

金刚石取心钻头干钻热特性试验研究

沈立娜, 李 春*, 赵 义, 刘海龙, 吴海霞

(北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要:干式钻进对环境的影响很小, 在没有冷却介质的情况下, 对于钻进一些遇水或钻井液发生反应或者产生新的污染等情况而言, 可有效解决钻孔取心问题, 因此, 该方法是地外天体采样的重要手段之一。然而以往地外天体钻头多为硬质合金钻头, 对于钻进坚硬岩层具有一定的局限性。金刚石钻进是一种比较先进的回转钻进技术, 在油气勘探和地质勘查中应用广泛, 是钻进坚硬岩层的利器。本文针对坚硬花岗岩开展了金刚石钻头的干式钻进试验研究, 探讨了钻进参数及钻头种类等对钻进过程热特性的影响。研究结果显示: PDC钻头的升温速率较常规表孕镶取心钻头更低, 约为常规孕镶钻头的1/2; PDC取心钻头在适宜的工艺参数下, 可实现花岗岩的干式钻进; 干式钻进中转速对金刚石钻头升温的影响较大, 且呈现非线性增长趋势; 钻头在空气中的降温曲线整体呈现指数下降趋势。在300℃降温至100℃过程中, 降温速率 $\geq 60^\circ\text{C}/\text{min}$ 。该研究成果可为科学设计与合理使用干式钻进钻头提供依据。

关键词:干式钻进; 金刚石钻头; 表镶钻头; 孕镶钻头; 复合片钻头; 升温速率; 地外天体采样

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)01-0062-06

Experimental study on the thermal characteristics of dry drilling of diamond coring bits

SHEN Lina, LI Chun*, ZHAO Yi, LIU Hailong, WU Haixia

(Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: Dry drilling has little impact on the environment. In the absence of cooling medium, it can effectively solve the problem of borehole coring when drilling some water or drilling fluid reacts or produces new pollution, so this method is one of the important means of exoplanets sampling. However, exoplanets object drill bits were mostly alloy drill bits, which had certain limitations for drilling into hard rock formations. Diamond drilling is a relatively advanced rotary drilling technology, which is widely used in oil and gas exploration and geological exploration, and is a powerful tool for drilling hard rock formations. In this paper, the dry drilling tests of diamond drill bits were carried out for hard granite, and the influences of drilling parameters and bit types on the thermal characteristics during the drilling process is discussed. The results show that: (1) The heating rate of PDC drill bits is lower than that of conventional diamond coring bits, which is about 1/2 of that of impregnated diamond bits; (2) PDC coring bits can be a way for the dry drilling of granite under suitable process parameters; (3) The rotary speed has a great influence on the temperature rise of diamond bits in dry drilling, and it shows a nonlinear growth trend; (4) The cooling curves of drill bits in air show an exponential downward trend. During the cooling from 300°C to 100°C, the cooling rate $\geq 60^\circ\text{C}/\text{min}$. The research results can provide a basis for the scientific design and rational use of dry drilling bits.

Key words: dry drilling; diamond drill bit; surface-set drill bit; impregnated drill bit; PDC drill bit; temperature rising rate; exoplanets sampling

收稿日期: 2024-05-07; 修回日期: 2024-06-21 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.01.009

第一作者: 沈立娜, 女, 汉族, 1985年生, 金刚石钻头研发中心副主任, 正高级工程师, 材料科学专业, 硕士, 从事金刚石钻头及钻具的优化设计工作, 北京市房山区良乡工业开发区二期创新路1号(102400), slns@foxmail.com。

通信作者: 李春, 男, 汉族, 1987年生, 高级工程师, 从事金刚石钻头及取心钻具的优化设计工作, 北京市房山区良乡工业开发区二期创新路1号(102400), 459755765@qq.com。

引用格式: 沈立娜, 李春, 赵义, 等. 金刚石取心钻头干钻热特性试验研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(1): 62-67.

SHEN Lina, LI Chun, ZHAO Yi, et al. Experimental study on the thermal characteristics of dry drilling of diamond coring bits[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 62-67.

