang Karamay 834000

Abstract: Steam assisted gravity drainage (SAGD), as the mainstream technology for commercial development of oil sands, has been widely applied in the oil sands areas of Alberta, Canada and Fengcheng, Xinjiang, China. At present, most SAGD projects worldwide have entered the middle and late stages, facing problems such as a significant decrease in oil production rate, continuous decline in oil to gas ratio, cross well steam flow, and uneven utilization of horizontal sections. Traditional technologies are difficult to balance development efficiency and low-carbon requirements, and current research lacks a collaborative framework. In the context of low-carbon strategy, it is urgent to break through the bottleneck of high energy consumption. In view of this, a three-dimensional research framework is constructed. Firstly, the SAGD development stage is defined, starting from the middle and later stages with the steam chamber to the top and the oil production rate decreasing by more than 5%. Combined with the reservoir fluid model, sub stages are subdivided; Secondly, analyze the core development characteristics, including the "two reductions and one liter" of production, the contradiction between steam chamber and energy consumption, technology succession and cost pressure; Finally, through SWOT analysis, the strengths, weaknesses, opportunities, and threats are identified, and based on this, a three in one strategic proposal of "technology upgrade cost optimization low-carbon transformation" is proposed, aiming to provide support for SAGD's mid to late stage development and promote the transformation of oil sands development towards efficient, low-carbon, and sustainable development.

Keywords: SAGD mid to late stage; Production decline; Steam channeling; SWOT analysis; Low-carbon transformation

0 引言

在全球能源“低碳化、多元化”转型与能源安全的双重挑战下, 油砂资源开发备受瞩目^[1]。蒸汽辅助重力泄油(SAGD)凭借对油砂黏度的高效降黏作用及独特的重力泄油机理, 已成为商业化油砂开发的主流技术。目前加拿大油砂产量中近 50% 来自该技术, 中国新疆油田双水平井

SAGD 更是实现累产原油突破 900 万吨、生产阶段油气比 0.18 的高效开发成果。然而, 随着开发进程推进, 全球多数 SAGD 项目已进入中后期阶段。当蒸汽腔扩展至盖层边界后, 产油速率较平台期降幅最高可达 30%–50%, 由于盖层持续增大的热损失, 导致油气比进一步降低, 储层非均质性引发的蒸汽窜流^[2]、剩余油在夹层影响下呈现“孤岛

化”分布等问题愈发突出^[1]，传统的单一注蒸汽技术已难以平衡开发效率与低碳要求。

1 SAGD 热采中后期开发阶段界定

SAGD 技术的核心是通过蒸汽腔的形成与扩展来加热原油，降低其粘度，从而利用重力作用实现原油的高效开采。根据蒸汽腔的几何形状变化和生动态特征，SAGD 全生命周期可分为三个阶段：

1.1 上升阶段

蒸汽腔主要向上扩展，形成初始蒸汽腔。该阶段特点是产量稳步上升，蒸汽腔高度持续增加，但尚未触及油层顶部。Butler 模型是描述这一阶段的经典理论，此后众多学者发展该理论，假设蒸汽腔形状为倒三角形或半圆形，通过热传导、热对流、重力泄油机理实现产能和动态预测。

1.2 横向扩展阶段

当蒸汽腔到达油层顶部时，主要向水平方向扩展，形成蘑菇状蒸汽腔。该阶段的产量达到稳定峰值，油气比最大，采油速度也较大，是 SAGD 开发的黄金期，此阶段的动态特征表现为产液量稳定，含水率逐渐上升，但蒸汽腔尚未向下扩展。

1.3 垂向剥蚀阶段

随着蒸汽腔横向扩展接近井组边界，蒸汽腔开始向下扩展，导致蒸汽腔侧面逐渐下沉，泄油角逐渐变小，泄油动力显著降低。这一阶段的产量开始下降，油气比持续降低，热效率降低，开发进入递减期。该阶段的动态响应表现为含水率持续上升，井底流压波动增大。

中后期开发阶段主要包括“平台期末期”与“递减初期”两个子阶段。平台期末期蒸汽腔已扩展至油层顶部，但整体仍处于稳定泄油状态，产量波动较小，油气比维持在较高水平；递减初期蒸汽腔开始向下扩展，产量开始持续下降，油气比降低，热效率^[3]。

