

# 稠油热采过程中储层伤害控制技术及其经济影响

陈 静<sup>1</sup> 卢立刚<sup>2</sup> 仲玉梅<sup>3</sup> 班晓春<sup>1</sup> 刘 涛<sup>1</sup>

(1. 河口采油厂采油管理七区, 山东 东营 257000)

(2. 胜利油田注汽技术服务中心河口注汽项目部, 山东 东营 257000)

(3. 河口采油厂地质研究所, 山东 东营 257000)

**摘要:** 稠油的高黏度和高密度使得常规开采方法难以奏效, 热采技术因此成为主要的开采手段。然而, 热采过程中高温高压的作业环境会引发储层伤害问题, 如孔隙堵塞、渗透率下降和流体流动性降低。这些问题不仅会影响稠油的采收率, 还会增加作业成本, 削弱经济效益。本文基于储层伤害的机理, 分析了黏土稳定剂、纳米颗粒技术、表面活性剂及化学堵剂等控制技术的应用与效果, 希望可以为稠油热采过程中的储层伤害控制工作提供理论支持和实践参考。

**关键词:** 稠油热采; 储层伤害; 储层伤害控制技术; 经济影响

## 0 引言

稠油作为一种重要的非常规油气资源, 其开采对满足全球能源需求具有重要意义。稠油由于其高黏度和高密度特性, 常规开采方法难以取得理想的采收率, 因此热采技术应运而生<sup>[1]</sup>。热采技术通过注入热能(如高温蒸汽)降低稠油黏度, 从而提高其流动性, 成为稠油开采的主要手段之一。然而, 热采过程中, 高温、高压的作业环境会导致储层的物理化学性质发生变化, 产生一系列储层伤害问题。这些伤害包括孔隙堵塞、渗透率下降、流体流动性降低等, 严重影响了油田的长期生产能力和经济效益<sup>[2]</sup>。储层伤害不仅会降低稠油采收率, 还会增加作业成本, 进而影响油田的整体经济收益。因此, 如何在热采过程中有效控制和减缓储层伤害, 成为研究和应用的关键课题。

## 1 热采技术与储层伤害机理

### 1.1 热采技术概述

热采技术是指通过向油藏注入热能以提高原油流动性的一系列技术手段。其主要包括蒸汽驱、火烧油层和电热采油等<sup>[3]</sup>。其中, 蒸汽驱技术应用最为广泛, 且效果显著。蒸汽驱技术通过向油藏注入高温蒸汽, 使稠油的黏度大幅降低, 从而提高其流动性, 使其能够更顺利地流向生产井。在蒸汽驱过程中, 高温蒸汽不仅能降低油的黏度, 还能增加油层的压力, 进一步促进原油的采出。火烧油层技术通过在油层内引燃部分原油, 利用燃烧产生的热量和气体推动剩余原油向生产井移动。电热采油则是通过电加热设备直接加热

油层, 使稠油黏度降低。这些热采技术各有优劣, 选择适宜的热采技术需要根据具体的油藏条件、经济成本及环境影响等因素综合考虑。

### 1.2 储层伤害机理

在热采过程中, 储层伤害是一个复杂且多方面的问题。首先, 高温蒸汽注入会导致储层中的黏土矿物发生膨胀和迁移。黏土矿物在高温条件下膨胀, 容易堵塞储层孔隙, 导致渗透率下降, 影响油流的顺畅性<sup>[4]</sup>。此外, 蒸汽驱过程中产生的高压环境也会引起储层中的砂粒迁移。这种砂粒迁移不仅会破坏储层的孔隙结构, 进一步降低渗透率, 还会导致生产井的砂堵问题。在高温环境下, 油水混合物也容易形成乳化液。乳化液的高黏度会使得油水分离困难, 从而增加流体的流动阻力, 进而影响稠油的采收效率。在储层中, 高温蒸汽会与储层中的矿物和流体发生一系列复杂的化学反应, 生成各种沉淀物。这些沉淀物会在孔隙中积聚, 进一步阻碍流体的流动, 降低储层的有效渗透率。这些储层伤害因素相互作用, 导致热采过程中储层的物理化学性质发生显著变化, 最终影响到油田的长期生产能力和经济效益。因此, 深入研究热采过程中储层伤害的机理, 采取有效的控制技术, 对于提高热采效率、延长油田寿命具有重要的现实意义。

## 2 储层伤害控制技术

### 2.1 黏土稳定剂的应用

在稠油热采过程中, 黏土稳定剂起到了至关重要的作用。它们可以通过抑制储层中黏土矿物的膨胀和

迁移，防止储层堵塞，维持储层的良好渗透性能。高温高压环境下，储层内黏土矿物容易发生复杂的物理化学变化，导致孔隙结构的破坏，从而影响油田的采收率和经济效益。黏土稳定剂的应用可以有效地缓解这些问题，提高稠油热采的效率和经济性。

