

# 电加热技术在稠油热采开发中的应用研究

刘玄诗, 汪燊雪, 朱荣升, 吴彬, 张韶田

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年3月27日; 录用日期: 2026年5月29日; 发布日期: 2026年6月15日

## 摘要

我国稠油资源丰富且普遍具有胶质含量高、原油黏度大、地下流动性差的特征, 采用传统蒸汽吞吐、蒸汽驱等热采技术开发时, 普遍存在注汽过程热损失大、能耗与碳排放高等问题, 在“双碳”战略背景下, 提倡绿色高效的稠油开发技术。本文系统调研了电加热技术在稠油热采开发中的应用研究, 阐述了油藏电加热技术的基本原理与核心特点, 分类解析了电阻加热、电磁感应加热微波加热三类技术的作用原理、性能优势与适用场景, 对比了电加热技术与传统热采技术的差异, 明确了该技术在油藏适配性、热利用效率、低碳环保等方面的突出优势。结合现场应用案例, 分析了不同电加热技术在不同类型稠油油藏中的应用差异与适配条件, 探讨了加热功率、加热温度、油藏地质条件、设备性能等关键参数对开发效果的影响规律。同时, 总结了当前电加热技术在设备要求、工程实施、应用经济性等方面的核心问题, 提出了技术优化、经济降本等针对性改进措施, 研究成果可为稠油热采电加热技术的现场应用与技术创新提供理论参考与实践支撑。

## 关键词

电加热技术, 稠油热采, 提高采收率, 电阻加热

# Research on the Application of Electric Heating Technology in Heavy Oil Thermal Recovery Development

Xuanshi Liu, Rouxue Wang, Rongsheng Zhu, Bin Wu, Shaotian Zhang

School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: March 27, 2026; accepted: May 29, 2026; published: June 15, 2026

## Abstract

My country has abundant heavy oil resources, which are generally characterized by high gum content,

文章引用: 刘玄诗, 汪燊雪, 朱荣升, 吴彬, 张韶田. 电加热技术在稠油热采开发中的应用研究[J]. 石油天然气学报, 2026, 48(2): 177-187. DOI: 10.12677/jogt.2026.482020

high crude oil viscosity, and poor underground fluidity. When using traditional thermal recovery technologies such as steam injection and steam drive, there are generally problems such as large heat loss, high energy consumption, and high carbon emissions during the steam injection process. Under the background of the “dual carbon” strategy, green and efficient heavy oil development technologies are advocated. This paper systematically investigates the application research of electric heating technology in heavy oil thermal recovery. It elucidates the basic principles and core characteristics of reservoir electric heating technology, and categorizes and analyzes the working principles, performance advantages, and applicable scenarios of three types of technologies: resistance heating, electromagnetic induction heating, and microwave heating. The differences between electric heating technology and traditional thermal recovery technologies are compared, highlighting the significant advantages of electric heating technology in reservoir adaptability, thermal utilization efficiency, and low-carbon environmental protection. Based on field application cases, the paper analyzes the application differences and adaptation conditions of different electric heating technologies in different types of heavy oil reservoirs, and explores the influence of key parameters such as heating power, heating temperature, reservoir geological conditions, and equipment performance on development results. Furthermore, it summarizes the core issues of current electric heating technology in terms of equipment requirements, engineering implementation, and application economy, and proposes targeted improvement measures such as technology optimization and cost reduction. The research results can provide theoretical reference and practical support for the field application and technological innovation of electric heating technology in heavy oil thermal recovery.

## Keywords

Electric Heating Technology, Heavy Oil Thermal Recovery, Enhanced Oil Recovery, Resistance Heating

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

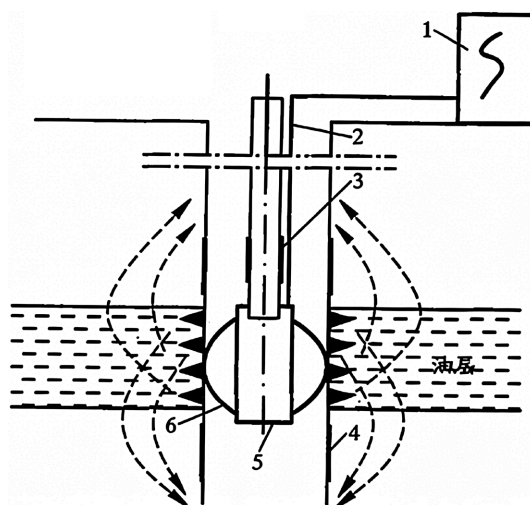
随着常规油气资源持续递减,稠油作为重要非常规油气资源,已成为保障国家能源安全的关键领域。稠油高黏度、流动性差的特征,决定了加热降黏是其开采核心逻辑。目前我国稠油开发以传统注蒸汽热采技术为主,虽已实现成熟工业化应用,但存在注汽热损失大、深层低渗油藏应用受限、高能耗高排放等突出问题。在“双碳”战略背景下,稠油低碳开发需求迫切,电加热技术凭借热效高、热损小、低碳清洁的优势,成为稠油绿色开发的重要研究方向。本文系统调研了稠油热采电加热技术的应用现状,厘清了不同技术的作用机理与适配条件,结合现场案例分析了其应用差异,总结了关键影响因素与现存问题并提出优化措施,可为我国复杂稠油油藏的低碳高效开采提供理论与实践支撑。

