月球自行走钻具随钻孔壁强化膜仿生增阻数值模拟

佟以轩[1,2]，王金龙[3]，韩丽丽[4]，赵　研[1,2]，于永平[1,2]，
贾　瑞[1,2]，王治刚[1,2]，张　毅[2,4*]，高　科[1,2*]
（1.吉林大学深部探测与成像全国重点实验室，吉林 长春 130026；2.吉林大学建设工程学院，吉林 长春 130026；
3.中水东北勘测设计研究有限责任公司，吉林 长春130021；4.中国地质科学院，北京 100037）

摘要：针对月球真空、低重力及极端温度环境下月壤松散、孔壁易坍塌，且常规钻井液与套管护壁技术难以直接应用、制约深部钻探取心的工程难题，本文提出一种适配仿生自行走钻具的随钻孔壁强化膜护壁方案，并引入人体指纹仿生理念对强化膜表面进行增阻优化。采用PFC3D离散元软件对比有无强化膜条件下的钻进过程，验证强化膜的护壁效果；基于ABAQUS有限元软件，结合正交试验与极差分析，系统研究仿生波纹形态及参数对界面增阻性能的影响规律。结果表明：随钻强化膜可显著抑制月壤颗粒脱落与孔壁失稳；弓型纹仿生波纹增阻效果最优，且当波纹宽度小于1 mm时，最优脊线间宽比（约1.65）与指纹脊线特征高度一致；最优参数组合为宽度0.5 mm、间距0.825 mm、厚度0.15 mm、曲率半径1.5倍波纹弦长，此时摩擦力较光滑表面提升35.89%。该研究为月球深部钻探随钻孔壁强化及仿生结构设计提供了理论依据与工程应用参考。

关键词：月球钻探；自行走钻具；孔壁强化；强化膜；仿生增阻；指纹仿生；数值模拟；正交试验
中图分类号：P634.4;P184　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2096-9686(2026)06-0114-12

Numerical simulation of bionic friction augmentation for while-drilling borehole wall reinforcement membrane of lunar self-propelled drilling tool

TONG Yixuan[1,2], WANG Jinlong[3], HAN Lili[4], ZHAO Yan[1,2], YU Yongping[1,2],
JIA Rui[1,2], WANG Zhigang[1,2], ZHANG Yi[2,4*], GAO Ke[1,2*]
(1. *State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, Jilin University, Changchun Jilin* 130026, *China*; 2. *College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin* 130026, *China*; 3. *China Water Northeastern Investigation, Design & Research Co., Ltd., Changchun Jilin* 130021, *China*; 4. *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*)

Abstract: To address the engineering challenges of loose lunar regolith and borehole wall instability under lunar vacuum, low-gravity, and extreme temperature conditions-where conventional drilling fluid and casing wall-protection technologies are difficult to apply directly and restrict deep drilling and coring-this paper proposes a while-drilling borehole wall reinforcement membrane scheme adapted to the bio-inspired self-propelled drilling tool. Furthermore, the bionic concept of human fingerprints is introduced to optimize the friction-augmentation performance of the membrane surface. The PFC3D discrete element software is employed to compare the drilling processes with and without the

收稿日期：2026-03-09；**修回日期**：2026-05-08　　**DOI**：10.12143/j.ztgc.2026.06.013
基金项目：深部探测与成像全国重点实验室开放课题（编号：DEEI20251142）；深地探测与矿产勘查全国重点实验室基本科研业务费项目（编号：JKYDM2025112）；中国地质科学院基本科研业务费专项（编号：JKY202642）
第一作者：佟以轩，男，满族，2000年生，硕士研究生，地质工程专业，研究方向为地外天体钻探，吉林省长春市朝阳区西民主大街938号，tongyx24@mails.jlu.edu.cn。
通信作者：张毅，男，汉族，1985年生，高级工程师，油气井工程专业，博士，研究方向为科学钻探技术与装备，北京市西城区百万庄大街26号，shidazhangyang@263.com。
高科，男，汉族，1977年生，教授，博士生导师，地质工程专业，博士，主要从事仿生自平衡理论、仿生自平衡钻进理论与技术、仿生钻头和科学钻探技术与装备研究工作，吉林省长春市朝阳区西民主大街938号，gaokenm@jlu.edu.cn。
引用格式：佟以轩，王金龙，韩丽丽，等.月球自行走钻具随钻孔壁强化膜仿生增阻数值模拟[J].钻探工程，2026，53(6)：114-125.
TONG Yixuan, WANG Jinlong, HAN Lili, et al. Numerical simulation of bionic friction augmentation for while-drilling borehole wall reinforcement membrane of lunar self-propelled drilling tool[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(6): 114-125.