储层中的黏土矿物主要包括蒙脱石、伊利石和高岭石等。这些黏土矿物在储层孔隙中具有较大的比表面积和较强的吸附能力，能够吸附大量的水分子和离子。在高温高压条件下，这些黏土矿物容易发生膨胀和分散，导致储层孔隙的堵塞和渗透率的下降<sup>[5]</sup>。例如，蒙脱石是一种层状硅酸盐矿物，具有很强的吸水膨胀能力。在高温蒸汽驱动的过程中，蒙脱石吸收水分后体积迅速增大，导致孔隙通道被堵塞，从而影响流体的流动<sup>a</sup>性。

黏土稳定剂通过与黏土矿物表面的反应，形成稳定的化学键，从而抑制黏土矿物的膨胀和迁移。首先，黏土矿物表面通常带有负电荷，能够吸附阳离子。黏土稳定剂中的阳离子（如钾离子、铝离子等）可以与黏土矿物表面的负电荷进行交换，形成稳定的化学键，从而抑制黏土矿物的膨胀。例如，钾离子具有较小的水合半径和较强的离子键合能力，能够有效地取代黏土矿物表面的钠离子和钙离子，形成稳定的黏土结构。而黏土稳定剂中的有机分子（如阳离子聚合物和有机硅化合物等）能够与黏土矿物表面发生化学反应，形成共价键或氢键，从而增强黏土矿物的稳定性。例如，阳离子聚合物能够通过其正电荷与黏土矿物表面的负电荷结合，形成稳定的络合物，从而抑制黏土的膨胀和迁移。黏土稳定剂中的大分子物质则可以在黏土矿物表面形成一层保护膜，阻止水分子和离子的渗入，从而减少黏土矿物的膨胀和分散。例如，有机硅化合物能够在黏土矿物表面形成一层疏水性薄膜，减少水分子的渗透，从而保持黏土矿物的稳定性。

## 2.2 纳米颗粒技术

纳米颗粒技术是近年来在油气开采领域中兴起的一种新型储层伤害控制方法。由于纳米颗粒具有独特的物理化学性质，包括较大的比表面积、强烈的表面活性和良好的稳定性，使其在改善稠油热采过程中储层性能方面表现出显著的优势。纳米颗粒技术可以通过稳定砂粒、改善油水乳化状态和降低流体黏度等方式，有效提高热采效率，减少储层伤害。

纳米颗粒通常指粒径在1至100纳米之间的微小颗粒。由于其微小的尺寸，纳米颗粒具有较大的比表

面积和表面能，能够提供更多的反应位点。此外，纳米颗粒还具有独特的光学、电学和磁学性质，这使得其在储层伤害控制方面具有广泛的应用潜力。常用的纳米颗粒材料包括二氧化硅、氧化铝、铁氧化物、碳纳米管和金属纳米粒子等。

纳米颗粒能够进入储层的微小孔隙，与砂粒表面发生相互作用，形成稳定的物理或化学键，从而防止砂粒的运移。通过在砂粒表面形成一层稳定的保护层，纳米颗粒能够有效地阻止高温高压条件下砂粒的迁移，维持储层的孔隙结构。例如，二氧化硅纳米颗粒能够在砂粒表面形成硅氧键，增加砂粒间的黏结力，从而提高储层的稳定性。在稠油热采过程中，油水乳化现象常常导致流体黏度增加，影响油品流动性。纳米颗粒具有较强的表面活性，能够在油水界面上自组装，形成稳定的乳化液，从而降低流体的黏度。例如，铁氧化物纳米颗粒在油水界面上形成一层稳定的单分子层，减少油水界面的张力，防止乳化液的形成，提高油品的流动性。纳米颗粒还可以通过在流体中分散，形成稳定的分散体系，能够有效降低稠油的黏度，改善其流动性。例如，碳纳米管具有较强的分散能力和优异的物理化学性质，能够与稠油分子发生相互作用，降低其黏度，提高油品的流动性。

纳米颗粒的选择和应用需要根据具体的油藏条件和热采技术进行优化。常用的纳米颗粒包括二氧化硅纳米颗粒、氧化铝纳米颗粒、铁氧化物纳米颗粒、碳纳米管和金属纳米粒子等。这些纳米颗粒具有不同的物理化学性质和作用机制，需要根据储层的特点和热采工艺进行合理选择。

## 2.3 表面活性剂的使用

表面活性剂在稠油热采过程中具有重要的应用价值。通过降低油水界面张力，表面活性剂能够有效改善油水乳化状态，降低流体黏度，提高油品流动性，从而提升热采效率，减少储层伤害。表面活性剂的基本原理是其分子结构中既包含亲水基团又包含亲油基团，能够在油水界面上形成稳定的单分子膜，从而降低界面张力。通过这一特性，表面活性剂可以在稠油热采中发挥多重作用。在稠油热采过程中，表面活性剂的主要作用机制包括降低界面张力、形成微乳液和改良润湿性。首先，通过在油水界面上形成稳定的单分子膜，表面活性剂显著降低了界面张力，使油滴更容易通过孔隙结构，提高了稠油的流动性。其次，表面活性剂能够在油水混合物中形成微乳液，这种微乳

