高效钻取含月岩颗粒深层月壤的钻头设计及影响因素研究

曹金凤[1]，刘宇航[1]，郝海春[2*]，黄博源[1]，孙宇航[1]，郑昱君[1]
（1.青岛理工大学机械与汽车工程学院，山东 青岛 266520；2.深圳大学深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室，广东 深圳 518060）

摘要：获取深层月壤样品是研究月球物质组成与演化历史的关键，因月壤中通常含有月岩颗粒，使得钻进取心难度大，迫切需要研发高效可靠的取心钻头，并探究影响取心效率的关键因素，为月球探测任务顺利实施奠定基础。本文构建了含月岩颗粒的深层月壤–钻头三维有限元模型，设计了八角和六角两款钻头，通过对比试验探究了月岩颗粒形状、大小、空间位置、钻头钻进参数对钻取性能的影响规律。结果表明：当钻头结构为阶梯基体、切削刃为八角立齿构型、切削角度为90°、切削刃后角为14°时，钻头的综合性能最优；颗粒的大小和空间位置是引起载荷变化的关键因素，而非月岩颗粒形状；当进尺速度为1.4 mm/s时，钻取效率最高且稳定；当回转速度为140 r/min时可实现高效低负载稳定钻进。本文研究为复杂月基环境钻头结构设计优化与工况参数优选提供了一定的借鉴意义。

关键词：月球钻探；月壤取心；月岩颗粒；取心钻头；钻进性能；数值模拟
中图分类号：P634.4+1;P184　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2096-9686(2026)06-0103-11

Research on bit design and influencing factors for efficient drilling of deep lunar regolith containing lunar rock particles

CAO Jinfeng[1], LIU Yuhang[1], HAO Haichun[2*], HUANG Boyuan[1], SUN Yuhang[1], ZHENG Yujun[1]
(1. *School of Mechanical & Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong* 266520, *China*; 2. *State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, Shenzhen University, Shenzhen Guangdong* 518060, *China*)

Abstract: Obtaining deep lunar regolith samples is crucial for analyzing the material composition and evolutionary history of the moon. Lunar regolith generally contains lunar rock particles, which greatly increases the difficulty of drilling and coring. Therefore, it is urgent to develop high-efficiency and reliable coring bits and explore the key factors affecting coring efficiency, so as to lay a solid foundation for the smooth implementation of lunar exploration missions. In this paper, a 3D finite element model coupling deep lunar regolith containing lunar rock particles and drill bits is established. Two coring bits equipped with octagonal and hexagonal structures are designed. Comparative simulations are conducted to analyze the influence laws of the shape, size, spatial position of the lunar rock particles as well as drilling parameters on drilling performance. The results show that the drill bit achieves the optimal comprehensive performance when adopting a stepped matrix structure, octagonal vertical tooth cutting edge configuration, a cutting angle of 90° and a cutting edge relief angle of 14°. The particle size and spatial distribution of the lunar rock particles are the dominant factor leading to load variation, rather than shape. The highest and most stable coring efficiency is

收稿日期：2026-03-16；**修回日期**：2026-06-03　　**DOI**：10.12143/j.ztgc.2026.06.012
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目（编号：52404365）；国家自然科学基金重点项目（编号：52434004）
第一作者：曹金凤，女，汉族，1978年生，副教授，硕士生导师，工程力学专业，博士，主要从事Abaqus数值模拟、人工智能学科交叉等研究工作，山东省青岛市黄岛区韶山路568号福瀛天麓湖4栋，caojinfeng@qut.edu.cn。
通信作者：郝海春，男，汉族，1992年生，助理教授，土木工程专业，博士，主要从事月基大深度取心探矿原理、技术及装备研发，极端环境岩石力学等研究工作，广东省深圳市深圳大学科技楼8层，haohaichun@szu.edu.cn。
引用格式：曹金凤，刘宇航，郝海春，等.高效钻取含月岩颗粒深层月壤的钻头设计及影响因素研究[J].钻探工程，2026，53(6)：103-113.
CAO Jinfeng, LIU Yuhang, HAO Haichun, et al. Research on bit design and influencing factors for efficient drilling of deep lunar regolith containing lunar rock particles[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(6): 103-113.

obtained at a drilling feed rate of 1.4 mm/s, and efficient, low-load and stable drilling can be realized at a rotational speed of 140 r/min. This research provides a reference for the optimization of structural design and operating parameter for drill bits applied in complex lunar subsurface environments.

Key words: lunar drilling; lunar regolith coring; lunar rock particles; coring bit; drilling performance; numerical simulation

0 引言

月球是距离地球最近的天体,因其独特的自然环境与矿产资源,成为人类开展星球探测的主要目标[1-2]。深层月壤采样的目标是在月壤样品数量充足的基础上,能够保持月壤的原位层理特性[3]。对于月球地层结构,学界共识是在月球表面覆盖有平均厚度为4~15 m的松散月壤,迄今为止所采集的月球样本最深仅为3.05 m,并未触及深层月岩[4-5]。因此,当前钻取技术研究多以浅层均匀松散月壤为研究对象,深层月壤钻探的研究成果比较少见。在深层月壤钻取采样过程中,通常包含月岩颗粒,不仅会影响钻头的取心效率和钻进性能,也可能对钻头造成损坏,导致钻进任务失败。因此,构建含月岩颗粒的深层月壤-钻头三维仿真模型,获得不同工况参数下的钻进性能,对取心钻头设计优化和钻进性能提升具有重要的工程应用价值。

近年来,学者们在钻探取心及采样过程的力学分析等方面开展了大量研究工作。田野等[6]建立了月球次表层取心钻具功耗模型,得到了取心钻具的功耗特性曲线。针对月表极端钻进环境,李大佛等[7]提出了一种内外管联合取心钻具,能够实现可靠钻进取心。王迎春等[8]提出了一种基于恒钻进力载控制的深层月壤采样控制方法,通过简化深层月壤钻取系统模型和结构参数,构建了钻进力载与运动速度的映射关系。Wu等[9]基于离散元提出了一种月球岩石模拟物的参数标定方法,为月岩取心钻探提供了参考。Schäfer等[10]使用光滑粒子流体动力学(SPH)模拟微重力风化层采样过程,分析了风化层不同材料参数对采样率的影响。姜生元等[11]结合机-壤相互作用机理以及地面钻取采样试验数据,分析钻进取心过程及其负载波动状态的月壤组构致因,对全钻进剖面的月壤层序状态进行机理解译。Nagaoka等[12]探究了钻探机制与月壤之间的相互作用,提出了CSD(反向螺杆钻)新颖钻探机制,为实现有效钻探提供了新思路。赖小明等[13]根据取心钻具的特点、使用情况以及空间环境要求,利用有限元分析方法研究了月壤取心钻具的热特性。Khademian等[14]研究了月壤中不规则形状、破碎颗粒对其力学行为的影响。周峻等[15]基于钻采过程中月壤颗粒的运动规律,提出了一种钻具与月壤相互作用区域的等效方法,从宏观角度建立了一种新型月壤钻进压力解析模型。