## 2. 电加热技术的核心原理与分类

### 2.1. 电加热技术的基本原理

电加热系统主要由电力调控装置、电力传输系统、井下电极、接地系统以及数据采集与监测系统构成[1]。油藏电加热装置的工作原理如图1所示。电力调控装置通过电缆将电流输送至井下电极,该电极安装于油管下端,油管与井下电极之间采用玻璃钢油管实现电气绝缘。电极外部装配有接触装置,其结构与套管扶正器类似,可确保电极与油层套管紧密接触,从而将电流传导至油层套管。油层套管的上下

两端均设有玻璃钢套管，以此形成电气隔离，迫使流经油层套管的电流穿过油层，越过玻璃钢套管段后，经由常规钢质套管回流至地面。当电流通过油层时，电能油层的电阻作用下转化为热能，实现对油层的加热，大幅降低原油黏度，同时部分小分子轻质原油裂解析出，改变近井地带原油的物理与化学性质，从而更易采出[2]。



1-电力调节设备；2-电缆；3-绝缘油管；4-绝缘套管；5-井下电极；6-接触器

Figure 1. Schematic diagram of the working principle of reservoir electric heating equipment [1]

图 1. 油藏电加热设备工作原理示意图[1]

储层段电加热技术具有以下四个主要特点[3]：其一，油井适用性强，可与各类油田举升技术及井下安全控制技术配套应用；其二，地面设备精简，仅需配备地面控制柜，占地面积小；其三，加热方式直接高效，加热电缆沿水平段分布，可对储层实施直接加热；其四，功率调节灵活，通过地面控制柜可实现加热功率的实时调节，最大功率可达 250 kW。

## 2.2. 稠油热采中常用电加热技术分类及特点

**电阻加热类：**主要由空心抽油杆、加热电缆、电加热抽油杆供电装置三部分组成[4]。特制加热电缆与空心抽油杆相连构成闭合回路，电缆穿设于空心抽油杆内部。当特种电缆通入中频交流电时，电缆与空心抽油杆内将产生大小相等、方向相反的交变电流，二者之间形成交变电磁场并相互耦合，进而引发显著的集肤效应与涡流效应。在此作用下，流经钢制空心抽油杆的电流以薄壁电流环形式贴近杆体内壁流动，显著增大其交流阻抗，从而实现高效产热[5]。

**电磁感应加热类：**主要基于电磁感应定律、焦耳效应以及趋肤效应。其核心过程是将电能转换为热能，通过加热储层介质，从而降低原油黏度。电磁感应加热的加热速度快、加热效率高，可达 80%~90% [2]；加热温度高，可实时调整加热功率及频率控制加热温度。并且井下加热器直接工作于油藏处，所产生的蒸汽直接注入到油藏，有效规避了地面管线输送及井筒传输过程中的热损耗，从而显著提升了热能利用率，并确保了较高的蒸汽干度[6] [7]。

**微波加热类：**加热机制主要由离子传导和偶极极化 2 部分组成[8]，2 种加热机理可以同时存在于一种介质。其中离子传导在介质离子浓度较高时占据加热主导地位，离子在外加电场作用下反复移动，分子间碰撞增加，内能升高，导致温度迅速变化[9]。与传统热采技术相比，微波加热具备加热效率高、升温速率快、选择性加热等显著优势。微波加热相比常规加热更易控制，可以瞬间开启或者关闭微波源，

还可以利用间歇性开关电源提高加热效果[10]。该技术可有效降低热能在传输过程中的损耗,提升储层整体加热效果,在提高原油产量的同时,避免能源过度消耗。

### 2.3. 电加热技术与传统热采技术的性能对比

传统热采技术如蒸汽吞吐、蒸汽驱及 SAGD 等主流技术适应于黏度低、油层厚、渗透率高、饱和度高的油藏[11],均需由地面向井筒持续注入大量蒸汽。该过程中,蒸汽在地面管线与井筒内均存在显著热量散失,且热损失随井深与输送管线长度增加而增大,地面与井筒综合热损失可达 20%以上[2],造成大量热能浪费。采用传统热采方法进行开采所需要的人力和技术水平较高,蒸汽驱油技术的采油效率也会随着时间的延长而逐渐降低,在开采后期很难达到高效采油的目的[12][13]。并且矿场中,蒸汽多由柴油作为燃料制备,其燃烧后产生的硫氧化物、氮氧化物等有毒性气体直接被排放到大气中,这将对环境造成巨大污染。蒸汽站占地面积也广,难以搬迁,利用率低[14]。

电加热技术作为稠油热采的绿色高效技术,在各方面均展现出优异性能,有效弥补了传统热采技术的短板,其设备部署灵活,不受井深、油藏类型限制,既适用于常规浅层稠油藏,也能适配中深层、低渗透、边际及海上稠油藏等传统热采技术难以开发的复杂油藏,适配性与灵活性突出。该技术摒弃传统燃煤、燃气产汽流程,将电能直接转化为热能,无需长距离蒸汽输送,且可调控加热功率匹配开采需求,避免能源过度消耗,整体能耗远低于蒸汽吞吐、SAGD 等传统工艺。并且,电加热技术实现了油层附近的集中加热,流体被加热之后直接注入地层,降低了油层上部井筒热量向地层的无效传递,提高了能量利用率[15]。