reinforcement membrane, verifying its wall-stabilizing effect. Based on the ABAQUS finite element software, combined with orthogonal experiments and range analysis, the influence of bionic corrugation morphology and parameters on the interfacial friction-augmentation performance is systematically investigated. The results indicate that the while-drilling reinforcement membrane can significantly inhibit the detachment of lunar regolith particles and borehole wall instability. The arch-type bionic corrugation exhibits the optimal friction-augmentation effect; when the corrugation width is less than 1 mm, the optimal ridge spacing-to-width ratio (approximately 1.65) is highly consistent with the characteristics of human fingerprint ridges. The optimal parameter combination is a width of 0.5 mm, spacing of 0.825 mm, thickness of 0.15 mm, and curvature radius of 1.5 times the corrugation chord length, under which the friction force is increased by 35.89% compared with a smooth surface. This study provides a theoretical basis and engineering application reference for while-drilling borehole wall reinforcement and bionic structure design in deep lunar drilling.

Key words: lunar drilling; self-propelled drilling tool; borehole wall reinforcement; reinforcement membrane; bionic friction enhancement; fingerprint bionics; numerical simulation; orthogonal test

0　引言

月球钻探是开展月球深部探测、月球资源开发利用的核心技术手段,获取的月壤(岩)样品是实现月球精准探测与科学评估的关键材料。美国阿波罗计划于20世纪60年代启动,经持续技术改进与方案优化,先后完成6次载人登月任务,并同步开展月球表面人工钻探取样工作[1]。其中,Apollo-11、Apollo-12、Apollo-14号采用钳、耙、铲、锤等人工方式采集月壤样品[2]。Apollo-15号及后续任务启用月面钻机开展取样,Apollo-17号最大钻探深度305 cm,累计获取样品质量110.5 kg[3]。苏联Luna-16、Luna-20、Luna-24号探测器先后成功实现无人月面取样,其中Luna-24号开创性地采用无滑差软袋取心法完成月壤采样[4]。我国探月工程起步相对较晚,从2007年嫦娥一号发射,到2020年嫦娥五号实现无人月面钻探取样并成功返回,我国成为继美国、苏联后第三个实现月面钻探取样的国家[5]。嫦娥五号钻深0.9 m,成功采样并带回1731 g样品[6]。嫦娥六号是人类第一个月球背面样品采集任务,钻进深度约1.1 m时遭遇碎石层,考虑后续任务安排等因素停止钻进,共取样1.9 kg[7-8]。

当前月球钻探深度偏浅,深部月球钻探仍面临多项技术挑战,孔壁稳定性是制约钻探深度的关键因素之一。随钻孔深度增加,孔壁失稳风险上升,钻具振动易诱发孔壁月壤、砾石颗粒脱落,甚至引发孔壁坍塌、砾石卡钻等工程故障。嫦娥五号任务因钻遇砾石层发生卡钻,被迫提前终止钻进[9]。在地球钻探中,通常采用钻井液循环维护孔壁稳定。然而,月球极端低温、低重力环境使得常规钻井液难以正常工作。另一种常用的孔壁加固方式是下入套管,但常规下套管需先提起钻具,大幅增加作业时间;而不提钻下套管则需对钻杆、钻机及钻头等进行特殊设计与改进[10],对月球工程车的载荷设计提出了难以达到的技术要求,实施难度较大。