综上,国内外学者已在钻探取心及采样过程力学分析等方面取得了一定的成果,但研究对象多为浅层月壤。在实际采样过程中,钻头会与深层月壤中的月岩颗粒发生接触。现有研究中,尚未考量其对钻头钻进性能与采样效率的潜在影响。由于地面试验成本较高,而对于含月岩颗粒等特殊工况,很难通过实验揭示月壤-钻头之间的作用机理,而数值模拟可以构建任何所需复杂工况,越来越受到人们的重视[16]。鉴于此,本文基于大型非线性有限元软件Abaqus[17],构建含月岩颗粒的深层月壤-钻头三维仿真模型,探究月球环境下月岩颗粒对钻头钻进性能的影响,设计并优选钻头,完成大量工况动力学仿真,获得钻头进尺速度、回转速度对取心效率的影响规律,为复杂月基环境下钻头的结构设计优化与工况参数选取提供参考与依据。

1 设计取心钻头

在月球取样钻探中广泛采用硬质合金钻头,其在高温下仍能保持较高的强度和硬度,同时还具有较好的耐磨性和耐热性。本文研究对象为含有月岩颗粒的深层月壤,模型中仅含一定体积分数的月岩颗粒。已有研究表明[18],硬质合金钻头在处理月壤中的月岩颗粒时,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。故本文选用硬质合金钻头进行模拟研究。

1.1 钻头基体

现有的月球取样钻头基体以平面、阶梯、锥形基体为主,如图1所示。阶梯基体钻头切削时具有更好的回转定心能力,相较于平面基体,其排屑效果更优[19]。对于锥形基体,由于锥面处容易打滑,而且连续过渡容易让切屑在锥面与孔壁间堆积。因此,本文选用阶梯基体作为钻头基体。

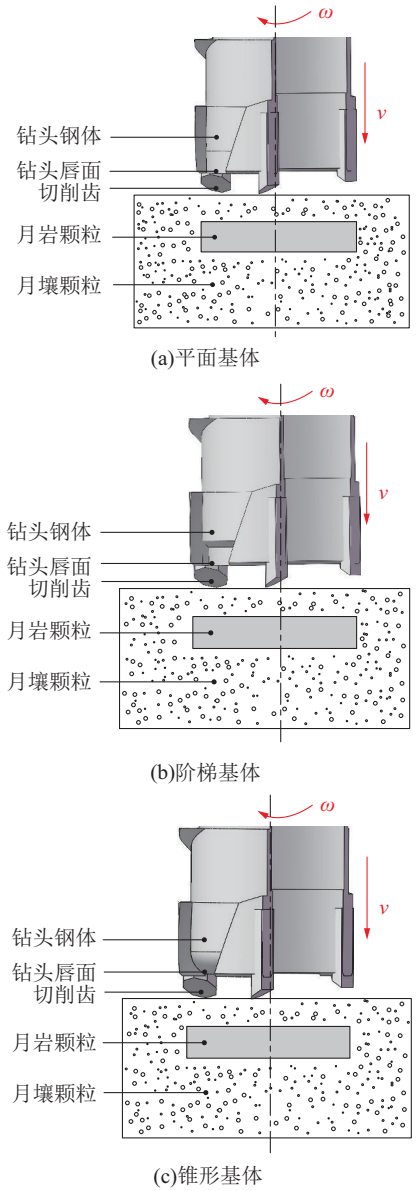


图 1　三种典型钻头基体取心结构示意

Fig.1　Schematic diagram of coring structures of three typical drill bit matrix

1.2　切削刃形状

钻具冲击回转运动过程中,钻头作为与月壤接触并传递力的重要结构,既要切削和破碎月壤,还要兼顾取心效率,因此,对其设计和优化十分重要。当钻头上的切削刃为立齿结构时,它能够从多个角度对月壤施加载荷,具有高效切削、均匀受力等优点,使得月壤更容易切削成较小颗粒,取心效能更好。由于钻头上的立齿构型决定了月壤破碎程度和钻杆排粉程度的好坏[20],因此,本文设计了八角立齿构型(简称“八角钻头”)和六角立齿构型(简称“六角钻头”)2 种钻头形状,如图 2(a)和(b)所示。图 2(c)中边界 A、边界 B 分别为切削齿切削形成的范围边界。2 种钻头的高度均为 46 mm,采用相同的钻杆结构,钻头内径为 34 mm,钻头外径为 43 mm。

