

潜孔钻机随钻参数对钻孔效率的影响研究

杨巍¹, 田帅康², 郭大超¹, 姚毅¹, 于海航¹

(1. 成远矿业开发股份有限公司, 辽宁辽阳 111299; 2. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083)

[摘要] 潜孔钻机通过冲击力、轴力和扭矩共同作用进行凿岩, 其钻孔效率严重依赖于各工作参数的选择。因此, 本文利用自主研发的潜孔钻机随钻测量系统, 通过采集钻孔过程中的随钻参数, 分析了推进力、扭矩、风压、冲击频率等8个工作参数对冲击钻孔效率的影响。基于潜孔钻机的凿岩特性, 设计了正交试验并进行了现场钻孔测试, 揭示了主要影响钻孔效率的随钻参数分别为风压、冲击频率和轴力。此外, 笔者发现, 在不同风压条件下, 轴力与钻进速度之间存在最佳匹配值; 而在不同轴力水平下, 风压与碎岩比功之间存在反比例关系。基于钻速和碎岩比功这两个评价指标, 确定了轴力为10.5 kN、风压为1.75 MPa、冲击频率为26 Hz时的最优钻孔参数组合。研究结果可为潜孔钻机钻孔工艺的优化、提高生产效率及降低生产成本提供理论参考。

[关键词] 随钻测量 潜孔钻机 露天矿 参数优化 钻孔效率

[中图分类号] TD164; P634.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2025)01-0154-08

Yang Wei, Tian Shuaikang, Guo Dachao, Yao Yi, Yu Haihang. The influence of drilling parameters of downhole drilling rig on drilling efficiency[J]. Geology and Exploration, 2025, 61(1): 0154-0161.

0 引言

潜孔钻机由于其在硬岩层中可以实现较高的钻孔效率, 被广泛应用于采矿(勘探和钻爆应用)、地热钻探和浅层油气等领域(王家臣等, 2024)。潜孔钻机正常作业受轴力、扭矩、风压、冲击频率等众多参数的影响, 这些参数对钻进响应的影响规律受制于复杂的钻孔过程而很难被全面了解(石永泉, 2013; 汪学清等, 2023)。潜孔钻机破岩效率与钻孔作业参数密切相关, 但目前实际钻孔作业中由于工作参数匹配不佳导致卡钻频繁、钻头磨损严重、效率低等问题。因此, 研究钻孔工作参数的最佳组合对提高钻孔效率具有重要意义。

近年来, 随着数字化、智慧化矿山建设, 随钻测量技术已被应用到矿山领域(Lee and Lee, 2023; Zhang et al., 2023; 石教华等, 2024), 这为研究钻进

过程中各随钻参数影响钻孔效率提供了更加便捷的方法。随钻测量技术是利用安装在钻机上的各种传感器采集钻进过程中的工作参数进行分析和反演地层岩石力学性质的原位测试方法(Schunnesson, 1998; Rodgers et al., 2020; 郝世俊等, 2023), 利用采集的随钻参数去解读钻孔过程中钻头破碎岩石的钻进响应(Moradi et al., 2023)。研究人员根据不同的凿岩原理已经搭建了各类实验室和现场原位测试的随钻测量系统收集钻孔过程中的随钻参数, 在随钻参数与岩体物理力学参数的关系方面进行了基础性的研究, 取得了丰硕的成果(岳中琦, 2014; 岳中文等, 2022; Tian et al., 2024)。Liu et al.(2001)使用多元统计方法分析了从实际钻孔过程中收集的随钻数据, 对随钻参数的相互作用和钻孔过程评估方法进行了分析研究, 得出了扭矩在9500 N·m和转速在78 r/min的条件下

[收稿日期] 2024-05-16; [改回日期] 2024-11-07; [责任编辑] 陈伟军。

[基金项目] 中央高校基本科研业务费专项资金项目(编号:2017QL05)资助。

[第一作者] 杨巍(1992年-), 女, 2015年毕业于辽宁工程技术大学, 学士学位, 主要从事矿山开采方面的研究。E-mail: 910241020@qq.com。

[通讯作者] 田帅康(1994年-), 男, 中国矿业大学(北京)在读博士研究生, 主要从事工程爆破与岩石破碎方面的研究。E-mail: tsk42982@163.com。

达到最佳的钻进性能。Yu et al.(2023)分析了钻进参数对钻压、转速和工作压差对钻进速度与碎岩比功的影响,通过分析钻进速度与碎岩比功及时优化钻具组合,以提高现场钻孔效率。Kivade et al.(2013)研究了钻进过程中推力、旋转扭矩等工作参数和岩石特性对钻孔效率的影响;并通过理论分析,建立了碎岩比功与球齿间距和齿数的关系,确定了球齿间距和齿数的最佳比,从而得到最小碎岩比功和最大钻速的关系。Song et al.(2021)根据冲击钻井唯象论模型预测了钻孔能量传递对钻头与岩石界面伪刚度的非单调依赖性,从而得到了最大化钻进速度对应的最佳轴力。Li et al.(2020)采用田口法对随钻参数进行正交试验,分析了冲击功、推进力、转速和钻头类型等工作参数对凿岩效率的影响,通过对影响钻速的主要工作参数进行回归分析,得到并验证了钻进速度与工作参数之间的关系,为设备选型、最优工作参数、设备改进和钻速预测提供了依据。Qu et al.(2023)以回转式钻机钻进速度、单位钻孔成本和碎岩比功为目标函数,钻进轴压和转速为优化变量,建立了随钻参数多目标优化模型,应用该模型结果提高了钻进速度的同时降低了钻孔成本。Shen et al.(2024)使用液压锚杆钻机对白云岩块进行了全尺寸钻井试验,以钻速与碎岩比功耦合为评价指标分析钻孔效率,并采用极差分析和方差分析两种方法分析评价指标对随钻参数的敏感性。