综上所述,孔壁失稳是制约月球钻进深度突破的瓶颈。地球钻探成熟的孔壁强化技术在月球真空、低重力、极端温变及资源受限条件下存在根本性应用障碍,难以直接用于月球钻探,现有月钻技术无法做到随钻强化孔壁。目前国内外月球钻探研究集中于钻具优化与参数调控,尚未针对孔壁强化技术开展系统性研究,属关键技术空白。针对月球钻探孔壁强化难题,本文提出一种基于月球钻探自行走钻具的随钻孔壁强化机构,该机构采用随钻推出孔壁强化膜护壁方法,护壁原理接近套管护壁。针对该强化膜的护壁性能,本文明确2个评价维度:(1)钻孔孔壁的整体结构稳定性,即是否发生坍塌失稳;(2)钻探作业时动态工况下强化膜的支护可靠性,即其是否具备优异的界面附着性能与抗位移、抗脱落能力。基于上述评价体系,后续针对强化膜在2个方向的可靠性开展系统理论分析与模拟验证。相较于现有钻探孔壁强化技术,本研究引入仿生学理念,提出了适配自行走钻具的仿生增效孔壁强化方案,实现了月球钻探随钻强化孔壁。该研究为月球钻探孔壁强化提供一种新思路。

1　自行走钻具及孔壁强化膜护壁原理

月球钻探自行走钻具以蚯蚓为生物原型进行仿生设计,无需配套钻机,近钻头动力驱动碎岩,如图1所示。自行走钻具系统主要由支撑机构、行走机构、压力调节机构和内外钻头回转机构组成[11]。

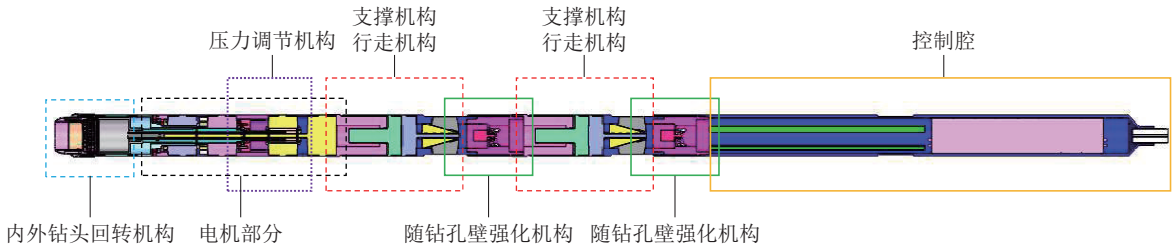


图1 月球钻探仿生自行走钻具示意

Fig.1 Schematic diagram of a bio-inspired self-propelled drilling rig for lunar exploration

随钻孔壁强化机构为月球自行走钻具的重要组成部分，主要由孔壁强化腔、孔壁强化轮、孔壁强化传扭电机、孔壁强化传扭轮、孔壁强化传扭绳和孔壁强化膜组成，如图2所示。孔壁强化机构在工作时，传扭电机提供转动扭矩，经传扭轮和传扭绳传递，带动强化轮旋转，将强化膜自强化腔中推出。强化膜被推出后自然回弹撑到孔壁上实现孔壁强化。强化膜推出过程如图3所示，强化膜增阻设计如图4所示。