### 2.4. 电加热技术在稠油热采中的应用前提与核心要求

在技术设备要求中,电加热技术应用于稠油热采时,对配套技术装备提出了严苛的工况适应性要求,必须利用高效、稳定的电加热器设备,耐高温、高压和耐腐蚀直接影响加热效率和安全性。比如高温( $>300^{\circ}\text{C}$ )和腐蚀环境中,如  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CO}_2$  等,常规金属加热器容易氧化、硫化腐蚀或热疲劳而失效,导致加热效果逐渐减弱或加热器毁坏[16]-[18]。加热电缆、加热元件及井下传感器须具备优异的耐高温性能,以适应井筒及储层的热力学条件。

在经济与环保要求中,经济方面,电加热技术用于稠油热采,要兼顾成本与效益,具备实际应用的可行性。技术成本可分为初始成本和运营成本,经济效益可分为直接效益和间接效益[15]。该技术要能凭借较高的热效率减少电量消耗,还可借助低谷电价进一步压缩能耗成本,最终实现提升原油采收率的目标,让开采收益超过电力与设备投入。环保方面,电加热技术需符合绿色开采的相关要求,做到清洁低碳。开采过程中无需燃烧煤、天然气等化石燃料,不会产生大量二氧化碳、硫化物等污染物,能有效降低碳排放,顺应当前能源领域内由“碳经济”向“低碳经济”跨越的节能现状[19]。

## 3. 电加热技术在稠油热采中的具体应用研究

### 3.1. 不同电加热技术的现场应用

#### 3.1.1. 电阻加热技术

该技术以井下电加热器、井口悬挂密封装置、供电控制系统为核心,辅助监测设备为补充的配套体系,各设备参数均适配稠油热采井下工况。井下电加热器为连续管状密闭结构,外部设护套,内部集成耐高温加热丝、电缆芯及绝缘材料,耐温达  $700^{\circ}\text{C}$ ,单位长度功率最高  $7\text{ kW/m}$ ,满足油层集中加热需求;井口悬挂密封装置采用复合材料多级并联密封,配备三级独立密封系统及实时监测点,保障作业安全;供电控制系统可实现功率自动调节,提升加热智能化水平;辅助设备实现井下温压等参数全方位监测,

为功率调节及安全管控提供数据支撑。如图 2 所示。

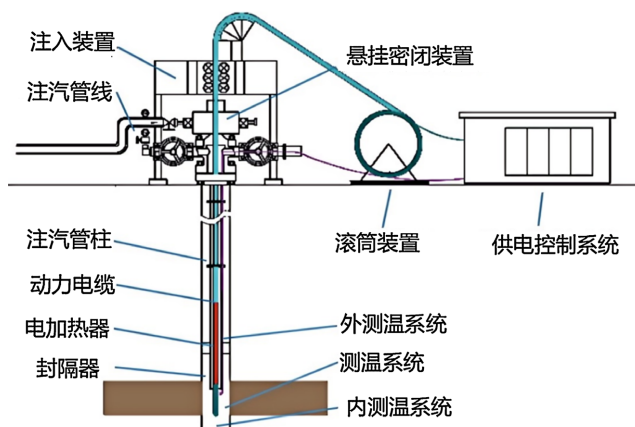


Figure 2. Principle of downhole electric heating technology to improve steam dryness [15]

图 2. 井下电加热提升蒸汽干度技术原理[15]

该技术在辽河油田开展了多轮次现场试验与应用。从蒸汽干度验证到扩大试验再到专项区块试验，层层验证了其提升蒸汽干度、增产增油的技术有效性。其中千 12 块的试验井在开井后最高日增产 5.0 t/d，阶段累计增油 353.1 t，生产周期超 450 d [15]，实现高效开发。

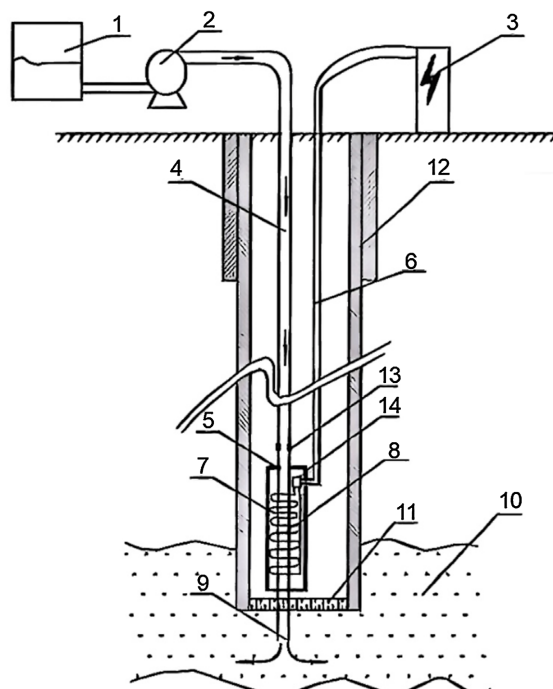
### 3.1.2. 空心杆、油管电加热技术

空心杆电加热与油管电加热技术虽核心应用场景一致，但加热原理存在显著差异，也因此形成了不同的应用优势与局限性，现场应用效果各有侧重：空心杆电加热技术的现场应用优势集中体现在工艺、能效及效益三方面：一是工艺性能优异，作业难度低。同时，可有效解决高含蜡井结蜡卡井问题，显著延长洗井周期，大庆油田采油七厂 7 口试验井应用后，两年内均未开展热洗工序[20]；二是能源利用效率高，电加热能量通过杆柱直接传导至管内原油，理论上可实现全部热量[21]，原油出井温度高；三是增产增效优势突出，既减少了传统热洗导致的压产、扣产，又通过降低原油黏度提升流动性，有效释放单井产能。此外，该技术拓展应用效果突出，渤海某电潜泵井应用后投入产出比达 1:8 [22]，三塘湖油田 5 口典型井应用后正常运行 1766 d，成功恢复长停井生产且无井筒堵塞现象[4]。