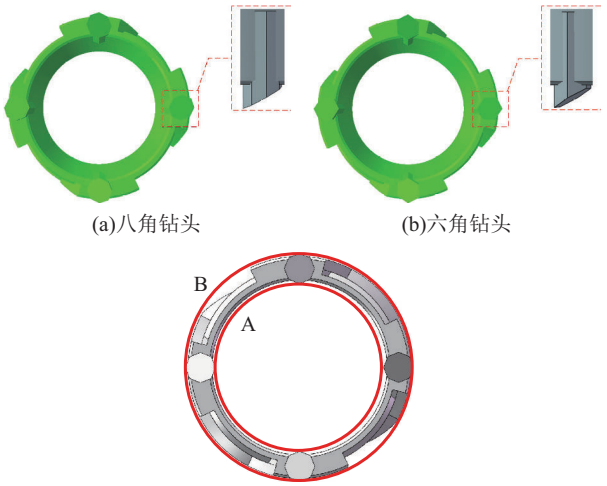


图 2　钻头俯视图

Fig.2　Top view of the drill bit

1.3　切削角度

钻头基体上切削刃的安装有 3 种方式,分别为:正斜镶、直镶、负斜镶。对应的切削角度 α 分别为锐角、直角、钝角,如图 3 所示。

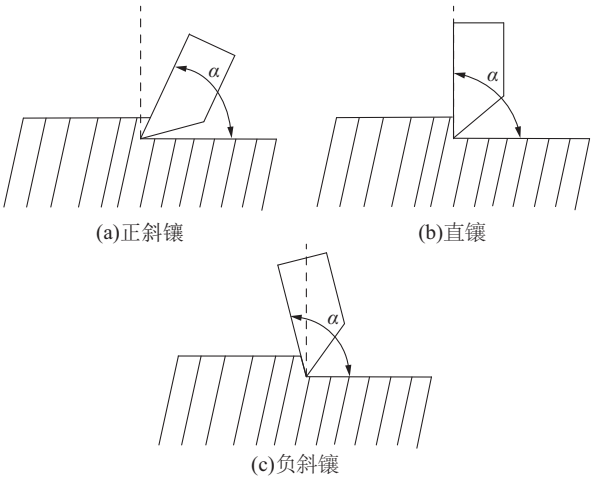


图 3　切削角度

Fig.3　Cutting angles

1.4　切削刃后角

合理的切削刃后角能减少摩擦生热,减缓刀具磨损。本文选取的后角角度范围为 10°~20°,见图 4。

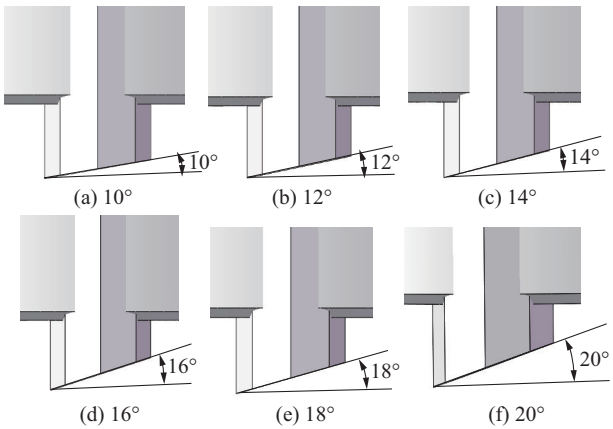


图4 切削刃后角

Fig.4 Cutting edge clearance angle

2 建立月壤-钻头三维仿真模型

选择与真实月壤高度相似的CUG-1A月壤的物理力学特性进行有限元仿真,由于月岩颗粒的矿物组成、化学组成等与玄武岩相近,故采用玄武岩的力学性质进行仿真分析。

2.1 材料参数

硬质合金钻头钻进月壤仿真分析的关键是定义正确的材料参数和失效准则,本文选用的月壤本构模型为Mohr Coulomb Plasticity[21],月岩颗粒的本构模型为Drucker-Prage[22],选择剪切破坏作为失效准则。参数详见表1[23]和表2[24-25]。

表1 月岩力学性能参数[23]

Table 1 Mechanical parameters of the lunar rock

材料	密度/(t·mm^{-3})	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	剪切破坏		
					断裂应变	剪切应力比	应变率
玄武岩	2.8×10^{-9}	45000	0.23	48～55	0.004151	0.77	0.00155

表2 钻头和月壤力学性能参数[24-25]

Table 2 Mechanical parameters of the drill bit and lunar regolith

材料	密度/(t·mm^{-3})	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)
CUG-1A月壤	1.9×10^{-9}	10	0.5	48～51
硬质合金钻头	1.48×10^{-8}	530000	0.29	

2.2 分析类型和载荷工况

由于钻头的钻进过程属于动力学问题,故将分析步类型设置为显式动力学。由于在钻进过程中涉及到几何大变形,故需要打开几何大变形开关(Nlgeom=ON)[26],仿真分析过程中,采用质量缩放技术,缩放系数为1×10^5,在保证计算精度的前提下提高求解效率。

设置月球的重力加速度为1630 mm/s^2。根据钻头钻进方向,定义绕旋转轴的转动(Angular velocity)和进尺速度(Velocity),并将月壤的四周和底部完全约束。

2.3 定义相互作用和划分网格

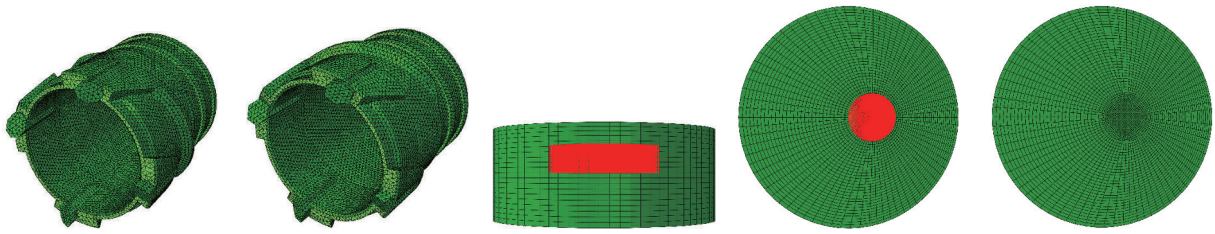
月壤与钻头之间定义通用接触,摩擦系数为0.1,法向接触定义为硬接触[21]。与月壤相比,钻头的变形程度可忽略不计,可将其设置为刚体模型,并将钻头和月壤之间设置耦合约束。为了保证仿真分析收敛,提高仿真分析的准确度,采用Hypermesh软件对钻头和月壤模型划分高质量网格,如图5所示。由于钻头结构外形复杂,将其划分为四面体网格,2种钻头单元类型统一为C3D4,八角钻头的单元数量为129510,六角钻头的单元格数量为122820。月壤模型采用圆柱体,将其划分为六面体网格,月壤模型尺寸为Ø100 mm,单元类型统一为C3D8R,如图5(c)所示,红色和绿色阴影区域分别表示月岩颗粒和月壤模型。

当月岩颗粒的大小与钻头厚度尺寸相近时,易出现边界效应现象,不仅影响分析结果的精度,而且可能影响分析收敛性。为了避免出现上述问题,本文在仿真过程中,采取对切削接触区域的网格进行局部加密的技术,来抑制边界效应带来的数值问题,大大提升了分析结果的收敛性和可靠性。图5(d)和(e)给出了偏置距离为11 mm时,对月岩颗粒区域实施网格加密的效果。

2.4 对比试验

2.4.1 不同钻头结构的对比试验

不同切削刃形状钻进负载随钻进深度的变化曲线如图6所示。可以看出:八角钻头的钻进负载低于六角钻头,六角钻头接触月岩颗粒时,载荷的波动幅度更大;而八角钻头的曲线整体平缓,波动幅度较

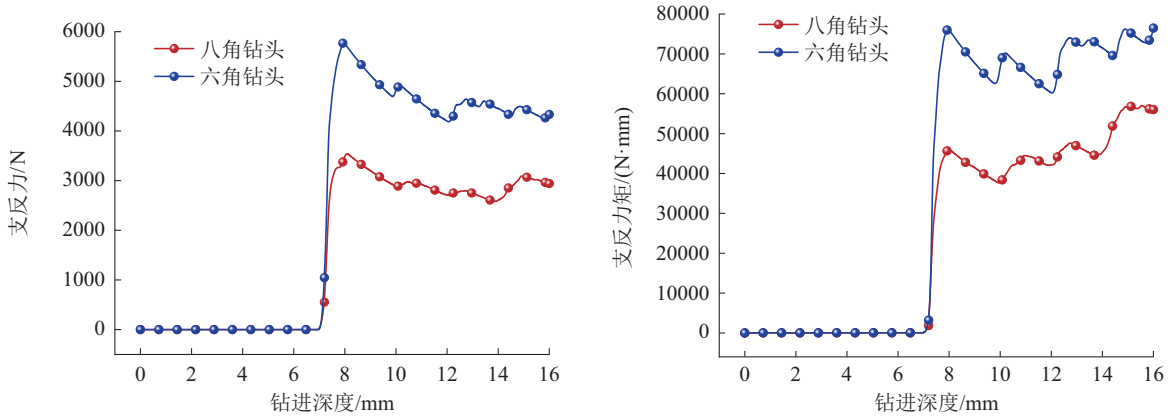


(a)八角钻头模型　(b)六角钻头模型　(c)含有月岩颗粒的月壤模型　(d)偏置11mm月岩颗粒所在位置　(e)偏置11mm月岩颗粒实施加密网格

图 5　模型的有限元网格

Fig.5　Finite element mesh of the model

小。综上,八角钻头的钻进性能更稳定,效果更优,该分析结果与文献资料[20]的研究结果一致。



(a)平均支反力　(b)平均支反力矩

图 6　不同切削刃形状平均支反力和平均支反力矩随深度变化

Fig.6　Variation curves of average support reaction force and average support reaction moment with depth under different cutting edges