以上对 SAGD 中后期开发阶段进行了明确界定，但考虑储层非均质性对 SAGD 开发的显著影响，为更好的精细分析和制定应对策略，基于隔夹层渗流屏障作用的强弱程度，将 SAGD 井组划分为三种渗流模式：

A 模式（多套优质储层叠合，夹层不发育）：油层中夹层不发育或发育程度低，水平渗透率与垂直渗透率比值（ K_v/K_h ）接近 1，蒸汽腔扩展方向稳定，顶部触及盖层后仍能保持较高的热效率。这类油藏的蒸汽腔稳定性最高，适合长期高效开发。

B 模式（夹层局部发育）：油层中夹层局部发育，如在水平井段的某一部分存在夹层，导致蒸汽腔扩展方向发

生偏移，但仍能维持整体扩展。夹层的存在会降低蒸汽腔扩展效率，增加局部热损失，影响开发效果。

C 模式（夹层密集、分布广）：油层中夹层密集且分布广泛，如在水平井段多个位置存在夹层，导致蒸汽腔扩展严重受限，出现多处蒸汽窜流或剩余油滞留。这类油藏的蒸汽腔扩展效率最低，开发难度最大，经济效益最差。

2 SAGD 热采中后期核心开发特点

2.1 产量动态呈现“两降一升”特征

SAGD 进入开发中后期后，其开发动态呈现出独特的开发特征与矛盾。该阶段不仅影响油田的最终采收率，也直接关系到开发的经济效益。以下从产量动态、蒸汽腔发育与能耗、技术接替与成本控制三个方面，对中后期开发特点进行深入分析。

2.1.1 产量动态呈现“两降一升”特征，开发效益面临挑战

进入开发中后期，SAGD 井组的产量动态普遍呈现“两降一升”的典型特征，即产油速率下降、注汽效率下降，以及产液含水率上升。

产油速率显著递减是开发中后期最直接的表现。根据室内研究及矿场实践，纯 SAGD 阶段的采收率一般大于 50%，而进入中后期后，产油速率降幅可达 30%~50%。其主要原因包括蒸汽腔扩展速率减缓、热效率降低以及剩余油分布复杂化。Suncor 公司 Firebag 项目的长期生产数据表明，中后期井组需通过精细压力调控将汽油比（SOR）控制在 3.5 以下，才能维持基本的经济产量。注汽效率持续恶化是另一突出特点^[4]。总体而言，“两降一升”现象的本质是开发过程中能量接替不足与储层物性影响的共同作用结果。

2.1.2 蒸汽腔发育与能量损耗矛盾突出，储层非均质性影响加剧

中后期开发中，蒸汽腔的发育形态与热效率之间的矛盾日益突出，而储层非均质性进一步加剧了这一矛盾。

随着蒸汽腔扩展至盖层，其与上覆岩层的接触面积显著增加，导致热损失量较平台期增加 20%~30%。这不仅降低了热利用率，还可能引起盖层稳定性问题^[6]。如在加拿大 McMurray 组油砂开采中，部分项目因热损失过大导致 SOR 急剧上升，开发经济性大幅下滑。储层非均质性的影响在中后期阶段被进一步放大。A 模式多套优质储层叠合，夹层不发育，蒸汽腔扩展稳定，仍能保持较好的生产效果；B 模式夹层局部发育，蒸汽腔易偏流，影响蒸汽腔的均匀扩展，导致热效率提前降低，采收率提升受限；C

模式夹层密集、分布广，蒸汽窜流与剩余油滞留矛盾最先暴露。密集夹层严重阻碍了蒸汽腔的扩展和热量传递，导致水平段动用程度低，蒸汽腔发育缓慢，采收率提升困难。蒸汽腔发育与热损耗的矛盾本质上是热力学效率与地质条件之间相互制约的体现，要求开发过程中必须加强动态监测与实时调控。

