

某海上油田柱塞泵结垢机理以及防治方法

郭云冠*

中海石油（中国）有限公司湛江分公司，广东 湛江 524057

摘 要： 在海上某油田的脱水系统调试中，遇到了柱塞泵运行不稳定、过滤器频繁堵塞和严重结垢等问题，这些问题影响了生产效率和安全生产。通过深入分析了结垢原因，包括原油矿物质、微生物活动和工艺流程，并评估了现有工艺的不足，如过滤效率和化学物质使用。采取了一系列解决方案，包括改进过滤器设计以减少堵塞，调整工艺参数降低结垢风险，以及引入新的化学添加剂抑制垢形成。同时，加强了设备维护和清洗，确保关键部件清洁和良好运行。这些措施显著提升了柱塞泵的稳定性，有效控制了堵塞和结垢问题，提高了脱水系统的效率和安全性，为油田的持续生产提供了坚实保障。

关 键 词： 脱水系统；柱塞泵；油泥；结垢；阻垢剂

Scaling Mechanism and Prevention Method of Plunger Pump in an Offshore oil Field

Guo Yunguan*

CNOOC (China) Co., Ltd. Zhanjiang Branch, Zhanjiang, Guangdong 524057

Abstract： During the commissioning of the dewatering system in an offshore oil field, some problems such as unstable operation of the plunger pump, frequent filter blockage and serious scaling are encountered, which affect the production efficiency and safety. Through in-depth analysis of scaling causes, including crude oil minerals, microbial activities and process flows, and assessment of deficiencies in existing processes such as filtration efficiency and chemical use. A range of solutions were adopted, including improved filter design to reduce blockage, adjusting process parameters to reduce the risk of scaling, and the introduction of new chemical additives to inhibit scale formation. At the same time, the equipment maintenance and cleaning are strengthened to ensure the clean and good operation of the key components. These measures significantly improve the stability of the plunger pump, effectively control the blockage and scaling problems, improve the efficiency and safety of the dewatering system, and provide a solid guarantee for the continuous production of the oil field.

Key words： dewatering system; plunger pump; sludge; scaling; scale inhibitor

一、引言

在油田生产过程中，结垢问题是一个普遍且复杂的现象，它不仅影响油田的产量和效率，还可能导致设备故障，增加维护成本。随着油田开发的深入，尤其是在一些老油田，结垢问题变得更加突出。当前，全球油田行业正面临着提高采收率、延长油田寿命的挑战，而结垢问题的解决对于实现这些目标至关重要。

在行业现状方面，油田运营商越来越重视结垢问题的预防和治理。他们投入大量资源进行研究，以更好地理解结垢的成因和机理。这包括对井液中矿物质成分的分析、沉积物的物理化学特性研究，以及垢层与设备材料相互作用的研究。通过这些研究，行业已经开发出了一系列化学药剂和物理方法来应对结垢问题。

化学药剂方面，除了传统的酸化剂和分散剂，新型的生物酶制剂和纳米技术也被应用于结垢的防治。这些新型药剂旨在更安全、更有效地清除垢层，同时减少对环境的影响。物理清洗技术也在不断进步，如激光清洗、超声波清洗等，这些技术提供了更

精细的清洗能力，减少了对设备的损害。

在设备设计方面，油田设备制造商正在开发更耐腐蚀、更易于清洁的泵和管道系统。这些设备通常采用特殊涂层或合金材料，以提高其抗结垢性能。同时，智能化监测系统也被引入油田管理中，这些系统可以实时监测设备的运行状态，及时发现结垢迹象，并自动调整操作参数，以预防结垢的发生。

然而，尽管行业在结垢防治方面取得了一定的进展，但结垢问题仍然是一个难以完全解决的挑战。这主要是因为油田环境的复杂性，以及不同油田地质条件的差异。因此，油田运营商需要根据具体情况，制定个性化的结垢防治策略。