尽管对旋切钻机工作参数优化的研究已覆盖多个方面,但由于潜孔钻机在钻进过程中涉及的机械与岩石之间的相互作用机理极其复杂,伴随着大量的随钻参数和岩石物理力学参数之间的相互作用,这些随钻参数间、钻机与岩石间的相互影响增加了分析随钻参数相互响应规律的难度。因此,要想更有效地利用随钻数据优化钻孔作业的效率,有必要进一步探索钻孔过程中随钻参数对钻进速度和碎岩比功之间的关系,并确定钻孔效率最优的随钻参数组合。本研究选取露天矿潜孔钻机作为试验平台,通过深入分析随钻参数的相互作用,旨在为现场优化钻孔作业参数达到最佳钻孔效率提供坚实的理论基础和数据分析支持。

1 现场试验

1.1 场地描述

千山石灰岩矿山位于辽宁省辽阳市,矿山年产

量为200万t,矿区岩石类型较简单,主要岩性为生产工业水泥材料的石灰岩。本次研究区域为矿山176平台,采用露天深孔台阶钻爆法开挖,台阶高度为15m,钻孔直径为120mm,钻头为HD-45A潜孔钻头。矿区岩体结构较完整,节理裂隙较不发育,RQD值为80%~91%,岩体质量等级为Ⅱ级。按照ISRM试验标准(Ulusay,2015)对岩石试件进行单轴抗压强度、巴西劈裂等试验,获得的岩石物理力学参数如表1。

表1 岩石物理力学参数

Table 1 Rock physical and mechanical parameters

| 岩石样本 | 抗压强度 (MPa) | 抗拉强度 (MPa) | 纵波波速 (m/s) | 弹性模量 (GPa) | 密度 (kg/m ³) |
|------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------------------|
| 1 | 67.9 | 4.67 | 5829 | 4.6 | 2.71 |
| 2 | 76.6 | 5.26 | 6058 | 4.1 | 2.70 |
| 3 | 69.4 | 4.87 | 5760 | 4.3 | 2.73 |
| 平均值 | 71.3 | 4.93 | 5882 | 4.3 | 2.71 |

1.2 试验设备及系统

本次试验以泰业390气动潜孔钻机为试验平台,在潜孔钻机上安装压力、流量等传感器搭建随钻测量系统。该系统可以在钻进过程中实时采集钻孔深度、轴力、扭矩、转速、风压、风量、钻速和冲击频率等八种参数,并通过数据采集卡以200Hz的采样频率将随钻数据储存于工控机中,也可将随钻测量数据通过工控机中的4G无线通讯模块传输到远端服务器(侯仕军等,2023)。潜孔钻机随钻测量系统如图1所示。随钻测量系统主要由传感器数据采集、数据处理、工控机分析存储和远程传输组成。试验过程中需要控制恒定轴力钻进,因此利用钻机中安装的可编程逻辑控制器控制钻进过程中轴力的输出。风压的大小由空压机控制。

1.3 试验方案

本次试验数据是潜孔钻机在露天台阶钻进炮孔时采集的,根据潜孔钻机破岩机理及钻机与空压机的性能,考虑钻孔作业的安全性以及工作效率等实际情况开展钻孔试验。根据图2的随钻参数相关性分析得出与钻进速度相关性最强的三个因素为轴力、风压及冲击频率,因此正交试验方案选择这三个主要钻进工作参数作为试验变量。正交试验是一种高效的实验设计方法,可以系统地进行多因素影响分析,用最少的试验找出最优的结果(朱国民等,2023)。设计3因素5水平进行正交试验对钻进速度与钻孔效率进行评价,正交试验方案如表2所示。



图1 潜孔钻机随钻测量系统

Fig. 1 Measurement system while drilling of down-the-hole drilling rig

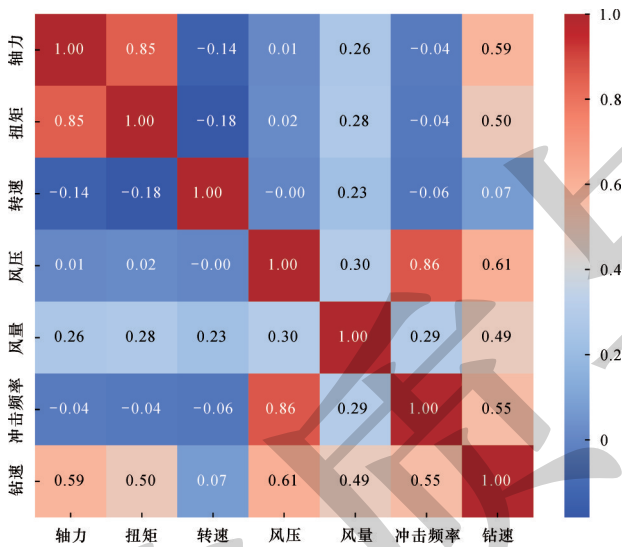


图2 随钻参数相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of drilling parameters