2.1.3 技术接替与成本控制压力倍增，溶剂辅助成为关键方向

随着 SAGD 开发进入中后期，单一蒸汽驱技术的局限性逐渐显现，技术接替成为维持开发效果的必然选择。与此同时，成本控制的重要性日益凸显。

降黏改质技术可通过溶剂辅助与电加热两条路径协同降低 SAGD 中后期原油黏度。前者利用轻烃在近井区溶解胶质沥青质并在外围形成动态液封，可将采收率提高 5 - 8 个百分点、溶剂回采率 >90% 并削减碳排放 60% 以上，辽河油田应用后单井组产量升至 50 t/d、油气比优化至 0.22；后者在蒸汽腔扩展阶段以井下电加热器热裂解稠油，2 - 3 a 内使水平段动用程度由 67% 提至 100%，新疆风城现场实现油气比提升 20 倍、能耗下降 90%、单井组年节约蒸汽 3.6×10^4 t。

溶剂辅助 SAGD (SA-SAGD) 已成为中后期开发的主流技术方向。溶剂与蒸汽的协同作用可显著降低原油粘度，提高驱油效率。实验对比表明，二甲醚 (DME) 作为辅助溶剂，可使采收率提高 19.26%，累计油气比提升 0.027，溶剂回收率达到 86.6%，效果明显优于丙烷辅助。其优势在于 DME 与稠油具有良好的相容性和较低的挥发损失，能够有效扩大蒸汽腔波及范围，提高采收率^[5]。

3 SAGD 热采中后期 SWOT 战略分析及应对建议

3.1 SAGD 热采中后期 SWOT 战略分析

SAGD 热采中后期开发的优势、劣势、机会与威胁 (SWOT) 具体分析如表 1 所示。

从 SAGD 热采中后期开发的内外部条件与技术经济性出发，其 SWOT 特征呈现出鲜明的辩证关系：在内部优势层面，前期开发积累的成熟技术体系已实现高井网密度控制，蒸汽腔基础形态的稳定发育、井网控制下对储层非均质性认识使剩余油分布空间和形态形成可识别的规律，而长期现场运营（如 Suncor 公司 Firebag 项目 20 年实践中；新疆油田、辽河油田近 17 年的 SAGD 生产调控）所沉淀的动态调控经验，为中后期参数优化与风险预判提供了扎实的技术与管理基础，构成了应对开发矛盾的核心支撑。但与此同时，内部劣势亦凸显且相互叠加：SAGD 技术固有的高能耗属性在中后期因蒸汽腔与盖层接触面积扩大、热损失增加而加剧，表现为吨油 CO₂ 排放压力；储层非均质性随开发进程进一步放大，导致不同流体模式井组开发效果差异显著；加之纯 SAGD 阶段的累计油气比在中后期持续恶化，溶剂 / 化学剂注入又增加了操作复杂度与成本，共同削弱了项目的经济性。

3.2 战略应对建议

基于 SWOT 分析，针对 SAGD 中后期开发面临的油藏能量衰减、注采效率下降、碳排放压力增大等核心问题，需构建“技术升级 - 成本优化 - 低碳转型”三位一体战略体系，通过工程技术迭代、全流程成本管控与低碳模式创新的协同联动，实现开发效益与可持续性的双重提升，具体实施路径如下：

表 1 SAGD 热采中后期开发 SWOT 分析表

维度	具体内容	案例/数据
优势 (Strengths)	1.技术体系成熟，井网控制程度高 2.蒸汽腔基础形态已形成，剩余油分布相对明确 3.现场操作经验丰富，动态调控手段多样	Firebag 项目 20 年运营经验，600 余口井网实现 21.5 万桶 / 日产能
劣势 (Weaknesses)	1.能耗强度高，碳排放压力大（吨油 CO ₂ 排放量约 0.8-1.2 吨） 2.储层非均质性导致开发效果差异显著 3.溶剂 / 化学剂注入增加操作复杂度与成本	纯 SAGD 阶段 SOR 达 0.141，中后期热损失增加 30%
机会 (Opportunities)	1.溶剂辅助、电加热等接替技术突破 2.CCUS 技术与 SAGD 结合实现低碳开发 3.数字孪生技术提升实时调控精度 4.新能源大发展推动热能清洁替代	新疆油田电加热辅助技术申报 5 项发明专利，采收率提升 15% 以上；创新构建“源网荷储智”智慧能源生态新模式
威胁 (Threats)	1.国际油价波动影响项目经济性（盈亏平衡点约 60-70 美元 / 桶） 2.环保政策收紧（如碳税提升至 80-100 美元/吨） 3.替代能源对重油需求的挤压	全球主要油砂产区碳政策趋严，Suncor 项目投入 12 亿美元用于减排设施