不同切削角度钻进负载随钻进深度的变化曲线如图 7 所示。可以看出:切削角度对钻头的负载影响较大,正斜镶的载荷峰值最大,负斜镶的载荷峰值最低,直镶以 0°前角垂直切入月壤,钻进负载峰值适中、波动幅度最小,综合性能最优。因此,本文选用直镶的安装方式,即切削角度为 90°。

不同切削刃后角钻进负载随钻进深度的变化曲线如图 8 所示。可以看出:当后角角度的取值范围为 12°~16°时,钻进负载与后角呈负相关,该分析结论与文献[19]的研究结果一致;当后角为 14°时,钻进负载最低。综上,本文选用 14°作为切削刃后角。

综上,本文选择切削角度为 90°、切削刃后角为 14°的阶梯基体八角钻头作为取心钻头,完成后续工况的仿真分析。

2.4.2　对比验证

为了验证仿真结果的可靠性,将工况参数与文献[21,26-27]保持一致,并将求得的支反力、支反力矩随钻进深度的变化曲线与文献资料中的试验负载曲线进行比对。由于原始曲线对于规律变化反映情况不明显,为便于观察钻头的钻进规律及变化趋势,提取了钻头在钻进过程中的平均支反力、平均支反力矩,并绘制了它们随钻进深度的变化曲线(图 9)。

从图 9 中可以看出:(1)在钻头钻进过程中,仿真分析结果曲线与试验曲线的整体趋势吻合,钻头的支反力和支反力矩随着钻进深度的增加均呈现“稳定-急剧上升”的两阶段特征;(2)仿真中负载的平均数值与试验数值存在差异,但负载变化趋势与试验负载数据基本吻合。(3)比较钻进深度到 8 mm 的分析结果,可以看出支反力分析与试验存在较大差异(正好位于斜率急剧变化位置,认为该差异可以忽略);支反力矩的分析结果与试验结果基本一致,验证了仿真结果的可靠性,为后续大量工况的仿真奠定了基础。

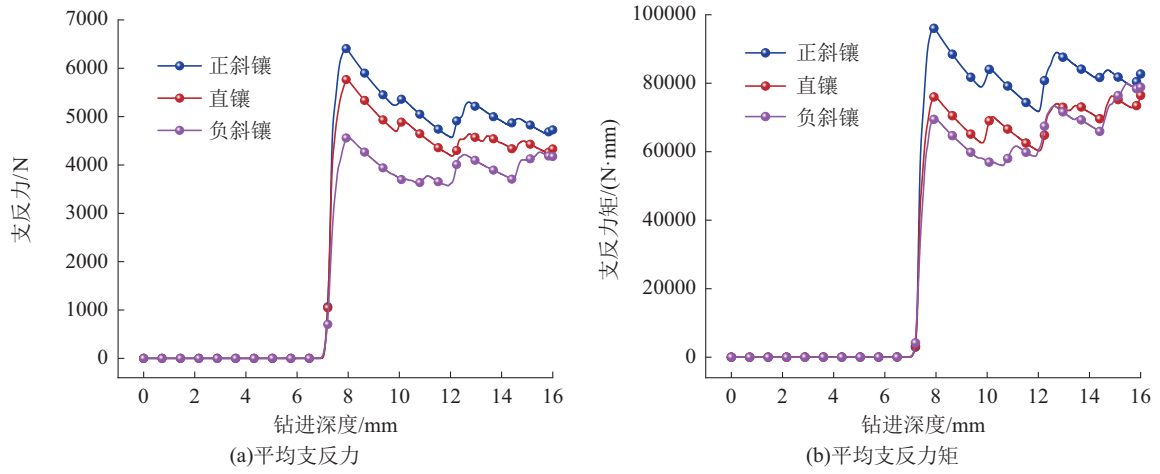


图7 不同切削角度平均支反力和平均支反力矩随深度变化曲线

Fig.7 Variation curves of average support reaction force and average support reaction moment with depth under different cutting angles

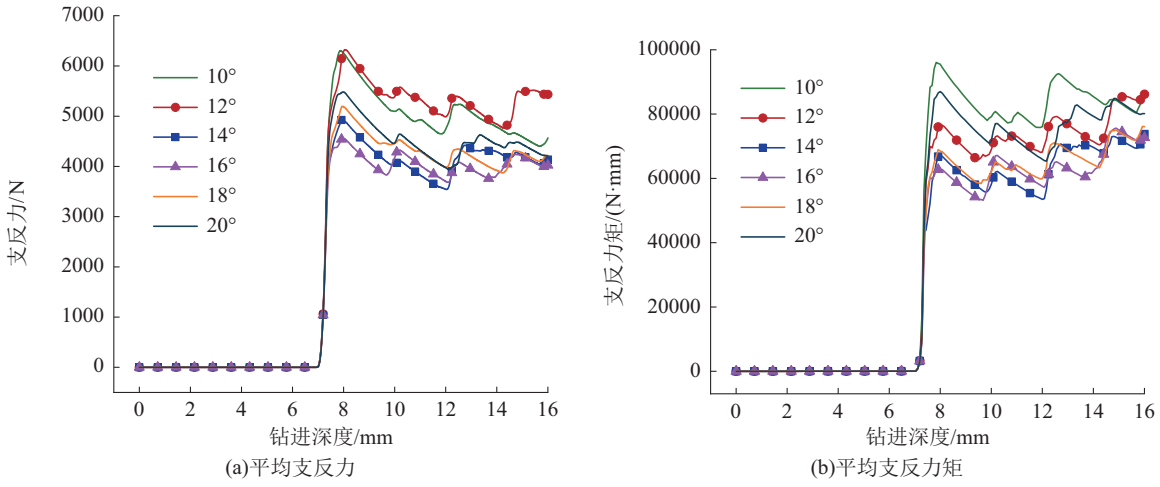


图8 不同切削刃后角下平均支反力和平均支反力矩随深度变化曲线

Fig.8 Curves of average support reaction force and average support reaction moment versus depth at different flank angles of cutting edges