0 引言

以月球探测与研究为基础,联合其他行星、小行星等地外天体探测活动,可以为太阳系形成与演化、宇宙起源和生命起源等重大科学问题研究提供支持。从20世纪50年代至今,多个国家在地外天体开展了外部探测、内部探测、星表钻取采样等活动,包括原苏联月球(Luna)系列、美国“阿波罗”工程和火星探测计划、欧空局生物火星(ExoMars)探测计划、罗塞塔(Rosetta)彗星探测任务和我国嫦娥系列等^[1-7],积累了大量的经验和数据,大幅拓展了人类认识的边界。作为深空探测活动的一种重要形式,地外天体钻取采样借助采样钻具的回转和进尺耦合运动可相对高效、便捷、稳定地去除表层土体,在获取沿深度方向星壤样品的同时,可显著减少对周围原位星壤的破坏,因此,该方法被广泛的采用^[8]。在地外天体钻采中,难以引入循环冷却介质,主要以干式钻进为主。干钻对环境的影响很小,在没有冷却介质的情况下(例如干旱地区、地外星球等)能够顺利工作,对于钻进一些遇冲液发生反应或者产生新的污染等情况而言,干式钻进是解决钻孔问题的有效方法,具有安全环保、节约成本等优点^[9-10]。

国内对干式钻进用钻头的研究主要集中在对薄壁金刚石钻头的研究,如凸凹齿形结构的研究^[11],钻头胎体研究等方面^[10-12]。然而由于地外天体钻取工具多为外螺旋双层或多层管结构,钻头壁厚很难控制在3 mm以内。其壁厚与地质钻探单管取心^[13]或BTW系列更接近^[14],但口径略小。由于钻进深度较小,考虑到耐冲击性能和循环冷却等问题,地外天体钻头干式钻进切削齿大多为硬质合金,相关钻头升温试验报道较多^[15-17]。而对于地外天体可能钻遇的坚硬岩石(如玄武岩等),硬质合金难以压入岩体,无法实现有效钻进取心。金刚石钻进是一种比较先进的回转钻进技术^[12],主要切削齿为金刚石单晶、聚晶金刚石和PDC。在油气勘探和地质勘查工作中应用广泛,也是目前科学钻探、深部油气勘探和干热岩勘探开发中所采取的主要钻进方式^[18]。随着国内外超硬材料材质、异型结构以及地层-切削齿计算模型等^[19-26]的发展,各种新型钻头应用越来越广泛。对于这类壁厚的金刚石钻头干式钻进坚硬岩石升温性能的研究,相关报道较少。本文结合金刚石切削齿优势,针对坚硬岩石开展了干式钻进试验研究,并对试验结果进行了分析探讨。

1 金刚石钻头干钻试验

本试验旨在探究金刚石取心钻头在干钻试验条件下钻进坚硬花岗岩的升温 and 降温特性。通过在岩石边缘布设钻孔,实现钻头端面温度的实时数据采集和岩粉自排屑。

1.1 试验平台

采用微型钻进试验平台(如图1所示)开展相关干式回转钻进试验。该装置可提供0~30 kN的钻压以及0~1500 r/min的转速,同时能够实现对钻进过程中转速、钻压以及扭矩等钻进参数的监测、采集和处理,能够满足试验需求。



图1 微型钻进试验平台

Fig.1 Microdrilling test platform

1.2 试验钻头

试验中选用3类取心钻头,分别为孕镶金刚石钻头、聚晶金刚石复合片(PDC)钻头、表镶金刚石钻头(如图2所示),钻头基本信息如表1所示。



图2 干钻试验钻头

Fig.2 Dry drilling test bit

1.3 温度测量方式

为了获取钻头工作温度,国内相关研究人员大都在近钻头部位预埋温度传感器^[15-17,24]。由于钻头

表1 干钻试验钻头基本情况
Table 1 Basic information of dry drilling test bits

钻头类型	规格(外径/内径)/mm	切削齿描述
孕镶	38/18	切削面积 $S=2.8\text{ cm}^2$
表镶	38/28	切削面积 $S=2.5\text{ cm}^2$
PDC	38/28	4齿

回转切削岩石过程中,切削齿与岩石接触端面会受到摩擦磨损,因此传感器距离钻头实际切削端面有一定距离,难以获得钻头与岩石接触面的最高温度。本试验中,直接在花岗岩边缘布设钻孔,以获得钻头与岩石接触面的最高温度(如图3所示)。

