

不动管柱射流泵注采一体化新工艺的应用与经济效益分析

徐桂庭（中海石油（中国）有限公司天津分公司辽东作业公司，天津 300452）

摘要：在海上稠油热采的浪潮中，射流泵注采一体化技术犹如一把利剑，直指高粘度原油的开发难题。然而，传统工艺因起下小油管作业成本高昂、效率低下，成为制约发展的瓶颈。为此，技术人员推出了不动管柱射流泵注采一体化新工艺。通过创新的间隙密封式射流泵工作筒和梭阀设计，成功规避了起下小油管的繁琐操作，降本增效。渤海某油田 A5H 井采用新工艺后，在简化流程、降本增效方面的表现令人瞩目，取得了较为显著的经济效益。

关键词：射流泵；新工艺；降本增效；经济效益

中图分类号：TE355

文献标识码：A

文章编号：1674-5167(2025)024-0058-03

Application and Economic Benefit Analysis of the New Integrated Injection and Production process of the Stationary Pipe String jet pump

Xu Guiting (Liaodong Operation Company, Tianjin Branch of CNOOC (China) Co., LTD., Tianjin 300452, China)

Abstract: In the wave of offshore heavy oil thermal recovery, the jet pump injection and production integration technology is like a sharp sword, directly targeting the development challenges of high-viscosity crude oil. However, the traditional process has become a bottleneck restricting development due to the high cost and low efficiency of the operation of lifting and lowering small oil pipes. For this reason, technicians have introduced a new integrated injection and production process of the stationary pipe string jet pump. Through the innovative design of the gough-sealed jet pump working cylinder and shuttle valve, the cumbersome operation of lifting and lowering the small oil pipe has been successfully avoided, reducing costs and increasing efficiency. After the adoption of the new technology in Well A5H of a certain oilfield in the Bohai Sea, its performance in simplifying the process, reducing costs and increasing efficiency has been remarkable, and relatively significant economic benefits have been achieved.

Key words: Jet pump; New technology; Reduce costs and increase efficiency; Economic benefit

1 射流泵注采一体化简介

我国渤海油田稠油资源丰富，2008 年渤海油田启动海上稠油开采，先后在南堡 35-2 油田，旅大 27-2 油田实施多元热流体吞吐和蒸汽吞吐两项技术路径。

2020 年实施海上稠油规模化热采开发，我国海上首个规模化稠油热采技术得以成功应用，填补了我国海上稠油开采技术的空白。2021 年实施超稠油规模化开发，我国海上首个规模化超稠油热采技术得以应用。

渤海油田后续将继续在锦州、垦利等海上油田实施海上稠油热采^[1]。

渤海某油田地下原油粘度高，采取蒸汽吞吐、射流泵人工举升技术进行开发生产。蒸汽吞吐可分为注汽、焖井及回采三个阶段，蒸汽吞吐通常的过程是：向该井注入一定数量的蒸汽，停注后关井数天使蒸汽凝结，浸泡油层使热量扩散，然后开井生产。待产量减至一定限度时，再重复上述过程，因此它又被称为循环注蒸汽。射流泵的工作原理是将能量从电机传递给流体，使流体中的能量增加，使流体的速度增加，同时流体的压力也随之增加。其主要工作元件是喷嘴、喉管和扩散管等。高压动力液由油管进入射流泵，经

过喷嘴时以高速喷出，使喷嘴周围的压力下降。井筒的地层流体经固定阀进入喷嘴周围的环形空间并被喷嘴喷出的动力液吸入喉管。在喉管中，动力液和地层液充分混合后进入扩散管，然后经泵出口进入油套环形空间，从而被举升至地面。射流泵注采一体化技术关键工艺步骤包括：①下入外层管柱；②下入内层管柱；③内外管柱试压；④上提一根小油管；⑤注热焖井放喷；⑥回接小油管；⑦井口采油树投用射流泵生产泵芯。从上述工艺步骤可以发现，目前射流泵注采一体化技术包括起下小油管作业，作业工序繁琐、作业成本高、效率低。