1.4 试验指标

钻进速度和碎岩比功是评价钻孔效率的关键指标,碎岩比功概念由Teale (1965)于1965年提出,表示破碎单位体积的岩石所做的功。潜孔钻机主要依靠轴力、扭矩和冲击力三部分共同作用破岩。因此,碎岩比功 SE 可由三个不同的部分的能量组成 (Izquierdo and Chiang, 2004):冲击作用消耗的能量(E_i)、轴力作用消耗的能量(E_f)和旋转消耗的能量(E_r)。碎岩比功表示为以下各分量之和:

$$SE = E_i + E_f + E_r \quad (1)$$

式(1)可以写为:

表2 正交试验方案设计 $L_{25}(5^3)$

Table 2 Design of orthogonal experiment scheme $L_{25}(5^3)$

| 水平 | 轴力/kN | 风压/MPa | 冲击频率/Hz |
|----|-------|--------|---------|
| 1 | 8.5 | 1.55 | 22 |
| 2 | 9.5 | 1.55 | 23 |
| 3 | 10.5 | 1.55 | 20 |
| 4 | 11.5 | 1.55 | 21 |
| 5 | 12.5 | 1.55 | 22 |
| 6 | 8.5 | 1.65 | 24 |
| 7 | 9.5 | 1.65 | 25 |
| 8 | 10.5 | 1.65 | 25 |
| 9 | 11.5 | 1.65 | 23 |
| 10 | 12.5 | 1.65 | 24 |
| 11 | 8.5 | 1.75 | 25 |
| 12 | 9.5 | 1.75 | 27 |
| 13 | 10.5 | 1.75 | 26 |
| 14 | 11.5 | 1.75 | 26 |
| 15 | 12.5 | 1.75 | 25 |
| 16 | 8.5 | 1.85 | 29 |
| 17 | 9.5 | 1.85 | 27 |
| 18 | 10.5 | 1.85 | 28 |
| 19 | 11.5 | 1.85 | 28 |
| 20 | 12.5 | 1.85 | 27 |
| 21 | 8.5 | 1.95 | 31 |
| 22 | 9.5 | 1.95 | 30 |
| 23 | 10.5 | 1.95 | 30 |
| 24 | 11.5 | 1.95 | 31 |
| 25 | 12.5 | 1.95 | 32 |

$$SE = \frac{W}{A \cdot PR} + \frac{T \cdot \omega}{A \cdot PR} + \frac{F}{A} \quad (2)$$

式(2)中: W 为冲击功,J; A 为钻孔面积, m^2 ; T 为扭矩, $N \cdot m$; ω 为转速, r/min ; PR 为钻进速度, m/s ; F

为轴力, N。

冲击功由式(3)动能定理计算获得, 本次试验选用的冲击器活塞质量为 7.98 kg, 冲击速度可由冲击频率计算得出, 冲击频率是通过安装在钻机前部的拾音器采集钻孔过程中的音频信号进行分析获得的; 图 3 为拾音器采集钻孔过程中的冲击音频信号。

$$W = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3)$$

式(3)中: W 为冲击功, J; m 为冲击器活塞的质量, kg; v 为活塞冲击速度, m/s。

2 试验结果

采集的随钻数据通常受到操作因素的显著影响, 例如钻机的特定设置、钻孔深度、接换钻杆过程 (Rai et al., 2016; Van Eldert et al., 2020)。这些由接换钻杆操作、钻机振动等因素引起的无效数据和噪声信号, 严重干扰了随钻参数的准确分析和解

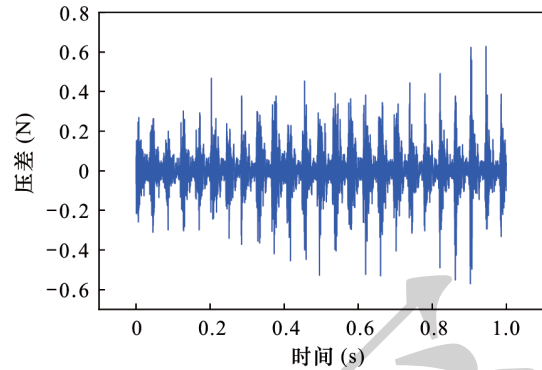


图 3 拾音器采集钻孔冲击音频信号

Fig. 3 Collecting drilling impact audio signals with a microphone

读。因此, 通过对原始随钻测量参数进行信号处理和过滤非正常钻进的有效数据后从而得到反映真实钻进过程的随钻数据 (Ding et al., 2023)。获得处理后结果如图 4, 图中展示的是轴力为 12.5 kN、风压为 1.95 MPa 和冲击频率为 30 Hz 组合下的随钻参数钻进数据。正交试验结果如表 3。

