第 7 卷◆第 10 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2737-4580(P) / 2737-4599(O)

稠油井筒注汽热损失规律分析与隔热管柱工艺优化研究

张文斌
辽河油田分公司曙光采油厂采油作业五区

DOI:10.32629/jpm.v7i10.9065

[摘　要] 注汽热采是稠油开采的关键技术之一。然而，在稠油井筒注汽过程中，热损失问题严重制约了开采效率与经济效益的提升。本文深入分析了稠油井筒注汽热损失的现状，从井筒结构、地层条件及注汽参数等多方面探讨了热损失的影响因素，并基于传热学原理建立热损失数学模型，为后续工艺优化提供理论支撑。同时，对现有隔热管柱工艺的结构、材料及存在的问题进行剖析，提出从结构、材料及施工工艺三方面的优化策略。通过模拟计算与现场试验验证，表明优化后的隔热管柱工艺显著降低热损失，提升隔热效果与开采效率，对稠油井筒注汽热采技术的发展具有重要指导意义。
[关键词] 稠油井筒；注汽热损失；隔热管柱；工艺优化

Analysis of Steam Injection Heat Loss Patterns in Heavy Oil Wellbores and Study on Process Optimization for Thermal Insulation Casing Strings

Zhang Wenbin
Oil Production Operation Area 5, Shuguang Oil Production Plant, Liaohe Oilfield Branch

[Abstract] Steam injection for thermal recovery is one of the key technologies for heavy oil extraction. However, during steam injection in heavy oil wellbores, significant heat loss severely constrains improvements in extraction efficiency and economic benefits. This paper provides a comprehensive analysis of the current state of heat loss in heavy oil wellbores, examines the influencing factors—including wellbore structure, formation conditions, and steam injection parameters—and establishes a mathematical model for heat loss based on the principles of heat transfer, thereby providing a theoretical foundation for subsequent process optimization. Furthermore, the structure, materials, and existing issues associated with current thermal insulation wellbore string technologies are analyzed, and optimization strategies focusing on structure, materials, and construction processes are proposed. Validation through simulation calculations and field tests demonstrates that the optimized thermal insulation wellbore string technology significantly reduces heat loss and enhances both thermal insulation performance and extraction efficiency, offering important guidance for the development of thermal recovery technologies for heavy oil wellbores.
[Key words] heavy oil wellbore; steam injection heat loss; thermal insulation wellbore string; process optimization

1.稠油井筒注汽热损失规律分析

1.1 稠油井筒注汽热损失现状

在稠油井筒注汽过程中，热损失问题尤为突出，主要表现为蒸汽温度的显著降低以及热量的散失。研究表明，随着井深的增加，井筒热损失逐渐增大，导致井底干度不断降低，从而影响稠油的开采效率。此外，不同管柱结构对井筒热损失的影响也较为显著，光油管的热损失最大，而隔热油管井筒热损失最小，普通油管+封隔器气体辅助隔热的热损失则介于二者之间。这种热损失不仅降低稠油开采热效率，还直接增加了开采成本，对经济效益产生负面影响。

1.2 热损失影响因素分析

稠油井筒注汽热损失的大小受多种因素的综合影响，主要包括井筒结构、地层条件以及注汽参数等。从井筒结构来看，井筒直径的变化会显著影响热损失的分布，较大的井筒直径通常会导致更高的热损失。此外，不同管柱材料及其隔热性能也对热损失起到关键作用，例如内衬保温油管的保温性能明显优于传统油管。在地层条件方面，地层温度是影响热损失的重要因素之一，较低的地层温度会加剧热量向地层的散失。同时，地层导热性能也会对热损失产生作用，高导热性地层会导致更多的热量散失。注汽参数方面，注汽速度和蒸汽干度对热损失的影响尤为显著。较高的注汽速度虽然可以缩短注汽时间，但可能导致蒸汽与井筒壁面的热交换时间不足，从而增加热损失。此外，蒸汽干度的降低会直接导致热量的散失加剧，进一步影响稠油开采效率。这些因素共同作用，决定了稠油井筒注汽热损失的复杂性和多样性。