液具有较低的黏度和较高的流动性，有助于稠油在储层中的迁移。最后，表面活性剂可以改变储层岩石的润湿性，降低流体在岩石表面的粘附力，提高油品采收率。表面活性剂的选择和应用需要综合考虑储层条件、油品性质和热采工艺等因素。常用的表面活性剂包括阴离子型、阳离子型、非离子型和两性离子型等。阴离子型表面活性剂在高盐度和高矿化度的储层条件下表现出较强的去污和乳化能力；阳离子型表面活性剂适用于高黏度稠油的热采，能够与储层岩石表面的负电荷结合，改变岩石表面的润湿性；非离子型表面活性剂对储层的矿化度和盐度适应性较强，具有良好的乳化、润湿和增溶能力；两性离子型表面活性剂在不同 pH 值条件下表现出不同的性质，适用于复杂储层条件。

#### 2.4 化学堵剂技术

化学堵剂技术在稠油热采过程中是一种重要的储层伤害控制手段。化学堵剂通过在储层中形成物理或化学屏障，有效阻止非目标区域的流体流动，从而减少储层伤害并提高采收率。化学堵剂技术的核心在于选择合适的堵剂材料和注入工艺，从而确保堵剂在高温高压环境下的稳定性和有效性。

化学堵剂根据其化学性质和作用机理，可分为无机堵剂、有机堵剂和复合堵剂三类。无机堵剂包括硅酸盐、铝酸盐等，这些材料在储层中可通过沉淀反应生成不溶性固体，填塞储层孔隙，从而形成物理屏障。无机堵剂的优点是成本低、原料易得，但其适用性受限于储层环境的化学条件。有机堵剂包括各种聚合物材料，如聚丙烯酰胺、聚乙烯醇等，这些聚合物在储层中能够通过化学交联反应形成高强度的网状结构，阻止流体渗透。有机堵剂的优势在于其较好的适应性和调控性，可以根据不同的储层条件进行优化设计。复合堵剂则是将无机和有机堵剂结合使用，通过综合利用两者的优势，提高堵水效果和稳定性。例如，聚合物-硅酸盐复合堵剂在高温高压环境下表现出良好的堵水性能。

### 3 经济影响分析

稠油热采过程中储层伤害控制技术具有重要的经济影响，具体包括：

#### 3.1 显著降低作业成本

储层伤害控制技术的应用可以显著降低作业成本。例如，粘土稳定剂、纳米颗粒和化学堵剂的使用能够有效减少储层堵塞和砂堵问题，从而减少修井和清井的频次和费用。虽然这些技术本身的材料成本和

施工费用可能较高，但从长期来看，通过减少储层伤害，提高采收率，可以实现更强的经济效益。

#### 3.2 提升采收效益

储层伤害控制技术的应用直接影响稠油的采收率。通过有效控制储层伤害，可以显著提高热采效率，增加油田的可采储量。例如，纳米颗粒和表面活性剂的使用可以显著改善油品的流动性，提高油井的产量。采收率的提升不仅直接增加了油田的产量，还延长了油田的经济寿命，提高了整体经济收益。

#### 3.3 减少设备维护和更换成本

储层伤害控制技术的应用可以减少设备的磨损和故障率。例如，通过化学堵剂技术防止砂粒运移，可以减少砂粒对井筒和生产设备的磨损，延长设备的使用寿命，降低设备维护和更换成本。设备维护和更换费用的减少可以进一步提高经济效益。

#### 3.4 降低环境治理成本

储层伤害控制技术的应用有助于降低环境治理成本。例如，利用化学堵剂技术可以减少水窜现象，降低地面环境的污染风险，减少环境治理费用。环保措施的改进不仅符合国家和地方的环境保护法规要求，还可以提高企业的社会责任形象，带来潜在的经济和社会效益。

### 4 结论

稠油热采过程中储层伤害不可避免，但通过合理应用粘土稳定剂、纳米颗粒技术、表面活性剂和化学堵剂技术，可以有效控制储层伤害，提高热采效率。综合考虑不同技术的效果和成本，可以为稠油热采提供最佳解决方案。未来的研究应进一步优化这些技术，开发出更高效、低成本的储层伤害控制方法，为稠油热采提供更强有力的技术支持。

#### 参考文献：

- [1] 吴婷 . 海上稠油储层热采降粘剂微观作用机理研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量 ,2024,44(11):118-120.
- [2] 王滨 , 李晓亮 , 吴晓燕 , 陈斌 . 长链烷基羧酸甜菜碱表面活性剂放量生产工艺优化 [J]. 石油化工应用 ,2023,42(12):87-90.
- [3] 刘小鸿 . 稠油和超稠油原位提高采收率技术 [J]. 当代化工 ,2023,52(05):1224-1230+1235.
- [4] 林辉 , 孙君 , 孙艳萍 , 刘志龙 , 付云川 . 海上稠油热采储层黏土稳定技术 [J]. 山东石油化工学院学报 ,2023,37(01):72-76.
- [5] 罗炳学 . 化学降粘采油技术研究及应用 [J]. 石化技术 ,2021,28(05):136-137.