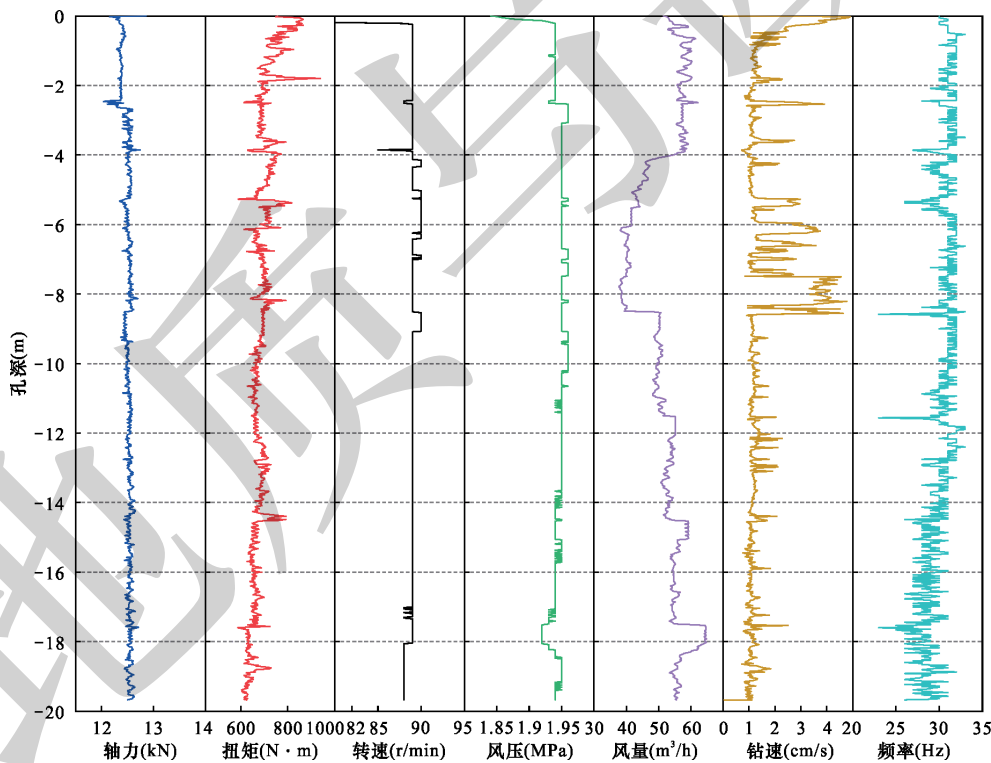


图 4 随钻参数信号

Fig. 4 Drilling parameter signals

3 钻孔效率分析

3.1 随钻参数分析

轴力作为施加给钻头的推进力保证钻头与孔

底岩石有效接触并抑制钻头在冲击岩石后回弹, 轴力和扭矩的关系如图 5 所示。轴力越大, 旋转所需的扭矩就越大, 这样不仅会加大钻头的磨损还会降低凿岩效率。扭矩是为了保证来自冲击机构的后

表3 正交试验结果

Table 3 Orthogonal test results

| 轴力 (N) | 扭矩 (N·m) | 转速 (r/min) | 风压 (MPa) | 风量 (m³/h) | 冲击频率 (Hz) | 钻速 (cm/s) |
|--------|----------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 8530 | 417 | 87 | 1.55 | 56.38 | 22 | 1.00 |
| 9500 | 439 | 88 | 1.55 | 57.82 | 23 | 1.24 |
| 10578 | 479 | 90 | 1.55 | 57.26 | 20 | 1.43 |
| 11520 | 592 | 87 | 1.55 | 57.53 | 21 | 1.35 |
| 12511 | 597 | 87 | 1.55 | 58.3 | 22 | 1.23 |
| 8560 | 371 | 86 | 1.65 | 51.6 | 24 | 1.01 |
| 9520 | 459 | 89 | 1.65 | 62.33 | 25 | 1.31 |
| 10408 | 494 | 87 | 1.65 | 52.09 | 25 | 1.48 |
| 11540 | 607 | 88 | 1.65 | 53.64 | 23 | 1.38 |
| 12499 | 578 | 87 | 1.65 | 61.5 | 24 | 1.28 |
| 8570 | 419 | 87 | 1.75 | 56.38 | 25 | 1.15 |
| 9509 | 480 | 86 | 1.75 | 61.52 | 27 | 1.47 |
| 10558 | 511 | 87 | 1.75 | 60.79 | 26 | 1.67 |
| 11689 | 604 | 86 | 1.75 | 57.07 | 26 | 1.55 |
| 12486 | 638 | 87 | 1.75 | 57.08 | 25 | 1.47 |
| 8540 | 370 | 89 | 1.85 | 55.57 | 29 | 1.10 |
| 9508 | 432 | 87 | 1.85 | 58.55 | 27 | 1.43 |
| 10473 | 475 | 90 | 1.85 | 62.28 | 28 | 1.78 |
| 11582 | 614 | 87 | 1.85 | 58.88 | 28 | 1.69 |
| 12570 | 618 | 88 | 1.85 | 58.14 | 27 | 1.58 |
| 8530 | 388 | 87 | 1.95 | 52 | 31 | 1.24 |
| 9620 | 502 | 90 | 1.95 | 63.53 | 30 | 1.67 |
| 10567 | 496 | 87 | 1.95 | 60.78 | 30 | 1.93 |
| 11527 | 576 | 86 | 1.95 | 63.71 | 31 | 1.82 |
| 12586 | 587 | 87 | 1.95 | 58.97 | 32 | 1.69 |

