

月面深部钻进钻头及钻进规程的优选研究

邹欣悦¹, 李 谦^{*1,2}, 罗浩天¹, 曾小龙¹, 陈嘉豪¹

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059;

2. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059)

摘要:我国“嫦娥”工程第三期已经实现对月球的探测及取样。针对进一步月球深部的可行性探索,本文基于月面深部钻进钻头及钻进规程的优选问题,设计正交试验。分析钻头类型和钻进规程参数对钻进效率和功耗的影响。试验结果表明,PDC 钻头以高达 3.98 mm/s 的钻速及中等的钻进功耗远优于其他类型的钻头。从试验因素的影响程度、取心效果和排屑能力的角度研究钻进规程引起的钻进效率和功耗的变化,结合理论模型得出转速、钻压和泵量与钻速和功率之间的关系。针对试验结果初步优选出最佳钻头类型和钻进规程组合,为后续钻进试验提供技术支持。

关键词:月球探测;取心钻头;PDC 钻头;钻进规程参数;钻进效率;功耗

中图分类号:P634;P184 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)S1-0183-09

Research on drill bit and drilling procedure optimization for deep drilling on lunar surface

ZOU Xinyue¹, LI Qian^{*1,2}, LUO Haotian¹, ZENG Xiaolong¹, CHEN Jiahao¹

(1. College of Environmental and Civil Engineering, Chengdu University of Technology,
Chengdu Sichuan 610059, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection
(Chengdu University of Technology), Chengdu Sichuan 610059, China)

Abstract: The third phase of the Chang'e project has realized the exploration and sampling of the moon. In order to further explore the feasibility of the deep moon, the orthogonal test is designed based on the optimization of drill bit and drilling procedures in deep drilling. The effects of bit type and drilling schedule parameters on drilling efficiency and power consumption are analyzed. The results showed that the PDC bit outperformed other types of bits with the rate of penetration (ROP) of up to 3.98mm/s and a moderate drilling power consumption. The changes in drilling efficiency and power consumption caused by drilling procedures are studied from the angle of influence degree of test factors, coring effect and cutting-removal ability, and the relationship among rotational speed, weight on bit and pump volume and drilling rate and power is obtained by combining theoretical model. Based on the test results, the optimal bit type and drilling schedule combination are preliminarily selected to provide technical support for subsequent drilling tests.

Key words: lunar exploration; core bit; PDC bit; drilling regime parameters; drilling efficiency; power

收稿日期:2023-05-30 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.S1.027

基金项目:国家自然科学基金项目“量化月壤扰动特征的模块化月球钻进力学模型研究”(编号:42072344);青年科学基金项目“月表采样对月壤物理力学性质的影响机理研究”(编号:2022NSFSC0991)

第一作者:邹欣悦,女,汉族,1999年生,岩土工程专业,硕士研究生,研究方向为月面深部钻探工具与钻进工艺优化,四川省成都市东三路1号,2698600216@qq.com。

通信作者:李谦,男,汉族,1987年生,副教授,地质资源与地质工程专业,博士,从事钻井智能化分析与应用研究工作,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,liqian2014@cdu.edu.cn。

引用格式:邹欣悦,李谦,罗浩天,等.月面深部钻进钻头及钻进规程的优选研究[J].钻探工程,2023,50(S1):183-191.

ZOU Xinyue, LI Qian, LUO Haotian, et al. Research on drill bit and drilling procedure optimization for deep drilling on lunar surface [J]. Drilling Engineering, 2023,50(S1):183-191.

0 引言

月球探测是世界各国航天研究的重要内容。20世纪,美国的 Apollo 载人航天首次成功登陆月球并采集 381.7 kg 月岩和月壤样本^[1]。前苏联 Luna 系列登月计划率先实现了机器人探测取心采集 300 g 岩心样本^[2-3]。我国“嫦娥”计划在 2004 年也成功实现第一阶段的月球探测^[4-5],这标志着我国的探月工程取得了重大突破。2020 年“嫦娥五号”顺利完成了月球探测计划的第三阶段任务,以月球表面采样和钻孔采样两种采样方式钻进 2 m 并成功带回月岩和月壤 1.7 kg^[6-8]。与地球环境不同,在月球环境下受真空、低温、无水等因素的影响,为钻取采样带来了一定的难度,严重影响钻进效率^[9]。针对月球表面的深部钻进取样,钻头的类型及钻进规程决定了能否高质量、高效率地进行钻取。

从目前对星球探测的钻头研究来看,为罗塞塔任务提出的 SD2 钻具以 1 mm/min 的钻速钻进中硬岩,钻机钻入中硬岩的功率消耗也仅只有 4.5 W^[10]。Zacny 等^[11]提出的用 LunarVader 钻头在 1 h 内以 100 W 的功率和小于 100 N 的钻压能穿透 1 m 岩石层,降低了钻头的功耗。李大佛及其团队^[9]研制的特种取心 PDC 金刚石钻头能钻进岩石等级 6 级以内的月壤层。唐庭武^[12]提出的一种复合式硬质合金采样钻头,钻进中会减小对月壤的扰动以及良好的排屑能力降低重复破岩的功率消耗,提高钻进效率。Bai 等^[13]提出用旋转冲击式超声钻头(RPUD)对岩石进行取样,在 5 N 钻压下,钻穿砂岩的最大速度为 13 mm/min,比传统钻头更适合在小行星上取样。