二、柱塞泵结垢的机理

油田柱塞泵结垢的机理主要涉及物理和化学过程，这些过程受到多种因素的影响，包括流体成分、温度、压力、流速等。以下是油田柱塞泵结垢机理的主要方面^[1]：

* 郭云冠（1980—），男，籍贯：广东湛江，民族：汉族，职称：工程师，学历：本科，研究方向：海洋油气开采与工艺处理

1. 流体成分：油田流体中含有各种溶解的矿物质，如钙、镁、钡、硫酸盐等。当这些矿物质的浓度超过其在特定温度和压力下的溶解度时，它们会从流体中沉淀出来，形成垢层。

2. 温度和压力变化：油田流体在从地下抽取到地面的过程中，会经历温度和压力的变化。这些变化可能超过某些矿物质的溶解度，导致沉淀和结垢。

3. 流速变化：在柱塞泵的进出口处，流速的变化可能导致流体中悬浮的固体颗粒沉积。在泵的低压区域，流速减慢，使得颗粒有更多的机会沉积在泵的内部表面。

4. 流体混合：原油与其他流体（如水、酸性液体等）混合时，可能会发生化学反应，生成不溶于油的沉淀物，这些沉淀物会附着在泵的内部表面，形成垢层。

5. 腐蚀和沉积物：油田流体中的腐蚀性物质（如硫化氢、二氧化碳等）可能会腐蚀泵的材料，导致金属颗粒脱落并沉积在泵内部，形成垢层。

6. 微生物活动：油田水中的微生物（如硫酸盐还原菌）可能会产生硫化物，这些硫化物与金属离子反应，形成硫化物垢。

7. 物理沉积：油田流体中的固体颗粒（如砂粒、泥沙等）在泵的内部流动时，可能会因为物理作用而沉积在泵的表面。

总之，油田柱塞泵出口容易结垢是由于输送流体中的流体成分、温度和压力变化、流速变化、流体混合、腐蚀和沉积物、微生物活动和物理沉积等因素共同作用所致。这些因素会促使杂质在柱塞杆、泵出口处沉积和结晶，形成结垢现象。

三、柱塞泵结垢的影响

油田柱塞泵作为油田生产中的关键设备，其正常运行对油田的稳定产出至关重要。然而，结垢现象普遍存在于油田的开采过程中，它不仅影响泵的性能，还可能对整个油田的生产效率和经济效益产生深远的影响。

首先，结垢会显著降低柱塞泵的效率。泵内部的结垢物质会堵塞出口或内部通道，阻碍流体的正常流动。这种阻碍作用导致泵的排量减小，扬程降低，从而直接影响油田的产能和生产效果。泵效率的下降意味着在相同的工作条件下，泵无法达到设计的生产能力，这可能导致油田产量下降，影响油田的整体经济效益。

其次，为了克服结垢带来的阻力，泵需要消耗更多的能量来维持正常的流量和压力。这不仅增加了泵的能耗，还可能导致设备过载，长期过载运行会加速泵的磨损，缩短其使用寿命。此外，增加的运行压力还可能对泵的密封系统造成压力，增加泄漏的风险，进一步影响泵的可靠性。

结垢还会导致泵的维修和更换频率增加。结垢物质对泵内部的零部件和密封件造成磨损，尤其是在高压和高温的工作环境下，这种磨损更为严重。频繁的维修不仅增加了维护成本，还可能导致生产中断，影响油田的正常运营。在某些情况下，为了彻底解决问题，可能需要更换整个泵，这将带来更高的成本。

此外，结垢还可能影响油品的质量。结垢物质可能会脱落，

随着流体进入下游的管道和设备，导致油品中夹杂有杂质和颗粒物。这些杂质不仅影响油品的商业价值，还可能对下游的炼油和化工过程造成干扰，增加后续处理的难度和成本。

四、油泥对结垢造成的影响

在油田的生产过程中，输送流体中的油泥是一个不容忽视的问题^[2]。油泥主要由颗粒物、粘土、腐蚀产物、微生物代谢物以及其他有机物质组成，它们在泵体内部的沉积和堵塞会加速结垢的形成和积累。油泥的粘性和黏附性使其更容易附着在泵体内部的壁面上，这种附着作用不仅阻碍了流体的正常流动，还会导致泵的出口流量和扬程降低，严重时甚至可能造成设备堵塞和停机。

油泥中的颗粒物在流动过程中与泵体内部的金属零件发生摩擦，这种摩擦会加速泵的磨损。长期运行下，磨损不仅会导致泵的性能下降，还会削弱密封性能，从而增加维护和更换的成本。此外，油泥中的颗粒物在流体中随泵流动，可能会使油品中夹杂有杂质和颗粒物，这不仅影响油品的商业价值，还可能对下游的炼油和化工过程造成干扰，增加后续处理的难度和成本。