油管电加热技术的核心优势体现在兼容性、可靠性及长期经济性上：一是无需改变油井原有采油工艺，便于现场管理[23]，可实现原油入泵前的精准加热，有效解决油管壁及抽油杆结蜡问题，降低抽油机负荷[24]；二是配套系统完善，采用三相平衡供电解决电网不平衡问题且无环境污染，变频控制柜可实现功率连续无极调节，同时配备过流、短路等多重保护，运行可靠性高[25]；三是与电潜泵配套使用时，可提升泵效并降低机组能耗约 5% [26]。从经济性来看，牛心坨区块 10 项指标对比显示，该技术对比空心杆电加热技术在价格、油井负荷、电机耗电、井下杆柱及维护费用 5 项指标上占优[21]，可有效提升稠油井生产时率，适用范围广且推广价值高[27]。

### 3.1.3. 电磁感应加热技术

电磁感应加热技术应用工艺基于地面配套系统与井下核心装置协同运行设计，适配油田现有井筒作业体系，核心分为井下电磁感应加热蒸汽发生工艺与射频电磁辐射储层加热工艺，均可实现电能向热能的井下直接转换，大幅降低热量传输损耗[7]。电磁感应加热蒸汽系统由地面与井下两部分组成，地面部分含水箱、水泵、中频感应电源，井下部分主要为变压器及适配井筒的圆柱形井下电磁感应加热器。如图 3 所示。



1-水箱 2-水泵 3-电源 4-连续油管 5-保护壳 6-供电电缆 7-感应加热线圈  
8-发热元件 9-蒸汽出口 10-油层 11-分离器 12-井筒 13-转接头 14-变压器

Figure 3. Schematic diagram of downhole electromagnetic induction heating [7]

图 3. 井下电磁感应加热示意图[7]

电磁感应加热技术突破传统热采技术局限，无需依赖传热流体，通过内部瞬时加热实现储层升温，适配性优于电阻加热技术[28]，可应用于多种稠油油藏。其适用油藏类型主要包括：一是复杂地质条件稠油油藏，涵盖深层、低渗透率、非均质稠油油藏及高页岩含量砂岩、碳酸盐岩油藏与油页岩储层[29]，可解决传统蒸汽热采波及体积小的问题，实现局部精准加热[7][30]；二是开发初期含水率 < 30%的稠油/沥青储层[29]，该类储层原生水含量低，电阻加热效果不佳，而电磁加热通过介质介电吸收实现高效热能转换；三是海上稠油油藏，由于海上平台空间有限，设备布置和安装困难[31]。电磁感应加热器体积小、重量轻，适配海上作业空间要求[7]，但常规设备电源稳定性要求高、需双电缆供电，限制了规模化推广[2][32]。

电磁感应加热技术自 1956 年加拿大相关专利提出后，经数十年研发试验，在稠油降黏、储层加热、区块增产及绿色开发等方面取得显著成效。2011 年加拿大将 ESEIEH 技术应用于超稠油开发[33][34]，采用双水平井与射频天线加热，结合溶剂稀释稠油，相较于 SAGD 技术碳排放降低 50%以上[2]。该技术还具备诸多附加优势，射频电磁加热过程中，井筒内的电磁能量损失可有效防止石蜡沉积，同时提高井筒内原油流动性，实现储层加热与井筒降黏双重效果[29]；井下电磁感应加热以电能为唯一能源，无有害气体排放，热能利用率高，可适配风电、太阳能供电，契合绿色开发要求，同时能提升原油采收率，是稠油热采的重要发展方向[7]。

### 3.2. 电加热技术在不同类型稠油藏中的应用差异

稠油藏在埋藏深度、储层物性及开发环境等方面存在显著差异，电加热技术需结合具体油藏特征进行工艺适配与参数优化，因此其在应用形式、技术重点及开发效果上呈现出明显区别[30][35]。

浅层稠油藏因埋藏较浅，井筒热损失较小，成为电加热技术应用最成熟的油藏类型，该类油藏中电加热以电阻加热为主，主要用于解决井筒举升降黏及 SAGD 启动预热问题[36]。由于井浅，电缆传输损

耗较低,井下设备维护难度也相对较小。其中,电加热辅助 SAGD 技术在浅层超稠油藏中应用效果突出,通过井下电加热器可快速建立注采井间热连通,有效缩短 SAGD 启动周期,减少预注蒸汽用量[37]。但浅层油藏地层压力较低, SAGD 电预热过程中蒸汽腔操作压力远低于中深层油藏,单位质量蒸汽的比容与热焓受蒸汽干度影响更为显著[36],进而影响油藏产量,所以需控制注汽干度以保障加热效果。

深层/特深层稠油藏具有井筒长、地层压力高的特点,导致蒸汽传输过程中热损失大、干度衰减快,因此电加热提升蒸汽干度技术成为该类油藏的核心应用方向[15]。其应用重点主要体现在三方面:一是采用一级自动、两级手动的三级密封系统,配套耐高温 350℃ 以上的石墨复合密封材料,实现高温高压工况下的长期密封;二是将加热器布置于预定深度,通过提高加热功率减缓井筒压力下降,进而提升蒸汽干度;三是采用近油层集中加热模式,减少上部井筒的热散失。辽河油田现场应用验证表明,该技术在不同注汽排量下可使蒸汽干度平均提升 8%,单井最高日增产 6.6 t,单井平均阶段增产油量达 150 t 以上[15],开发效果显著。