由于月球表面含有月壤和月岩,基于对此的考虑,本文在设计钻头及钻进规程的优选的试验中,选择了与月岩可钻性等级接近的中细粒岩屑砂岩作为钻进试验的岩样。以钻头类型、转速、钻压和泵量为影响因素设计了四因素三水平正交试验,测试钻速和扭矩作为表征钻进效率和功耗的目标参数。根据试验结果分析钻头类型、转速、钻压和泵量因素对钻速、扭矩以及功率的影响程度,明确各因素对目标参数的影响趋势。结合取心效果、排除岩屑的能力以及钻头磨损情况的分析,优选出能达到最优钻井效率的同时功耗也相对较低的钻头类型和最佳钻进规程参数,为后续试验提供理论价值。

1 钻取采样试验设备

本次室内试验主要在由 AC-VFD-AC 交流变频电驱动数字控制的机械传动、液压给进顶驱式岩心钻机 XD-1DB 型改进的微钻试验台上完成,如图 1 所示。试验所使用的操作台的核心装置包括动力头、给进机构和泥浆泵,具体参数如表 1 所示。



图 1 微钻试验台

表 1 试验设备关键参数

部件	参 数	参数值
动力头	额定功率/kW	15
	额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	高档 0~1296;低挡 0~424 r/min
	额定扭矩/($N \cdot m$)	高档 244(0~648 r/min);低挡 696(0~212 r/min)
给进机构	形式	双油缸液压给进(缸径 90 mm,杆径 50 mm)
	提升能力/kN	127(10 MPa)
	加压能力/kN	8.8(10 MPa)
	给进行程/mm	600
泥浆泵	给进速度/($mm \cdot s^{-1}$)	0~7(0~25.2 m/h)
	额定泵压/MPa	0~5 MPa
	额定流量/($L \cdot \min^{-1}$)	0~160

2 钻进试验设计

2.1 试验方案设计

经调研统计,各国当前已实施和试验中的钻进机具关键参数如图 2 所示。从钻孔直径来看,当前的行星钻孔直径均偏小,已实施的钻孔直径 ≥ 32 mm,而在试验中最大也仅只有 64 mm。从转速上看,各国的研究均认为 150~300 r/min 的转速是满足采样要求的经济转速。无论是已实施还是试验机型的钻进深度,最大钻深均未超过 3 m。对于钻进功率而言,已实施的机型偏大,最大有接近 1000 W 的功率,中位数接近 200 W,而试验机型整体在向小

于200 W的低功耗方向研发。其中,调研缺乏钻压数据,是由于大多设备的钻压由机具自重提供,并未在相关论文中具体进行阐述。

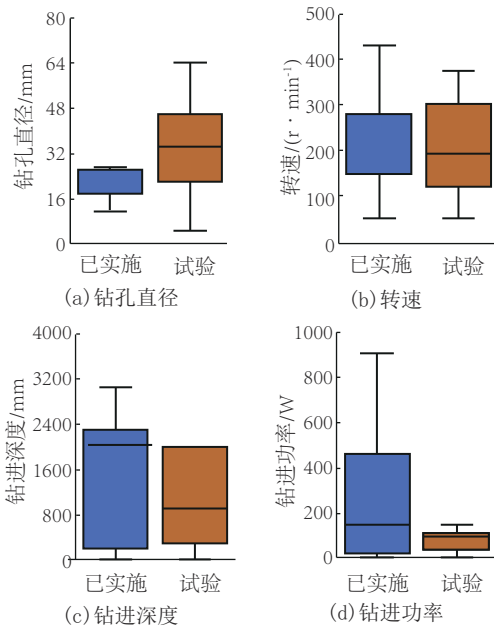


图2 各国行星采样钻进机具参数统计

基于上述的调研,本次试验设计拟使用相同外径大小为36 mm的钻头,采用正交试验法^[14]。试验设计为确定钻进效率和钻进功耗的影响因素,选取钻头类型、转速、钻压和泵量4个影响因素,每个影响因素包含3个水平值,设计了四因素三水平 $L_9(3^4)$ 正交试验表。钻头因素的水平值考虑到钻进试验中常用钻头,选择了孕镶金刚石钻头、PDC钻头和硬质合金钻头3种类型的钻头。转速因素的水平则根据调研以往的钻进试验来选择^[15-16]。由于在调研中极少涉及钻压相关信息,因此对于钻压因素的水平设计而言,结合设备信息选用了1500、2000和2500 N进行试验。在此次所用的设备中无法满足干钻条件,则在设计试验方案时拟采用尽可能低的泵量靠近无水环境,选用了6、8、10 L/min 3种泵量。具体试验参数设计如表2所示。

监测目标参数方面,选择平稳钻进50 mm岩样的平均钻速与平均扭矩作为评价指标。平均钻速可以分析钻进效率,平均扭矩有助于后期优选对应的动力头。同时,通过监测实时钻进扭矩 T ,结合转速 n 计算获得钻进功率 P :

$$P = Tn/9550 \quad (1)$$

表2 试验参数设计

试验组数	钻头类型	转速/(r·min ⁻¹)	钻压/N	泵量/(L·min ⁻¹)
1	孕镶金刚石	150	2000	8
2	孕镶金刚石	250	2500	10
3	孕镶金刚石	350	1500	6
4	PDC	150	2500	6
5	PDC	250	1500	8
6	PDC	350	2000	10
7	硬质合金	150	1500	10
8	硬质合金	250	2000	6
9	硬质合金	350	2500	8

