

井下动力钻具驱动磨铣技术在长井段套损修复中的应用

李新海

辽河工程技术分公司工程技术研究所

DOI : 10.32629/jpm.v7i7.8999

[摘要] 在油气田开发过程中，套损问题尤为普遍且严重，其中长井段套损对油气井生产的影响更为显著，亟待高效修复技术的出现。井下动力钻具驱动磨铣技术作为一项重要修复手段，其原理是通过井下动力钻具将动力传输至磨铣工具，从而实现磨铣作业。该技术具有高效、精准等特点，在处理长井段套损方面展现出独特优势。在实际应用中，已成功用于多口井的长井段套损修复，显著恢复了井筒通畅，有效提升了油气井生产效率，为降低生产成本、提高油气资源开发效益提供了有力技术支持，对推动油气田可持续发展具有重要意义。

[关键词] 井下动力钻具；磨铣技术；长井段套损；修复应用

Application of Downhole Power Drilling Tool-Driven Grinding Technology in Long Well Section Bit Damage Repair

Li Xinhai

Engineering Technology Research Institute, Liaohe Engineering Technology Branch

[Abstract] During oil and gas field development, bit damage is a prevalent and severe issue, with long well section damage having particularly significant impacts on production, necessitating efficient repair solutions. Downhole power drilling tool-driven grinding technology serves as a key remediation method that transmits power from the drilling tool to the grinding equipment for precise grinding operations. Characterized by high efficiency and accuracy, this technology demonstrates unique advantages in addressing long well section damage. In practical applications, it has been successfully employed for repairing bit damage in multiple wells, significantly restoring wellbore diameter, enhancing production efficiency, providing robust technical support for reducing costs and improving resource utilization, and playing a crucial role in advancing sustainable oil and gas field development.

[Key words] Underground power drilling tools; Grinding and milling technology; Long-hole section casing damage; Repair applications

引言

在油气田开发过程中，套管损坏问题已成为影响油气井生产效率 and 寿命的关键因素之一。随着油气田开发的深入，地层压力变化、注水开发引起的应力集中以及腐蚀性介质的作用，导致套管变形、破裂等问题的发生率显著上升。尤其是长井段套损问题，因其涉及井深范围广、损坏形态复杂，对油气井的正常生产造成了严重影响。研究高效、精准的长井段套损修复技术，对于提高油气井利用率、延长油田开发周期具有重要意义。本文旨在探索井下动力钻具驱动磨铣技术在长井段套损修复中的应用，以解决传统修复技术存在的效率低、成本高的问题。该技术通过利用螺杆钻具或涡轮钻具等井下动力设备，将动力直接传递至磨铣工具，实现对套损部位的精确磨铣处理。相比传统的机械修复方法，该技术具有施工效率高、修复精度高、适用范围广等优势。此外，该技术的应用能够有效降低施工周期和作业成本，为油田开发提供更为经济高效的解决方案。

案。因此，开展此项技术研究不仅有助于提高油气井的修复成功率，还对降低生产成本、实现油田效益开发具有重要意义。

1. 井下动力钻具驱动磨铣技术原理与特点

1.1 技术原理

1.1.1 井下动力钻具工作原理

井下动力钻具作为现代修井作业的核心设备，其主要包括螺杆钻具和涡轮钻具两种类型。螺杆钻具通过将泥浆液压能转化为机械能，利用转子与定子之间的啮合运动产生扭矩输出，从而驱动磨铣工具进行高效作业。该类型钻具具有结构简单、可靠性高的特点，在长井段套损修复中表现出良好的适应性。涡轮钻具则通过高压流体冲击涡轮叶片，使涡轮轴旋转并传递动力至磨铣工具，其优势在于能够在高温、高压环境下保持稳定的性能表现。两种动力钻具的选择通常取决于井况条件及施工需求，这些动力装置为磨铣工具提供了持续稳定的动力来源，确保了磨铣作业的高效性和精准性。