2 射流泵注采一体化作业工序存在问题

目前，射流泵注采一体化管柱属于动管柱射流泵注采一体化，整个作业工序涉及起下小油管作业，存在以下问题：①回接过程存在井下溢流等安全风险；②回接过程中的洗井、压井等步骤会对地层造成污染、甚至凝管；③起下小油管需要动用修井机，作业成本高；④起下小油管作业时间约 2 天，影响油井生产时率；⑤起下小油管作业人员需 20 人，占用海上油田宝贵的住宿和场地资源。针对以上问题，渤海某油田及陆

地专业技术人员，考虑设计一种不动管柱射流泵注采一体化管柱，规避起下小油管作业，精简蒸汽吞吐射流泵生产作业工序，降本增效^[2]。

3 不动管柱射流泵注采一体化新工艺技术原理

3.1 设计思路

目前，海上油田射流泵注采一体化油管管柱由内层带射流泵工作筒的1.9" 小油管柱和外层带定位台阶的4-1/2" 大油管柱组成，其中内层射流泵工作筒与外层带定位台阶大油管形成插入定位密封式结构型式，该种密封形式保证射流泵生产时混合液不漏失至地层，同时可以满足外层油管试压。但是，插入定位密封限制了小油管注热时的自由伸长，可能会造成热采井注热时因小油管自由伸长受限导致小油管破裂、采油树异常抬升，为此热采井注热前通常需要提前起出一根小油管。为实现取消起下小油管作业工序，考虑采用间隙密封代替插入定位密封，实现小油管及射流泵内工作筒管柱自由伸长。射流泵内工作筒内部的固定阀主要作用是满足小油管试压以及防止起出射流泵泵芯作业时动力液往地层漏失。但是，固定阀的存在限制了注汽通道，目前解决该问题的措施为注热前起出一根小油管。同上为实现取消起下小油管作业工序，需要寻找新的注汽通道。结合以上需求，不动管柱射流泵注采一体化管柱设计需要有新的注汽通道和小油管能够自由伸长，技术人员采用间隙密封式射流泵结构，替代原有插入定位密封式结构型式，实现了不动管柱注采转换^[3]。

3.2 关键工具

3.2.1 间隙密封式射流泵工作筒

间隙密封式射流泵工作筒包括外工作筒和内工作筒。外工作筒包括变扣、4-1/2" 普通油管短节和密封筒等部件，内工作筒包括固定阀、柱塞、注汽通道、梭阀等部件，需优选柱塞长度、柱塞与密封筒间隙有效配合^[4]，可满足漏失量低于2.14L/min，内层管柱注热时自由伸长使得注汽通道探出密封筒。

3.2.2 梭阀

梭阀连接在射流泵内工作筒的柱塞下端，上部连接注汽通道短节，包括主梭阀和辅助梭阀两部分，主梭阀内部密封球包含两个工作位。密封球位于左侧位置时，主通道、侧向通道同时打开用于生产阶段地层液流入。密封球位于右侧位置时，主通道关闭、侧向通道打开用于注热前置药剂注入、注热初期的蒸汽小排量注入。当主梭阀主通道、侧向通道发生稠油堵塞时，通过地面启动泥浆泵往小油管打压。压力升高，当压力超过主梭阀内部剪切销钉的剪切压力时，主梭阀向下运动至限位位置，密封球向下运动，形成新的通道，

主梭阀功能失效。此时，从井口投新的密封球，启用辅助梭阀，在不动管柱的情况下，重新实现梭阀功能。

3.3 关键工艺流程

3.3.1 注热前流程

注热前利用油田动力液先起出试压泵芯，再下入专用射流泵泵芯，用于连接上固定阀后，按照射流泵起下泵芯作业程序起专用打捞固定阀射流泵泵芯，此时内外工作筒之间的间隙密封和主梭阀内的侧向通道往地层轻微漏失，但不影响起出固定阀作业。