2.2 试验钻头设计

基于本次试验目的,设计并加工了孕镶金刚石、PDC和硬质合金3种钻头,具体结构如图3所示。

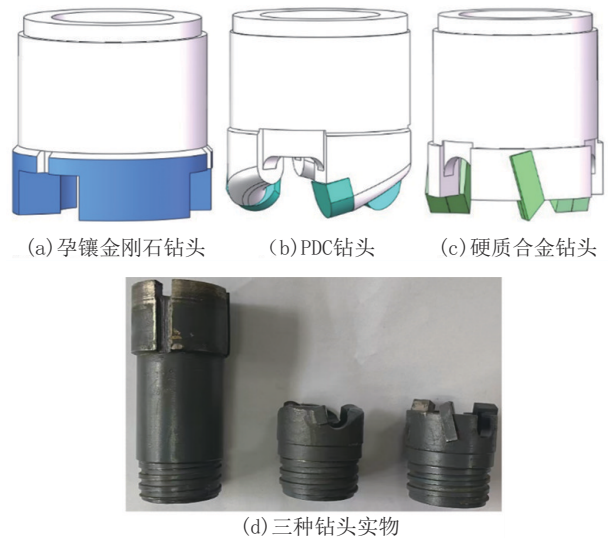


图3 试验使用钻头

试验中所用3种钻头的基本尺寸如表3所示。以刻削破岩方式的PDC和硬质合金钻头在进行结构设计时采用相同的15°负倾角镶嵌,PDC切削具为切割过的8 mm直径圆片,硬质合金切削具为4个4 mm宽度的条形切削具并排镶嵌。而以磨削破岩的孕镶金刚石钻头胎体部分的配方由25%铁粉(Fe)、20%钴粉(Co)、50%铜基预合金粉(CuRe+663Cu)、4%镍(Ni)和1%锰(Mn)所组成,在70%浓度、45/50目数(单一粒径)、980℃烧结温度、15 MPa压力以及6 min保温时间下烧结而成。

表3 试验用钻头基本尺寸

钻头类型	外径/	内径/	高/	单边出刃/
	mm	mm	mm	mm
孕镶金刚石钻头	36.8	24.1	80	
PDC钻头	35	21.1	35	0.6
硬质合金钻头	36	20.1	38.7	1.1

3 钻进试验的结果与分析

3.1 试验结果

在本次优选钻头和钻进规程的试验中,为了研究钻进效率和钻进功耗的影响因素,选择平均钻速、钻进扭矩平均值以及平均功率作为评价指标,试验的实测数据如表4所示。

表4 正交试验结果

试验组数	钻头类型	转速/(r·min ⁻¹)	钻压/N	泵量/(L·min ⁻¹)	钻速/(mm·s ⁻¹)	扭矩/(N·m)	功率/W
1	孕镶金刚石	150	2000	8	0.38	38.72	608.24
2	孕镶金刚石	250	2500	10	0.85	55.56	1454.40
3	孕镶金刚石	350	1500	6	0.87	49.06	1797.97
4	PDC	150	2500	6	3.29	56.47	886.99
5	PDC	250	1500	8	3.69	51.88	1358.21
6	PDC	350	2000	10	4.97	55.56	2036.09
7	硬质合金	150	1500	10	0.80	42.18	662.56
8	硬质合金	250	2000	6	0.79	50.25	1315.33
9	硬质合金	350	2500	8	1.55	64.87	2377.35

为了进一步研究各因素对目标参数的影响,需要对正交表的试验数据进行处理,数据结果常用的处理方法为极差分析^[17]。使用该方法对数据结果进行分析可以更为直观地看出各因素的影响程度,其计算式如(2)所示:

$$\begin{cases} R_i = \max k_{i,j} - \min k_{i,j} \\ k_{i,j} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_{i,n} \end{cases} \quad (2)$$

式中: i ——各影响因素; j ——每个因素中的水平; R_i ——各因素的极差值; $y_{i,n}$ ——试验值; $k_{i,j}$ ——在水平值为 j 时因素 i 的平均值; N ——水平总数。

根据表4的试验数据结果结合公式(1)进行极差分析后的结果如表5所示。

表5 极差分析结果

目标参数分析	钻头		转速		钻压		泵量	
	类型	试验值	水平值	试验值	水平值	试验值	水平值	试验值
钻速分析	孕镶金刚石	0.70	150	1.49	150	1.79	6	1.65
	\overline{K} PDC	3.98	250	1.78	200	2.05	8	1.88
	硬质合金	1.05	350	2.47	250	1.90	10	2.21
	R	3.28		0.98		0.26		0.56
扭矩分析	孕镶金刚石	47.78	150	45.79	150	47.71	6	51.93
	\overline{K} PDC	54.64	250	52.56	200	48.18	8	51.82
	硬质合金	52.43	350	56.50	250	58.97	10	51.10
	R	6.86		10.71		11.26		0.83
功率分析	金刚石	1286.87	150	719.26	150	1272.91	6	1333.43
	\overline{K} PDC	1427.10	250	1375.98	200	1319.89	8	1447.94
	硬质合金	1451.75	350	2070.47	250	1572.91	10	1384.35
	R	164.88		1351.21		300.00		114.51