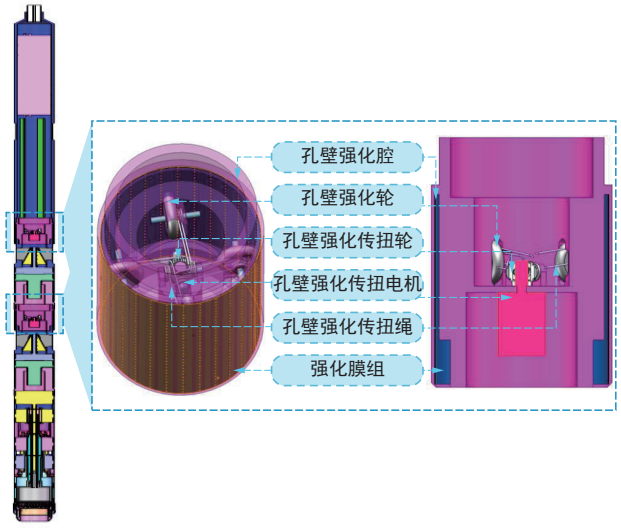


图2 孔壁强化机构三维模型

Fig.2 Borehole wall reinforcer 3D model

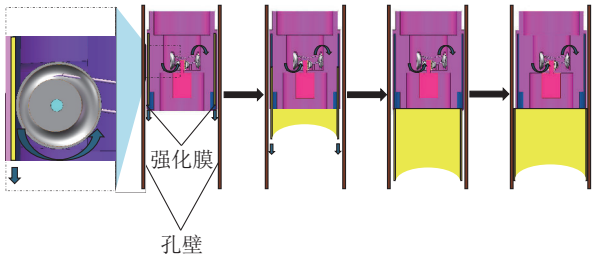


图3 强化膜推出过程示意

Fig.3 Schematic diagram of the reinforcement membrane push-out process

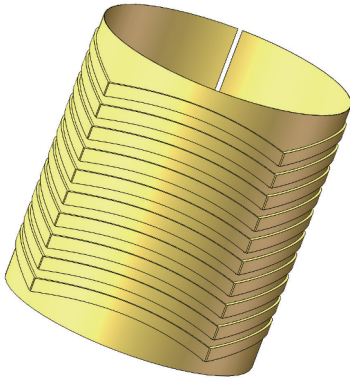


图4 强化膜增阻设计

Fig.4 Friction-augmentation design of the reinforcement membrane

2 强化膜孔壁强化效果数值模拟

为论证月球钻探中孔壁失稳问题，并验证强化膜的护壁效能，本研究选用PFC3D软件进行强化膜强化效果模拟。该软件在离散元分析领域应用广泛，且针对月壤建模与参数校核已有较为成熟的研究成果和工程案例支撑。颗粒性质设置参考宋江文[12]的研究，月壤的黏聚力3.4 kPa、内摩擦角47°、弹性模量17 MPa、泊松比0.2。采用SolidWorks软件建立钻头三维模型，内径50 mm，外径60 mm。为提升计算效率，仿真中将钻头模型以刚体形式导入PFC3D软件，如图5所示。

使用“wall generate”命令建立尺寸为100 mm×100 mm×500 mm的模型边界，并在该范围内依据月壤参数生成颗粒。随后施加平衡指令，使颗粒在自重作用下自然沉积并消除初始重叠，最终形成包含43546颗球形颗粒的月壤模型。为模拟实际钻进过程，设置钻头沿Z轴匀速向下作直线运动并绕其轴线顺时针旋转。同时，通过删除指令，移除位于钻头内径范围内连接状态被破坏的颗粒，以此模拟岩心采取过程。

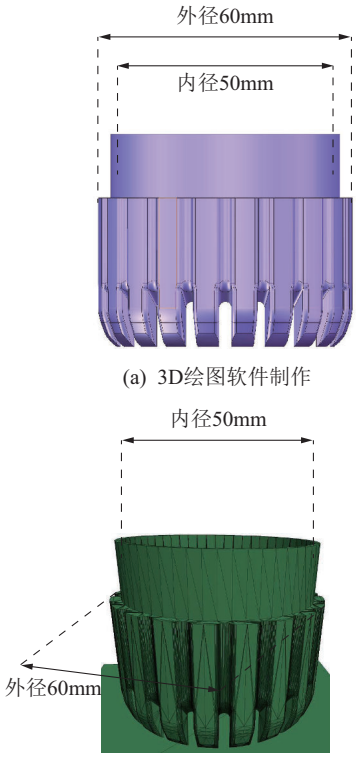


图 5　钻头模型

Fig.5　Drill bit model

2.1　无强化膜组模拟

无强化膜组在钻进初期、中期、结束阶段的数值模拟结果见图 6。由图 6 可见，孔壁呈现显著的不规则形貌，同时可观测到大量发生大位移的月壤颗粒。上述现象表明，未采取孔壁强化措施时，月壤孔壁在钻进作业过程中会发生坍塌失稳。

