

稠油井热洗清蜡机理与温度场动态分布研究

靳 伟

玉门油田分公司 甘肃酒泉

【摘要】目的 针对稠油井热洗清蜡效率受限问题，研究热洗过程中的温度场分布特征及其对蜡层去除效果的影响机制。**方法** 构建考虑油管、蜡层等多层结构的二维非稳态温度场物理模型，基于有限体积法进行数值仿真，分析不同注热参数对温度传播规律的影响。**结果** 注热温度、流速与持续时间共同决定温度波前推进速率与清蜡有效区长度。温度 $\geq$ 蜡熔点的区域面积与蜡层去除率显著正相关，存在明显的参数临界区间。**结论** 建立了热洗清蜡机理与温度场分布之间的耦合关系，明确了热穿透深度与清蜡效率的映射规律，可为热洗工艺优化提供理论支持与仿真依据。

【关键词】 稠油井；热洗清蜡；温度场；数值模拟；传热机理

【收稿日期】 2025 年 8 月 18 日 **【出刊日期】** 2025 年 9 月 16 日 **【DOI】** 10.12208/j.pngc.20250001

Study on thermal washing wax removal mechanism and dynamic temperature field distribution in heavy oil wells

Wei Jin

Yumen Oilfield Branch, Jiuquan, Gansu

【Abstract】Objective To address the limited efficiency of thermal washing in heavy oil wells by investigating the temperature field distribution and its impact on wax removal. **Methods** A 2D transient thermal model considering tubing and wax layers was developed. Numerical simulations based on the finite volume method were conducted to analyze the influence of injection parameters on heat transfer. **Results** Injection temperature, flow rate, and duration jointly affect the thermal front propagation and effective wax removal zone. The area where temperature exceeds wax melting point is positively correlated with wax removal rate, with a critical parameter range identified. **Conclusion** The coupling between thermal washing mechanism and temperature field was established, clarifying the mapping between heat penetration depth and wax removal efficiency, providing a theoretical and simulation basis for process optimization.

【Keywords】 Heavy oil well; Thermal washing; Temperature field; Numerical simulation; Heat transfer mechanism

1 引言 (Introduction)

稠油井在开采过程中由于原油粘度大、蜡含量高，极易在井筒内产生结蜡现象，导致管柱堵塞、产能下降，严重时甚至引发停井等问题。热洗清蜡作为当前最常用且经济可行的措施，主要依赖热水或蒸汽注入以提高井筒温度，使蜡层软化、熔化并脱离井壁。然而，实际生产中热洗作业常存在清蜡不彻底、热效率低和热量传递不均等问题，根源在于

对热洗过程中蜡层响应机制及温度场演化规律认知不足。当前关于清蜡工艺多聚焦于作业参数优化，缺乏对其机理层面的深入研究，尤其缺乏温度场动态变化与清蜡效果之间的耦合分析。因此，本文拟从热洗传热机理出发，建立井筒温度场动态模型，结合仿真分析与工程数据验证，揭示温度场演化对热洗清蜡过程的影响，为清蜡工艺优化提供理论支持和工程指导。

作者简介：靳伟（1982-）男，汉族，甘肃酒泉，本科，助理工程师，从事石油工程。

2 稠油井结蜡与热洗清蜡机理分析(Mechanism Analysis)

2.1 稠油井结蜡形成机制

稠油井开采过程中,井筒环境温度和压力沿深度梯度显著降低,原油在升井过程中经历复杂的相态变化。稠油中含有大量长链正构烷烃(主要为C18-C36),这类组分在温度低于析蜡点(WAT)时开始从均相液体中析出,形成蜡晶颗粒并发生聚集。结蜡现象属于不可逆热力学相分离过程,析出速率和成核行为与局部冷却速率、流体扰动强度、压力变化速率密切相关^[1]。蜡晶初期以分散状态悬浮于油中,但随温度继续下降,蜡晶间作用力增强,形成三维网络状结构并吸附于油管内壁,逐步构成具有黏附性和强度的固体蜡层。

蜡层的生长过程受控于多个因素:温度梯度决定了析蜡区的位置和厚度,流体雷诺数决定了蜡晶在壁面附近的滞留概率,原油中芳香族含量影响蜡晶再沉积速率,而管壁粗糙度则会诱导蜡层初始成核点。一般而言,井口与近地面井段温降最快,是蜡层富集的重点区域。蜡层导热系数极低(约 $0.2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$),比钢管小两个数量级,导致井筒局部热通量受限,形成“热屏障”,严重影响后续热洗效率。此外,蜡层越厚,其对热传递的阻抗越大,形成负反馈效应。因此,在稠油井热洗工艺优化前,必须充分理解蜡层生长的时空分布特性与热物理约束机制,才能从根源上制定合理的清蜡策略。