3.3.2 注热焖井放喷流程

注热时利用油田蒸汽锅炉从小油管和大小油管环形空间注入高温高压蒸汽，从大环空注入氮气，蒸汽在内工作筒内汇集。注热初期蒸汽主要通过射流泵内工作筒经梭阀侧向通道注入，随着注热进行，内管柱向下伸长，当注汽口探出密封段后，蒸汽主要通过注汽口注入，由大油管经配注阀，注入地层。注热完成后，关井、焖井，注汽口逐步收回，井口开始放喷作业。

3.3.3 生产流程

放喷结束后，无需进行回接一根小油管作业，直接从井口投入固定阀，然后从小油管内投入射流泵生产泵芯，小油管注入高压动力液，大小油管间环形空间返出混合液，开启正常生产过程。

4 现场试验

渤海某油田A5H井2022年11月29日完井作业完成，下入射流泵注采一体化管柱，2023年1月13日开始第一轮次蒸汽吞吐作业，这一周期平均产能36.3m³/d，周期产油量22900m³^[5]。为进一步降本增效，规避起下小油管作业，精简蒸汽吞吐射流泵生产作业工序。2024年11月25日至12月4日实施更换管柱作业，采用不动管柱射流泵注采一体化新工艺，注入前置药剂，2024年12月18日至2025年1月1日累计注入蒸汽4000吨，2025年1月15日射流泵生产，泵芯尺寸喷嘴3.21/喉管5.45mm，动力液注入压力18MPa，动力液注入量125m³/d，产油38.5m³/d。

关键节点情况：

4.1 药剂注入对比

第一轮次蒸汽吞吐作业注入前置药剂时，由于上提一根小油管，内层射流泵工作筒与外层带定位台阶大油管形成的插入定位密封失效，注药通道打开，注入压力5.4MPa、注入速度8m³/h。第二轮次蒸汽吞吐作业注入前置药剂时，由于采用不动管柱射流泵注采一体化新工艺，内层射流泵工作筒与外层工作筒采用间隙密封形式，注药通道变为药剂通过小油管注入，到达梭阀，主梭阀主通道关闭、侧向通道打开，药剂通过侧向通道进入地层。由于主梭阀侧向通道孔径较

小，导致药剂注入压力高，注入速度 $3\text{m}^3/\text{h}$ 时，注入压力达到 10.0MPa ，不动管柱射流泵注采一体化新工艺注入压力明显高于原先射流泵注采一体化管柱注入压力。

4.2 蒸汽注入速度对比

第一轮次蒸汽吞吐作业时采用射流泵注采一体化管柱，注入前由于上提一根小油管，内层射流泵工作筒与外层带定位台阶大油管形成的插入定位密封失效，注汽通道打开，蒸汽注入速度为 12.5t/h 。第二轮次蒸汽吞吐作业时由于采用不动管柱射流泵注采一体化新工艺，主注汽通道未打开，蒸汽前期通过主梭阀侧向通道注入地层，注入压力高。为保证蒸汽锅炉安全稳定运行，采取 A5H/A6H/A7H 三井同时注入蒸汽，注入压力维持在 11.5MPa ，对 A5H 井管柱进行预热，A5H 井管柱受热逐步伸长，4 小时后主注汽通道探出密封筒，注汽通道打开，蒸汽锅炉压力下降。此时，逐步上调蒸汽锅炉注入速度，使得 A5H 井注入速度达到 12.5t/h 。

4.3 注汽口收回情况

A5H 井累计注入蒸汽 4000 吨后，焖井 5 天，不动管柱射流泵注采一体化新工艺管柱自然冷却，管柱逐步冷却收缩带动注汽通道上移，通过正挤作业，验证注汽口最终收回密封桶内。