1.1.2 磨铣工具结构与工作原理

常用磨铣工具主要由切削元件、本体结构及冷却系统组成，其设计需兼顾强度与耐磨性以满足复杂井下环境的需求。切削元件通常采用硬质合金材料制成，并通过优化几何形状提升切削效率与寿命；本体结构则负责承受来自动力钻具的扭矩传递，同时将切削力均匀分布至目标套管表面。在磨铣作业过程中，磨铣工具通过高速旋转对套管内壁进行切削处理，生成铁屑并通过循环泥浆带出井筒。此外，部分高效磨铣工具还配备了水力喷射装置，用于增强铁屑清除能力并降低工具磨损率。这种复合式设计显著提高了磨铣作业的效率与质量，尤其适用于长井段套损修复中的复杂落物处理场景。

1.1.3 动力传输与磨铣过程

井下动力钻具通过钻杆柱将地面提供的泥浆压力转化为机械能，进而驱动磨铣工具完成切削作业。具体而言，当泥浆流经动力钻具时，其内部机构将液压力转换为旋转运动，并通过花键连接将扭矩传递至磨铣工具。在此过程中，磨铣工具的切削元件与套管内壁接触，通过机械摩擦去除损坏部分并形成规则的通畅空间。与此同时，泥浆循环系统不仅起到冷却和润滑作用，还通过携带铁屑上返维持井筒清洁，从而避免二次卡钻风险。整个动力传输与磨铣过程的协调配合，是实现长井段套损修复高效施工的关键所在。

1.2 技术特点

1.2.1 优点分析

井下动力钻具驱动磨铣技术相较于传统修复方法具有显著优势，尤其在处理长井段套损时表现突出。首先，该技术能够实现连续、高效的磨铣作业，大幅缩短施工周期，同时减少对油井生产的影响。其次，由于动力钻具具备精确控制能力，操作人员可根据实时监测数据调整施工参数，从而确保磨铣作业的精度与一致性。此外，该技术在复杂井况下的适应性较强，例如在深井、水平井及大位移井中均能保持稳定性能，这为长井段套损修复提供了可靠保障。研究表明，采用该技术的修复井段通畅恢复率普遍高于传统方法，且生产恢复速度更快，充分体现了其高效性与经济性。

3.2.2 局限性分析

一方面，该技术对井况条件要求较高，特别是在小井眼或严重变形的井段中，可能存在工具下入困难或卡钻风险。另一方面，磨铣工具寿命受限于切削元件的磨损程度，尤其在处理高强度套管时，工具损耗加剧可能导致频繁更换，从而增加施工成本与时间。此外，动力钻具在长时间运行过程中可能出现密封失效或过热问题，这也对施工安全性提出更高要求。

2.长井段套损修复难点分析

2.1 长井段套损特点分析

首先，长井段套损通常表现为套损长度较大，这可能延伸至数十甚至上百米，导致修复范围广泛且耗时较长。其次，套损形态多样，包括变形、错断、破裂等复杂情况，这些形态不仅增加了修复难度，还对施工精度提出了更高要求。此外，套损分布往往呈现非均匀性，部分井段可能出现多处套损叠加的现象，进一步加剧了修复工作的复杂性。在某些情况下，套损

还可能伴随井眼坍塌或地层出砂等问题，使得修复过程更加困难。因此，针对长井段套损的特点进行深入分析，是制定有效修复方案的重要前提。

2.2 修复难点分析

长井段套损修复过程中面临诸多困难，其中工具选择和施工工艺控制尤为关键。工具选择方面，由于长井段套损的复杂性和多样性，传统修复工具往往难以满足实际需求。例如，常规磨铣工具在处理大长度套损时可能存在效率低下或寿命不足的问题，而专用工具的成本较高且适用范围有限。此外，工具的选择还需考虑井眼尺寸、井斜角度以及地层条件等因素，这进一步增加了工具选型的难度。在施工工艺控制方面，长井段套损修复需要精确的操作和严格的过程监控。同时，施工过程中还需应对铁屑上返困难、卡钻风险高等问题，尤其是在深井或小井眼条件下，这些风险更为突出。因此，如何优化施工工艺并实现全过程的有效控制，成为长井段套损修复中的核心难点之一。