3.2 试验因素的影响程度分析

从表5极差分析结果来看,4种因素对目标参数平均钻速、平均扭矩和平均功率的影响程度如图4所示。根据图4可以得出影响钻进效率最大的因素为钻头类型,其次是转速因素,泵量因素对于平均钻速的影响较小,而影响程度最小的为钻压因素。从图中可以明显看出钻头类型的影响程度远远大于其他3种因素,其中从表5三组试验数据的极差结果分

析,PDC钻头的钻速甚至是孕镶金刚石钻头和硬质合金钻头的数倍。就转速和钻压而言,转速的影响程度大于钻压,因此在提高钻进效率时应控制转速因素。由于本试验在有水环境进行,泵量则在本次实验中代表了排除岩屑的能力,试验结果也显示及时排除岩屑会有效提高钻速,其控制钻速的能力甚至超过了钻压。

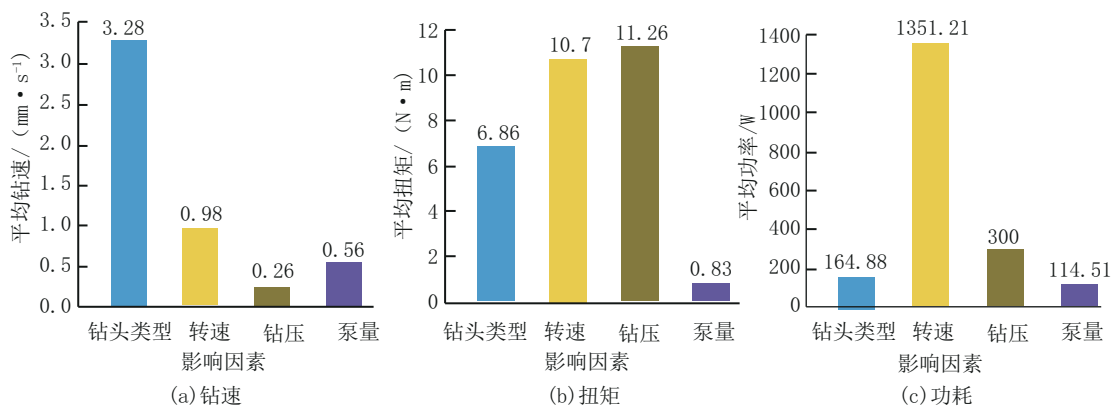


图4 试验因素影响程度分布

由图4可知,影响钻进扭矩的因素排序为:钻压>转速>钻头类型>泵量。从扭矩的角度上看,钻压和转速明显影响了实时钻进扭矩,其中钻压的影响略高于转速。钻头类型对扭矩的影响程度也偏大,但不如钻压和转速的影响程度大。泵量的变化几乎对扭矩不产生任何影响。因此在选择合适的动力头驱动钻头时钻压和转速是更具有参考意义的因素。

针对钻进功率这一目标参数,其影响因素排序为:转速>钻压>钻头>泵量,可见转速对功率的消耗起决定性影响,影响程度远超过其他因素,调整转速将明显引发功率的变化,因此在考虑功率设计时转速无疑将作为首选考虑因素。

综合上述对钻速、扭矩和功率的影响程度分析,对于月球钻进机具的设计首选钻头类型应考虑PDC钻头以获得更高的钻速,在选定动力头时重点考虑转速和钻压的协调以适配合适的扭矩,考虑功率因素时应首选转速因素,但对转速的调整需同时注意钻速和功率的协调。

3.3 试验因素的影响趋势分析

3.3.1 钻头类型因素的极差结果分析

钻头类型对钻进效率和功耗的影响趋势如图5

所示。针对本次实验所采用的玄武岩岩样,PDC钻头钻进的平均钻速可达3.98 mm/s,远超过孕镶金刚石钻头的0.7 mm/s和硬质合金钻头的1.05 mm/s的平均钻速。从扭矩结果来看,由于碎岩方式的不同,PDC钻头和硬质合金钻头是以刻削为主要碎岩方式的,在碎岩过程中会产生相对更大的扭矩,分别为54.64 N·m和52.63 N·m。而金刚石钻头以磨削为主要碎岩方式,则产生的扭矩相对较小,为47.78 N·m。就功率而言,孕镶金刚石钻头功耗最低(1286.87 W),相对PDC钻头的1427.1 W和硬质合金钻头的1451.75 W分别降低了9.8%和11.4%。

根据钻头类型的影响趋势分析结果,PDC钻头尽管会提高部分切削功耗,但结合其对钻进效率的巨大提升,PDC钻头应是最佳钻头类型。

3.3.2 转速因素的极差结果分析

转速对钻井效率和功耗的影响趋势相同,平均钻速、扭矩以及功率将随着转速的提升而显著提升,转速的变化对目标参数的影响结果如图6所示。转速从150 r/min提升至350 r/min时,平均钻速将从1.49 mm/s提升至2.47 mm/s,提升幅值65.7%;同时平均扭矩将从45.79 N·m提升至56.49 N·m,提升幅值23.4%。平均功耗将从719.26 W提升至