低渗稠油藏渗流阻力大、蒸汽波及范围小,薄层稠油藏则存在蒸汽腔扩展受限的问题,常规 SAGD 技术难以实现高效开发,因此电加热技术需通过适配性改造与多技术联用实现突破[35]。适配性改造主要包括两方面:一是优化加热器部署[35],将其精确置于薄油层段,减少无效热损失;二是采用高功率集中加热器,保障油层均匀升温。技术联用方面,射频加热与溶剂萃取联用可使采收率达到 50%~80% [30];电加热与 CO<sub>2</sub> 辅助 SAGD 联用则能显著提升水平段动用程度及最终采收率,为该类稠油藏高效开发提供了新路径[38]。

海上稠油藏开发受平台空间、供电条件、环保要求及成本控制等因素约束显著,电加热技术凭借设备紧凑、热效率高、低碳清洁的优势,展现出巨大应用潜力,但同时也面临多重挑战[39][40]。应用潜力主要体现在:设备占地面积小,适配海上平台有限空间;渤海典型井应用表明,其较冷采增油 46%,产能提升 2~4 倍[39];可与绿电耦合,契合海上低碳开发需求。面临的突出挑战包括:大位移井开发成本较高,需至少满足冷采单井累产油  $3 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4 \text{ m}^3$  的经济门槛[39];加热温度需控制在 150℃~250℃ 的结焦温度以下[39],且加热功率受电缆额定值限制,参数调控约束严格;海上设备的防腐、密封及运维成本较高,制约了电加热技术的规模化推广[40]。

### 3.3. 电加热技术应用的关键参数与影响因素

加热功率、温度、注汽压力、蒸汽流量作为电加热技术的核心参数,其调控合理性直接决定能量利用效率,需与油藏条件及开发阶段精准适配[15][41]。加热功率是影响预热速度与蒸汽腔形成的关键,与蒸汽干度、井底压力呈正相关,功率越大,井筒压力下降越缓、蒸汽干度越高[15],但功率过高易造成设备局部过热损坏,过低则无法达到预期热采效果,需结合注汽速度、井深及油层吸热能力优化匹配。温度直接决定原油降黏效果,需同时满足低于原油 150℃~250℃ 的低温氧化结焦温度及电缆耐热温度的双重约束[39],具体参数需结合油藏条件与开发阶段调整[35];不同电加热技术温度上限差异显著,电磁加热约为 250℃,微波加热可将烃类加热至 300℃~400℃ [30]。注汽压力作为稠油热采核心工艺参数,其合理取值直接影响蒸汽波及范围、热效率及最终采收率,需综合考量地层自身压力、井筒沿程摩擦损失、重力效应及热量损耗等因素确定[41]。蒸汽流量优化需兼顾多重因素,过量易引发蒸汽窜流,不足则限制加热范围。其取值与油层渗透率、孔隙度、厚度及原油黏度密切相关,高渗透高孔隙度油层注汽量可适度降低,低渗透低孔隙度及高黏度原油油层需提高注汽量以保障蒸汽有效渗流与降黏效果,最终需依据油田自身特性精准确定[41]。

油藏地质条件是电加热技术应用的基础,渗透率、油层厚度、含油饱和度等参数决定技术适配性与经济边界[37][39]。渗透率主要影响油层蒸汽流动阻力与传播速度[40],而对电预热实现储层均匀升温的

效果受渗透率的影响程度较低[37] [38]。同时通过开展的渗透率对稠油电加热开采效果的量化研究表明,渗透率变化对累产油的影响整体较小,当渗透率  $\geq 2000$  mD 时,累产油基本保持稳定[39];厚层油藏热损失率较低,电加热效率更高;薄层油藏热量易向上下围岩散失[15],需采用油层附近集中加热模式;在相同加热热量条件下,储层含油饱和度越低,升温速率越慢,因低含油饱和度油藏含水饱和度更高,需投入更大加热功率才能实现有效升温,进而导致加热过程的累计能耗显著增加[37]。

设备的密封性能、功率调节能力、监测精度等,直接决定电加热技术应用的安全性与稳定性[15] [40]。因电加热器需穿过井口自上而下安装在注汽管柱内,所以绝缘密封是技术关键[15],一旦密封失效,导致短路或击穿,将迫使系统停运;为适应用电来源、降低运行费用,设备支持定功率或变功率运行,可根据用电来源与开发需求灵活调整,实现蒸汽干度提升与能耗优化[15];内、外部测温与测压系统的精密度直接影响参数调控效果[15],通过实时采集井筒与储层温压数据,为功率调节与安全管控提供依据,避免因参数失控影响开采效果。

#### 4. 电加热技术在稠油热采应用中的问题与优化措施

稠油热采中的电加热技术作为一种重要的提高采收率方法,近年来取得了显著进展,但其在技术、经济、工程和环境层面仍面临诸多挑战。针对这些问题,科研人员和工程师正在积极探索和实施一系列优化措施,以提升其应用效果和可持续性[42]-[44]。