2.2 热洗清蜡作用原理

热洗清蜡的基本原理是借助高温流体介质在井筒内部形成稳定的温度场,通过热量传递改变蜡层的结构状态,实现其熔化、软化或流化并最终脱落。热洗液通常为饱和蒸汽或高温热水,在压力控制下以一定流速注入油管。热洗过程中,热液沿轴向流动,与内壁发生对流换热,并形成局部温度梯度。热量首先传导至油管金属壁,再向外穿越蜡层直至环空区域。该过程主要由两个传热机制控制:一是热洗液与油管内壁之间的对流换热,二是多层固体结构中的径向热导^[2]。

蜡层的相变过程受温度控制显著,蜡晶熔化开始温度约为 $45-60^\circ\text{C}$,完全熔解则需超过 $70-90^\circ\text{C}$ 。熔化路径表现为从外层逐渐向内层推进,其受热响应分为四阶段:升温期、软化期、熔融期与脱附剥离期。当局部温度仅达初熔点,蜡层仅软化或

表层液化,易造成残蜡附着;只有在持续高温($\geq$ 蜡熔点)且热通量充足条件下,整个蜡层才能被彻底熔化并随热液带出井筒。

热洗有效性高度依赖温度场的空间覆盖率与时间持续性,尤其是蜡层厚度方向的热穿透能力。其核心受热阻结构在于油管-蜡层界面,接触热阻、材料导热系数、注热流量与滞留时间均为关键控制参数。温度场沿轴向呈非线性衰减,故井筒深部清蜡效果通常差于浅层区域。热量不足或分布不均,将导致清蜡带断裂、蜡层残留甚至再结晶。因此,热洗过程实质上为一个典型的热传导驱动下的多相固液耦合传热问题,必须通过精确控制温度分布与热通量特性,才能实现稳定有效的除蜡操作。

2.3 热洗清蜡作用原理

热洗清蜡依赖高温流体(如热水或饱和蒸汽)沿油管注入,通过热对流和管壁热传导将热量传递至蜡层界面,从而改变蜡层的物理状态。首先,热液沿轴向注入油管,在流动过程中与管壁发生对流换热,形成内壁温度梯度;随后热量经钢管导入管外蜡层,并在径向方向上向蜡层内部扩散。蜡层在受热过程中,其结构依次经历升温、晶体软化、熔化和剥离四个阶段。温度分布决定各阶段的空间边界和推进速率,当局部温度超过蜡的初熔温度(一般为 $45-60^\circ\text{C}$),外层蜡晶开始脱稳,形成半液态的流动界面;进一步升温至蜡的完全熔点(可达 $70-90^\circ\text{C}$)时,蜡层整体转化为低粘度液体,被随热洗液携带带出井筒。实际清蜡效果受限于热量在管壁与蜡层间的传递效率,而该效率又取决于接触热阻、蜡层厚度、注热速率及停留时间等因素^[3]。因此,热洗的有效性实质上是温度场分布与热物性动态耦合的结果。

3 热洗过程温度场动态建模

3.1 物理模型构建

热洗过程中温度在井筒系统内沿轴向与径向发生动态分布,需基于井筒结构、流体特性与蜡层热物性建立简化物理模型。井筒结构可简化为多层轴对称圆柱体系,由内向外依次为热洗液层、油管钢壁、蜡层及环空原油层,各层热传导特性与厚度均已知。流体为高温热水或饱和蒸汽,呈现稳定注入状态,具备明确的初始温度和流速边界条件^[4]。由于井筒纵深大、温度变化剧烈,热传导与对流换热共同作用主导整个过程,需考虑轴向与径向的二维非

稳态传热特征。

蜡层作为主要传热阻抗结构,厚度变化显著影响径向热通量分布,应将其作为独立热传导单元建模。井筒轴向热对流受限于流体雷诺数与努塞尔数函数关系,需引入经验关联式修正。井筒边界条件包括井口热洗液恒温注入边界与井底绝热反射边界,初始温度场基于井筒自然冷却状态设定^[5]。为提高模型稳定性,物理域采用轴对称圆柱坐标,蜡层厚度设定为变量函数以适应不同工况。该物理模型可有效刻画热量在复杂管-蜡多层介质中的耦合传递行为,为后续数学建模提供空间结构与边界框架支撑。