续冲击之间的旋转,使钻头每次冲击都作用于孔底的一个新部分。转动钻头所需的扭矩主要取决于钻头底部的阻力和与孔壁之间的摩擦阻力,扭矩还随着岩体的软硬程度变化,遇到岩体结构较破碎区域容易造成卡钻导致扭矩出现峰值。回转转速表示改变钻头冲击岩石位置的速度,转速过快或过慢都将影响钻头每次冲击时的有效破碎体积。风压和风量是由空压机的输出决定,其不仅关系到清渣洗孔的质量,还直接影响着冲击器的工作性能(冲击频率和冲击功)。钻进速度为响应参数,其受岩石物理力学特性和其他随钻参数共同影响。这些随钻参数之间互相影响,有着复杂的非线性关系,本文将通过正交试验的结果对各随钻参数的相互响应规律和对钻孔效率的影响进行定量化分析。

3.2 钻速敏感性分析

在钻孔过程中测量钻速是评估钻孔效率的直接方法,钻速定义为单位时间内的钻深。轴力与风压是钻进速度变化的主要影响因素,根据正交实验

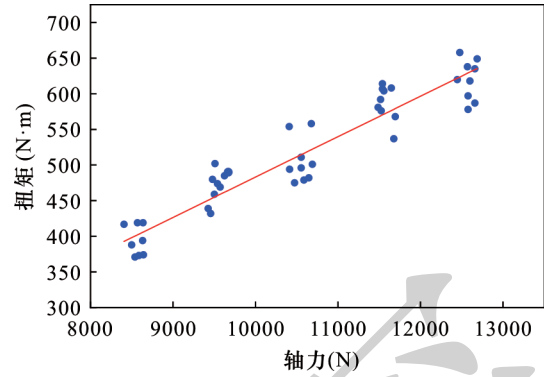


图5 轴力与扭矩的关系

Fig. 5 Relationship between axial force and torque

结果绘制不同轴力、风压下和钻进速度变化关系如图6所示。结果表明:在某一固定的轴力钻进时,钻进速度随风压的增大而增大。而对于同一风压下的钻速变化在轴力的增加下先增加后减小,呈倒“U”抛物线形变化关系,轴力在10.5 kN时会出现一个钻速最佳点,即在轴力小于10.5 kN时,增加轴力可以提高钻进速度,在轴力大于10.5 kN时,钻进速度随轴力的增加而降低。这种最佳状态通常被称为“最佳点”,人们对于“最佳点”给出的解释为钻头磨损的加剧(杨展等,2024)以及岩屑的清理不佳(周劲辉等,2016)。然而,还没有人对存在“最佳点”背后的物理现象给出令人信服的解释。增加轴力将会对钻头压实,影响孔内清渣的效率,钻孔内岩渣不能及时排出导致重复破碎压在钻头球齿下的岩屑,这也将消耗更多的能量从而降低钻孔效率。因此,在潜孔钻机钻孔过程中,轴力的设定并不是越大钻孔效率越高,试验结果显示轴力在10.5 kN时钻进速度最佳。

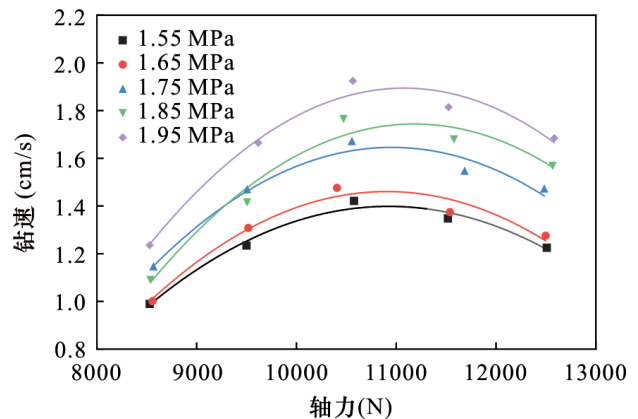


图6 风压、轴力与钻进速度关系

Fig. 6 Relationship between air pressures, axial force, and drilling speed

3.3 碎岩比功敏感性分析

碎岩比功作为评价钻孔效率的关键指标,反映钻进过程中破碎单位体积的岩石所消耗的能量(Chen et al., 2014)。根据正交试验结果分析不同轴力、风压下和碎岩比功的关系如图 7 所示,当在相同风压下,碎岩比功随轴力的增大而增大,而对于相同轴力的条件下,碎岩比功随风压的增大呈“U”型变化关系。由于风压的增大导致钻孔消耗能量的增加,在风压为 1.75 MPa 以下时,钻孔能量的增加提高了岩石破碎体积,因此碎岩比功有较大的降低,但对于大于 1.75 MPa 的风压时,碎岩比功呈缓慢上升的趋势。结合图 6 钻速敏感性分析反映出增加风压,在一定程度上可以增加钻进速度,但考虑能量的消耗,这部分提高的钻速将过量的能量消耗,导致碎岩比功下降。因此,针对碎岩比功的分析,在潜孔钻机作业时选择风压为 1.75 MPa 具有较低的碎岩比功。