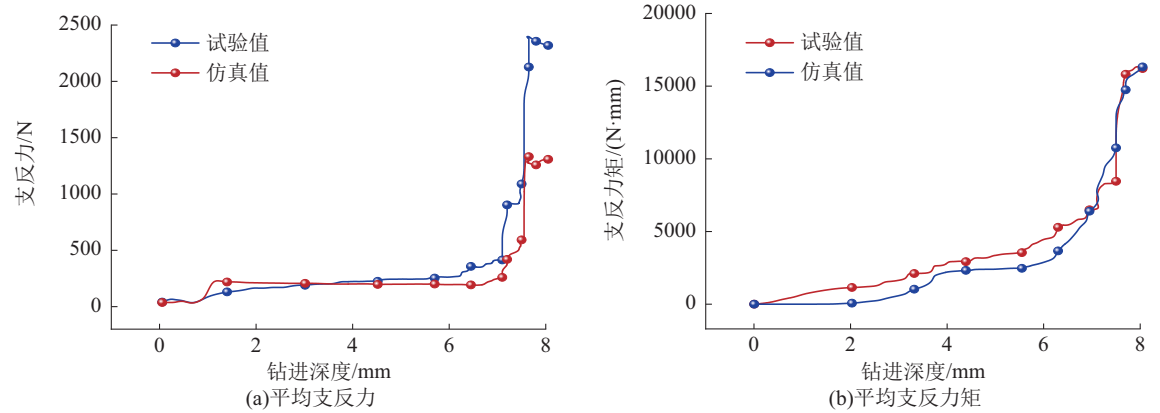


图9 试验数据与仿真数据对比

Fig.9 Comparison diagram of experimental and simulation data

3　不同影响因素下的钻进效果

本文选取3组对比参数(月岩颗粒、进尺速度、回转速度),设计并完成了16组工况的仿真分析,如表3所示。

3.1　月岩颗粒对深层月壤钻进性能的影响分析

为了探究月岩颗粒的形状、大小、空间位置对钻取性能的影响规律,选取球体和圆柱体2种不同形状的月岩颗粒进行研究,其中,球体形状的颗粒尺寸为Ø50 mm,圆柱体形状的颗粒尺寸为Ø50 mm×H12 mm;对于圆柱体形状月岩颗粒,选择了Ø22、Ø42、Ø50 mm三种颗粒,高度均为12 mm;对于Ø22 mm×H12 mm的圆柱体形状月岩颗粒,设置了4种位置状态,分别是:无偏置、与钻头中轴线的偏置距离分别为11、24、37 mm。仿真分析并获得了钻进负载随钻进深度的变化曲线,其仿真初始状态如图10所示。

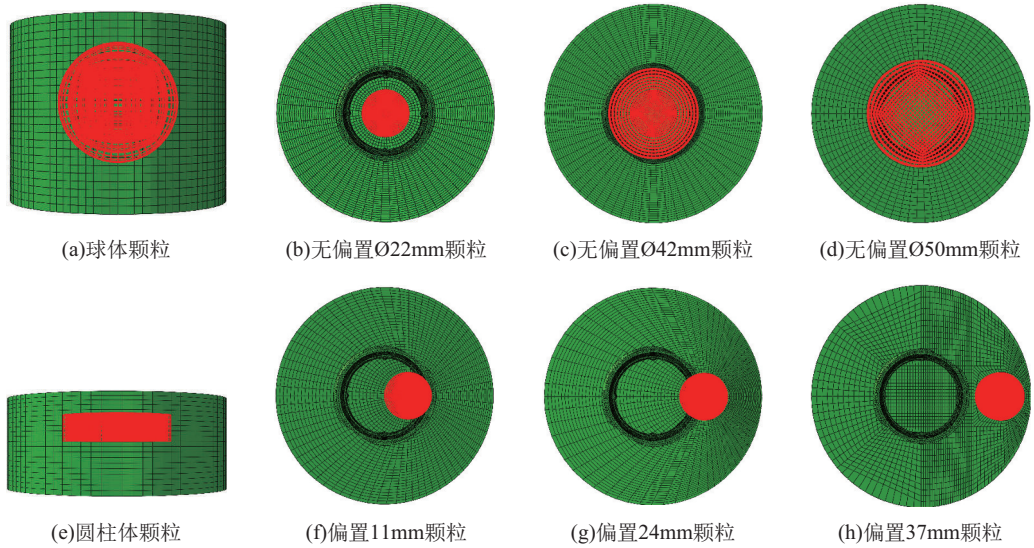
表3　16组仿真分析工况

Table 3　Working conditions of 16 groups of simulation analysis

工况	岩石形状	岩石直径/mm	岩石位置/mm	进尺速度/(mm·s^{-1})	回转速度/(r·min^{-1})
1	球体	50	无偏置	4.0	120
2	圆柱体	50	无偏置	4.0	120
3	圆柱体	22	无偏置	4.0	120
4	圆柱体	42	无偏置	4.0	120
5	圆柱体	22	无偏置	4.0	120
6	圆柱体	22	偏置11	4.0	120
7	圆柱体	22	偏置24	4.0	120
8	圆柱体	22	偏置37	4.0	120
9	圆柱体	50	无偏置	1.4	120
10	圆柱体	50	无偏置	1.6	120
11	圆柱体	50	无偏置	1.8	120
12	圆柱体	50	无偏置	2.0	120
13	圆柱体	50	无偏置	1.4	80
14	圆柱体	50	无偏置	1.4	100
15	圆柱体	50	无偏置	1.4	120
16	圆柱体	50	无偏置	1.4	140

按照不同的月岩颗粒形状,绘制了钻进负载随钻进深度的变化曲线(如图11所示),可以看出:随着钻进深度的增加,2种形状月岩颗粒的钻进负载均呈现出显著的阶跃式增长趋势;虽然颗粒形状对负载的变化有一定影响,但二者的变化趋势接近,可以判断它们不是引起载荷变化的最关键因素。

按照月岩颗粒的不同尺寸,绘制了钻进负载随钻进深度的变化曲线(如图12所示),可以看出:当颗粒直径小于边界A时,Ø22 mm工况的支反力、支反力矩峰值分别为5.15 N、119.64 N·mm,载荷水平低且曲线平稳;当颗粒直径大于边界A时,Ø42 mm工况的支反力、支反力矩峰值分别为2398 N、61122 N·mm,约为Ø22 mm工况下支反力、支反力矩峰值的466、511倍;当颗粒直径大于边界B时,Ø50 mm工况的支反力、支反力矩峰值分别为4912 N、73053 N·mm,约为Ø42 mm工况下支反力、支反力矩峰值的2.05、1.20倍。表明颗粒的大小是引起负载变化