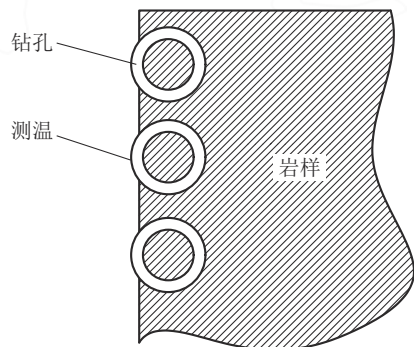


图3 钻孔布设示意

Fig.3 Schematic diagram of borehole layout

钻进过程中,始终保证钻头的部分切削齿外露,采用高分辨率FLIRE40型便携式红外热成像仪在该部位实时获取钻进最高温度(如图4所示)。

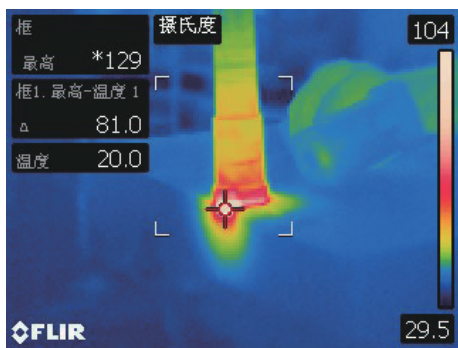


图4 测温点位示意

Fig.4 Schematic diagram of temperature measurement points

该仪器热灵敏度 $<0.07\text{ }^{\circ}\text{C}$,量程 $-100\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,可同时实现温度数据采集和存储,能够较好地满足试验要求。钻头回转钻进升温过程中,因为手持测温仪在测温过程中会出现测温点偏移

现象,为保证测试数据准确,每间隔10 s或1 min(视钻进情况而定)采集一次数据,记录该段时间内钻头出现过的最高温度。钻头在空气中冷却过程中,由于热传导速率与物质温差大小的影响,为了保证降温特性拟合曲线数据有效性,对冷却过程温度采用分梯度记录方法,在前3 min内,每隔2 s记录一次温度数据,3 min以后每分钟记录一次数据。

1.4 岩石样品

花岗岩和玄武岩均为火山喷发后岩浆冷却形成。花岗岩硬度、可钻性更高,更难钻进。考虑到地外天体采样的不确定性和钻进难度,选用更难钻进的花岗岩作为钻进对象开展相关试验。钻进岩石为可钻性8~9级花岗岩方砖。岩石样品尺寸为:500 mm $\times$ 500 mm $\times$ 500 mm。通过前期试验及有关文献^[17,27]得到玄武岩与花岗岩两种岩石性能参数如表2所示。

表2 岩石物理力学参数
Table 2 Parameters of petrophysical mechanics

岩石类型	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	泊松比	摩氏硬度	可钻性
花岗岩	2.65~2.75	0.24	6~7	7~9
玄武岩	2.6~2.9	0.27	5~7	7~8

1.5 试验流程

(1)安装钻头,移动钻头至岩样边缘。为保证手持测温仪能直接测量到钻进过程中钻头的最高温度,仪器始终对准钻头与岩石接触边缘。

(2)设置钻进参数。提升钻头至离岩样表面约10 mm处,启动钻机,调节选定转速,设定机械钻速1 mm/min。

(3)开启手持测温仪实时记录钻进过程中钻头的温度,当检测到最高温度达到 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时停止钻进,提升钻头离开岩样在空气中冷却,记录钻头冷却温度数据。

2 试验结果与讨论

2.1 金刚石钻头种类对升温特性影响

图5为3种金刚石取心钻头在机械钻速1 mm/min、转速120 r/min条件下干钻花岗岩升温至 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 所用的时间。

表镶和孕镶钻头在回转钻进试验中,分别用91 s和114 s就达到 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$,不足2 min,升温较快。这与表镶和孕镶钻头的切削作业方式有关。常规表镶和孕镶钻头钻进中为全弧度面接触切削岩石,与岩石的接触点多,摩擦生热量大,因此升温速率较