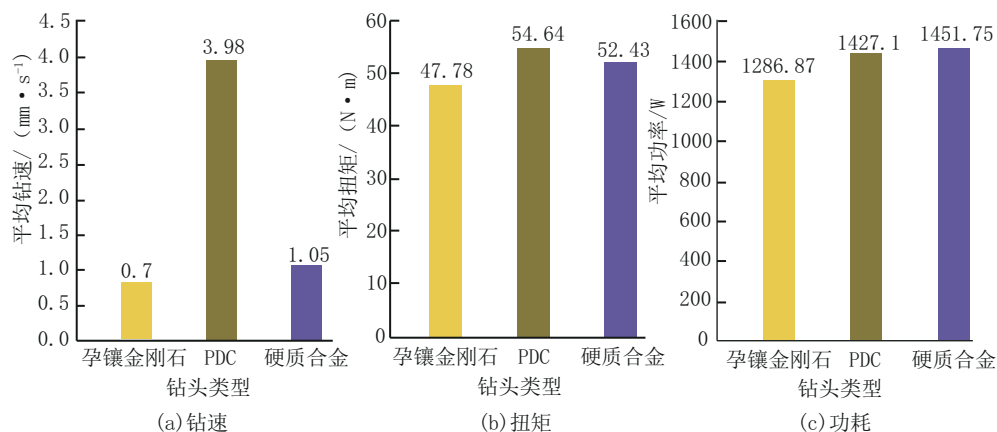


图5 钻头类型因素对钻进效率和功耗的影响趋势

2070.47 W,提升幅值187.9%。结合变化趋势和提升幅值来考虑,为提升钻进效率,应在功耗许可的条件下尽量采用高转速钻进。

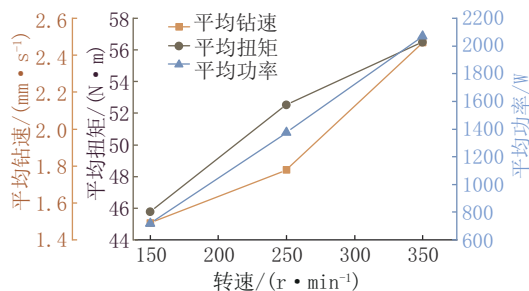


图6 转速因素对钻进效率和功耗的影响趋势

3.3.3 钻压因素的极差结果分析

图7为钻压因素对钻进效率和功耗影响的变化趋势图。从图中的变化趋势来看,钻压对平均钻速的影响存在峰值,当钻压在2000 N时可获得最大的平均钻速2.05 mm/s。从扭矩的角度看,钻压在2000 N之前平均钻进扭矩保持在48 N·m左右,但钻压的进一步增大将会带动钻进扭矩的显著提升。当钻压增加到2500 N,平均钻速下降到1.9 mm/s,降低7.3%,但平均扭矩增加至58.97 N·m,提升22.4%。从功率的角度来看,变化趋势与扭矩类似,钻压达到2000 N之前功耗缓慢从1272.9 W提升至1319.9 W,提升幅值仅3.7%,但钻压增长至2500 N后,功率迅速提升至1572.91 W,提升幅值达19.2%。

通过对钻压因素的分析可知,该因素在试验中会存在阈值的情况,当钻压达到阈值时能取得较高的钻速同时功耗也不会明显的增加,但超过阈值后会引发钻速显著下降,此时的功耗也会急剧上升,这

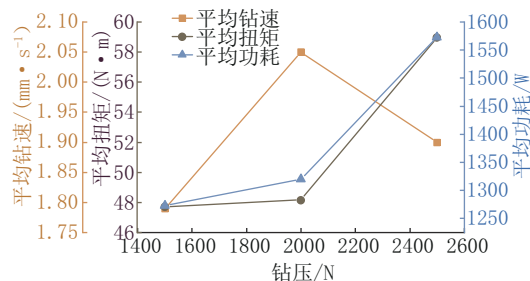


图7 钻压因素对钻进效率和功耗的影响趋势

也与常规钻探的临界规程参数规律类似。

3.3.4 泵量因素的极差结果分析

泵量在本次试验中用以表征排出岩屑的能力,减少岩屑对试验的影响,泵量越大代表排屑能力越强。针对本次试验泵量对钻进效率和功耗的影响如图8所示,平均钻速将随排屑能力的下降而明显下降,也就是说这会导致岩粉的堆积变多。当平均钻速从2.21 mm/s下降至1.65 mm/s时,即下降幅值为25.3%,说明平均钻速将随排屑能力的下降(或岩粉的堆积)而明显下降。从扭矩结果来看,平均扭矩从51.1 N·m略微提升至51.93 N·m,说明孔底清洁状况变差导致岩粉堆积过多,因此重复破碎对扭矩的影响也并不明显。就功耗而言,平均功耗在1333~1447 W之间波动,尽管存在波动,但仍小于其他因素产生的影响。

