

# 冲击回转钻探在硬岩地层中的钻进效率影响因素探讨

陈军民

陕西彬长胡家河矿业有限公司 陕西 咸阳 713600

**【摘要】**：冲击回转钻探在硬岩地层中的钻进效率受多因素耦合作用影响，核心在于冲击能量与回转切削的协同配合。围绕硬岩破岩特性、钻头结构与材料性能、冲击参数及钻压转速匹配关系展开分析，并结合施工工艺与设备运行状态探讨效率波动原因。在此基础上提出参数协同优化与现场适应性调控措施，有效提升破岩效率，降低能耗与磨损，为复杂硬岩地层高效钻探提供参考。

**【关键词】**：冲击回转钻探；硬岩地层；钻进效率；参数匹配；破岩机理

DOI:10.12417/2705-0998.26.04.020

## 引言

硬岩地层钻探过程中，传统单一回转钻进方式往往难以兼顾效率与成本控制。冲击回转钻探通过叠加冲击载荷与切削作用，为提高破岩效率提供了新的路径。在实际施工中，钻进效果常因参数选择不当或设备匹配不足而波动明显。围绕影响钻进效率的关键因素展开系统分析，有助于明确各要素之间的内在联系，为优化施工工艺与提升作业稳定性提供理论依据与实践参考。

## 1 冲击回转钻探在硬岩地层中的关键问题分析

### 1.1 硬岩地层破岩特性与能量需求

硬岩地层普遍具有抗压强度高、完整性强、脆性明显的特征，岩体内部常伴有石英、长石等高硬度矿物成分，这使钻头在切削过程中容易出现吃入困难、侧向滑移和局部打滑等情况。单纯依靠回转切削时，钻齿对岩面的接触多表现为浅层磨削，单位进尺所需时间较长，机械比能明显升高。尤其在花岗岩、玄武岩等致密岩层中，岩石裂纹扩展门槛较高，若输入能量不足，破岩形式便难以由表层磨蚀转化为体积破碎，直接制约钻进速度。

从能量需求看，硬岩破碎并非单一载荷即可完成，而是需要冲击能、轴向钻压与回转扭矩协同输入，促使岩体由弹性变形逐步进入裂纹萌生、扩展和剥落阶段。现场作业中，若冲击功偏低，岩屑粒径细小且排渣不畅，孔底反复研磨现象就会加重；若钻压传递不稳定，冲击波在钻具系统中的有效利用率也会下降。因此，准确匹配岩石强度参数、冲击频率和单次冲击功，是降低无效能耗、提升硬岩地层钻进效率的重要基础。在实际作业过程中，应依据岩石单轴抗压强度、弹性模量及脆性特征，对冲击能量输入进行分级调控，使冲击载荷能够有效突破岩体破裂阈值。合理选择冲击频率，使裂纹扩展与能量释放节奏保持一致，避免能量叠加不足或重复冲击现象。单次冲击功的优化则有助于提高单位作用下的破岩深度，从而减少无效循环次数。三者协调配合，可显著提升能量利用效率，保证钻进过程稳定高效运行。

### 1.2 冲击与回转耦合作用机理

冲击回转钻探的核心不在于两种作用方式的简单叠加，而在于冲击载荷与回转切削在时间和空间上的协同配合。冲击作用使孔底岩石瞬时承受高应变率载荷，局部区域形成压碎带和微裂隙网络，削弱岩体整体承载能力；回转运动则推动钻头齿面不断切入新鲜岩面，将已受损岩体从母岩中剥离<sup>[1]</sup>。二者耦合后，钻齿接触区的应力集中更加明显，破岩路径由连续摩擦切削转变为“冲击致裂—回转剥落”的复合过程，进而提升单圈回转的有效破岩量。

这种耦合作用的发挥程度，取决于冲击频率、转速、钻压和钻头结构之间的动态匹配。频率偏高而转速不足时，孔底岩石虽反复受击，却不能及时形成有效切削痕迹，容易产生重复破碎；转速过高而冲击能不足时，钻头又会回到硬磨硬削状态，导致齿尖温升和磨损加剧。施工实践表明，合理的耦合状态应保证裂纹扩展与齿面切削节奏同步，使冲击形成的弱化带能够被及时利用，既提高孔底破岩效率，也有利于稳定扭矩波动和减少钻具振动。

### 1.3 钻进过程中效率波动的主要表现

硬岩地层钻进过程中，效率波动往往表现为机械钻速忽高忽低、单位进尺能耗增大、钻具负荷变化频繁等现象。部分孔段在参数设定相同的条件下仍出现进尺迟缓，原因多与岩性突变、节理裂隙分布不均以及孔底清洁度不足有关。当钻头进入局部高强度夹层或硅化带时，破岩阻力会突然升高，设备输出参数若不能及时调整，钻压利用率和冲击传递效率便会同步下降。此时现场常伴随扭矩脉动增强、返渣颗粒异常变细、孔底重复破碎加重等情况，影响连续钻进的稳定性。