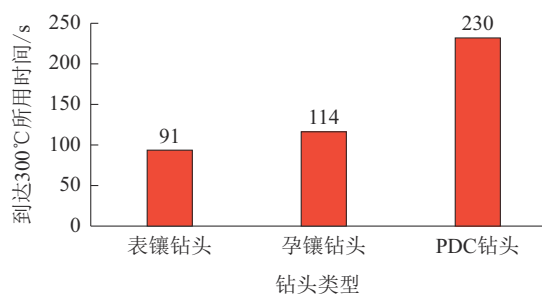


图5 钻头干钻升温至300℃所用时间

Fig.5 Diagram of the time taken for dry drilling to 300°C

高。如果改变表镶和孕镶钻头与岩石的接触方式,将全弧面切削改成点线接触切削,将能大大改善钻头的耐热性能。PDC钻头在回转切削过程中,升温时间较长,是孕镶钻头的2倍,升温相对较慢。这主要是因为PDC钻头为4齿切削,接触点仅为4个切削刃前端,接触面积小,摩擦生热量小,因此升温速率较低。由此可见,全切削面接触对升温速率有很大影响,这与钻进中摩擦生热有直接关系,接触面积越大,接触点越多摩擦生热越多,从而升温越快。为了提高钻头的耐热性能,可通过钻头异形唇面优化来改善,如设计后倾式短刃接触切削、螺旋布齿点接触切削等。

2.2 转速对PDC钻头温度特性影响

2.2.1 PDC钻头升温特性

有研究指出,干钻过程中钻头切削温度与钻进过程中钻压及转速成正增长趋势,且转速的影响率要大于钻压^[26]。因此,干钻试验不宜选用高转速。结合以往文献给出转速参数,本文试验中选用60 r/min和120 r/min两种转速(机械钻速1 mm/min)开展了转速对PDC取心钻头升降温热特性的影响研究。钻进过程中,不同转速下PDC取心钻头的升温曲线如图6所示。

由图6(a)可知,120 r/min钻进过程中,钻头初始温度为35.0℃,50 s时首次超过100℃,110 s时超过200℃。在0~110 s的钻进过程中,钻头端面最高温度以平均约120℃/min的速率急速升高。110~230 s钻进过程中,钻头最高温度以平均约48℃/min的速率升温,升温速率保持稳定直至钻头最高温度超过300℃。钻头温度在110 s后升温速率明显减缓,原因可能与钻头胎体高度11 mm完全进入钻孔导致温度场平衡发生变化有关。

图6(b)中60 r/min钻进过程中初始温度为32.3℃,180 s后超过100℃;780 s后超过200℃,并

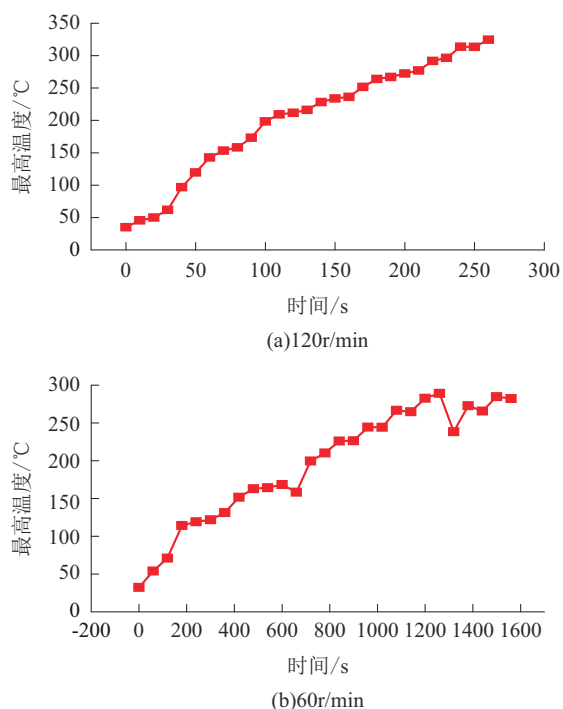


图6 不同转速下PDC钻头升温曲线

Fig.6 Temperature rising curves of PDC drill bits at different rotary speeds

在之后一段时间内保持在280~290℃附近,最高温度达到295.7℃,钻进全程最高温度未超过300℃。为保证钻头强度,1800 s后结束钻进。钻头升温速率相对稳定,升温曲线大致呈一条直线,平均升温速率约为20.8℃/min,是120 r/min钻速条件下初期升温速率的1/6,由此可见转速对升温速率的影响较大,呈非线性相关。