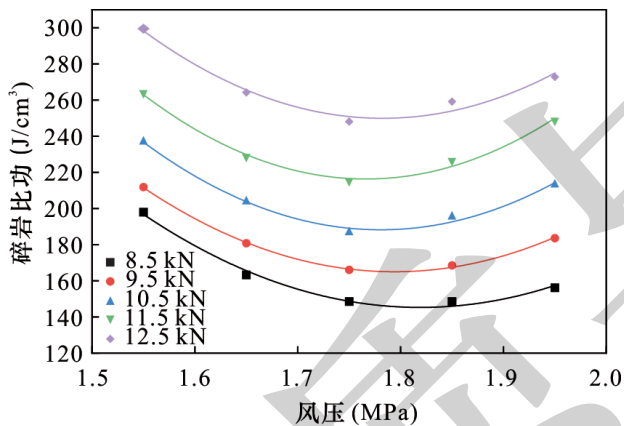


图 7 轴力、风压下和碎岩比功的关系

Fig. 7 Relationship between axial force, air pressure, and specific energy of drilling

在钻孔钻进过程中,冲击频率对钻孔效率也有显著的影响,根据正交试验结果绘制冲击频率与钻进速度、碎岩比功的关系如图 8 所示,结果表明冲击频率与钻进速度有显著的正线性关系,而与碎岩比功为负线性关系。在冲击频率为 26 Hz 时钻进速度与碎岩比功处于平衡状态,在此条件下钻孔效率最优。

为了优化钻孔效率,必须考虑轴力、风压、冲击频率和钻速、碎岩比功之间的平衡,调整这些参数可以导致破碎岩石所需能量的显著变化。这对于评估和提高钻孔作业的性能至关重要。综合以上分析,根据现场钻孔正交试验结果在以钻速和碎岩

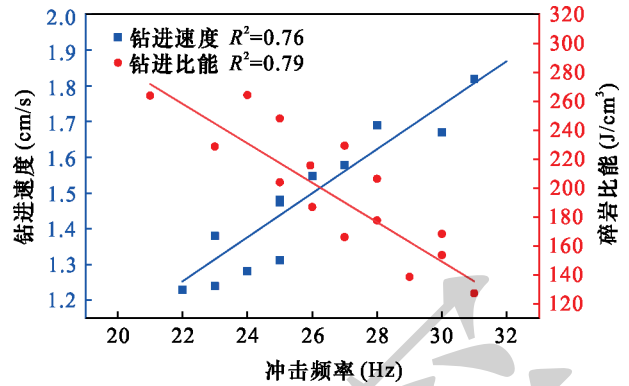


图 8 冲击频率与钻速、碎岩比功的关系

Fig. 8 Relation between impact frequency, drilling rate and specific energy

比功作为评价指标对随钻参数进行分析,获得了作业参数在轴力 10.5 kN、风压为 1.75 MPa 和冲击频率为 26 Hz 的条件下钻孔效率最优。

本次现场随钻测量试验研究得出了随钻参数在轴力为 10.5 kN、风压为 1.55 MPa 和冲击频率为 26 Hz 的组合下有助于改善钻孔效率,在保证较高钻进速度的同时降低钻孔成本。研究结果可为矿山开采规划高效施工提供参考。由于场地条件限制,研究结果局限于石灰岩地层,对岩性复杂多变的岩层还要考虑岩性变化对钻孔效率的影响,需要更一步深入研究来提高和完善岩石参数对钻孔效率的影响研究。

4 结论

本文通过自主研发的潜孔钻机随钻测量系统对钻孔过程的工作参数进行了采集,利用正交试验分析了各随钻参数之间的响应关系,并用钻进速度与碎岩比功作为评价指标对钻孔效率进行评估,获得了以下主要结论:

(1)通过对随钻数据进行相关性分析,结果表明与钻进速度相关性较强的三个随钻参数分别为风压、冲击频率和轴力。

(2)通过对钻孔过程中轴力与扭矩的分析,揭示了轴力与扭矩之间的线性关系。在不同风压钻进条件下,钻进速度随着轴力的增大呈现先增大后减小的抛物线型趋势,钻速最佳点位于轴力为 10.5 kN 处。表明轴力超过这一数值,继续增大轴力反而造成钻头压实影响钻孔清渣效率,孔内岩渣不能及时排除导致钻速降低。

(3)结合碎岩比功与钻速对钻孔效率分析,风压与碎岩比功的变化呈“U”型曲线,风压在 1.75 MPa 时

破碎同体积的岩石所用的能量均低于在其他风压条件下破岩能量;冲击频率在 26 Hz 的条件下钻进速度与碎岩比功达到了平衡状态。

[References]