效率波动还体现在钻头失效模式和设备工况的变化上。齿尖磨钝后，接触应力降低，岩石难以形成有效裂纹扩展，单位时间内的有效进尺明显减少；冲洗介质流量不足时，孔底岩粉堆积会形成二次研磨层，使冲击能被岩屑吸收，造成功率浪费。钻杆接头间隙、液压系统压力波动以及冲击器响应迟滞，也会削弱能量传递链条的完整性。由此可见，钻进效率的波动并非单一因素造成，而是地层条件、工具磨损和设备运行状态共同

作用的结果,必须结合现场参数监测进行动态调控。

## 2 影响钻进效率的主要因素及优化路径

### 2.1 钻头结构与材料性能对效率的影响

钻头结构直接决定冲击回转钻探在硬岩地层中的受力状态与破岩效果。硬岩钻进条件下,齿形布置、出刃高度、排屑槽角度以及底唇覆盖范围都会影响孔底应力分布和岩屑排出路径。柱齿型钻头在高强度岩层中具备较强的压入能力,能够在局部形成较高接触应力,利于诱发脆性破裂;复合片钻头则更适合保持连续切削,但在高冲击工况下对齿面稳定性要求更高。若钻头冠部结构设计不合理,孔底会出现破岩盲区,导致局部岩体残留、重复切削增多,机械钻速难以提升,钻具振动和偏磨问题也会更加明显。

材料性能决定钻头在长时间高载荷钻进中的耐磨水平与抗冲击能力。硬岩地层常伴有高磨蚀性矿物,齿体若硬度不足,工作面容易出现磨钝、崩刃和热疲劳损伤,进而降低侵入深度和破岩效率;材料韧性偏低时,冲击载荷反复作用又会引发微裂纹扩展,缩短钻头服役寿命。实际施工中,多采用硬质合金齿、表面强化层和高强钢基体相结合的方式,以兼顾耐磨性和抗断裂性能。只有在结构参数与材料特性相互协调的条件下,钻头才能保持稳定切削能力,减少起钻换头频次,提高单位台时进尺。

### 2.2 冲击参数与钻压转速匹配规律

冲击参数是影响硬岩钻进效率的核心变量,单次冲击功、冲击频率和波形传递特征共同决定孔底岩石的受载状态。单次冲击功偏小,岩石内部难以形成贯通裂纹,孔底以浅表层压痕和局部磨损为主,破岩深度不足;冲击频率过高而能量分散时,裂纹尚未充分扩展便遭遇下一轮作用,容易形成能量叠加不足的问题<sup>[2]</sup>。较理想的参数组合应使冲击载荷能够突破硬岩的动态强度阈值,促使压碎区、剪裂区和剥落区依次形成,从而实现有效破岩而非表层消耗,这对提高钻进效率具有决定性影响。

钻压与转速的匹配关系决定冲击能量能否转化为实际进尺。钻压不足时,钻头与孔底接触不充分,冲击波传递链条不完整,易出现空打和反弹现象;钻压过大又会使钻头埋入过深,增加扭矩负荷和钻具摩擦,造成设备功率分配失衡。转速控制同样需要与钻压、冲击频率形成协调关系,转速偏低会削弱齿间更新接触面的能力,转速过高则可能使切削轨迹重叠加剧,形成无效磨削。现场调参通常依据岩石完整程度、返渣粒径和扭矩波动情况动态优化,使钻压提供稳定轴向载荷,转速保证合理切削节奏,冲击参数负责裂纹扩展,三者协同后才能形成高效钻进状态。

### 2.3 施工工艺与设备运行状态调控

施工工艺与设备工况是保障参数落地、维持高效钻进的外

部支撑条件。施工工艺层面,开孔导向精度直接影响孔斜与偏孔,偏斜会增大钻具侧向受力,加剧能量损耗;洗井液或压缩空气的供给参数与地层不匹配时,孔底岩粉无法及时排出,形成重复破碎层,削弱冲击器对新鲜岩面的作用效率;在破碎带、强磨蚀地层中,若未及时调整进尺节奏与清孔周期,易引发卡钻、埋钻、孔壁失稳等事故,直接中断高效钻进。

设备运行状态层面,液压系统压力波动会改变冲击器活塞运动规律,导致单次冲击功偏差;动力头输出不稳会造成转速与扭矩异常,使钻头受力不均;钻杆连接刚度、传动系统同轴度、减振装置性能,均会影响能量传递效率。加强冲击器密封、动力系统校准、钻具磨损监测与循环系统维护,可减少无效功耗,保障参数稳定输出。在冲击器运行过程中,良好的密封性能能够防止气体或液压能量泄漏,确保冲击能量有效传递至钻头,提高能量利用率。动力系统的定期校准有助于维持转速与扭矩输出的稳定性,避免因波动导致的效率下降。通过对钻具磨损状态的持续监测,可以及时更换或修复关键部件,防止因齿面失效引发破岩能力衰减。