3.2 数学模型建立

热洗过程可归结为多层圆柱体系内的二维非稳态热传导与对流耦合问题。热洗液层以对流换热为主,采用能量守恒控制方程:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

其中, ρ 、 c_p 、 λ 分别为流体密度、比热容、导热系数, u 为轴向速度, T 为温度, r 、 z 分别为径向与轴向坐标。油管钢壁与蜡层为固体介质,导热方程不含对流项,退化为纯热传导模型:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

其中 $\alpha = \lambda / (\rho c_p)$ 为热扩散率。各材料界面需满足温度与热流连续性条件:

$$T_i = T_{i+1}, \quad -\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial r} = -\lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial r}$$

蜡层内热物性参数为温度函数,应考虑非线性变化:在 45-90 °C 区间,导热系数与比热容显著提升,需对模型引入温依函数修正项。边界条件设定井口处热洗液入口温度为恒定值 T_{in} ,井底为绝热边界 $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$ 。初始条件取全井温度为 $T_0(z)$,可由生产间隔后温度剖面拟合确定^[6]。该数学模型完整描述了注热过程中的时间-空间温度场响应,具备明确物理意义与数值可解性,便于仿真分析与参数敏感性研究。

3.3 数值模拟方法

由于传热过程涉及非稳态、强非线性、多层耦合介质和复杂边界条件,需采用稳健的数值方法进行求解。空间离散采用有限体积法,基于轴对称二维结构划分非均匀网格,径向方向对蜡层区域加密划分以提高解的精度;时间离散采用隐式差分格式 (Crank - Nicolson 格式),以增强数值稳定性并支持较大时间步长迭代^[7]。

对流换热项采用一阶迎风格式与高阶 QUICK 格式组合,确保在高 Pe 数区域的数值稳定性与解平滑性;边界热通量项通过边界控制体方法显式处理;蜡层区域引入温度相关性函数 $\lambda(T)$ 、 $c_p(T)$,通过迭代更新实现非线性项修正,数值格式采用松弛迭代求解;多层介质间接口处热流连续性由耦合控制体共享边界节点实现^[8]。

4 热洗温度场仿真分析与结果

4.1 不同工况下的温度场分布特征

热洗温度场分布受注热温度、注入流速与作业持续时间影响显著。仿真采用三组典型工况对比分析:工况 A 为注热温度 80 °C、流速 0.5 m/s、作业时间 30 分钟;工况 B 为注热温度 100 °C、流速 0.8 m/s;工况 C 为注热温度 120 °C、流速 1.0 m/s、时间 60 分钟。在上述参数下提取不同时刻井筒内轴向剖面与径向温度场,对比其热量传播特征与热波前推进趋势。

仿真结果显示,热量传播速度随注热温度与流速提升而加快,温度等温面整体向井底延展,且径向温度梯度更为显著。低注热工况下热波前在 20 分钟内仅推进至井深约 300 m 处,而高温高流速下可达 500 m 以上。图 1 为典型工况 B 下 $t=0$ 、10、30、60 分钟的温度场云图演化,可见热量在油管-蜡层结构中呈现明显的径向热滞后特征。

整体来看,注热温度是影响轴向热推进速率的主控因子,而注入流速则调控了径向换热效率与滞后带形成范围。

4.2 清蜡效果的温度临界判断

清蜡效率与井筒中温度 $\geq$ 蜡熔点区域的体积密切相关。以蜡的完全熔化临界温度 85 °C 为参考,提取各工况中温度场等温面,并计算达到熔点以上的有效清蜡区长度与面积占比。统计结果见表 1,展示不同注热参数下的温度覆盖范围与理论清蜡能力。以工况 C 为例,其清蜡有效区长度为 490.7 m,占井筒总长的 81.8%,明显优于其他方案。

