

天然气水合物储层改造研究进展

袁杰 尹超 唐银鹏

中石化西南石油工程有限公司井下作业分公司 四川 德阳 618000

摘要：本文综述了近年来天然气水合物储层改造的研究进展。随着全球能源需求的增长和环境保护的日益重要，天然气水合物储层的开发利用成为了研究的热点。本文重点介绍了数值模拟在储层改造中的应用、改造技术的研究现状以及未来发展趋势。通过数值模拟，可以更准确地预测储层的动态行为，为实际操作提供依据。同时，多种改造技术如注气置换、降压解冻等也在不断发展和优化。

关键词：天然气；水合物储层改造技术；研究

1 天然气水合物储层特征

天然气水合物，也被称为“可燃冰”，是一种在高压低温环境下由天然气和水形成的结晶化合物。以下是天然气水合物储层的一些主要特征：（1）高压低温环境：天然气水合物的形成需要高压和低温的环境条件。通常，这些储层位于深海沉积物中或陆地的永久冻土区域。（2）孔隙度和渗透率：天然气水合物储层的孔隙度和渗透率通常较低，这是因为水合物晶体占据了岩石孔隙空间的大部分。（3）封闭性：由于天然气水合物在高压下稳定，储层通常需要具有良好的封闭性，以保持必要的压力条件。（4）厚度和连续性：天然气水合物储层的厚度和连续性可以变化很大，取决于地质条件和沉积历史。在某些地区，储层可以是厚层且连续的，而在其他地区则可能是薄层或不连续的。（5）地震反射特性：由于天然气水合物与周围沉积物的物理性质差异，它在地震勘探中通常具有独特的反射特性，这有助于识别和定位储层。（6）气体组成：天然气水合物中的气体主要是甲烷，但也可能含有少量的乙烷、丙烷和其他烃类^[1]。气体组成可以影响水合物的物理性质和稳定性。（7）敏感性：天然气水合物储层对温度和压力的变化非常敏感。即使是小幅度的温压变化也可能导致水合物的分解，释放出大量的甲烷气体。（8）与常规油气储层的差异：与常规的油气储层相比，天然气水合物储层的开发更具挑战性，因为需要解决的技术问题更多，包括如何安全有效地提取和运输天然气。

2 天然气水合物储层的价值和重要性

天然气水合物储层具有重要的价值和重要性，主要体现在以下方面，据估计，全球天然气水合物的储量可能超过传统石油和天然气储量的总和。这意味着天然气水合物储层对于满足全球能源需求具有巨大的潜力，特别是在传统能源资源日益枯竭的背景下。天然气水合物

是一种清洁的能源来源。与传统的化石燃料相比，天然气水合物燃烧产生的二氧化碳量较少，有助于减少温室气体排放，对全球气候变化产生积极影响。因此，开发天然气水合物储层对于实现可持续发展和应对气候变化具有重要意义。通过开采和销售天然气，国家可以获得重要的财政收入，并促进经济发展。此外，天然气水合物储层的开发还将带动相关产业的发展，如基础设施建设、技术研发等，进一步推动经济增长。天然气水合物储层的存在和研究对于地球科学、地质学、化学等领域具有重要科研价值。通过研究天然气水合物的形成、分布、性质等，科学家可以深入了解地球的内部结构和动力学过程，推动相关学科的发展。天然气水合物储层的开发对于国家能源安全具有战略意义。随着全球能源需求的增长和传统能源资源的枯竭，拥有丰富的天然气水合物储量将为国家提供稳定的能源供应，减少对外部能源的依赖，增强国家的能源安全。

3 天然气水合物储层改造技术

3.1 热激活技术

天然气水合物储层改造技术中的热激活技术是一种通过加热或注入热流体来激活天然气水合物储层的方法。这种技术利用了水合物在高温下分解的特性，将储层中的水合物转化为气态烃类，从而释放出天然气。热激活技术通常包括以下步骤：通过加热设备或注入热流体，将储层中的水合物加热到其分解温度。加热可以促进水合物的分解，释放出气态烃类。在加热过程中，水合物分解产生气态烃类，如甲烷、乙烷等。这些气体将占据储层中的孔隙空间，并逐渐排出。通过专门的采集设备，将生成的气体从储层中采集出来。采集过程中需要注意控制气体压力和温度，以确保安全和有效采集。在气体采集过程中，需要保持储层的稳定性和封闭性，以防止气体泄漏和储层塌陷。同时，需要对储层进行监

测和控制,以确保其安全和稳定。热激活技术具有一些优点,如操作简单、成本低廉、适用范围广等。然而,该技术也存在一些挑战和限制,如加热过程中可能产生大量的热量损失、储层稳定性难以保证等。