当钻进至1200 s后,钻头最高温度几乎维持在250~290℃之间,分析可能有如下原因:当钻进某一深度时,钻孔内形成了相对稳定的旋转气流,这部分气流会持续带走钻头切削摩擦产生的热量,形成了一定程度的热平衡。

钻进后的PDC取心钻头如图7所示,可观察到干钻试验后,PDC切削齿磨损轻微,聚晶金刚石层完好,体现出PDC钻头耐温性能的优势。

2.2.2 PDC钻头降温特性

钻进结束后,钻头脱离钻孔在空气中进行冷却,60 r/min和120 r/min两种转速下PDC取心钻头的降温曲线如图8所示。

由图8(a)可以看出,在120 r/min转速下,PDC钻头从最高温度以平均78℃/min(20 s内)的速率迅速降温;20~140 s以平均30℃/min的速率降温,



图7 钻进后的PDC取心钻头

Fig.7 The PDC drill bit after drilling

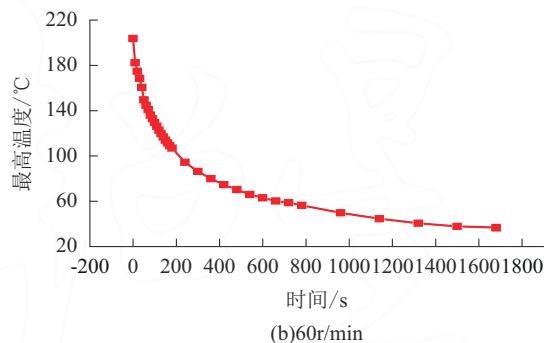
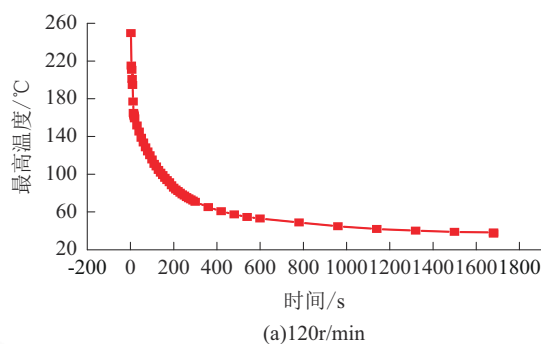


图8 不同转速下PDC钻头降温曲线

Fig.8 Cooling curves of the PDC drill bit at different rotary speeds

冷却速率大大减缓;140~300 s以平均12 °C/min的速率降温,冷却速率进一步减缓;300~600 s以平均3.5 °C/min的速率降温,降温速率比较缓慢;600 s之后以平均0.9 °C/min的速率降温,1600 s后降至36.8 °C。由此可见,当钻头降温至100 °C后降温速率大大减小,但平均降温速率仍有11.3 °C/min,60~70 °C后降温速率较低,平均速率为1.4 °C/min,钻头降温曲线整体呈现非线性降低趋势。

由图8(b)可以看出,在60 r/min钻进试验降温过程中,钻头最初以平均约60 °C/min的速率迅速降温;60~120 s以平均约30 °C/min的速率降温,冷却

速率大大减缓;120~180 s以平均约18 °C/min的速率降温,冷却速率进一步减缓;之后钻头以平均9 °C/min的速率降温。钻头温度降至100 °C需要约240 s,但从100 °C降至58.7 °C则需要较长时间(480 s)。钻头降温速率先急速衰减再缓慢减小,降温至100 °C后降温速率大大减小,钻头降温曲线整体呈指数下降趋势。

对比二者的降温速率可知,在空气冷却中,两种转速下的冷却曲线呈现相同的指数下降趋势,120 r/min钻进试验降温速率大于60 r/min降温速率,原因可能是由于120 r/min钻进升温时间较短,仅用230 s就达到300 °C。钻头受热时间较短,钻头内部储存热量少,从而降温速率较大。

3 结论

根据以上分析,得出如下结论:

- (1)在本实验的干式钻进中,在转速120 r/min、1 mm/min的钻进条件下,PDC钻头的升温速率较常规表、孕镶取心钻头更低,约为常规孕镶钻头的1/2。
- (2)PDC取心钻头在适宜的工艺参数下,可实现对花岗岩的干式钻进。
- (3)干式钻进中,转速对金刚石钻头升温速率的影响较大,且呈非线性增长趋势。
- (4)钻头在空气中的降温曲线整体呈指数下降的趋势。在300 °C到100 °C降温速率 ≥ 60 °C/min。

参考文献(References):

- [1] 李鹏.月岩取心钻头及其低作用力高效能钻进特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
LI Peng. Research on efficient drilling characteristic of lunar regolith coring bit with low acting force[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [2] 刘建忠,欧阳自远,李春来,等.中国月球探测进展[J].矿物岩石地球化学通报,2013,32(5):544-551.
LIU Jianzhong, OUYANG Ziyuan, LI Chunlai, et al. China National moon exploration progress (2001-2010) [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2013, 32 (5) : 544-551.
- [3] 姜生元,刘君巍,张伟伟,等.赫梅列夫·弗拉基米尔,戈雷赫·罗曼.月面人机联合采样探测发展趋势与任务设想[J].载人航天,2019,25(5):572-580.
JIANG Shengyuan, LIU Junwei, ZHANG Weiwei, et al. Development trend and mission prospect of the man-machine joint lunar sampling exploration [J]. Manned Spaceflight, 2019, 25 (5):572-580.
- [4] 刘德赞,张焄,杨帅,等.月球极区钻取采样技术[J].深空探测学报,2020,7(3):278-289.
LIU Deyun, ZHANG He, YANG Shuai, et al. Research of