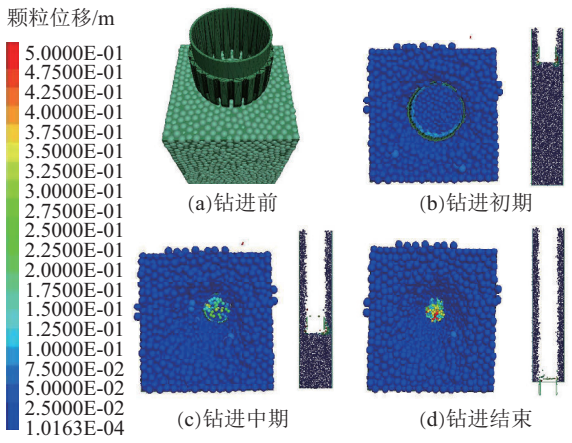


图 6　无强化膜组各时间段模拟结果

Fig.6　Simulation results across different time intervals for the non-reinforcement-membrane control group

2.2　有强化膜组模拟

考虑到将强化膜简化为刚体无法准确反映其与月壤及钻具的真实力学作用，为了真实复现随钻孔壁强化过程，在钻头上表面预设圆环区域，随钻头钻进，在该预设区域内基于 PB 模型实时生成颗粒，以构建动态强化膜模型。通过实时监测钻头位移，每达到预设进尺即生成一层强化膜颗粒，并使其与既有膜颗粒黏结，以此动态复现钻进过程中的孔壁强化，如图 7 所示。

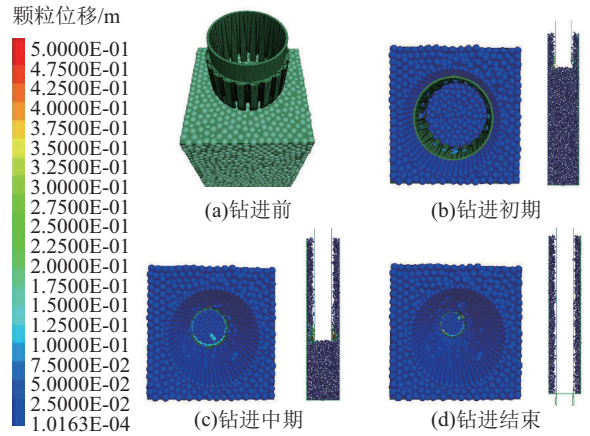


图 7　有强化膜对照组各时间段模拟结果

Fig.7　Simulation results across different time intervals for the reinforcement-membrane control group

图 7 展示了有强化膜组钻进初期、中期、结束阶段的模拟结果。可以看出，孔壁与强化膜紧密贴合，钻进完成后孔底基本未见大位移月壤颗粒。这表明强化膜能够有效维持孔壁稳定，具有良好的强化效果。钻进完成时的强化膜颗粒受力、位移云图见图 8、图 9。