##### 4.1. 现存主要问题

在技术层面中,电加热技术的核心在于将电能转化为热能,以降低稠油黏度,提高其流动性[42] [43]。然而,现有的电加热系统在加热效果、设备可靠性及技术适配性方面存在明显不足。在实际应用中,特别是在页岩油开采过程中,由于油页岩导热系数低,电加热器需要额外的设备来提高传热效率[45]。因焦耳热是电流流经电阻时将电能转化为热能的不可避免的过程。Jamaloe [46]等人通过其原理和实验分析指出低频加热(LFH)的两个问题:其一在 LFH 中,主导机制为电阻式(欧姆或传导式)加热,所以当储层中的水被过度加热并大量转化为蒸汽时,LFH 的加热效率将明显下降。其二 LFH 在存在裂缝、非均质性以及部分饱和(例如已有部分原油被采出)的介质中亦难以有效穿透,表现出明显局限性。

Narayanan D [47]等人通过研究指出井下电加热器的金属外壳在高温高压环境下易发生绝缘老化、金属蠕变的问题,并在  $H_2S/CO_2$  共存的腐蚀性环境中面临局部腐蚀如点蚀问题。此外,电热催化反应中电场和热场的共存使得现象和效应远比单一电场或热场复杂,对催化剂的设计和作用机制的理解仍不充分,Wang W [48]等人表示电子协同催化机制的研究仍处于初期阶段,离工业应用还很遥远。

在经济层面中,电加热技术的经济性是制约其大规模推广应用的关键因素[49]。单井电加热系统的初始投资成本通常较高。Shang [43]等人研究发现,在电磁加热工艺中,成本取决于加热油藏所采用的功率。并且给出了依据使用频率进行的电磁加热工艺成本估算如表 1。

**Table 1.** Estimated heating costs for electromagnetic heating [43]

**表 1.** 电磁加热成本估算[43]

电磁加热技术类型	频率范围	百万欧元/兆瓦
电阻加热	60 Hz	<0.1
感应加热	<300 kHz	<1
感应加热	0.3~300 MHz	5~10
微波加热	>300 MHz	>10

在工程层面中,电加热技术在工程实施过程中也面临多项挑战。电加热设备的安装和下入工艺较为复杂,尤其是在水平井中。需要利用精密的井筒-储层热耦合模拟来预测和优化加热效率[50]。加上离岸稠油井筒的电加热研究相对较少,其特殊环境(如海洋条件)带来额外的施工难度和维护成本[43]。

## 4.2. 针对性优化措施

### 4.2.1. 技术优化

技术优化是提高电加热效率和设备可靠性的关键。在技术优化方面,主要应解决的是电加热效率及其在复杂油藏环境中的热量分布控制的问题。首先 Jamaloe [46]等人通过实验、数值和试点研究,发现电磁加热效果的提升,需要面临三项储层物性优化措施——实部介电常数、降低虚部介电常数以及增强导热系数的问题。其次,Zhang J [51]等人提出,电加热还可以与溶剂辅助 SAGD(EH-SAGD)及膨胀溶剂-蒸汽辅助重力泄油(EH-SAGD-ES)等方法结合,解决高黏度和储层深度增加带来的热损失问题,以及单一溶剂辅助在非均质储层中效果受限的问题。最后为了解决热量分布控制问题,需要开发更精细的温度场预测模型与控制策略。例如,基于能量守恒方程和传热理论,Yuan H 等人已建立了电加热海上稠油井筒稳态温度场的数学模型,用于分析海上稠油井筒的电加热温度场[43] [52]。

### 4.2.2. 经济优化

经济优化是实现电加热技术可持续发展的关键。经济优化有两个方面,其一优化井网布局提升单井效益。Tian C [50]等人通过将井筒管流与油藏渗流进行创新的系统耦合,建立了一个新的油藏加热效率评估模型。然后通过敏感性分析进一步揭示了渗透率、原油黏度、产液量、含水率和加热持续时间等机制对加热效率的影响。我们可以根据其模型结合储层特征和油藏地质条件,优化电加热井的布局 and 数量,最大化单井产量和采收率,从而提高整体经济效益。

其二推广绿电供电降低运行成本,利用可再生能源,如 Cao X [53]等人提出太阳能加热原油管道,可以显著节约电力消耗,而且当输送距离超过 20 公里时,所提出的输送系统可在一年内收回成本,具有良好的经济效益。

## 5. 总结与展望

### 5.1. 研究电加热技术对稠油油田开发的用途

研究电加热技术在稠油油田开采中的应用在提高石油采收率方面具有显著的应用价值。具体表现在通过对油管、抽油杆加热,降低井筒内原油的黏度,可以更好地将原油开采出来;辅助传统热采工艺,可以提升开发效果与经济性;实现稠油绿色低碳开发,满足行业转型需求;通过将传统热采工艺与电加热技术对比,可以明确传统热采技术在某些稠油油藏中应用受限,而电加热技术设备却可以部署灵活,不受限制。

### 5.2. 对于电加热技术未来有待解决的问题

未来研究在稠油热开采技术中可从以下几个方面深入:一是未来可结合风电、光伏等可再生能源的应用,构建全链条低碳开发模式,进一步提升能量利用效率与开采效益。二是通过对耐高温、高压材料的研究来解决长期井下作业的设备可靠性与使用寿命问题。三是将电加热技术与溶剂萃取、CO<sub>2</sub> 驱等技术的结合,进一步发展稠油开采技术,提高原油采收率。