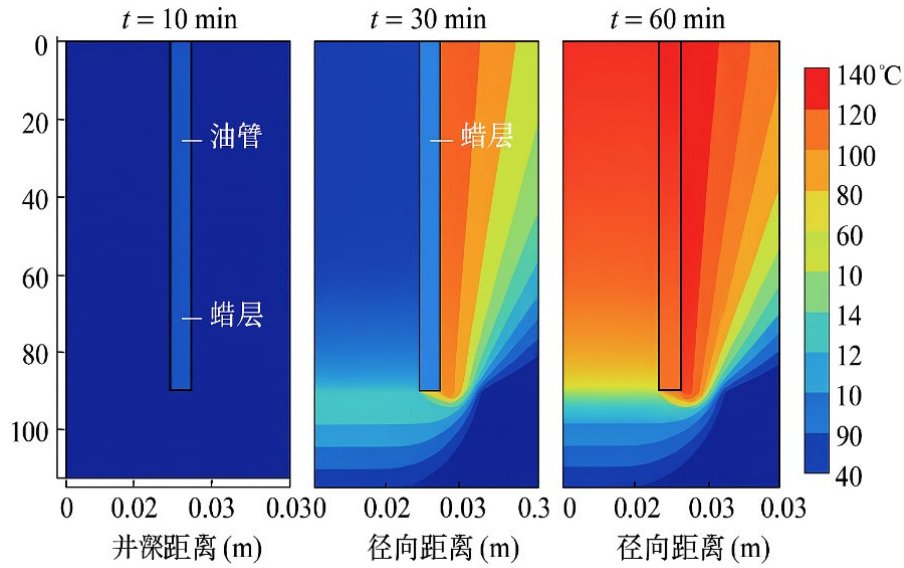


图1 热洗过程中井筒温度场演化云图（工况 B）

表1 不同工况下温度 $\geq 85^{\circ}\text{C}$ 区域长度与清蜡覆盖率

工况编号	注热温度 ($^{\circ}\text{C}$)	流速 (m/s)	作业时长 (min)	$\geq 85^{\circ}\text{C}$ 区域长度 (m)	清蜡覆盖率 (%)
A	80	0.5	30	165.3	27.5
B	100	0.8	45	375.9	62.7
C	120	1.0	60	490.7	81.8

进一步分析热穿透深度与蜡层去除率之间的关联，模拟径向热通量在蜡层边界处的响应，定义热穿透深度为径向温度梯度等于零的位置。仿真表明，当径向热穿透深度超过蜡层厚度 80%，对应蜡层去除率可达 90%以上；而穿透深度不足 50%时，仅实现边缘软化，无法实现彻底剥离。

图1与表1共同揭示，清蜡效率受制于两个关键参数区间：其一为注热温度临界区间（ $95 - 105^{\circ}\text{C}$ ），控制温升速率与热量持续性；其二为注热时间窗口（35 - 50 分钟），决定蜡层由软化转为整体熔解的时间条件。因此，应优先保障注热温度与热能稳定性，辅以合理注热持续时间，实现清蜡全过程的热量控制闭环。

5 结论（Conclusion）

研究基于热洗过程的多层圆柱体结构，建立了涵盖油管、蜡层与环空的二维非稳态温度场模型，揭示了热对流与径向传导耦合驱动下的温度演化行为。研究结果表明，注热温度在 $95 - 105^{\circ}\text{C}$ 之间、作业持续时间在 40 分钟以上时，可形成连续覆盖井

筒轴向 70%以上的有效清蜡区。热穿透深度与蜡层去除率呈明显正相关，径向热通量分布可作为清蜡效果预测的关键指标。

参考文献

[1] 范天龙.油井热洗清蜡效果提升策略研究[J].中国洗涤用品工业,2025(6):76-77.

[2] 张洪斌.油井热洗质量提升与实践[J].石油工业技术监督,2025,41(1):25-29.

[3] 刘丽娜.热洗清蜡存在的问题及治理应用效果[J].石油石化节能,2023,13(8):75-79+84.

[4] 张淼.抽油机井热洗清蜡的探索与研究[J].石化技术,2021,28(1):151-152.

[5] 王文琴,徐永东,韩召先,张超华,贾剑平,王非凡,李玉龙.电阻缝焊制备铁基非晶涂层温度场数值模拟[J].焊接学报,2024,45(8):24-32.

[6] 肖娟,汪忠,朱亚昆,付国艳,王春梅,侯光宗.别古庄油田采

- 油井热洗清蜡工艺研究分析[J].中国科技纵横,2023(18): 15-17.
- [7] 赵小光,黄燕,邵波,曹婷.H 油田 Y 区井组输油管线清蜡技术研究及应用[J].黑龙江科学,2023,14(2):88-91.
- [8] 付亚荣,刘泽,张新军,王婧,王晓军,崔兴华,徐诗奇,胡晓斌,殷新华.中高含水油井清蜡降黏方案制定方法[J].石

油石化节能,2023,13(4):44-47.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS