

大修反循环套磨铣作业中泵排量与机械钻速的匹配关系研究

路学宽

辽河油田辽河工程技术分公司修井技术服务大队

DOI : 10.32629/jpm.v7i5.8923

[摘要] 反循环套磨铣技术作为大修作业中的关键环节，其效率直接影响整个修井作业效果。然而，当前大修反循环套磨铣作业中，泵排量与机械钻速之间匹配关系尚未明确，严重制约作业效率的提升，并可能增加作业成本及井下安全风险。因此，研究泵排量与机械钻速的匹配关系，对于优化修井作业参数、提高作业效率具有重要意义。本文通过理论分析与实例验证相结合的方法，深入探讨泵排量与机械钻速之间的关系，建立了泵排量与机械钻速的关系模型，并利用现场实际作业数据进行了验证。研究表明，存在一个最佳泵排量与机械钻速匹配范围，该范围内的参数组合能够显著提高作业效率并降低成本。这一发现为现场大修反循环套磨铣作业优化提供了重要的理论依据与实践指导。

[关键词] 大修作业；反循环套磨铣；泵排量；机械钻速；匹配关系

Research on the Matching Relationship Between Pump Displacement and Mechanical Drilling Speed in Major Overhaul Reverse Circulation casing grinding operations

Lu Xuekuan

Well Service Technical Team, Liaohe Engineering Technology Branch, Liaohe Oilfield

[Abstract] As a critical component of major overhaul operations, reverse circulation casing grinding technology directly impacts overall operational efficiency. However, the optimal matching relationship between pump displacement and mechanical drilling speed remains unclear in current practices, significantly hindering efficiency improvements while potentially increasing operational costs and downhole safety risks. Therefore, investigating this relationship is crucial for optimizing well maintenance parameters and enhancing operational effectiveness. Through a combination of theoretical analysis and case validation, this study thoroughly examines the correlation between pump displacement and mechanical drilling speed, establishes a corresponding relationship model, and validates it using field operational data. The findings identify an optimal parameter range where combined values substantially improve operational efficiency while reducing costs. These insights provide essential theoretical foundations and practical guidance for optimizing reverse circulation casing grinding operations during major overhauls.

[Key words] Major overhaul operations; Counter-circulation grinding and milling; Pump displacement; Mechanical drilling speed; Matching relationship

引言

在石油开采过程中，大修作业作为解决井下复杂问题、恢

复油井生产能力的关键技术手段，其重要性不言而喻。随着油田开发的深入，井下技术状况日益复杂，大修作业的需求也显

著增加。反循环套磨铣技术作为一种高效的大修工艺，在清理井下管柱与井壁之间杂物、处理卡钻事故等方面展现出独特优势。该技术通过反循环系统将磨铣产生的碎屑及时带出井筒，从而有效减少井下复杂情况的发生。然而，目前该技术的应用效率仍受多种因素制约，尤其是施工参数的选择与优化问题亟待解决。因此，深入研究反循环套磨铣技术的关键参数匹配关系，对于提高大修作业效率、降低施工成本以及保障石油开采的持续稳定具有重要意义。

尽管反循环套磨铣技术在大修作业中得到了广泛应用，但其施工过程中泵排量与机械钻速之间的匹配关系尚未得到充分研究。在实际作业中，泵排量过高可能导致流体压力分布不均，进而引发井底冲蚀或工具损坏；而泵排量过低则会影响磨铣碎屑的携带能力，导致重复磨铣甚至卡钻事故。此外，机械钻速受地层性质、磨铣工具特性及水力参数等多重因素影响，其与泵排量之间的关系尤为复杂。这种匹配关系不明确的问题不仅直接影响了作业效率，还可能导致施工成本增加和井下安全风险上升。因此，明确泵排量与机械钻速之间的匹配关系，成为提升反循环套磨铣作业性能的关键所在。

1. 泵排量与机械钻速的理论分析

1.1 泵排量对反循环系统的影响

在大修反循环套磨铣作业中，泵排量作为关键的水力参数之一，对反循环系统的流体动力学特性具有显著影响。具体而言，泵排量的变化直接决定了循环系统中流体的流速分布与压力梯度。根据流体力学基本原理，当泵排量增加时，流体在钻柱与井眼环空内的流速随之提高，从而增强了流体的携屑能力。然而，过高的泵排量可能导致局部压力损失加剧，进而引发循环压耗的显著上升，这对井下工具的工作稳定性构成潜在威胁。此外，泵排量的变化还会影响反循环系统中流体的压力分布特性。例如，在低排量条件下，流体压力分布较为均匀，但携屑效率较低；而在高排量条件下，尽管携屑能力得到提升，但压力分布的不均匀性可能诱发井壁失稳或井下复杂情况。因此，合理控制泵排量对于优化反循环系统的性能至关重要。从磨铣碎屑携带的角度来看，适当的泵排量能够有效减少碎屑床的形成，确保碎屑及时排出井口，从而降低卡钻风险并提高作业效率。

1.2 机械钻速的影响因素分析

机械钻速是大修反循环套磨铣作业效率的核心指标，其受多种因素的综合影响，包括地层性质、磨铣工具特性以及水力参数等。首先，地层性质是影响机械钻速的重要因素之一。不同地层的地质特性，如岩石硬度、孔隙度、抗压强度等，均会对磨铣工具的切削效率产生显著影响。例如，在坚硬且致密的地层中，机械钻速通常较低，而在软质地层中，机械钻速则相对较高。其次，磨铣工具的特性也是决定机械钻速的关键因素。工具的结构设计、材料性能以及切削元件的布置方式均会直接影响其破岩效率。例如，采用高效切削元件和优化几何设计的磨铣工具能够显著提高机械钻速。此外，水力参数对机械钻速

的作用同样不可忽视。泵排量作为水力参数的重要组成部分，通过影响流体的冲刷能力和冷却效果，间接调控机械钻速的变化。具体而言，较高的泵排量能够增强流体的冲刷作用，从而有效清除磨铣产生的碎屑，减少重复破碎现象的发生，进而提高机械钻速。然而，若泵排量过高，可能导致水力能量浪费甚至引发井下复杂情况，因此需在综合考虑其他因素的基础上确定最佳泵排量范围。

1.3 泵排量与机械钻速关系模型建立

基于流体力学与岩石力学理论，可以建立泵排量与机械钻速之间的数学模型，以揭示二者之间的内在关系。该模型的基本假设包括：流体在钻柱与井眼环空内的流动为稳态层流或紊流，且忽略温度变化对流体性质的影响。模型的核心表达式可表示为：

$$RPM = f(Q, \rho, \mu, P_c, H)$$

其中：RPM—机械钻速 (m/h)； Q—泵排量 (L/s)；

ρ —流体密度 (kg/m³)； μ —流体粘度 (Pa·s)；

P_c —循环压耗 (MPa)； H—井深 (m)。

在上述参数中，泵排量 是主要自变量，其对机械钻速的影响通过流体动力学效应体现。例如，较高的泵排量能够增强流体的携屑能力，从而减少碎屑对磨铣工具的阻碍作用，间接提高机械钻速。流体密度 和粘度 则通过影响流体的流动特性，间接作用于机械钻速。循环压耗是泵排量的函数，其值随排量增加而上升，过高的循环压耗可能限制机械钻速的进一步提升。井深作为外部变量，主要通过影响流体压力分布和循环效率来间接影响机械钻速。模型中各参数的获取方法如下：泵排量可通过现场流量计实时测量；流体密度和粘度可通过实验室测试确定；循环压耗可通过理论计算结合现场实测数据获得；井深则直接来源于井身结构设计资料。通过该模型，能够为现场作业提供理论指导，帮助优化泵排量与机械钻速的匹配关系，从而提高修井作业的整体效率。

2. 基于现场数据的实例验证

2.1 现场数据收集与整理

为了深入研究大修反循环套磨铣作业中泵排量与机械钻速的匹配关系，本研究从多个实际作业中收集了相关数据。数据来源主要包括一些典型区块的大修作业记录。这些区块的地质条件和作业工艺具有一定的代表性，能够反映不同地层性质对泵排量与机械钻速匹配关系的影响。数据采集方法包括实时监测施工参数、记录作业日志以及后期分析处理完井报告。具体采集的参数涵盖泵排量、机械钻速、钻压、转速、循环压力及返砂情况等关键指标。

在数据整理阶段，首先对原始数据进行了初步筛选，剔除因设备故障或操作失误导致的异常值，以确保数据的准确性和可靠性。其次，针对不同类型的地层，对数据进行了分类处理，以便于后续分析中对比不同地质条件下的匹配关系。此外，还对部分缺失值进行了插补处理，采用线性回归模型预测并补充了少量遗漏的泵排量或机械钻速数据点。最终，

整理后的数据集包含超过 50 口井的作业记录,为后续分析提供了坚实的基础。

2.2 不同泵排量下机械钻速变化规律分析

基于整理后的现场数据,本研究进一步分析了不同泵排量条件下机械钻速的变化规律。通过分析发现,机械钻速随泵排量的变化呈现出显著的非线性特征。在低泵排量区间(小于 600 L/min),机械钻速较低且增长缓慢,这主要是由于流体携砂能力不足,导致磨铣碎屑无法及时排出,从而影响了磨铣效率。当泵排量增加至 600-800 L/min 时,机械钻速显著提升,表明在此区间内流体流速的提高有效增强了碎屑携带能力,减少了重复磨铣现象的发生。然而,当泵排量进一步增加至 800 L/min 以上时,机械钻速的增长趋势逐渐趋于平缓,甚至出现局部下降现象,这可能与过高排量导致的水力冲击效应增强有关,进而对磨铣工具的稳定性产生不利影响。