## 基金项目

国家级大学生科技创新训练计划项目,项目号:202511551003。

## 参考文献

- [1] 李松林, 王东辉, 陈亚平. 油藏电加热技术的设备原理及特性[J]. 石油机械, 2004(1): 11-12+59-60.
- [2] 游红娟, 陈森, 苏日古, 等. 稠油油藏井下电加热技术现状及发展方向[J]. 焊管, 2025, 48(9): 1-8.
- [3] 邢海翔. 储层段电加热技术的研究与应用[J]. 石化技术, 2025, 32(1): 237-239.
- [4] 张朋举, 项红军, 张佩玉, 等. 空心抽油杆电加热采油技术在三塘湖油田的应用[J]. 钻采工艺, 2020, 43(3): 114-116.
- [5] 肖勇. 稠油井电加热联锁节能控制装置的设计与开发[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
- [6] 满永奎, 郑栋, 王博, 等. 涡流损耗在石油加热方面的研究及应用[J]. 控制工程, 2009, 16(S4): 106-108.
- [7] 谢小辉. 井下电磁感应加热器理论分析及实验研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- [8] 罗万江, 兰新哲, 宋永辉. 微波加热技术及其热解油页岩的研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(21): 109-114.
- [9] 孙志刚, 王玉斗, 杨天方. 微波加热技术在页岩气开采中的应用研究综述[J]. 世界石油工业, 2024, 31(2): 65-73.
- [10] 牟群英, 李贤军. 微波加热技术的应用与研究进展[J]. 物理, 2004, 33(6): 438-442.
- [11] 叶翠, 江厚顺, 幸明刚. 稠油热采技术研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2012, 9(7): 99-101+7.
- [12] 杨智利. 稠油油藏热力采油技术探究[J]. 石化技术, 2019, 26(3): 200.
- [13] 王大为, 周耐强, 牟凯. 稠油热采技术现状及发展趋势[J]. 西部探矿工程, 2008(12): 129-131.
- [14] 蒋生健. 热力采油湿蒸汽发生器及附属设备[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- [15] 张福兴, 赵超, 刘福顺, 等. 稠油油藏井下电加热提升蒸汽干度提高采收率技术[J]. 石油钻探技术, 2025, 53(5): 137-142.
- [16] 卢迎波, 胡鹏程, 申婷婷, 等. 电加热辅助蒸汽吞吐提高水平井水平段动用程度的技术[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(2): 167-174.
- [17] 杨浩哲, 杨果, 周晓义, 等. SAGD 中后期多介质强化提高开发效果技术[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(4): 123-129.
- [18] Anderson, M.T., Kennedy, D.B. (2025) SAGD Startup: Leaving the Heat in the Reservoir. *The SPE Heavy Oil Conference Canada*, Calgary, June 2012, SPE-157918-MS.
- [19] 余子洋. 基于电加热器材料特性的井筒原位溶剂汽化研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 华东交通大学, 2025.
- [20] 尹丹, 罗日蕾. 空心抽油杆杆式电加热技术在高含蜡井的应用[J]. 石油石化节能, 2022, 12(7): 33-36.
- [21] 孙伟. 油管电加热技术在牛心坨区块的应用[J]. 化工管理, 2019(12): 125.
- [22] 方涛, 刘义刚, 白建华, 等. 海上电潜泵井空心杆电加热工艺技术研究[J]. 中国海上油气, 2023, 35(2): 163-167.
- [23] 周洪亮. 油管电加热技术优化研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2013, 32(2): 154-158.
- [24] 林星. 井筒电加热装置的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013, 33(11): 215.
- [25] 吴桐. 采油油管电加热技术在高凝油开采中的应用研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013, 33(23): 119.
- [26] 李伟超, 刘平, 于继飞, 等. 渤海稠油油田井筒电加热技术可行性分析[J]. 断块油气田, 2012, 19(4): 513-516.
- [27] 韩增军. 油管电加热技术合理工作参数确定方法[J]. 化学工程与装备, 2019(8): 136-137.
- [28] 刘涛, 李欣欣. 电法热采技术的储层功率损耗分析[C]//中国电子学会. 第二十届全国微波能应用学术会议论文集. 北京, 2023: 186-193.
- [29] Davletbaev, A., Kovaleva, L., Babadagli, T., et al. (2026) Heavy Oil and Bitumen Recovery Using Radiofrequency Electromagnetic Irradiation and Electrical Heating: Theoretical Analysis and Field Scale Observations. *The Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference*, Calgary, October 2010, SPE-136611-MS.
- [30] Hasibuan, M.Y., Regina, S., Wahyu, R., et al. (2020) Electrical Heating for Heavy Oil: Past, Current, and Future Prospect.
- [31] 孔祥征. 海上稠油采油工艺配套技术分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(20): 134-136.
- [32] Chandra, S., Winarto, H. and Rachmat, S. (2019) Mathematical Model to Predict Unsteady-State Heat Transfer Mechanism and Economic Feasibility in Nanoparticle-Assisted Electromagnetic Heating Stimulation Technique for Bituminous Extra-Heavy Oil Reservoir. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 9, 1255-1261. <https://doi.org/10.1007/s13202-018-0570-0>
- [33] Sadeghi, A., Hassanzadeh, H. and Boustani, A. (2021) The Significance of Operating Parameters on Electromagnetic-