3.2 降压解冻技术

降压解冻技术是一种用于开采天然气水合物储层的方法,通过降低储层中的压力来解冻水合物,使其分解为天然气。这种技术利用了水合物在一定压力下保持稳定,而压力降低时解冻并释放出气体的原理。降压解冻技术通常包括以下步骤,通过专门的降压设备或技术,将储层中的压力降低到水合物分解的压力阈值以下。这使得储层中的水合物开始解冻并分解为天然气。在降压过程中,水合物分解产生天然气。这些气体将占据储层中的孔隙空间,并逐渐排出。通过专门的采集设备,将生成的气体从储层中采集出来。采集过程中需要注意控制气体压力和温度,以确保安全和有效采集^[2]。在气体采集过程中,需要保持储层的稳定性和封闭性,以防止气体泄漏和储层塌陷。同时,需要对储层进行监测和控制,以确保其安全和稳定。降压解冻技术具有一些优点,如操作简单、适用范围广等。然而,该技术也存在一些挑战和限制,如降压过程中可能产生大量的热量损失、储层稳定性难以保证等。

3.3 注气置换技术

注气置换技术是一种通过向天然气水合物储层中注入气体来解冻并提取水合物中的天然气的方法。这种技术利用了水合物与气体之间的化学反应和物理变化,使水合物分解为气体,从而释放出天然气。注气置换技术通常包括以下步骤:选择适当的气体作为注入剂,如氮气、二氧化碳等。这些气体在适当的条件下可以与水合物发生反应,促进其分解。通过专门的注入设备,将选定的气体注入到天然气水合物储层中。注入过程中需要控制气体的压力和流量,以确保气体能够充分与水合物接触并发生反应。注入的气体与储层中的水合物发生化学反应,使水合物分解为气体。这个过程会释放出大量的热量,因此需要控制反应温度,以避免储层温度过高导致不稳定。通过专门的采集设备,将生成的气体从储层中采集出来。采集过程中需要注意控制气体压力和温度,以确保安全和有效采集。在气体采集过程中,需要保持储层的稳定性和封闭性,以防止气体泄漏和储层塌陷。同时,需要对储层进行监测和控制,以确保其安全和稳定。注气置换技术具有一些优点,如操作简单、适用范围广等。然而,该技术也存在一些挑战和限制,如注入过程中可能产生大量的热量损失、储层稳定性难以

保证等。

4 数值模拟在储层改造中的应用

4.1 数值模拟方法概述

数值模拟方法在储层改造中发挥着重要的作用。它通过建立数学模型,模拟储层的地质特征、流体流动、水合物分解等过程,为储层改造提供重要的理论支持和指导。数值模拟方法主要包括有限元法、有限差分法、有限体积法等。这些方法通过离散化处理储层和流体流动问题,将复杂的物理过程转化为数学方程的求解问题。通过数值模拟,可以精确地预测储层改造过程中的各种参数,如压力、温度、气体浓度等,从而为实际操作提供可靠的依据。在储层改造过程中,数值模拟可以应用于以下几个方面:(1)储层建模:通过数值模拟方法建立储层的三维地质模型,包括地层结构、岩石物性、孔隙率等参数。这有助于深入了解储层的空间分布和特征,为后续的改造方案设计提供基础数据。(2)流体流动模拟:数值模拟可以模拟储层中的流体流动情况,包括流体的速度、压力、温度等参数的变化。这有助于预测改造过程中可能出现的流体流动问题,如流体堵塞、泄漏等,从而采取相应的措施进行预防 and 解决^[3]。

(3)水合物分解模拟:数值模拟可以模拟水合物在储层中的分解过程,包括水合物的分解速率、气体生成量等参数。这有助于了解水合物分解的规律和影响因素,为优化改造方案提供理论支持。(4)储层稳定性分析:数值模拟可以分析储层在改造过程中的稳定性,包括地层应力、岩石破裂等参数。这有助于预测储层改造过程中可能出现的地质灾害和安全隐患,从而采取相应的措施进行预防和控制。

4.2 储层改造数值模拟过程

数值模拟在储层改造过程中发挥着重要的作用。它通过建立数学模型,模拟储层的地质特征、流体流动、水合物分解等过程,为储层改造提供重要的理论支持和指导。储层改造数值模拟过程包括以下几个步骤,第一,建立地质模型:首先根据地质勘查数据和地球物理资料,建立储层的三维地质模型。这包括地层的厚度、岩性、孔隙度、渗透率等关键属性。同时,定义模型的边界条件和初始状态,例如初始压力、温度和水合物饱和度。第二,建立数学模型:根据储层的特性和改造的目标,选择合适的数学模型。例如,对于水合物的分解,可能需要使用反应动力学模型;对于流体的流动,可能需要使用达西定律或其变体。第三,参数化:为模型中的各个参数赋值,这通常基于实验室测量、现场数据或经验估计。这些参数可能包括岩石的物性、流体的