通过分析表明,泵量代表的排屑能力强弱对钻进效率影响明显,在后续试验中排屑能力应着重考虑。

3.4 取心效果分析

由于钻头类型的不同,在钻进过程中稳定性也会不同,进而导致钻孔尺寸以及所取岩心尺寸的不

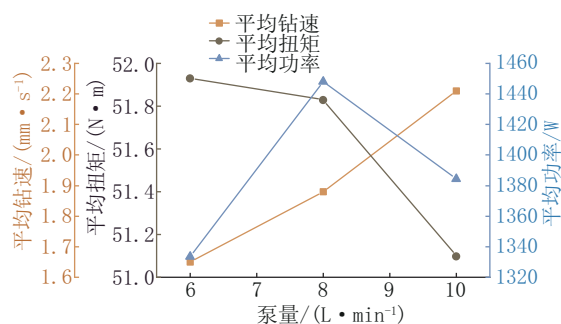


图8 泵量因素对钻进效率和功耗的影响趋势

同。根据现场试验的观察,孕镶金刚石钻头在钻进过程中表现得最为平稳,因而能够取到直径最大、光滑程度最好以及完整性最高的岩心。3种钻头在钻进时的钻孔和所取岩心如图9所示。尽管PDC钻头在3种钻头中的钻速最快,但由于自身结构较为锋利以及在钻进过程中的不稳定,会减小钻取的岩心直径,图9左图中右下孔即为PDC钻孔,与其余3个孕镶金刚石钻孔存在明显区别,硬质合金钻头取心效果则介于两者之间。

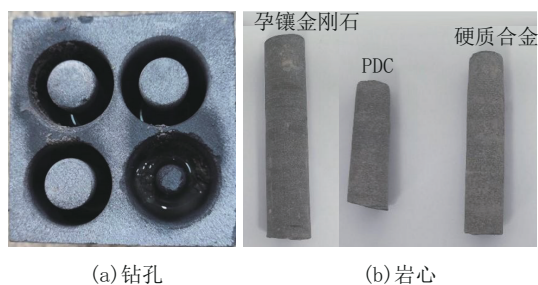


图9 试验钻取后钻孔和岩心

试验过程中可观察在开孔阶段振动明显,达到一定深度后振动逐渐减缓的现象。将岩心取出后测量开孔直径和终孔直径的平均值,并对比表3钻头尺寸所获得的理论取心直径。3种直径所取岩心尺寸的变化如图10所示。通过对比可明显看出孕镶金刚石钻头钻进平稳,在整个钻进过程中均能基本保持理论直径不变。PDC钻头在整个钻进过程中会明显出现因振动而引起的岩心磨损,无论是开孔还是终孔阶段的岩心尺寸均小于理论尺寸。同时PDC钻头在开孔阶段振动明显,岩心尺寸从理论值21.1 mm下降至17 mm,在钻进的后期会趋向稳定但仍然会磨损岩心,相比于前期磨损程度会减小。硬质合金钻头在开孔阶段相对比较平稳,但钻进岩样后仍然会产生振动,而且比孕镶金刚石钻头更加锋利,进而导致其岩心终孔直径大于理论直径。

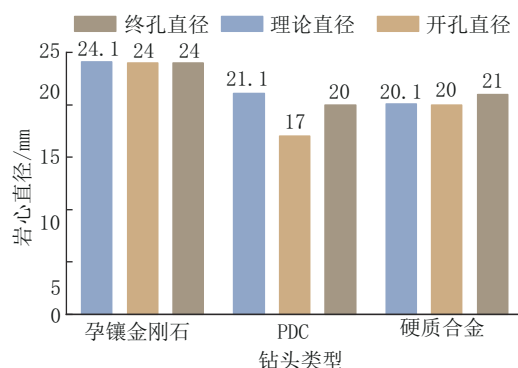


图10 三种钻头钻取岩心的尺寸变化

3.5 排屑效果分析

本次所用的试验设备因无法进行无水条件下的干钻试验,故尽可能通过减小泵量以靠近干钻条件。在试验过程中发现排屑效果会明显影响钻进效率,如图11所示。对比3种类型钻头的排屑情况,孕镶金刚石钻头因磨削钻进则岩粉较细,在钻进过程中有水会更容易排除,不会堆积。但PDC钻头和硬质合金钻头基于其刻削的碎岩机理,岩屑较粗不易排出导致在钻孔中堆积(图11a),更严重的情况在于无法排出的岩粉将在钻孔中被重复破碎,形成极为细腻的岩屑泥(图11b),增加钻进功耗但无法进尺。同时,无法被顺利排出的岩粉也将在钻头上形成泥包(图12),钻头无法正常切削岩石也会阻碍进尺,形成无进尺、重复破碎、泥包、无进尺的循环。因此排屑能力的好坏将是后期无水干钻的重要影响因素。