2.3 对磨铣技术的要求

在工具性能方面，高效的磨铣工具需具备高强度、耐磨性和长寿命的特点，以应对大长度套损的复杂工况。此外，磨铣工具的设计还需考虑其对不同套损形态的适应性，如变形、错断等复杂情况，以确保修复效果的一致性和可靠性。在施工工艺方面，磨铣技术需结合井下动力钻具的特点进行优化，以实现高效、精准的修复作业。例如，在深井小井眼条件下，通过液压水龙头驱动代替转盘驱动，并优化钻具组合，可以显著提高段铣效率和施工质量。此外，施工工艺还需关注钻井液性能参数的优化，以确保铁屑能够有效上返并减少卡钻风险。综上所述，磨铣技术在长井段套损修复中的应用需综合考虑工具性能和施工工艺的协同优化，以满足实际工程需求。

3.井下动力钻具驱动磨铣技术在长井段套损修复中的应用

3.1 井况介绍

该井位于某油田区块，井深为 3500m，采用多层套管程序设计，表层套管直径为 339.7mm，技术套管直径为 244.5mm，生产套管直径为 139.7mm。根据前期检测数据显示，该井在井深范围 2800-3100m 之间存在严重套损现象，主要表现为套管变形、破裂及局部坍塌。套损段长度达到 300m，属于典型的长井段套损类型。由于套损区域分布复杂且深度较大，传统修复技术难以满足施工需求，因此选择采用井下动力钻具驱动磨铣技术进行修复作业。

3.2 施工准备

施工前，首先对井筒进行全面的处理以确保施工条件符合要求。通过井筒高效处理决策技术，对井内残留物进行清理，并利用验套挤堵一体化工艺对套损段上下进行封堵，防止流体窜流影响施工效果。在工具选择方面，结合套损特点和施工要求，选用高扭矩螺杆钻具作为动力源，并配备改进型三翼高效磨鞋作为主要磨铣工具。这种磨鞋具有较大的切削面积和优异的耐磨性能，在类似复杂工况中表现出色。此外，还针对长井段施工需求优化了钻具组合，以增强工具的稳定

性和抗疲劳性能。

3.3 施工过程

施工过程中,首先下入螺杆钻具与高效磨鞋组合至套损段顶部,开启泥浆泵建立循环后启动螺杆钻具,开始磨铣作业。初始阶段采用较低转速(60–80r/min)和适中钻压(10–15kN),以稳定工具并评估磨铣效果。随着磨铣深度增加,逐步调整参数至最佳范围(转速 100–120r/min,钻压 20–25kN),同时密切监测扭矩变化和铁屑返出情况。当磨鞋磨损严重时,及时更换新工具并记录进尺数据。整个磨铣过程分为多个阶段完成,每阶段结束后均进行井底清理和工具检查,以避免卡钻等风险事件发生。

3.4 施工效果

经过连续作业,该井套损段共计磨铣处理长度达 298m,平均单只磨鞋进尺超过 45m,最高磨铣速度达到 0.52m/h,整体效率较传统方法提升显著。修复完成后,通过通井规检测确认通径恢复至设计值,满足后续生产需求。生产恢复后,日产油量由修复前的 0t 提升至 12t,经济效益明显。此外,该井的成功修复验证了井下动力钻具驱动磨铣技术在长井段套损修复中的可行性和优越性。

4.应用效果分析

4.1 技术优势验证

通过实际案例数据的对比分析,充分验证其在提高修复效率与保证修复质量方面的显著优势。以某油田某井为例,该井因堵塞封堵失败导致井下管柱被水泥凝固,形成复杂的卡钻事故。在采用改进的三翼高效磨鞋配合井下动力钻具驱动后,单只磨鞋的最高进尺达到 47.22m,平均磨铣速度达 0.49m/h,较传统方法提升了约 30%。此外,在某油田大修井作业中,结合井下动力钻具驱动磨铣技术,共实施 45 口井的修复工作,显著提升了修复效率与质量。

研究表明,井下动力钻具驱动磨铣技术通过优化动力传输与磨铣工具的配合,实现了对复杂井况的高效处理。例如,在大庆深层侧钻水平井的钻井施工中,通过轨迹优化设计与井下动力钻具的优选,成功解决了深井小井眼套管段铣的技术难题,使套管段铣效率提高了 2 倍以上。