- drilling and sampling technique for lunar polar region exploration [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020,7(3):278-289.
- [5] 申志强,李帅,刘德赞,等.地外天体探测与钻取技术发展研究[J].航天器工程,2023,32(1):97-104.
- SHEN Zhiqiang, LI Shuai, LIU Deyun, et al. Research on development of extraterrestrial object detection and drilling technology represented[J]. Spacecraft Engineering, 2023,32(1):97-104.
- [6] 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.
- LI Qian, GAO Hui, XIE Lanlan, et al. Review of research about lunar drilling technology[J]. Drilling Engineering, 2021,48(1):15-34.
- [7] 林杨挺.特约主题:中国月球与火星探测进展[J].矿物岩石地球化学通报,2023,42(6):后插2.
- LIN Yangting. Special theme: Progress of China's moon and mars exploration[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2023,42(6): Post-insertion 2.
- [8] 唐钧跃,邓宗全,陈崇斌,等.面向深空探测的星球钻取采样技术综述[J].宇航学报,2017,38(6):555-565.
- TANG Junyue, DENG Zongquan, CHEN Chongbin, et al. Review of planetary drilling & coring technologies oriented towards deep space exploration[J]. Journal of Astronautics, 2017,38(6):555-565.
- [9] 王适.金刚石热稳定性研究现状分析[J].金刚石与磨料磨具工程,2001(5):36-39.
- WANG Shi. Analyse on the researches on diamond thermal stability and some propositions[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2001(5):36-39.
- [10] 徐良,刘一波,徐强,等.干式钻进金刚石钻头的制备及钻进性能研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2017,37(3):11-14.
- XU Liang, LIU Yibo, XU Qiang, et al. Preparation and drilling properties of dry drilling diamond bit[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2017,37(3):11-14.
- [11] 张建立,史文龙.一种凹凸齿形的金刚石工程薄壁钻头:CN202321799360.3[P].2023-07-10.
- ZHANG Jianli, SHI Wenlong. A diamond engineering thin-walled drill bit with concave convex tooth shape: CN202321799360.3[P]. 2023-07-10.
- [12] 王伟唯.一种锋利型干钻花岗岩金刚石钻头:CN201911420856.3[P].2019-12-31.
- WANG Weiwei. A sharp dry drilling diamond bit for granite: CN201911420856.3[P]. 2019-12-31.
- [13] 王达,何远信.地质钻探手册[M].长沙:中南大学出版社,2014.
- WANG Da, HE Yuanxin. Geological Drilling Handbook[M]. Changsha: Central South University Press, 2014.
- [14] 刘蓓,张晨,杨可,等.便携式全液压钻机在秦岭地区地质钻探中的应用[J].钻探工程,2021,48(11):93-102.
- LIU Bei, ZHANG Chen, YANG Ke, et al. Application of the portable full hydraulic drill in geological drilling in the Qinling region[J]. Drilling Engineering, 2021,48(11):93-102.
- [15] 刘晓庆,刘君巍,王露斯,等.月壤钻进取心过程钻具热特性研究[J].工程设计学报,2019,26(1):73-78.
- LIU Xiaoqing, LIU Junwei, WANG Lusi, et al. Study on thermal characteristics of drilling tools during lunar soil drilling coring process[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2019,26(1):73-78.
- [16] 赵德明,姜生元,唐德威,等.月球次表层回转取样钻头构型设计[J].吉林大学学报(工学版),2017,47(4):1149-1158.
- ZHAO Deming, JIANG Shengyuan, TANG Dewei, et al. Structure design of lunar subsurface sampling drill[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2017,47(4):1149-1158.
- [17] 周琴,张在兴,张凯,等.钻头切削齿破碎岩石的温度变化试验及机理分析[J].天然气工业,2020,40(10):102-110.
- ZHOU Qin, ZHANG Zaixing, ZHANG Kai, et al. Temperature variation tests and mechanism analysis of rock breaking by bit cutters[J]. Natural Gas Industry, 2020,40(10):102-110.
- [18] 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.
- WU Haidong. Experimental research on diamond bit drilling under high temperature[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [19] 沈立娜,贾美玲,蔡家品,等.金刚石钻头高效破岩技术新进展[J].金刚石与磨料磨具工程,2022,42(6):662-666.
- SHEN Lina, JIA Meiling, CAI Jiapi, et al. New development of efficient rock breaking technology with diamond bit[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2022,42(6):662-666.
- [20] 刘伟吉,阳飞龙,董洪铎,等.异形PDC齿混合切削破碎花岗岩特性研究[J].工程力学,2023,40(3):245-256.
- LIU Weiji, YANG Feilong, DONG Hongduo, et al. Investigate on the mixed-cutting of specially-shaped PDC cutters in granite[J]. Engineering Mechanics, 2023,40(3):245-256.
- [21] 罗鸣,朱海燕,刘清友,等.一种适用于超高温超高压塑性泥岩的V形齿PDC钻头[J].天然气工业,2021,41(4):97-106.
- LUO Ming, ZHU Haiyan, LIU Qingyou, et al. A V-cutter PDC bit suitable for ultra-HTHP plastic mudstones[J]. Natural Gas Industry, 2021,41(4):97-106.
- [22] 王昶皓,李士斌,张立刚.PDC破岩条件下的岩石研磨性评价[J].地质与勘探,2019,55(3):850-861.
- WANG Changhao, LI Shibin, ZHANG Ligang. Evaluation of rock abrasiveness under the rock-breaking condition of PDC[J]. Geology and Exploration, 2019,55(3):850-861.
- [23] 刘维,高德利.PDC钻头研究现状与发展趋势[J].前瞻科技,2023,2(2):168-178.
- LIU Wei, GAO Deli. Research status and development trends of polycrystalline diamond compact bits[J]. Science and Technology Foresight, 2023,2(2):168-178.
- [24] 汤凤林,赵荣欣,ТКННВ Ч.Ф.,等.关于PDC钻头设计的分析研究[J].钻探工程,2024,51(2):15-22.
- TTANG Fenglin, ZHAO Rongxin, CHIKXOTKIN V. F., et al. Analytical research on designing of PDC drill bit[J]. Drilling Engineering, 2024,51(2):15-22.
- [25] 汤凤林,赵荣欣,周欣,等.深部钻进用新型复合片钻头的试验研究[J].钻探工程,2023,50(1):39-48.
- TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, ZHOU Xin, et al. Experimental research on a new generation PDC bit used for deep drilling[J]. Drilling Engineering, 2023,50(1):39-48.
- [26] 何录忠.月表取心钻头旋转切削热分析及模拟实验研究[D].北京:中国地质大学(北京),2015.
- HE Luzhong. Cutting thermal analysis and simulated experimental study of Lunar surface coring drill[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- [27] 欧阳自远.月球科学概论[M].北京:中国宇航出版社,2005.
- OUYANG Ziyuan. Introduction to lunar science[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2005.

(编辑 荐华)