由于油泥增加了流体的黏性和阻力，泵在输送含油泥的流体时需要更大的力和压力来克服油泥对泵的阻碍。这不仅会增加泵的能耗和运行压力，降低泵的效率，还可能导致泵的过载运行，增加故障发生的风险。长期过载运行不仅会缩短泵的使用寿命，还可能引发安全事故，对油田的生产安全构成威胁。

为了应对油泥对柱塞泵结垢的影响，油田运营商需要采取一系列预防和控制措施。首先，可以在泵的入口处增加沉积物的过滤装置，以减少进入泵体的颗粒物。这种过滤装置可以有效地拦截大颗粒的固体杂质，减少油泥在泵体内的积累。

其次，定期清洗和维护泵是控制结垢的关键。通过定期的清洗，可以去除泵体内部的油泥和结垢，减少堵塞的风险。同时，定期的维护可以检查泵的磨损情况，及时更换磨损严重的部件，保持泵的良好运行状态。

此外，还可以通过优化泵的操作参数来减少油泥对泵的影响。例如，调整泵的运行速度和压力，以适应含油泥流体的特性，减少油泥在泵体内的沉积。同时，可以通过改进泵的设计，如采用更耐磨的材料和更合理的内部结构，来提高泵对油泥的抵抗能力。

五、阻垢剂的作用机理

阻垢剂的反应机理能在常温 and 很宽的 PH 值条件范围内，与生产水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Ba^{2+} 等离子进行化学反应，并在短时间内迅速生成不溶性、低含水量、容易过滤去除的絮状沉淀，从而达到从水中去除重金属离子^[3]。

阻垢剂主要包括一些天然分散剂、膦酸、膦羧酸及膦磺酸和高分子聚合物等^[4]，油田目前使用的绝大多数阻垢分散剂是高分子聚合物。它们能分散水中的难溶性无机盐、阻止或干扰难溶无机盐的沉积、结垢。阻垢剂作用概括起来主要是以下四个方面：

1. 螯合增溶

阻垢剂在水中溶解后会发生电离现象，这样会有带负电性的分子链产生，这种分子链可以与水中的钙离子进行还原作用，生成可以溶解在水中的螯合物或者是络合物，从将水垢溶解下来起到去除水垢的作用。

2. 凝聚分散

阻垢剂在水中解离时产生的阴离子与碳酸钙微晶的碰撞，发生物理和化学吸附凝聚现象，使微晶双电层的表面带负电，当吸附的产物与其它抑垢剂分子接触时，吸附的晶体转移并且晶粒均匀分散，分散的结果是防止水垢形成颗粒之间的相互接触和凝结，从而防止水垢生长的作用。

3. 静电斥力

阻垢剂通过其分子官能团在微晶上占据了一定的地位破坏了生长，减慢了晶体的生长速度，增加了晶体之间的斥力，阻止它们聚合，从而起到阻垢作用。

4. 晶体畸变

当水处理系统的硬度、碱度较高时，所投入的阻垢剂不足以完全阻止它们析出的时候，则其被析出。如果没有分散阻垢剂的存在，垢的生长将服从晶体生长的一般规律^[5]，所形成的垢坚固地附着在热交换器表面上；如果有足量的分散阻垢剂的存在，则被吸附、包围，这阻止了成垢粒子在其规则的晶格点阵上排列，从而使所生成的污垢松软、易被水流的冲刷而带走，最后达到了阻垢作用^[8]。

六、柱塞泵结垢的防治方法

针对油田柱塞泵结垢问题，可以采取一系列综合性防治措施，以确保泵的正常运行和延长其使用寿命^[6]。以下是一些有效的防治策略：

1. 定期清洗与维护：建立定期清洗计划，对柱塞泵进行彻底的内部清洁，以去除积累的垢层^[7]。这不仅有助于及时发现结垢问题，还能防止垢层的进一步积累。同时，定期维护可以确保泵的各个部件正常工作，减少因结垢导致的性能下降。