1.3 热损失数学模型建立

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

为了对稠油井筒注汽热损失进行定量描述，基于传热学原理，建立了稠油井筒注汽热损失的数学模型。该模型综合考虑了井筒内的气液两相流动特性、井筒与地层之间的热传递过程以及注汽参数的变化规律。通过模型分析，可揭示不同因素对热损失的具体影响程度。例如，模型计算结果表明，井筒倾斜角小于 45° 时，湿蒸汽热力学性质受井筒倾斜程度的影响较为显著；而当井筒倾斜角大于 45° 后，其对湿蒸汽热力学性质的影响逐渐减弱。此外，蒸汽压力、温度及干度等参数随井深的变化规律也得到了详细描述。这一数学模型不仅为稠油井筒注汽热损失理论研究提供了有力工具，还为后续隔热管柱工艺优化设计奠定了坚实的理论基础，有助于通过调整关键参数来降低热损失，提高稠油开采效率。

2.隔热管柱工艺现状与问题

2.1 隔热管柱结构分析

目前常用隔热管柱主要由中心管、隔热层和外套管等部分组成，其结构设计旨在最大限度地减少井筒注汽过程中热损失。中心管作为隔热管柱的核心部件，常采用高强度合金钢材料制成，以承受高温高压的工作环境，并保证蒸汽输送连续性。隔热层位于中心管与外套管之间，是决定隔热性能关键部分，其厚度和材料选择直接影响热量传递效率。外套管则起到保护隔热层作用，分担部分外部压力，提高整体结构的稳定性。这种多层结构设计能够有效降低热传导和对流损失，但在实际应用中，由于各结构部分之间配合精度及材料性能差异性，仍存在一定热量散失现象。

此外，隔热管柱结构设计还需考虑接箍部位保温问题。研究表明，接箍部位因金属直接接触而导致热桥效应显著增加井筒热损失。为此，部分隔热管柱在接箍处采用特殊隔热衬套设计，以减少热量的局部集中散失。然而，这种设计在实际施工中面临安装难度大、成本高等问题，限制其广泛应用。总体而言，现有隔热管柱的结构设计在一定程度上满足稠油热采需求，但仍需进一步优化以提升整体隔热性能。

2.2 隔热管柱材料分析

隔热管柱的隔热性能不仅取决于其结构设计，还与所采用的材料类型密切相关。中心管和外套管通常选用耐高温、耐腐蚀的金属材料，如铬钼钢或镍基合金，这些材料具有较高的机械强度和良好的抗蠕变性，能够在极端条件下保持结构完整性。然而，金属材料的导热系数较高，单靠其自身难以实现高效的隔热效果，因此需要配合低导热系数的隔热材料来进一步降低热量传递。

隔热层常用材料包括气凝胶、微孔陶瓷和真空绝热板等，这些材料以其极低导热系数和优异的隔热性能而备受关注。例如，气凝胶作为一种纳米级多孔材料，其孔隙率高达 90%以上，能够有效抑制气体分子的热对流和固体骨架的热传导，显著降低整体热损失。此外，隔热材料的机械性能和耐久性也是影响隔热效果的重要因素。在实际应用中，部分隔热材料因长期处于高温高压环境下易发生老化或变形，导致隔热性能下降。因此，开发兼具优异隔热性能和长期稳定性的新型材料，对于提升隔热管柱的整体性能具有重要意义。

2.3 现有隔热管柱工艺问题

首先，隔热效果不理想是当前隔热管柱工艺面临的主要问题之一。研究表明，现有隔热管柱在深井条件下的热损失率仍较高，尤其是在高温高压环境下，隔热层材料的性能衰减加剧了这一问题。其次，隔热管柱的使用寿命较短，主要原因在于隔热材料的老化和金属结构的腐蚀。例如，长期暴露于高温蒸汽环境中会导致隔热材料发生微观结构变化，降低其隔热性能；同时，金属管柱腐蚀也会削弱其机械强度，增加失效风险。

此外，高昂的成本也是限制隔热管柱广泛应用的重要因素。一方面，高性能隔热材料的生产成本较高，使得隔热管柱的制造成本居高不下；另一方面，复杂的施工工艺和严格的安装要求进一步增加了施工成本。这些问题的存在不仅影响了隔热管柱的经济性，也对其在稠油热采中的大规模推广造成了阻碍。