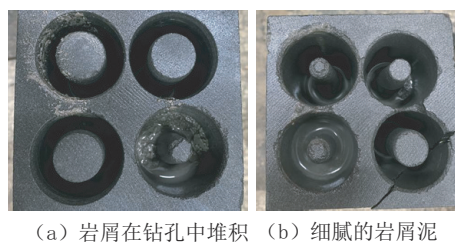


图11 排屑不畅引起的岩粉堆积

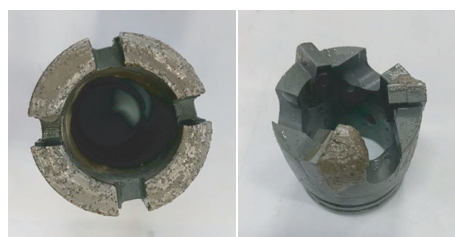


图12 试验过程中钻头出现的泥包现象

3.6 钻头磨损分析

针对本次设定的试验组各自进行了3次重复试验,试验过程中钻头出现了明显的磨损,进而对钻进

效果产生了较为明显的影响,钻头磨损对试验的钻速影响如图13所示,对3种钻头的磨损分析如下。

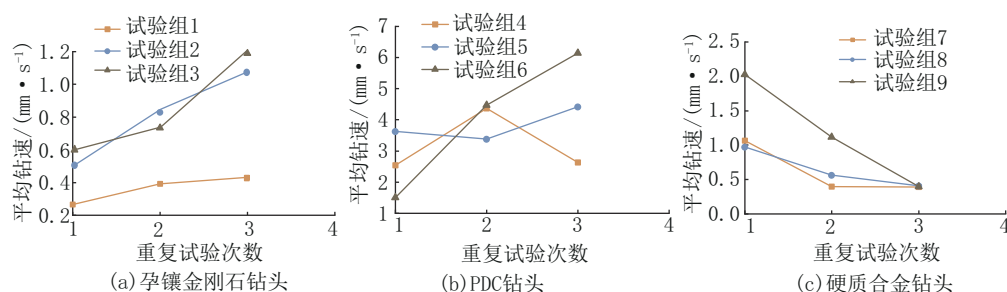


图13 不同试验组钻头磨损对钻速的影响趋势

(1)孕镶金刚石钻头在钻进过程中随着切削而开刃(即钻头胎体被磨损而使金刚石颗粒出露,如图14a),进而增强了其切削能力,因此呈现出随着试验的进行,其平均钻速增加的现象。

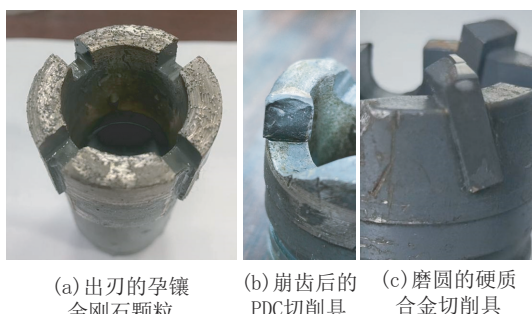


图14 试验后钻头的磨损情况

(2)PDC钻头在试验过程中出现崩齿(图14b),导致3个切削具不能保持在同一平面上,在总钻压一定的前提下实际增大了切削具的单位钻压,进而引起平均钻速的上升。

(3)硬质合金钻头在试验过程中被磨圆(图14c),极大地降低了切削能力,因此在重复试验过程中钻速发生了显著的下降。

结合钻头的磨损状态,在3次重复实验后采用加权平均的方式获得最终的实验数据。其中针对孕镶金刚石钻头开刃的现状,3次重复试验的加权比例为2:4:4,重点考虑开刃后的切削效果。针对PDC钻头,3次重复试验的加权比例为4:4:2(第一次试验中第6组的结果过低导致可信度降低,故加权比例修订为0:7:3),减少钻头崩齿的影响。硬质合金钻头3次重复试验的加权比例设置为6:2.5:1.5,以此减少钻头切削具被磨圆后的影响。

4 分析与讨论

基于上述研究,基本可确定采用PDC钻头会取得最佳的钻进效率。再结合正交分析的试验原理,可根据各试验参数的影响趋势分析获得大致的最优参数组合。本次推演在固定功耗的条件下推演合理的转速和钻压,主要的计算步骤如下:

(1)结合表4的试验结果,选择PDC组的钻压WOB、转速RPM、功率P和钻速ROP分别进行回归,分别以功耗和钻速为因变量,建立以转速和钻压为自变量的平面方程如式(3)所示(三点建立平面方程, R^2 固定为1):

$$\begin{cases} P = 0.1378WOB + 6.09RPM - 370.9 \\ ROP = 5.87 \times 10^{-4}WOB + 9.87 \times 10^{-3}RPM + 0.3433 \end{cases} \quad (3)$$

(2)选定符合功耗要求的钻压和转速范围,结合试验的控制要求,整机功耗 ≤ 1000 W,故钻头切削功耗上限预估 $P_{\text{drill-max}} \leq 800$ W,剩余20%给上部机械结构,将固定功耗代入式(3)拟合的功率公式,可分别获得符合功耗的钻压和转速范围:

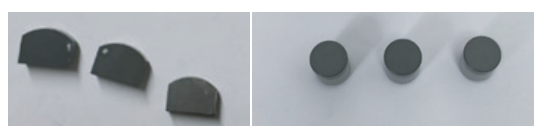
$$0.1378WOB + 6.09RPM \leq 1170.9 \quad (4)$$

(3)选定符合钻速要求的钻压和转速范围,结合试验的控制要求,钻速 ≥ 0.5 m/h(0.139 mm/s),结合式(3)拟合的钻速公式常数项为0.3433,大于钻速要求的0.139,钻压和转速不可能为负,故钻速一定能满足最低要求。