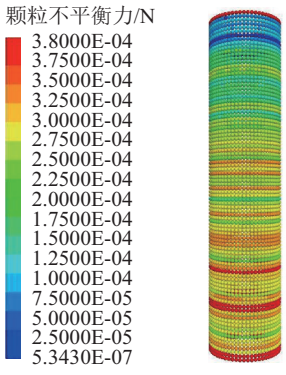


图 8　强化膜颗粒受力云图

Fig.8　Stress distribution contour of reinforcement membrane particles

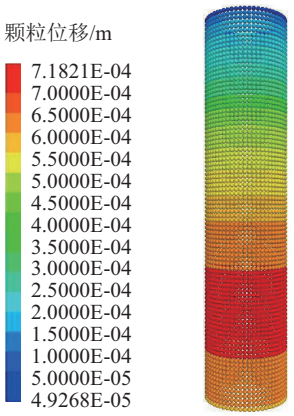


图9 强化膜颗粒位移云图

Fig.9 Displacement contour plot of reinforcement membrane particles

基于强化膜颗粒受力云图分析，强化膜受力整体呈现随钻孔深度增加而增大的分布规律，但局部区域存在应力集中现象，部分浅部区域受力水平高于深部区域。初步分析认为，该现象源于孔壁失稳脱落的月壤颗粒在局部区域发生堆积，对强化膜产生额外的挤压。针对深部区域因受力水平升高易出现强化效果衰减的问题，在不干扰钻具正常钻进作业的前提下，可采用变厚度强化膜设计方案：浅部钻进阶段使用薄层强化膜，抵达深部地层后使用厚层强化膜，以此提升深部孔壁的强化效果。基于强化膜颗粒位移云图分析，强化膜的微变形量随钻孔深度增加而增大，其空间分布规律与受力云图的分析结果具有良好的一致性。

2.3 对比分析

对比各时段2组模拟的孔壁月壤颗粒状态，可见有强化膜组相比无强化膜组孔壁稳定性显著增强。为更具体地量化强化效果，将各组模拟的月壤颗粒数量做统计，结果见表1。

通过各时段月壤颗粒数量对比，可看出强化膜有效阻止了大量孔壁月壤颗粒的坍塌。多组数值模拟结果的系统分析表明，孔壁强化膜对提升月壤钻孔孔壁稳定性具有显著效果。

表1 2组模拟各阶段月壤颗粒数量对比

Table 1 Particle count comparison: two simulation groups vs. time

组 别	钻进前/颗	钻进初期/颗	钻进中期/颗	钻进结束/颗
无膜对照组	43546	41096	35530	30875
有膜强化组	43546	41696	37208	32737

3 强化膜增阻仿生结构数值模拟

为进一步优化强化膜性能，使其具备优异的界面附着性能与抗位移、抗脱落能力，解决钻探动态作业工况下强化膜支护可靠性不足的问题，本文引入仿生理念，进行强化膜表面增效优化设计。受限于强化膜厚度较小，难以加工复杂结构，本次设计以人体指纹为仿生原型，同时参考锦蛇腹部鳞片的排布规律进行结构优化[13]。人类指纹由一系列凸起的脊线构成，这些脊线提升了接触面的粗糙程度，在接触面出现微小形变时，脊线能嵌入物体表面的微小形变中实现机械互锁，增大摩擦力。指纹可分为弓型纹、箕型纹和斗型纹3种类型[14]，见图10。通过调研相关文献，在25 mm^{2}区域内，男性手指尺骨部分指纹脊线数目为12.2～19.5条，女性为13.7～19.7条[15]。将指纹脊线简化为夹角后，其角度大约在110°～120°[16]。

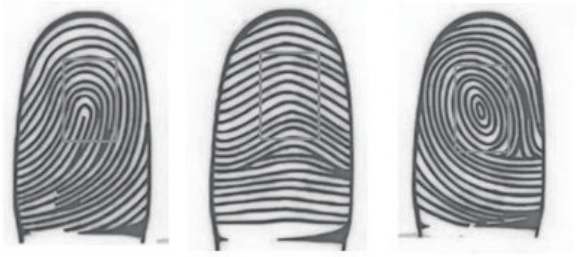


图10 3种指纹类型特征

Fig.10 Three-type feature maps

本研究拟定的数值模拟研究思路：首先对3种指纹类型开展对比模拟分析，遴选性能最优的指纹类型作为仿生原型，在此基础上对比分析竖直与水平2种波纹排布形式对强化膜性能的影响，确定最优波纹排布方向；随后选取波纹宽度、间距、厚度、曲率半径设计正交试验方案，采用极差分析法明确各参数对强化膜性能影响的主次顺序，最终按照波纹厚度、波纹宽度与间距、波纹曲率半径的顺序开展参数优化，以获取全局最优的仿生波纹结构参数组合。