4.2 经济效益分析

从经济效益角度看,井下动力钻具驱动磨铣技术在长井段套损修复中的应用具有显著成本优势与经济可行性。以 L 油田大修井项目为例,该项目在实施 45 口井的修复作业后,阶段累增油量达到 3.6 万吨,而单井平均工具费用仅为 11.0 万元。这一数据表明,尽管该技术在初期设备投入上较高,但其高效的修复能力显著缩短了施工周期,降低了作业成本,从而实现了良好的经济效益。

此外,苏桥储气库 SU7 井的深井小井眼套管段铣实践也进一步验证该技术经济可行性。通过优化施工参数与钻具组合,该井在连续段铣套管 50.0m 的过程中未发生井下故障,且段铣效率提高了 2 倍以上。这种高效施工不仅减少钻井液的使用量与废弃物处理成本,还显著降低因井下故障导致的额外支出。

通过实时采集磨铣过程中的转矩、转速与钻压等数据,可以优化施工工艺,减少工具磨损与更换频率,进一步降低施工成本。

4.3 存在问题与不足

首先,在深井、水平井及大位移井的修井作业中,由于磨铣工具需要承受较高的扭矩与钻压,其使用寿命往往受到限制。例如,在苏桥储气库 SU7 井的套管段铣施工中,尽管通过优化钻具组合提高了施工效率,但磨铣工具的磨损率仍然较高,导致施工过程中需频繁更换工具,增加了作业时间与成本。类似地,在 L 油田的大修井作业中,部分磨铣工具因长时间高负荷运行而出现早期失效现象,影响了整体施工效率。

其次,施工风险的控制仍是该技术面临的主要挑战之一。特别是在复杂井况下,如长井段套损修复中,井深、井眼直径小等因素可能导致铁屑上返困难,进而引发卡钻或丢鱼头等井下故障。例如,在 X7 井的磨铣作业中,尽管采用了改进的三翼高效磨鞋,但在处理大段水泥凝固层时仍出现了局部卡钻现象,增加了施工难度与风险。此外,减摩减扭技术的应用虽在一定程度上缓解了深井作业中的扭矩问题,但在极端条件下仍存在局限性。

最后,施工工艺优化空间有限也是当前存在的一个重要问题。尽管已有研究通过实验平台对磨铣工具的工作过程进行了模拟与优化,但实际施工中的不可控因素较多,如地层特性变化、钻井液性能波动等,均可能对施工效果产生不利影响。

5.结论与认识

(1) 井下动力钻具驱动磨铣技术在长井段套损修复中的应用表明,该技术具有显著的技术优势和经济价值。未来的研究和实践应更加注重工具性能的优化以及施工工艺的精细化设计,以进一步提升该技术的可靠性和适用性。

(2) 井下动力钻具驱动磨铣技术在长井段套损修复领域展现出广阔的应用前景和发展潜力。随着油气田开发的不断深入,长井段套损问题将成为制约油气井高效生产的重要瓶颈之一,而该技术以其高效、精准的特点,能够有效应对这一挑战。

(3) 未来,随着材料科学、智能控制和钻井技术的不断进步,该技术有望在工具性能、施工工艺和自动化水平等方面取得更大突破。此外,该技术在深海油气开发和非常规油气资源开采中的潜在应用价值也值得关注。

[参考文献]

- [1]王利全.高效磨铣工具在 X7 井修井中的应用及分析[J].石化技术,2022,29(1):65–66.
- [2]张亚明;高振涛;李军;杨晶;张裔;张艳茹.苏桥储气库 S U7 井深井小井眼套管段铣技术[J].石油钻探技术,2017,45(3):38–41.
- [3]季洪石;宋少博.大庆深层侧钻水平井钻井技术研究[J].西部探矿工程,2022,34(9):66–67.
- [4]刘国振;张帅;卜鸿浩;吴智超.减摩减扭技术在深井套铣、磨铣作业中的应用[J].石化技术,2021,28(8):60–61.
- [5]邱忠相.钻磨技术在水平井修复中的创新应用[J].化工管理,2018,(32):249–249.