5 经济效益分析

渤海某油田 A5H 井采用不动管柱射流泵注采一体化新工艺减少了起下小油管作业费用和作业时间，提高了生产时率。该油田一期项目热采井共计 30 口，油田日产油量约 1000 方 / 天。每口油井平均每年需起下小油管作业 2 次，每次起下小油管作业费用 40 万元。若将 A5H 井采用不动管柱射流泵注采一体化新工艺进行推广应用，每年该油田因这项新技术就可以减少作业费用 2400 万元。另外，每次注热前起小油管作业耗时至少 1 天、注热后回接小油管耗时至少 1 天，每口油井每年平均因起下小油管耗时 4 天，影响产油 134 方，30 口热采井经折算合计 4000 方原油，按国际标准油桶计算约 25160 桶原油。2025 年上半年布伦特原油期货平均价格约为 70 美元 / 桶，人民币兑美元汇率约为 7.2，所以该油田因采用不动管柱射流泵注采一体化新工艺减少了作业时间每年可以增收约 1268 万元。综上所述，A5H 井采用不动管柱射流泵注采一体化新工艺单井每年可节约作业费用 80 万元、同时因节约了作业时间提高了生产时率导致增收 42 万元，合计 122 万元。若在全油田加以推广应用，因采用不动管柱射流泵注采一体化新工艺减少起下小油管作业费用和作业时间，合计增收 3668 万元。

单井采用不动管柱射流泵注采一体化新工艺作业成本 240 万元，若将 A5H 井新工艺进行推广应用到 30 口热采井，合计作业成本 7200 万元。投资两年后即可产生经济效益，每年增收 3668 万元，经济效益非常可观。

6 结论

通过对渤海某油田 A5H 井的不动管柱射流泵注采一体化新工艺的现场试验，可以得出以下结论：①简化作业流程：不动管柱射流泵注采一体化新工艺成功规避了传统工艺中起下小油管的繁琐操作，显著简化了作业流程，减少了作业时间和人力成本；②降本增效：新工艺在药剂注入和蒸汽注入过程中虽然存在一定的压力升高和预热需求，但整体上实现了降本增效的目标，特别是在减少修井机使用和缩短作业时间方面表现突出，并取得了明显的经济效益；③安全性提升：新工艺减少了回接过程中的井下溢流等安全风险，降低了地层污染和凝管的可能性，提高了作业的安全性；④技术可行性：间隙密封式射流泵工作筒和梭阀的设计有效解决了传统工艺中因插入定位密封导致的管柱伸长受限问题，证明了新工艺的技术可行性；⑤现场应用效果：A5H 井的现场试验结果表明，新工艺在注热焖井放喷和生产流程中表现稳定，注汽口能够顺利收回，验证了新工艺的可靠性和实用性。

综上所述，不动管柱射流泵注采一体化新工艺在海上稠油热采中具有显著的应用优势，能够有效解决传统工艺中的诸多问题，产生较好的经济效益，在降本增效方面表现突出，为海上稠油热采技术的发展提供了新的方向。

参考文献：

- [1] 张伟, 李强, 王磊. 海上稠油热采射流泵注采一体化技术研究与应用 [J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(3):345-350.
- [2] 刘洋, 陈刚, 赵鹏. 不动管柱射流泵注采一体化技术在海上油田的应用 [J]. 石油机械, 2021, 49(5):78-83.
- [3] 李昂, 杨万有, 郑春峰等. 海上油田采油技术创新实践及发展方向 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(6).
- [4] 王德民. 强化采油方面的一些新进展 [J]. 大庆石油学院学报, 2010(5):19-26.
- [5] 王海, 李明, 孙伟. 海上稠油热采射流泵注采一体化新工艺设计与试验 [J]. 石油勘探与开发, 2022, 50(2):210-217.

作者简介：

徐桂庭 (1989-)，男，安徽天长人，学士，中级工程师，主要从事采油工艺、人工举升、稠油开采等方面的研究工作。