

**项目名称：**稠油蒸汽热采后期多元复合提高采收率关键技术及应用

**申报奖项：**中国发明协会发明创业奖创新奖一等奖

**完成人：**东晓虎、刘慧卿、王敬、吕晓聪、王海涛、刘小鸿

**完成单位：**中国石油大学（北京）、中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院、中海石油（中国）有限公司天津分公司

**项目简介：**

我国的稠油资源非常丰富，至今已在 12 个盆地发现了 70 多个稠油油田，陆上稠油资源量达 43.5 亿吨，海上资源量达 21.8 亿吨。对于稠油资源，无论其中的石蜡基原油还是环烷基原油，都是国家重大工程和国防尖端装备急需的战略物质，包括高端润滑油、冷冻机油及变压器油等。蒸汽吞吐、蒸汽驱等注蒸汽开发是目前稠油的主要开发方式，现阶段国内外大部分注蒸汽开发的稠油油田均已进入后期阶段，井间窜流、指进、低效无效波及等成为制约稠油开发效果的主要因素。蒸汽热采后期的提高采收率已成为保证稠油产量的重要手段，对于保障国家能源安全，降低国家对外石油依存度具有重要意义。本项目针对注蒸汽热采后期稠油油藏出现的一系列问题，依托于国家科技重大专项、国家自然科学基金及企业重点攻关课题等 20 余项，经过多年科研攻关，在稠油热采物理模拟实验技术、热采剩余油识别技术、窜流通道识别与表征技术及多元复合提高采收率技术等方面取得突破性进展。取得主要创新成果如下：

1. 发明了系列稠油热采开发物理模拟实验装置。研发了稠油热采高温高压三维物理模拟实验装置、井筒变质量流动模拟装置及水体能量模拟方法等，确保了注入模型本体的蒸汽质量，实现了油藏能量的储存和释放及水体能量的仿真模拟，最高实验压力达到 20MPa，推动了稠油热采开发物理模拟实验技术的发展。
2. 创立了多尺度剩余油识别与定量表征技术，发明了稠油热采窜流通道精细表征技术。研发了稠油注热流体开发的高温高压大视域可视化模拟系统与基于深度学习的剩余油分布识别技术，揭示了热采井间剩余油的赋存机理，识别了热采开发的 4 类典型剩余油分布特征，揭示了多元复合开发的剩余油转化规律；建立了考虑蒸汽瞬变凝析的多级指进变化率渗流理论模型，实现了热采井间汽窜预警；创建了基于集成学习的汽窜预测技术，解决了热采后的剩余油识别与窜流通道量化表征难题。
3. 研制了耐高温低成本深度调剖的凝胶与颗粒堵剂，发展了稠油多元复合提高

采收率理论与方法。研发了耐温 250℃ 以上的低成本凝胶堵剂，提出了降粘剂+氮气+泡沫剂多元复合体系，揭示了多元复合开发的抑制汽窜机理；创建了均衡流场控制下的多元体系调驱参数设计方法，提出了稠油热采开发流场改善的评价指标，攻克了稠油热采窜流通道封堵及流场高效调控难题。

项目成果授权国家发明专利 15 件，实用新型专利 6 件，计算机软件著作权 2 项，出版学术专著 4 部，其中英文专著 1 部，发表学术论文 78 篇，其中 SCI、EI 收录 46 篇，培养硕、博士研究生 30 余名。经中国石油和化学工业联合会组织专家鉴定会，鉴定认为，该成果整体处于国际先进水平，其中热采物理模拟装置和多元复合体系处于国际领先水平。项目成果已应用于中海油渤海油田、中石化胜利油田及中石化河南油田的多个热采稠油油藏，大幅改善了蒸汽后期稠油的开发效果，累积增油量 200 余万吨，新增利润 13 亿元，经济社会效益显著。

#### 主要知识产权目录：

| 序号 | 专利名称                   | 专利号              | 附件    | 法律状况 |
|----|------------------------|------------------|-------|------|
| 1  | 多功能注蒸汽热采三维物理模拟实验装置     | ZL201410784582.7 | 专利 1  | 授权   |
| 2  | 用于稠油热采的同心双管注采水平井物理模拟装置 | ZL201811587459.0 | 专利 2  | 授权   |
| 3  | 底水油藏水体能量三维物理模拟装置及方法    | ZL201510628714.1 | 专利 3  | 授权   |
| 4  | 稠油热采水平井段沿程变质量流动模拟实验装置  | ZL201510706300.6 | 专利 4  | 授权   |
| 5  | 一种水平井注蒸汽热采可视化实验装置      | ZL201410468666.X | 专利 5  | 授权   |
| 6  | 孔隙流体初始赋存状态的获取方法及其装置    | ZL201910826085.1 | 专利 6  | 授权   |
| 7  | 优势渗流通道确定方法、装置和计算机设备    | ZL201910822326.5 | 专利 7  | 授权   |
| 8  | 一种测定二氧化碳在多孔介质中扩散系数的方法  | ZL201610269554.0 | 专利 8  | 授权   |
| 9  | 一种测定二氧化碳在原油中的扩散系数的方法   | ZL201710302190.6 | 专利 9  | 授权   |
| 10 | 非均质油藏渗透率分布反演方法及装置      | ZL201810187730.5 | 专利 10 | 授权   |