(a)球体颗粒　(b)无偏置Ø22mm颗粒　(c)无偏置Ø42mm颗粒　(d)无偏置Ø50mm颗粒

(e)圆柱体颗粒　(f)偏置11mm颗粒　(g)偏置24mm颗粒　(h)偏置37mm颗粒

图10　仿真初始状态

Fig.10　Initial simulation state

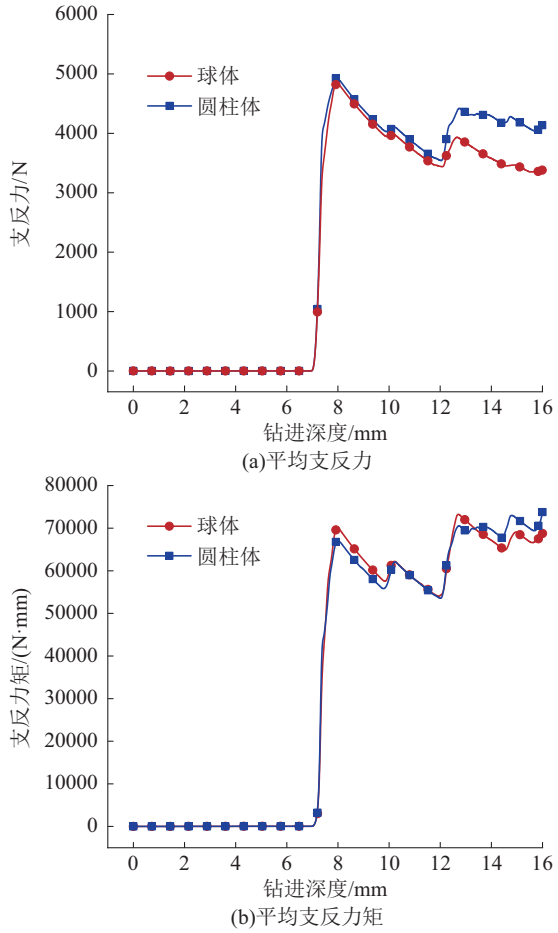


图11 不同月岩颗粒形状平均支反力和平均支反力矩随深度变化曲线

Fig.11 Variation curves of average support reaction force and average support reaction moment with depth for different lunar rock particle shapes

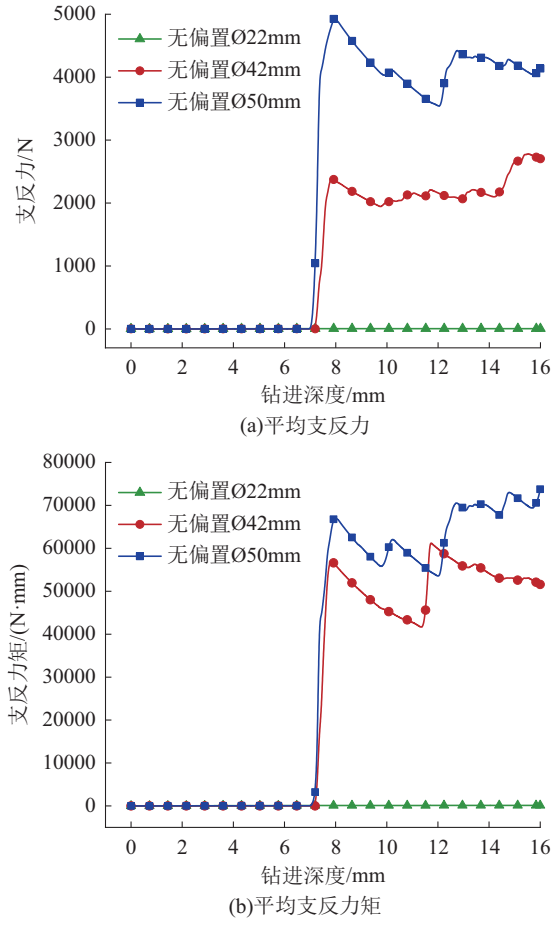


图12 不同月岩颗粒大小的平均支反力和支反力矩随深度变化曲线

Fig.12 Variation curves of average support reaction force and average support reaction moment with depth for different lunar rock particle sizes

的关键因素之一。

按照月岩颗粒的不同位置,绘制了钻进负载随钻进深度的变化曲线(如图13所示),可以看出:当月岩颗粒偏置37 mm时,支反力、支反力矩峰值分别为5.23 N、121.62 N·mm,载荷水平低且曲线平稳;当颗粒偏置11 mm时,支反力、支反力矩峰值分别为660 N、119670 N·mm,约为偏置37 mm工况下支反力、支反力矩峰值的126、984倍,载荷水平显著提高;当颗粒偏置24 mm时,支反力、支反力矩峰值分别为701 N、286843 N·mm,约为偏置11 mm工况下支反力、支反力矩峰值的1.06、2.40倍。表明月岩颗粒的空间位置也是引起负载变化的关键因素之一。

3.2 钻进参数对深层月壤钻进性能的影响

当对深层月壤进行钻进取心作业时,钻头的进尺速度与回转速度的参数匹配对钻进效率和钻进性能的影响至关重要。如果工况参数取值不合理,不仅会影响钻进作业的稳定性,也会影响取心质量和钻头的使用寿命。例如,如果进尺速度过大会破坏月壤的层序性,速度过小则大幅降低钻进作业效率;如果回转速度过高则可能会引起钻头振动失稳,过低则导致钻头破岩排渣能力不足,易出现卡钻等问题。鉴于此,特设计不同的进尺速度和回转速度工况,探究它们对深层月壤钻进性能的影响规律。

3.2.1 钻头进尺速度对深层月壤钻进性能的影响

为探究进尺速度对八角钻头钻取性能的影响规律,设置了1.4、1.6、1.8、2.0 mm/s共4种工况进行分析(图14),可以看出:支反力、支反力矩与进尺速度呈正相关关系,当进尺速度由1.4 mm/s升高到2.0

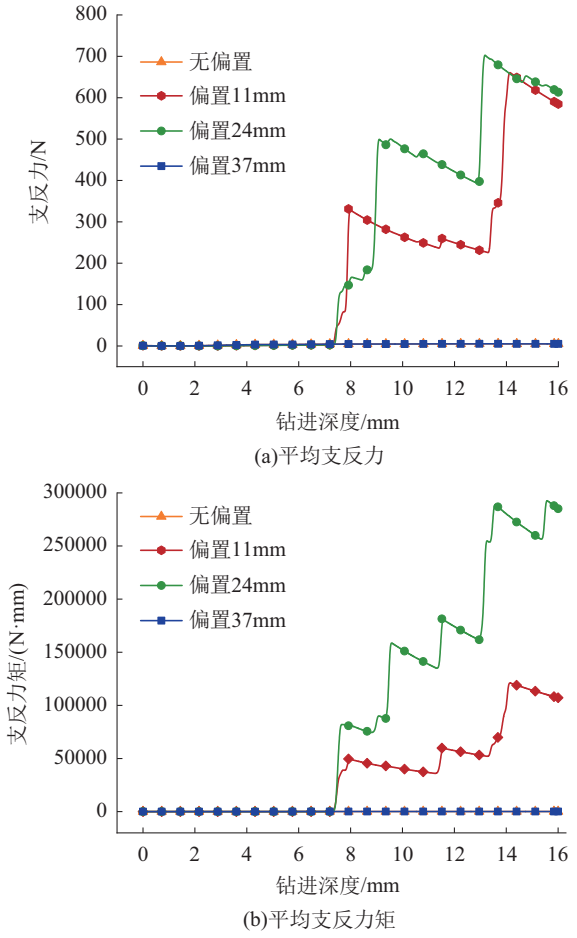


图 13　不同月岩颗粒位置平均支反力和平均支反力矩随深度变化曲线

Fig.13　Variation curves of average support reaction force and average support reaction moment with depth at different lunar rock particle positions