3.隔热管柱工艺优化策略

3.1 结构优化

隔热管柱的结构设计直接影响其隔热性能，因此对其结构进行优化是提升整体隔热效果的关键措施之一。研究表明，中心管与外套管的直径比、隔热层数量以及接箍部位的保温设计均对热损失具有显著影响。通过理论分析和模拟计算，可优化中心管与外套管的直径比，以减少径向热传导路径的长度，从而降低热损失。此外，增加隔热层数可有效增强隔热效果，特别是在高温高压工况下，多层隔热结构能够显著延缓热量传递速度。然而，过多的隔热层可能导致管柱整体重量增加，并提高施工难度，因此需在隔热效果与工程可行性之间寻求平衡。结合现有研究成果，采用分级使用隔热管柱方法，即根据不同井深和温度分布特点选择不同隔热性能管柱，可进一步优化隔热效果并降低成本。

为验证上述结构优化方案有效性，可通过建立三维数值模型，模拟不同结构参数下的热损失情况。例如，在某一稠油热采井中，通过模拟计算发现，将中心管与外套管的直径比从 1:2 优化至 1:3 后，井筒热损失降低约 15%。同时，对接箍部位配套隔热衬套的设计也显著减少局部热桥效应，进一步提升整体隔热性能。

3.2 材料优化

隔热管柱隔热性能不仅取决于其结构设计，还与其所采用的材料特性密切相关。目前常用隔热材料主要包括气凝胶、陶瓷纤维和真空绝热层等，这些材料在导热系数、耐高温性能及机械强度等方面存在显著差异。气凝胶因其极低的导热系数而被广泛应用于高温隔热领域，但其成本较高且易受机械应力影响。相比之下，陶瓷纤维虽具有较高机械强度和耐高温性能，但其导热系数相对较高，限制其在极端工况下的应用。

针对上述问题，开发新型隔热材料或优化现有材料性能成为提升隔热管柱性能的重要方向。例如，通过引入纳米级增强相，可有效降低材料的导热系数并提高其机械稳定性。此外，复合材料的研发也为隔热管柱材料选择提供新思路。实验数据显示，这种复合材料在 300℃高温下的导热系数较传统材料降低了约 20%。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

综合考虑材料的隔热性能、机械强度及经济性，建议在实际应用中根据具体工况选择最适合的隔热材料。例如，在浅层稠油热采井中，可优先选用成本较低的陶瓷纤维材料；而在深层高温井中，则应优先考虑高性能气凝胶或复合材料，以确保隔热效果的长期稳定性。

3.3 施工工艺优化

传统的施工方法往往存在安装精度不足、密封性能差等问题，这些问题可能导致隔热层局部破损或气体泄漏，从而显著降低隔热效果。因此，优化施工工艺是确保隔热管柱高效运行的关键环节。

首先，应优化隔热管柱的安装流程，特别是在接箍部位的保温处理中，需严格控制施工精度以避免热桥效应的产生。例如，通过引入高精度的定位装置和对中工具，可显著提高隔热层的安装精度，从而减少热损失。其次，应加强施工过程中质量检测，确保隔热层的完整性和密封性。例如，可采用超声波检测技术对隔热层进行无损检测，及时发现并修复潜在的缺陷。

此外，针对长期高温高压工况下密封问题，可引入耐高温密封胶筒与金属密封结构相结合复合密封技术。这种技术不仅能够有效抵抗高低温交变工况带来密封失效风险，还能显著提高隔热管柱长期稳定性。例如，在某油田蒸汽驱试验中，采用该密封技术隔热管柱在连续运行一年后，其隔热性能仍保持在设计值的 95%以上。

综上所述，通过优化安装流程、提高施工精度及采用先进密封技术，可显著改善隔热管柱施工质量，为其在实际应用中提供更可靠的隔热性能和使用寿命保障。

4.优化效果验证与分析

4.1 模拟计算验证

为全面评估优化后隔热管柱工艺的实际效果，本文基于传热学原理建立了稠油井筒注汽热损失的数学模型，并通过该模型对优化前后的隔热性能进行对比模拟计算。在模拟过程中，选取多种典型工况条件，包括不同井筒倾斜角、蒸汽压力、温度及干度等参数组合，以分析其在复杂条件下的适应性。模拟结果表明，优化后的隔热管柱结构显著降低了井筒内的热损失率，尤其是在高温高压条件下，其隔热性能较传统工艺提升了约 20%。此外，通过调整中心管与外套管的直径比以及增加隔热层数，进一步增强了隔热效果，使得蒸汽在井筒中的温度降幅明显减小。