## 3 效率提升的综合控制与实施要点

### 3.1 参数协同优化方法

参数协同优化的关键在于建立冲击功、冲击频率、钻压、转速与排渣能力之间的耦合关系,使各项参数共同服务于硬岩高效破碎,而不是彼此牵制。硬岩地层钻进过程中,孔底岩石破坏通常经历压碎、起裂、扩展和剥离几个阶段,任一环节参数失衡都会削弱整体钻进效果。冲击功不足时,裂纹扩展深度有限;转速偏高时,钻齿易在未充分破碎的岩面上形成反复磨削;钻压传递不稳定时,又会造成冲击器输出与钻头接触状态脱节。由此可见,协同优化不是单项参数的简单提高,而是依据岩性、孔深和设备能力确定合理区间,使孔底单位时间内的有效破岩体积达到较优水平。

现场应用中,参数协同优化更强调动态调节和实时反馈。施工人员通常结合机械钻速、扭矩变化、回转阻力、返渣粒径及冲击器工作声响应,判断当前参数组合是否匹配地层条件。当返渣颗粒偏细且钻速下降时,往往说明孔底存在重复破碎,可适当降低转速并提高单次冲击功;当扭矩持续上升而进尺改善不明显时,则需要重新校核钻压与齿面侵入深度的匹配关系。建立参数联动调控机制,使冲击、回转和轴向加载始终保持有效配合,既能提升硬岩钻进效率,也有助于减少设备波动,增强施工过程的连续性和稳定性。

### 3.2 现场作业条件适应性调整

现场作业条件的变化具有明显的不确定性,硬岩地层钻进效率往往不只取决于设计参数,还受到孔深变化、岩层完整性、地下水发育情况和孔内清洁程度等因素影响。遇到完整致密岩段时,孔底承载能力强,需要提高冲击载荷的有效利用率,保

证钻头形成足够的侵入深度；进入裂隙发育带后，岩石整体性减弱，若仍沿用高钻压、高频冲击模式，容易引发孔壁掉块和钻具受力异常。对于含水地层或岩粉黏附严重的孔段，还需及时调整冲洗介质参数，改善携屑与冷却效果，防止孔底沉渣堆积影响钻头破岩。只有对现场条件作出快速识别，钻进工艺才能保持针对性。

适应性调整还体现在施工组织与作业节奏的灵活控制上。长时间连续钻进后，钻头温升、冲击器效率衰减和钻杆连接部位疲劳累积会逐渐显现，若忽视这些信号，钻进效率常会在后续孔段明显下滑。施工过程中需要结合孔口返渣颜色、颗粒级配、设备振动幅值及液压系统压力变化，及时判断是否存在齿尖磨损、能量衰减或排渣受阻等问题，并通过短时提钻、循环清孔、参数回调等方式恢复作业状态。这样的调整并非临时补救，而是硬岩钻探中保障效率稳定的重要手段，有利于减少工况突变对钻进质量和设备寿命带来的不利影响。

### 3.3 降低能耗与磨损的控制措施

降低能耗与磨损的核心在于减少无效破岩和附加阻力，使设备输出的机械能尽可能转化为实际进尺。在硬岩地层中，孔底若长期存在岩粉滞留、钻头偏磨或冲击空耗现象，设备功率便会大量消耗在摩擦发热、重复压碎和振动传递之中。要改善这一问题，必须从钻头受力状态、孔底清洁程度和能量传递路径入手，控制钻头工作面与岩面的接触质量。合理选择钻头齿

形和基体材料，可降低局部应力异常引起的崩齿风险；保持冲洗介质流量与压力稳定，则有助于及时清除岩屑，削弱二次研磨效应。通过这些措施，可以有效降低单位进尺能耗，提高设备输出效率。

磨损控制还需要贯穿于设备运行和工艺管理全过程。冲击器活塞、密封组件、钻杆螺纹和动力头传动部位长期处于高频高载工况下，若缺少监测与维护，轻微磨损便可能演变为能量衰减和系统失稳。施工中应依据钻速变化、扭矩波动和液压力曲线，对关键部件进行状态判断，避免在异常磨损条件下持续高负荷作业。对于高磨蚀性地层，可通过分段调参、控制单次连续钻进时间和优化润滑冷却条件，减轻钻具表面剥蚀和热疲劳损伤。能耗控制与磨损控制本质上具有一致性，只有减少无效载荷和非正常接触，才能在保证钻进效率的同时延长工具寿命，降低整体施工成本。

## 4 结语

本文围绕冲击回转钻探在硬岩地层中的钻进效率问题，从破岩特性、参数匹配及施工调控等方面进行了系统分析。对钻头结构、冲击参数及现场条件的综合研究，明确了多因素协同对效率提升的关键作用。结合实际作业特点，提出了优化控制思路，为提高钻进稳定性、降低能耗与磨损提供了参考依据，对复杂硬岩地层高效钻探具有一定指导价值。

### 参考文献：

- [1] 周柳湘,余思琴,陈俊华,等.潜孔锤与冲击钻机联合钻进工艺成孔碎岩过程数值模拟[J].吉林大学学报(地球科学版),2025,55(05):1608-1618.
- [2] 黄元俊.硬岩隧道掘进机激光与机械联合破岩方法研究[D].石家庄铁道大学,2025.
- [3] 许敬伟.冲切分离式复合钻头破岩机理与实验研究[D].西南石油大学,2024.