3.2.1 技术升级：突破驱替效率与调控精度瓶颈

针对 SAGD 中后期油藏非均质性增强、剩余油难动用的问题，以“强化驱替效果、提升调控精度”为核心推进技术落地。一方面优先在 B/C 类井组应用二甲醚-蒸汽交替注入技术，搭配高能电加热装置构建“热-溶剂-电”协同驱替体系，通过二甲醚降黏、电加热补能、蒸汽扩驱的联动作用，解决蒸汽窜流难题，目标采收率有望从现有 50% 左右提升至 60% 以上。

3.2.2 成本优化：实现能耗与运维的全流程降本

聚焦 SAGD 中后期“注汽能耗高、设备运维贵”的痛点，从能耗管控与设备管理两方面推进成本优化。在能耗端，对注汽锅炉进行低氮燃烧器改造，将热效率从 80%- 提升至 95%，同时加装余热回收装置降低排烟温度，复合保温材料减少管网热损失，整体可降低年能耗成本 15%-20%。

3.2.3 低碳转型：构建碳循环与新能源协同模式

围绕碳排放管控需求，以“控排+利用”为核心打造低碳开发模式。一方面利用注汽系统烟道气的 CO₂ 捕集潜力，配套胺法捕集装置（捕集效率 ≥ 90%），将高纯度 CO₂ 作为非凝析气与蒸汽共注，既抑制蒸汽窜流、提升驱油效率，又实现碳封存，预计可减少吨油碳排放量 30%-40%；同时将多余 CO₂ 外输至化工园区作为原料，形成碳循环经济链条，增加年碳资产收益。

4 结语

(1) SAGD 中后期以蒸汽腔到顶且产油速率递减超 5% 为起点，依夹层发育分 A、B、C 三类渗流模式，此阶段呈“两降一升”特征，热损失增加、蒸汽窜流等问题凸

显，传统注蒸汽技术难平衡效率与低碳。

(2) SWOT 分析显示，SAGD 中后期有成熟井网、操作经验等优势，但高能耗、开发差异大等劣势明显；外部有溶剂辅助、CCUS 等机遇，也面临油价波动、碳税收紧等威胁，内外部矛盾需协同破解。

(3) 针对瓶颈，“技术升级-成本优化-低碳转型”战略可破局：梯度溶剂注入提升采收率，智能监测降 SOR，碳循环经济减碳 30%-40%，推动 SAGD 中后期向高效低碳转型。

参考文献：

- [1] 马小平, 冯京, 周继兵等. 新疆油砂研究进展及找矿方向[J]. 新疆地质, 2022,40(01):149-154.
- [2] 王晖, 刘振坤, 胡晓庆等. 基于 SAGD 开发的油砂储层综合评价——以加拿大长湖西南区块开发优化项目为例[J]. 中外能源, 2021,26(01):40-47.
- [3] 刘新光, 曹树春, 吴昊等. 油砂 SAGD 开发剩余油类型及挖潜方式实验研究[J]. 非常规油气, 2024,11(01):72-77.
- [4] 周志军, 张祺, 衣犀等. 鱼骨型分支井 SAGD 分支形态优化及采出程度变化规律[J]. 特种油气藏, 2024,31(01): 57-65.
- [5] 陈东明, 武凡皓. 浅层异常低压超稠油油藏 SAGD 精细调控技术[J]. 特种油气藏, 2022,29(04):F0003-F0003.

作者简介：郭凯（1982.09-），男，汉族，河南商丘，本科，工程师，研究方向：油砂油开采及销售方面的工作，2011 年 7 月毕业于中国石油大学（华东）化学工程与工艺专业。