(4)结合图7的结论,钻压对钻速的影响存在峰值,故钻压可直接选择2000 N,代入式(4),可得转速的范围为 $RPM \leq 147$;

(5)上述选择代入式(3),可得预测钻速峰值为2.97 mm/s。

从取心效果、排屑和钻头磨损的情况看,尽管PDC钻头取心效果存在明显的振动和切削具崩齿磨损,但是该现象主要由于PDC齿的安装与自身强度因素所致,在更精细的控制安装效果与选用整体结构、性能更加良好的圆形PDC片,如图15所示,这也将进一步降低钻头振动幅度和PDC齿磨损的程度。而从排屑角度上看,本次试验中仅PDC钻头未出现过钻头泥包现象,但唯一一次因排粉不畅而停机维护的情况也出现在PDC钻头组,据现场分析判断为进尺过快导致岩粉过多所造成。



(a)切割过的
PDC复合片

(b)正常使用的
圆形PDC复合片

图15 本次试验所用的PDC复合片

5 结论

本文为优选月面深部钻进的钻头及钻进规程参数,对钻头类型、转速、钻压和泵量4个结构参数对钻进效率和功耗的影响进行了正交试验设计,从正交试验结果的极差分析、取心效果以及钻头磨损的角度进行综合分析,可以得出以下结论:

(1)就钻头选择来看,孕镶金刚石钻头钻进平稳且功耗低,但同时钻进效率也最低,磨削的细岩粉和更小的环空间隙在月球无水条件下会提高排屑难度,降低钻速。

(2)硬质合金钻头钻进效率略高于孕镶金刚石钻头,相较于PDC钻头具有相对更好的排屑条件和功率消耗,但最快的磨损率不容忽视,一旦磨圆后其钻进效率将明显下降。

(3)PDC钻头是以细砂岩为核心目标的条件下钻进最佳的钻头,因其具有相对最高的钻进效率和中等的钻进功耗,相对孕镶金刚石钻头孔壁环空更大,具备更良好的排屑条件。

(4)从钻进规程角度来看,转速与钻进效率正相关,在功耗允许的条件下应尽可能提高转速;钻压存在阈值,达到阈值前与钻进效率正相关,达到阈值后继续提高钻压会引发钻进效率的下降与功耗的显著提升,寻找对应钻头的钻压阈值极为关键;钻进过程

中的孔内排屑清洁能力与钻进效率正相关,更好的排屑不仅会提升钻速,更会防止排粉不畅引发的重复破碎对功率的浪费和钻头的磨损。

参考文献:

- [1] 李斌斌,周琴,何录忠,等.月岩采样及其物理力学特性调研分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(5):1-7.
- [2] Allen Carlton, Allton Judith, Lofgren Gary, et al. Curating NASA's extraterrestrial samples—Past, present, and future [J]. Geochemistry, 2011, 71(1):1-20.
- [3] Gao Mingzhong, Wang Xuan, Zhang Guoqing, et al. The novel idea and technical progress of lunar in-situ condition preserved coring [J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2022, 8(2):46.
- [4] 欧阳自远.月球探测的进展与中国的月球探测[J].地质科技情报,2004,23(4):1-5.
- [5] Zheng Yongchun, Ouyang Ziyuan, Li Chunlai, et al. China's Lunar Exploration Program: Present and future [J]. Planetary and Space Science, 2008, 56(7):881-886.
- [6] Leslie Mitch. China's latest moon mission returns new lunar rocks[J]. Engineering, 2021, 7(5):544-546.
- [7] 李谦,高辉,谢兰兰,等.月球钻探取样技术研究进展[J].钻探工程,2021,48(1):15-34.
- [8] 林杨挺,欧阳自远.地球化学发展新机遇:嫦娥5号月球样品研究[C]//中国矿物岩石地球化学学会第九次全国会员代表大会暨第16届学术年会.西安:2017.
- [9] 李大佛,雷艳,许少宁.月球钻探取心特种钻头研制与试验[J].地球科学(中国地质大学学报),2013(S1):167-173.
- [10] Magnani P. G., Re E., Senese S., et al. Different drill tool concepts[J]. Acta Astronautica, 2006, 59(8-11):1014-1019.
- [11] Zacny K., Paulsen G., Szczesiak M., et al. Lunarvader: Development and testing of lunar drill in vacuum chamber and in lunar analog site of antarctica[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2013, 26(1):74-86.
- [12] 唐庭武.月壤深层钻取采样钻头结构参数优化[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [13] Bai Deen, Quan Qiquan, Wang Yinchao, et al. A longitudinal & longitudinal-torsional vibration actuator for rotary-percussive ultrasonic planetary drills [J]. Advances in Space Research, 2019, 63(2):1065-1072.
- [14] 蔡灿,谭政博,玄令超,等.分离式冲击—刮切复合钻头破岩机理及钻进破岩研究[J].振动与冲击,2022,41(16):232-241.
- [15] 丁世清.适合南堡油田火成岩的PDC钻头设计与应用[D].东营:中国石油大学(华东)油气井工程,2009.
- [16] 吴海东.高温条件下金刚石钻头钻进实验研究[D].长春:吉林大学,2017.
- [17] 赵齐.冰层空气反循环钻进旋流式钻头设计及试验研究[D].长春:吉林大学,2020.

(编辑 李艺)