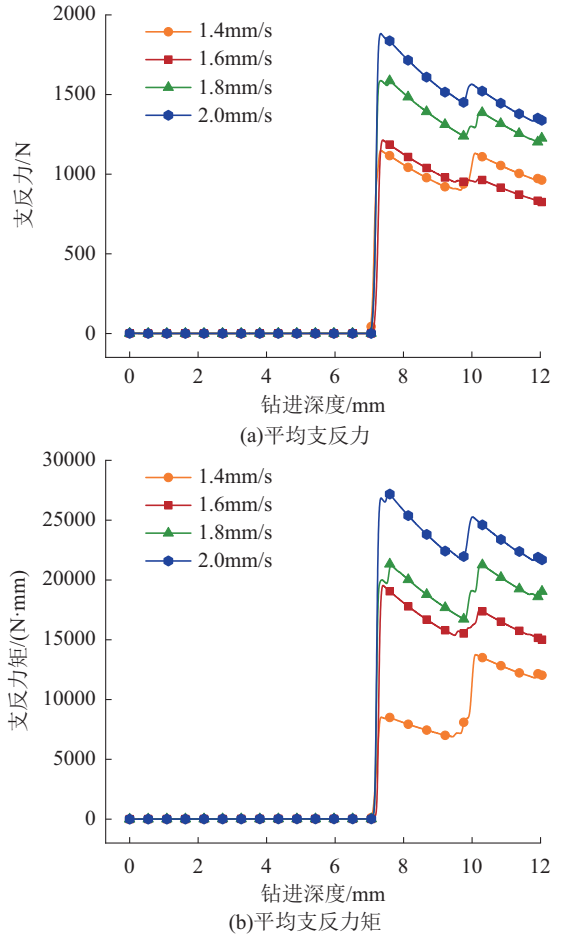


图 14　不同进尺速度平均支反力和平均支反力矩随深度变化曲线

Fig.14　Curves of average reaction force and average reaction moment with depth at different penetration rates

mm/s时,支反力峰值依次为1197、1202、1575、1879 N,支反力矩峰值依次为13825、19511、21327、26974 N·mm。四种工况中,进尺速度为1.4 mm/s时的支反力与支反力矩值最小,与该工况相比,1.6、1.8、2.0 mm/s工况的支反力峰值分别升高了约0.42%、31.58%、56.98%,支反力矩的峰值分别升高了约41.13%、54.26%、95.11%。综上,进尺速度1.4 mm/s工况下负载最小,变化更平缓,综合性能更优。

3.2.2　钻头回转速度对深层月壤钻进性能的影响

保持进尺速度为1.4 mm/s不变,设置了80、100、120和140 r/min共4种回转速度,得到的分析结果如图15所示,可以看出:随着回转速度升高,单次切削所需克服的切削阻力随之降低,原因是高速旋转产生的离心力可减少切屑堆积,降低钻头与切屑、孔壁间的摩擦阻力。对于支反力矩,其由切削阻力矩与摩擦阻力矩耦合而成,二者共同作用下,钻进负载曲线出现局部波动。但整体来看,切削阻力的降低是钻进负载整体随回转速度升高而降低的主要原因,该分析结论与文献资料[21,26,28]的研究结果一致。当回转速度由80 r/min升高到140 r/min时,支反力峰值依次为1358、1230、1129、1039 N,支反力矩峰值依次为15326、11572、13743、7628 N·mm。4种工况中,回转速度为140 r/min时的支反力与支反力矩值最小,与该工况相比,80、100、120 r/min工况的支反力峰值分别升高了约30.70%、18.38%、8.66%,支反力矩的峰值分别升高了约100.92%、51.71%、80.16%。综上,回转速度140 r/min工况下载荷水平最小,运行平稳,综合性能更优。

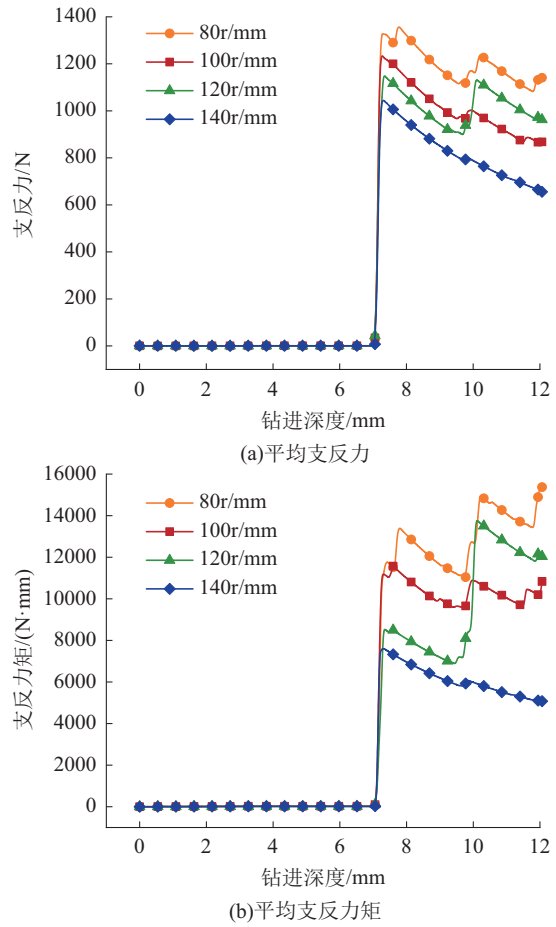


图15 不同回转速度平均支反力和平均支反力矩随深度变化曲线

Fig.15 Curves of average reaction force and average reaction moment with depth at different rotational speeds

4 结论

本文构建了含月岩颗粒的深层月壤-钻头三维有限元模型，设计了八角和六角2种钻头，通过设计多种对比试验，探究了月岩颗粒的形状、大小、空间位置和钻头钻进参数对钻取性能的影响规律，研究结论如下：

(1)钻进过程中，比较发现：当钻头结构为阶梯基体，切削刃为八角立齿构型，切削角度为90°、切削刃后角为14°时，钻头的综合钻进性能最优。

(2)月岩的颗粒形状不是引起负载变化的最关键因素，夹杂月岩颗粒的大小和空间位置是引起负载变化的关键因素。

(3)钻进负载与进尺速度呈正相关，当进尺速度为1.4 mm/s时，钻进取心效率最高且最稳定；当回转速度不同时，钻进负载则随回转速度的增加而降低；当回转速度为140 r/min时，可实现高效低负载稳定钻进。

参考文献(References)：

[1] 果琳丽，李志杰，齐玢，等．一种综合式载人月球基地总体方案及建造规划设想[J]．航天返回与遥感，2014，35(6)：1-10.
GUO Linli, LI Zhijie, QI Bin, et al. An overall tentative plan and construction blueprint of manned lunar base[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2014, 35(6): 1-10.