- Chen Xuyue, Fan Honghai, Guo Boyun, Gao Deli, Wei Hongshu, Ye Zhi. 2014. Real-time prediction and optimization of drilling performance based on a new mechanical specific energy model[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(5): 8221-8231.
- Ding Weijie, Hou Shijun, Tian Shuaikang, Liang Shufeng, Liu Dianshu. 2023. A bayesian optimized variational mode decomposition-based denoising method for measurement while drilling signal of down-the-hole drilling [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 72(8): 1-14.
- Hao Shijun, Chu Zhiwei, Li Quanxin, Fang Jun, Chen Long, Liu Jianlin. 2023. Research status and development trend of near-bit MWD in underground coal mine[J]. *Coal Geology & Exploration*, 51(9): 10-19 (in Chinese with English abstract).
- Hou Shijun, Ding Weijie, Tian Shuaikang, Liang Shufeng, Liu Dianshu, Guo Dachao. 2024. Development and application of MWD system for DTH drilling rig [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 46(7): 1509-1515 (in Chinese with English abstract)
- Izquierdo L E, Chiang L E. 2004. A methodology for estimation of the specific rock energy index using corrected down-the-hole drill monitoring data[J]. *Mining Technology*, 113(4): 225-236.
- Kivade S B, Murthy Ch S N, Vardhan H. 2013. Laboratory investigations on percussive Drilling[J]. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 94(2): 81-87.
- Lee Hyungjoo, Lee Hunjoo P. 2023. Formation lithology predictions based on measurement while drilling (MWD) using gradient boosting algorithms[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 227(3): 211-217.
- Li Hongsheng, Liu Songyong, Chang Huanhuan. 2020. Experimental research on the influence of working parameters on the drilling efficiency[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 95(6): 103-114.
- Liu Hang, Karen Yin K. 2001. Analysis and interpretation of monitored rotary blasthole drill data [J]. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 15(3): 177-203.
- Moradi S, Aalianvari A, Aghajani Bazzazi A. 2023. An efficient experimental model to estimate the performance of the raise borer drilling machine using linear and nonlinear regression approaches in the azad dam in iran [J/OL]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 10(7): 1483-1499.
- Qu Fengtao, Liao Hualin, Liu Jiansheng, Lu Ming, Wang Huajian, Zhou Bo, Liang Hongjun. 2023. Establishment of data-driven multi-objective model to optimize drilling performance [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 23(1): 212-225.
- Rai P, Schunnesson H, Lindqvist P-A, Kumar U. 2016. Measurement-while-drilling technique and its scope in design and prediction of rock blasting [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 26(4): 711-719.
- Rodgers M B, McVay M C, Horhota D J, Hernando J, Paris J M. 2020. Measuring while drilling in Florida limestone for geotechnical site investigation [J/OL]. *Canadian Geotechnical Journal*, 57(3): 1733-1744.
- Schunnesson H. 1998. Rock characterisation using percussive drilling[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(6): 711-725.
- Shen Qiang, Wang Yujie, Cao Ruilang, Zhao Yufei, Liu Yaoru. 2024. Sensitivity investigation of drilling efficiency to operational parameters of a drifter [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 68(5): 1-33.
- Shi Jiaohua, Bi Cheng, Wu Aixiang, Wang Yong, Yin Dongsheng, Zhao Wenxiong. 2024. Upgrading and application of the automated digital mine paste filling system [J]. *Gold*, 45(8): 33-39 (in Chinese with English abstract)
- Shi Yongquan. 2013. Down-the-hole hammer drilling technique [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press: 1-192 (in Chinese).
- Song Xianfeng, Aamo Ole Morten, Kane Pascal-Alexandre, Detournay Emmanuel. 2021. Influence of weight-on-bit on percussive drilling performance [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(7): 3491-3505.
- Teale R. 1965. The concept of specific energy in rock drilling [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 2(1): 57-73.
- Tian S, Hou S, Ding W, Liang S, Liu D, Xie K, Lu X, Yang W, 2024. Rock fracture identification with measurement while drilling data in down-the-hole drills [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(2): 65.
- Ulusay R. 2015. The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014 [J]. Springer International Publishing, 15(1): 47-48.
- Van Eldert J, Schunnesson H, Saiang D, Funchag J. 2020. Improved filtering and normalizing of measurement-while-drilling (MWD) data in tunnel excavation [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 10(3): 103-127.
- Wang Jiachen, Liu Yunxi, Li Yang, Wang Lei. 2024. 60 years development and prospect of mining systems engineering [J]. *Journal of China Coal Society*, 49(1): 261-279 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xueqing, Wu Shuaijun, Tang Hongping, Chen Bo. 2023. Impact of pressure-relief borehole on stability of deep roadway and determination of drillings parameters [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 43(3): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhan, Fang Xiaohong, Tan Songcheng, Yang Kaihua. 2024. Analysis of the wear mechanism of impregnated diamond bits [J]. *Geology and Exploration*, 60(2): 407-413 (in Chinese with English abstract).
- Yaşar E, Ranjith P G, Viete D R. 2011. An experimental investigation into the drilling and physico-mechanical properties of a rock-like brittle material [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 76(3): 185-193.
- Yue Zhongqi. 2014. Drilling process monitoring for refining and