2. 调整泵出口压力：适当增加泵出口的压力，可以提高流体的流速，从而减少颗粒物质在泵内部的沉积。这种方法有助于减少结垢物质的附着，但需注意不要超过泵的设计压力，以免造成

设备损坏。

3. 控制流体温度：通过精确控制流体的温度，可以避免因温度波动导致的结垢物质沉淀。温度的稳定有助于维持流体的化学稳定性，减少结垢的可能性。

4. 应用阻垢剂：在泵的吸入口添加专用的阻垢剂，可以有效抑制结垢物质的形成。阻垢剂能够与流体中的矿物质反应，改变其溶解度，从而减少沉积和结垢^[9]。

5. 采用超声波清洗技术：超声波清洗利用高频声波产生的空化效应，能够深入泵体内部，有效破碎和去除结垢。这种方法清洁效率高，对设备损伤小，适用于难以触及的区域。

6. 优化工艺参数：通过调整油田生产的工艺参数，如流速、温度、压力等，可以减少结垢物质的生成。例如，通过调整泵的运行参数，可以避免在泵内部产生低压区，这些区域通常是结垢的高发区。

7. 使用高效过滤系统：在泵的入口处安装高效的过滤系统，可以拦截固体颗粒，减少这些颗粒在泵内部的沉积。这有助于保持流体的清洁，降低结垢的风险。

8. 材料选择与表面处理：选择抗腐蚀和抗结垢的材料来制造泵的部件，或者对泵的内部表面进行特殊处理，如涂层或硬化，以提高其抗结垢性能^[9]。

9. 监测与预警系统：安装结垢监测设备，实时监控泵的运行状态，一旦发现结垢迹象，立即进行处理。这样可以避免结垢问题恶化，减少对生产的影响^[10]。

通过上述措施的综合应用，可以有效地控制油田柱塞泵的结垢问题，提高泵的运行效率，降低维护成本，确保油田生产的连续性和稳定性。

七、结语

柱塞泵作为油田脱水系统的重要附属设备，承担着脱水系统回流到闭排罐的污油的外输任务，其重要性不言而喻。柱塞泵运行不稳定直接威胁着脱水系统的投用，若柱塞泵故障引发脱水系统瘫痪，势必需要限制油井的产出以避免海管超压。经过上述措施和改造的实施，实现了油田柱塞泵的的稳定运行。给海上油田脱水系统柱塞泵的同类问题的解决提供了思路，值得借鉴。

参考文献：

- [1] 陈远谋. 涪西南油田结垢机理及除垢工艺研究 [D]. 西南石油大学, 2015.
- [2] 陈振仁. 浅海输油管道堵塞油泥柱力学分析及解堵工艺研究 [D]. 东北石油大学, 2019.
- [3] 张巧玲, 赖川. 阻垢剂作用机理研究进展 [J]. 四川文理学院学报, 2020, 30(02): 18-23.
- [4] 王玉江, 方洪波, 姚明修. 碳酸钙阻垢剂研究进展及阻垢作用机理 [J]. 应用化工, 2021, 50(12): 3430-3435. DOI: 10.16581/j.cnki.issn1671-3206.2021.12.017.
- [5] 张颖, 赵璐, 程艳等. 海上某油田 FPSO 工艺系统内结垢成因初探 [J]. 石油化工安全环保技术, 2022, 38(02): 18-21+44+5-6.
- [6] 周军, 李鹤, 闫明明等. 油田注水往复泵泵阀失效及改进措施 [J]. 设备管理与维修, 2022, No.532(23): 83-84. DOI: 10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2022.12.34.
- [7] 海上平台升降液压缸故障与技术参数优化 [J]. 高常军; 李预宾; 陈伟; 顾志超. 海洋石油, 2022.
- [8] 聚合物阻垢机理的分子动力学模拟研究 [J]. 王世燕; 张军; 卢贵武. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2007(05).
- [9] 水溶性聚合物与方解石晶体相互作用的 MD 模拟 [J]. 张曙光, 石文艳, 雷武, 夏明珠, 王风云. 物理化学学报, 2005(11).
- [10] 聚天冬氨酸对 CaCO₃ 的阻垢作用及其分子动力学模拟 [J]. 韶晖; 周胤; 王雅; 冷一欣; 钟璟. 石油学报 (石油加工), 2015(05).