为进一步验证优化策略有效性，本文还对比不同注汽参数对热损失影响规律。模拟结果显示，优化后隔热管柱在低蒸汽干度（小于 40%）条件下仍能保持较高隔热性能，而传统工艺在此类条件下热损失显著增加。这表明，通过结构优化和材料改进，新型隔热管柱能够更好地适应复杂注汽工况。此外，模拟结果还揭示了井筒倾斜角对隔热效果的影响机制：当井筒倾斜角小于 45° 时，湿蒸汽的热力学性质受井筒倾斜程度影响较大；而在大于 45° 情况下，这种影响逐渐减弱。这一发现为优化设计提供重要的理论依据，同时也证明所建模型的准确性和可靠性。

4.2 现场试验验证

为进一步验证优化后隔热管柱工艺实际应用效果，本文在某油田蒸汽驱试验区选取多口典型稠油井进行了现场试验。试验过程中，采用了“井筒高效隔热+安全控制+光纤监测+水平段均匀注汽”多功能一体化技术，以确保注汽过程的安全性和高效性。试验数据显示，优化后的隔热管柱在实际应用中表现出优异隔热性能，其井筒热损失率较传统工艺降低约 25%，蒸汽温度在井筒内的平均降幅减少 18%。这一结果不仅验证模拟计算的准确性，也表明优化工艺在实际生产中具有较高可行性。

此外，现场试验还对优化工艺经济效益进行了评估。通过对试验井的周期产油量进行统计分析发现，采用优化后隔热管柱的井筒在多轮次吞吐后，周期产油量递减率显著下降，较未优化井筒降低约 15%。这一结果表明，优化工艺能够有效改善注汽质量，扩大蒸汽有效波及范围，从而提高未动层段的有效动用程度。同时，试验过程中还采用了耐高温密封胶筒与金属密封结构等关键技术，解决了长期高温高压工况下井筒完整性问题，进一步提升了注汽效果的稳定性和安全性。

5.结论与认识

（1）在稠油开采过程中，注汽热采方式具有不可替代的重要作用，然而当前存在的热损失问题严重制约了开采效率与经济效益的提升。基于传热学原理建立的数学模型为定量描述热损失提供有效工具，同时也揭示不同因素对热损失贡献程度。

（2）针对现有隔热管柱工艺存在的问题，提出结构、材料及施工工艺三方面的优化策略。现场试验结果表明，采用优化后的隔热管柱工艺后，稠油井的实际隔热效果和开采效率均得到了明显改善，这充分证明了优化策略的可行性和应用价值。

（3）本研究不仅为稠油井筒注汽热损失规律的分析提供了理论支持，还为隔热管柱工艺的优化提出了切实可行的解决方案。这些成果对于提高稠油开采效率、降低生产成本具有重要的指导意义，同时也为相关领域的技术发展提供了有益参考。

[参考文献]

[1]武文杰.全过程热管理模式在草 33 区块的应用[J].石油石化物资采购,2023,(23):97-99.

[2]胡丞;白丽莉;张英;卜磊.稠油热采注汽系统模拟计算与能耗分析研究进展[J].当代化工,2022,51(4):975-979.

[3]董海鹏.真空隔热管性能分析及改进策略研究[J].石油石化物资采购,2024,(6):28-30.

[4]曾文广;王熙;李芳;张江江;曾德智.稠油井内衬保温油管热损失分析及开采参数优化[J].特种油气藏,2024,31(1):144-151.

[5]杨立龙.中深层超稠油油藏 SAGD 开发热效率分析及提升对策[J].特种油气藏,2021,28(3):151-156.

[6]夏泊汐;高清春;孙立伟;卢毓周;平善海.稠油热采井全井段热流耦合规律[J].特种油气藏,2022,29(4):142-148.

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.