- upgrading rock mass quality classification methods [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 33(10): 1977–1996 (in Chinese with English abstract)
- Yue Zhongwen, Yue Xiaolei, Yang Renshu, Wang Xu, Li Wei, Dai Shiqing, Li Yang. 2022. Progress of lithology identification technology while drilling [J]. Journal of Mining Science and Technology, 7(4): 389–402 (in Chinese with English abstract).
- Yu Qinglei, Wang Yuheng, Li You, Cao Yongsheng, Pu Jiangyong. 2023. Research progress of rock mass structure and mechanical parameter characterization based on measurement while drilling technology [J]. Metal Mine, 63(5): 45–58 (in Chinese with English abstract)
- Yu Zhaocai, Zhang Zheng, Yang Sen, Wang Wen, Liu Huanjie, Yan Rentian, Zhao Caiting. 2023. The deep shale gas drilling optimization method based on real-time drilling parameters [J]. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 59(2): 323–331.
- Zhou Jinhui, Zhang Yong, Gao De-li, Pu Shi-xiong, Wang Rui-bo, Wei Bang-wei. 2016. An experiment for the effect of cutting diameter on the minimum pump rate in pump-injected reverse circulation drilling [J]. Geology and Exploration, 52(1): 159–164 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Guomin, Ding Jing, Huang Jinyu, Hu Mingwei, Wan Ziwei, Xu Qiyuan. 2023. Factors influencing fluidized reduction of iron ore powder based on interactive orthogonal experiment [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 43(6): 119–122 (in Chinese with English abstract)
- [附中文参考文献]
- 郝世俊, 褚志伟, 李泉新, 方俊, 陈龙, 刘建林. 2023. 煤矿井下近钻头随钻测量技术研究现状和发展趋势 [J]. 煤田地质与勘探, 46(7): 1509–1515.
- 侯仕军, 丁伟捷, 田帅康, 梁书锋, 刘殿书, 郭大超. 2023. 露天潜孔钻机随钻测量系统研发与应用研究 [J]. 岩土工程学报, 46(7): 1509–1515.
- 石永泉. 2013. 潜孔锤钻进技术 [M]. 成都: 西南交通大学出版社: 1–192.
- 石教华, 毕成, 吴爱祥, 王勇, 尹东升, 赵雄文. 2024. 自动化数字矿山膏体充填系统升级改造及应用 [J]. 黄金, 45(8): 33–39, 45.
- 汪学清, 吴帅军, 唐红平, 陈博. 2023. 深部巷道钻孔卸压对巷道稳定性的影响及钻孔参数确定 [J]. 矿冶工程, 43(3): 1–5.
- 王家臣, 刘云熹, 李杨, 王蕾. 2024. 矿业系统工程60年发展与展望 [J]. 煤炭学报, 49(1): 261–279.
- 杨展, 方小红, 谭松成, 杨凯华. 2024. 孕镶金刚石钻头磨损机理研究 [J]. 地质与勘探, 60(2): 407–413.
- 于庆磊, 王宇恒, 李友, 曹永胜, 蒲江涌. 2023. 基于随钻测量的岩体结构与力学参数表征研究进展 [J]. 金属矿山, 63(5): 45–58.
- 岳中琦. 2014. 钻孔过程监测(DPM)对工程岩体质量评价方法的完善与提升 [J]. 岩石力学与工程学报, 33(10): 1977–1996.
- 岳中文, 岳小磊, 杨仁树, 王煦, 李为, 戴诗清, 李杨. 2022. 随钻岩性识别技术研究进展 [J]. 矿业科学学报, 7(4): 389–402.
- 周劲辉, 张勇, 高德利, 浦世雄, 王睿博, 韦帮伟. 2016. 泵注反循环岩屑粒径对最低排量的影响实验 [J]. 地质与勘探, 52(1): 159–164.
- 朱国民, 丁敬, 黄金玉, 胡明伟, 万紫薇, 徐其言. 2023. 基于交互正交试验的铁矿粉流态化还原影响因素研究 [J]. 矿冶工程, 43(6): 119–122.

The Influence of Drilling Parameters of Downhole Drilling Rig on Drilling Efficiency

YANG Wei¹, TIAN Shuaikang², GUO Dachao¹, YAO Yi¹, YU Haihang¹

(1. Chengyuan Mining Development Co., Ltd., Liaoyang, Liaoning 111299; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083)

Abstract: The down-the-hole drilling rig performs rock drilling through the combined action of impact force, axial force, and torque, and its drilling efficiency heavily depends on the selection of various working parameters. Therefore, this article uses a self-developed down-the-hole drilling machine measurement system to collect drilling parameters during the drilling process and analyze the effects of eight working parameters, including thrust, torque, wind pressure, and impact frequency, on the efficiency of impact drilling. Based on the rock drilling characteristics of a down-the-hole drilling rig, an orthogonal experiment was designed and on-site drilling tests were conducted. It is revealed that the main parameters affecting drilling efficiency are wind pressure, impact frequency, and axial force. In addition, we found that there is an optimal matching value between axial force and drilling speed under different wind pressure conditions. At different levels of axial force, there exists an inverse proportional relationship between wind pressure and the specific energy of rock fragmentation. Based on the evaluation indicators of drilling speed and rock fragmentation specific energy, the optimal drilling parameter combination was determined for an axial force of 10.5 kN, wind pressure of 1.75 MPa, and impact frequency of 26 Hz. The research results can provide theoretical references for optimizing the drilling process of down-the-hole drilling machines, improving production efficiency, and reducing production costs.

Key words: measurement while drilling rig, downhole drilling, open-pit mine, parameter optimization, drilling efficiency