- Solvent Bitumen Recovery Process. *Fuel*, **304**, Article ID: 121373. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121373>
- [34] Sadeghi, A., Hassanzadeh, H., Harding, T.G., MacFarlane, B., Bashti, S. and Haghghat, P. (2020) Numerical Modeling of Electromagnetic-Based Thermal Recovery Techniques Combined with Solvent Injection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **151**, Article ID: 119393. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119393>
- [35] 廖广志, 李秀峦, 王正茂, 等. 超稠油 SAGD/VHSD 高效开发创新技术与发展趋势[J]. 石油科技论坛, 2022, 41(3): 26-34+93.
- [36] 丁超, 杨兆臣, 吴永彬, 等. SAGD 蒸汽腔扩展阶段电加热机理及操作参数优化[J]. 特种油气藏, 2022, 29(3): 124-130.
- [37] 桑林翔, 王立龙, 吴永彬, 等. SAGD 电加热启动技术油藏适应性研究[J]. 特种油气藏, 2020, 27(3): 109-114.
- [38] 王超. 超稠油油藏电加热与 CO<sub>2</sub> 辅助 SAGD 实验和机理研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- [39] 罗珊, 于晓涛, 桑丹, 等. 渤海油田普 2b 类稠油地层电加热技术适应性研究[J]. 非常规油气, 2023, 10(4): 109-116.
- [40] 王鹏, 左鸿杰. 海上稠油油田电加热开采技术研究[C]//中国智慧工程研究会. 2024 工程技术应用与施工管理交流会议论文集(下). 北京: 中海石油(中国)有限公司蓬勃作业公司, 2024: 32-33.
- [41] 唐祎俊. 稠油热采井下电热蒸汽发生技术研究[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2025.
- [42] Sivakumar, P., Krishna, S., S., H. and Vij, R.K. (2020) Electromagnetic Heating, an Eco-Friendly Method to Enhance Heavy Oil Production: A Review of Recent Advancements. *Environmental Technology & Innovation*, **20**, Article ID: 101100. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101100>
- [43] Shang, S., Gao, K., Zhang, X., Zhao, Q., Chen, G., Tao, L., et al. (2024) Research on the Temperature Distribution in Electrically Heated Offshore Heavy Oil Wellbores. *Energies*, **17**, Article No. 995. <https://doi.org/10.3390/en17050995>
- [44] Yang, Y., Liu, W., Yu, J., Liu, C., Cao, Y., Sun, M., et al. (2024) Technology Progress in High-Frequency Electromagnetic *In Situ* Thermal Recovery of Heavy Oil and Its Prospects in Low-Carbon Situations. *Energies*, **17**, Article No. 4715. <https://doi.org/10.3390/en17184715>
- [45] Xu, G., Lan, X., Zhao, S., Hu, K., Qi, S., Geng, L., et al. (2023) Thermal Conductive Proppant with Self-Suspension Ability. *Petroleum Science*, **20**, 1742-1749. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.11.022>
- [46] Yadali Jamaloei, B. (2022) Electromagnetic Heating for Heavy-Oil and Bitumen Recovery: Experimental, Numerical, and Pilot Studies. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, **25**, 433-454. <https://doi.org/10.2118/209194-pa>
- [47] Narayanan, D., Martinez, A., Martin, U., Mansoor, B., Case, R. and Castaneda, H. (2024) Localized Corrosion in Selective Laser Melted SS316L in CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S Brines at Elevated Temperatures. *NPJ Materials Degradation*, **8**, Article No. 50. <https://doi.org/10.1038/s41529-024-00468-4>
- [48] Wang, W., Zhao, S., Tang, X., Chen, C. and Yi, H. (2023) Electrothermal Catalysis for Heterogeneous Reaction: Mechanisms and Design Strategies. *Chemical Engineering Journal*, **455**, Article ID: 140272. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140272>
- [49] Wang, Z., Yang, F., Fu, D., Ma, L., Duan, Z., Wang, Q., et al. (2023) Economic and Heating Efficiency Analysis of Double-Shell Downhole Electric Heater for Tar-Rich Coal *In-Situ* Conversion. *Case Studies in Thermal Engineering*, **41**, Article ID: 102596. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102596>
- [50] Tian, C., Wang, G., Geng, Z., Du, C., Yao, J. and Zhang, G. (2026) Investigation of Downhole Electric Heating Efficiency in Horizontal Wells for Offshore Heavy Oil Reservoirs: A Wellbore-Reservoir Thermal Coupling Approach. *ACS Omega*, **11**, 8734-8747. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c12347>
- [51] Zhang, J., Wu, Y., Wang, C., Liu, P., Xi, C., Zhao, F., et al. (2025) Experimental Investigations on Enhanced Oil Recovery by Electrical Heating Synergistic Expanding Solvent-Steam-Assisted Gravity Drainage in Ultraheavy Oil Reservoirs. *SPE Journal*, **30**, 4353-4368. <https://doi.org/10.2118/226218-pa>
- [52] Yuan, H., Gao, Y., Wei, J., Xu, N., Li, J. and Chen, H. (2023) Study on Temperature Field of Deep-Water Heavy Oil Wellbore by Electric Heating. In: *International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences*, Springer International Publishing, 783-795. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-42515-8\\_55](https://doi.org/10.1007/978-3-031-42515-8_55)
- [53] Cao, X., Deng, Z. and Nian, Y. (2024) Evaluation of Annual Performances of Crude Oil Pipeline Transportation by Solar Heating. *Applied Thermal Engineering*, **245**, Article ID: 122846. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122846>