性质、水合物的分解速率等。第四，运行模拟：使用数值求解器（如有限元法、有限差分法等）来求解数学模型，模拟储层在改造过程中的动态响应。这可能涉及大量的计算，特别是在处理大型模型和复杂过程时。第五，结果分析与可视化：分析模拟结果，提取关键指标，如气体产量、压力分布、温度变化等。使用可视化工具将这些结果以图形或动画的形式展现出来，以便更直观地理解储层的动态行为和改造效果。第六，优化与验证：根据模拟结果，对改造方案进行优化。这可能涉及调整注入气体的类型或速率、改变降压策略等。通过多次模拟和比较，确定最佳的改造策略。如果可能的话，使用现场数据对模拟结果进行验证，以确保模型的准确性和可靠性。第七，决策支持：最终，数值模拟的结果为决策者提供了关键信息，帮助他们制定安全、经济且高效的储层改造计划。

4.3 数值模拟结果分析与应用

随着计算机技术的飞速发展，数值模拟已成为储层改造中不可或缺的工具。通过高精度、高效率的模拟，工程师们可以深入了解储层的动态行为，预测改造效果，并为实际操作提供关键指导。

第一，数值模拟结果分析，数值模拟完成后，会产生大量的数据。这些数据描述了储层在改造过程中的各种物理和化学变化，如压力、温度、流体流动、水合物分解等。为了更直观地理解这些数据，通常会使用高级的可视化工具。通过三维图形、动画和颜色映射，工程师可以清晰地看到储层中的流动路径、压力分布、温度变化等。将模拟结果与预期的改造目标或现场观测数据进行对比，可以评估改造方案的可行性和效果。

第二，数值模拟结果的应用根据模拟结果，工程师可以调整改造策略，如改变注气速率、调整降压策略或选择更合适的注入剂等，以达到更好的改造效果。模拟结果可以帮助识别潜在的风险和问题，如流体泄漏、储层塌陷等。这为工程师提供了预警，使他们能够提前采取措施来预防或减轻这些问题。通过模拟不同改造方案的效果，可以对这些方案进行经济评估。这有助于决策者选择最具经济效益的方案。数值模拟结果还可以用于培训和教育目的，帮助工程师和决策者更好地理解储层

改造的复杂性和挑战。

5 天然气水合物储层改造技术的发展前景

随着全球能源需求的不断增长和环境保护意识的增强，天然气作为一种清洁、高效的能源受到了广泛关注。而天然气水合物储层作为一种潜在的丰富能源来源，其开发利用对于满足全球能源需求具有重要意义。因此，天然气水合物储层改造技术的发展前景非常广阔^[4]。首先，随着科技的不断进步，数值模拟技术在储层改造中的应用将更加广泛。通过高精度、高效率的数值模拟，可以更加准确地预测储层的动态行为，为实际操作提供可靠的依据。同时，随着计算机技术的不断发展，数值模拟的计算能力和精度也将不断提高，为储层改造提供更强大的技术支持。其次，随着环保意识的增强和能源结构的调整，天然气水合物储层的开发利用将更加受到重视。未来，将会有更多的国家和企业投入到天然气水合物储层的开发利用中，推动储层改造技术的不断创新和发展。此外，随着全球气候变化和环境问题的加剧，清洁能源的开发利用将成为未来能源发展的主流。天然气作为一种清洁、高效的能源，其开发利用将更加受到重视。而天然气水合物储层作为一种潜在的丰富能源来源，其开发利用将为清洁能源的发展提供有力支持。

结束语

天然气水合物储层改造技术仍面临许多挑战，如储层稳定性的维持、气体泄漏的预防等问题，需要进一步研究和解决。总的来说，天然气水合物储层改造研究在不断取得进展的同时，也面临着新的挑战和机遇，未来这一领域的发展将更加充满希望和挑战。

参考文献

- [1]刘伟,马丽,陈亮.天然气水合物储层改造实验研究[J].石油勘探与开发,2021,48(2):301-308.
- [2]赵阳,韩晓红,周明.数值模拟在天然气水合物储层改造中的应用[J].石油学报,2021,42(3):445-453.
- [3]陈婷,王伟,刘涛.天然气水合物储层改造现场应用与案例分析[J].天然气工业,2021,41(5):1-8.
- [4]宋鹏.琼东南盆地深水区浅层运聚系统及其对天然气水合物成藏的控制[J].海洋地质前沿,2021,37(07):11-21.