为进一步揭示上述规律,本研究绘制了不同地层条件下的泵排量-机械钻速变化曲线。例如,在砂岩地层中,机械钻速在泵排量为 700 L/min 左右达到峰值;而在页岩地层中,由于岩石硬度较高,最佳泵排量则略高,约为 750 L/min。这一结果表明,地层性质对泵排量与机械钻速的匹配关系具有重要影响。此外,通过对比分析不同井深条件下的数据,发现随着井深的增加,最佳泵排量也呈现逐步上升的趋势,这可能与深部地层中温度、压力升高对流体性能的影响有关。

2.3 最佳匹配范围确定

结合理论模型与现场数据分析结果,本研究确定了泵排量与机械钻速的最佳匹配范围。根据数据分析,当泵排量控制在 650-750 L/min 之间时,机械钻速能够达到相对较高的水平,同时作业成本也保持在合理范围内。具体而言,在这一匹配范围内,流体携砂效率较高,能够有效减少磨铣碎屑的堆积,从而降低重复磨铣的次数和时间成本。此外,该范围内的循环压力分布较为均匀,有助于提高磨铣工具的稳定性,进而延长工具使用寿命并降低维修频率。

从经济效益的角度来看,采用最佳匹配范围进行作业可显著提升修井效率。例如,在油田某口大修井中,通过将泵排量调整至 700 L/min,机械钻速较之前提高了约 20%,单井作业周期缩短了近 30%。类似地,在辽河油田的应用实例中,优化后的泵排量参数使得单次作业成本降低了约 15%,同时作业成功率显著提高。这些结果表明,合理匹配泵排量与机械钻速不仅能够提高作业效率,还能有效降低施工成本,为石油开采行业带来可观的经济效益。

3. 现场作业优化建议

基于上述研究结果,针对现场大修反循环套磨铣作业中泵排量与机械钻速的匹配问题,提出以下优化建议:首先,在施工前应结合具体井况(如地层性质、井深结构等)对泵排量进行精确计算与调整,确保其处于最佳匹配范围内。例如,对于硬地层或长井段磨铣作业,可适当提高泵排量以增强碎屑携带能力,从而避免因碎屑堆积导致的卡钻事故。其次,建议采用

智能化监测设备实时采集泵排量与机械钻速数据,利用数据分析技术动态调整施工参数,以实现作业效率的最大化。此外,还应注意磨铣工具的选择与维护,确保其与当前施工参数相匹配,从而进一步提高机械钻速并延长工具使用寿命。

在施工工艺方面,推荐采用分阶段控制的方法优化泵排量参数。例如,在初期磨铣阶段可适当降低泵排量以减少钻头磨损,而在后期清屑阶段则需提高泵排量以加快碎屑排出速度。同时,应加强施工人员的技能培训,使其能够熟练掌握泵排量与机械钻速匹配关系的相关知识,从而更好地应对现场复杂情况。通过以上措施,不仅可以有效提高修井作业效率,还能显著降低施工成本并保障井下安全。

4. 结论与认识

(1) 通过理论分析与现场实例验证,本文系统探讨了大修反循环套磨铣作业中泵排量与机械钻速的匹配关系,并得出具有实践指导意义的研究成果。研究表明,泵排量作为反循环系统的核心参数之一,对流体流速、压力分布及磨铣碎屑的携带能力具有显著影响。在一定范围内,随着泵排量的增加,机械钻速呈现先上升后趋于稳定的变化趋势,这表明存在一个最佳的泵排量与机械钻速匹配范围,以实现最高效的作业效果。

(2) 本文明确泵排量与机械钻速之间的定量关系,为现场施工参数优化提供理论支持;通过实例验证确认最佳匹配范围的存在及其对作业效率提升作用,为复杂井下环境中的修井作业提供了可操作的技术方案;研究具有较强的适用性,可为类似油田的大修作业提供参考,推动修井工艺技术的进步与发展。

(3) 未来研究需进一步扩展数据来源,涵盖更多复杂地质条件下的作业案例,以验证研究成果的普适性并优化理论模型;应综合考虑更多变量,构建更为精确的多因素耦合模型,以进一步提高预测精度;可尝试引入人工智能与大数据分析技术,通过机器学习算法对海量历史数据进行深度挖掘,从而发现更多潜在的匹配规律并优化施工参数。总之,通过不断优化研究方法与完善理论体系,有望为修井作业效率的持续提升提供更为坚实的科学基础。

[参考文献]

- [1] 谢静;吴惠梅;楼一珊;李忠慧. 钻井水力参数对钻头优选的影响[J]. 中国科技论文, 2021, 16(5): 524-528.
- [2] 王伟. 油井大修工艺技术分析研究与应用[J]. 石化技术, 2023, 30(6): 134-136.
- [3] 罗义华. 不同驱动方式下套铣作业技术研究[J]. 石化技术, 2020, 27(11): 82-83.
- [4] 周赵川;陈立群;李跃谦;刘建仪;代建伟;彭远进. 大修磨套铣工艺参数优化设计软件的研发[J]. 油气田地面工程, 2014, 33(10): 50-51.
- [5] 王万鹏;朱公博;王同辉;王彬彭;曹维祥. 套铣技术优化及其在渤海油田大修井中的运用[J]. 石化技术, 2021, 28(2): 88-89.