[2] 姜生元，刘君巍，张伟伟，等．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.

[3] 马亮．深层采样全过程月壤样品层理保持特性分析[D]．哈尔滨：哈尔滨工业大学，2015.
MA Liang. Analysis on maintaining stratification retention characteristics in the entire sampling process for deep lunar regolith[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

[4] Hao H C, Gao M Z, Li C B, et al. Selection and thermal physical characteristics analysis of in-situ condition preserved coring lunar rock simulant in extreme environment[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023, 33(11): 1411-1424.

[5] Allen C, Allton J, Lofgren G, et al. Curating NASA's extraterrestrial samples-past, present, and future[J]. Geochemistry, 2011, 71(1): 1-20.

[6] 田野，邓宗全，唐德威，等．月球次表层取心钻具功耗特性及地面模拟实验[J]．吉林大学学报(工学版)，2016，46(1)：166-171.
TIAN Ye, DENG Zongquan, TANG Dewei, et al. Power consumption of lunar subsurface coring driller and earth environment stimulant experiments[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 46(1): 166-171.

[7] 李大佛，殷参，雷艳，等．月球钻孔取心机具试验与钻进规程[J]．地球科学，2016，41(9)：1611-1618.
LI Dafo, YIN Can, LEI Yan, et al. Coring tests of core drilling tool and analysis of drilling parameters[J]. Earth Science, 2016, 41(9): 1611-1618.

[8] 王迎春，张鼐，曾婷，等．深层月壤钻取系统钻进力载控制方法与实验研究[J]．宇航学报，2025，46(5)：1024-1034.
WANG Yingchun, ZHANG Nai, ZENG Ting, et al. Control method and experimental study of drilling force load in deep lunar soil drilling system[J]. Journal of Astronautics, 2025, 46(5): 1024-1034.

[9] Wu Y, Gao M Z, Hao H C, et al. A DEM parameters calibration method for three-dimensional model of the lunar rock based on the approximate model[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2023, 156: 537-547.

[10] Schäfer C M, Scherrer S, Buchwald R, et al. Numerical simulations of regolith sampling processes[J]. Planetary and Space Science, 2017, 141: 35-44.

[11] 姜生元，梁杰能，赖小明，等．嫦娥五号月壤剖面钻进取芯状态

分析与解译[J].机械工程学报,2022,58(10):348-360.
JIANG Shengyuan, LIANG Jieneng, LAI Xiaoming, et al. Analysis on drilling and coring process and lunar regolith stratification state interpretation in Chang'E-5[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022,58(10):348-360.

[12] Nagaoka K ,Kubota T ,Otsuki M, et al. Experimental analysis of a screw drilling mechanism for lunar robotic subsurface exploration[J]. Advanced Robotics, 2010,24(8/9):1127-1147.

[13] 赖小明,杜志豪,王国峰,等.月壤取芯钻具热特性有限元分析[J].深空探测学报,2017,4(6):544-551.
LAI Xiaoming, DU Zhihao, WANG Guofeng, et al. The finite element analysis of thermal property for lunar soil-drilling sampler[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017,4(6):544-551.

[14] Khademian Z, Kim E, Nakagawa M. Simulation of lunar soil with irregularly shaped, crushable grains: effects of grain shapes on the mechanical behaviors[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2019,124(5):1157-1176.

[15] 周峻,刘天喜,梁磊,等.低密实度基础月壤的钻进压力建模及试验验证[J].宇航学报,2022,43(3):328-335.
ZHOU Jun, LIU Tianxi, LIANG Lei, et al. Low compactness basic lunar soil drilling pressure modeling and verification[J]. Journal of Astronautics, 2022,43(3):328-335.

[16] 刘天喜,魏承,马亮,等.大颗粒岩块对月壤钻取过程的影响分析[J].岩土工程学报,2014(11):2118-2126.
LIU Tianxi, WEI Cheng, MA Liang, et al. Effect of large granular rocks on drilling process of lunar soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014(11):2118-2126.

[17] 曹金凤.Abaqus有限元分析常见问题解答与实用技巧[M].北京:机械工业出版社,2020.
CAO Jinfeng. Abaqus Finite Element Analysis: FAQs and Practical Tips[M]. Beijing: China Machine Press, 2020.

[18] 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.

[19] 崔中雨.极区月壤水冰钻具设计及钻进力载特性研究[D].秦皇岛:燕山大学,2023.
CUI Zhongyu. Design of lunar soil water ice drilling tool and research on drilling load characteristics[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2023.

[20] 刘天喜,马亮,梁磊,等.深层月壤采样钻具参数影响分析[J].机械工程学报,2018,54(9):27-36.
LIU Tianxi, MA Liang, LIANG Lei, et al. Analysis on influence of drill parameters in the sampling of deep lunar soil[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018,54(9):27-36.

[21] Cao J F, Liu X L, Liu W J, et al. Study on the influence of rotation speed on drilling performance of lunar soil sampling drills[J]. Thermal Science, 2025,29(2 Part B):1369-1374.

[22] 庞彧,刘志全,李新立.月面钻取式自动采样机构的设计与分析[J].中国空间科学技术,2012,32(6):16-22.
PANG Yu, LIU Zhiquan, LI Xinli. Coring design and analysis of automatic drilling sampling mechanism for lunar exploration[J]. Chinese Space Science and Technology, 2012,32(6):16-22.

[23] 李斌斌.基于物理力学性质的模拟月岩可钻性研究[D].北京:中国地质大学(北京),2015.
LI Binbin. The drillability research of simulated Lunar rocks based on physics and mechanics properties[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.

[24] 陈伟,赵德明,高兴文,等.临界尺度月壤颗粒辨识集成学习方法[J].深空探测学报(中英文),2025,12(6):652-662.
CHEN Wei, ZHAO Deming, GAO Xingwen, et al. Integrated learning method for identifying critical-sized lunar soil particles[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025,12(6):652-662.

[25] 赖小明.月壤剖面模拟及其钻进负载特性研究[D].长沙:国防科技大学,2016.
LAI Xiaoming. The cross-section simulant of lunar regolith and research on drilling load feature[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.

[26] Cao J F, Liu W J, Liu X L, et al. Simulation and analysis of the lunar rock drilling process in a complex lunar environment[J]. Thermal Science, 2025,29(2 Part B):1333-1337.

[27] 刘天喜.基于离散元法的月壤钻取动力学研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
LIU Tianxi. Research on lunar soil drilling dynamics based on the discrete element method[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

[28] Gao Z, Gao M Z, Hao H C, et al. Investigation into failure mechanisms of lunar regolith simulant under thin-walled drilling tool with critical parameters[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2025,35(6):863-879.

(编辑　王文)