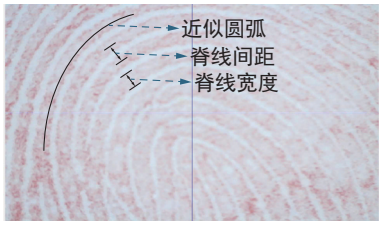
3.1 仿生指纹样本选取

本研究共采集8人的指纹样本，样品来源均为东亚成年男性，年龄区间为22～28岁。利用体视显微镜对样本进行观察，随后通过ImageJ软件对观察

到的指纹样品进行测量,见图11、表2。通过观察样品指纹,测量统计得出:脊线宽度为0.18～0.34 mm,脊线间距为0.38～0.58 mm。定义间宽比A=脊线间距/脊线宽度。



(a)体视显微镜



(b)镜下指纹样品

图11　体视显微镜及镜下指纹样品

Fig.11　Stereomicroscope with fingerprint sample

由以上测量数据可知,脊线的间距与宽度正相关。对于绝大多数脊线,1.5<A<1.8,计算其平均值A^*=1.64678。

$$A^*=\frac{A_1+A_2+A_3+\cdots+A_n}{n} \tag{1}$$

式中:n——样本脊线数量;A_n——第n条脊线的间宽比。

3.2　增阻设计仿生原型优选及模拟

在实际钻探过程中,强化膜外表面会与孔壁表面紧密贴合,但本模拟重点观测强化膜与孔壁间的摩擦力,为缩短模拟计算时间,将模型简化为平面接触。采用ABAQUS软件,建立三维模型进行有限元分析。据郑永春等[17]的研究,月壤的物理和机械性质具有较大波动范围。参照徐钊等[18]和尹忠旺等[19]月壤本构参数的选取,最终确定月壤密度1.58 g/cm^3,杨氏模量10 MPa,泊松比0.42,内摩擦角54°,膨胀角5°,黏聚力3 kPa,摩擦系数0.3。经反复测算,确定强化膜与月壤的网格尺寸。强化膜与月壤均采用结构化网格划分技术,共152991个网格单元,其中月壤占135000个,月壤单元类型为C3D8R,强化膜单元类型为C3D10M。强化膜与孔壁的接触作用网格模型如图12所示。在设置边界条件时,固定月壤模型侧面和底面的节点位移与旋转自由度,其余节点自由度不受约束。

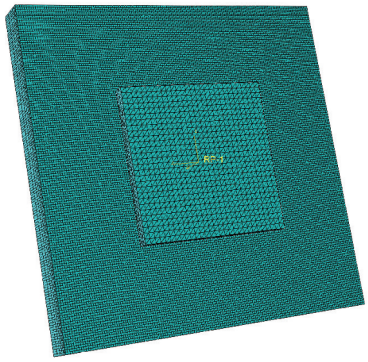


图12　强化膜与孔壁的接触作用网格模型

Fig.12　Mesh model diagram illustrating the contact interaction between the reinforcement membrane and the borehole wall

分别提取弓型纹、箕型纹、斗型纹特征结构,建立简化模型。其中,弓型纹提取出圆弧形波纹,箕型纹提取出U形波纹,斗型纹提取出椭圆形波纹,如图13所示。

为确定最佳表面载荷参数,在仅施加面荷载的条件下进行了一系列数值模拟。通过多次试验比较,最终确定0.05 MPa的均布荷载与0.3 s的施压时间为最优组合。0.3 s后为强化膜施加0.1 mm Y轴正方向位移,同时约束强化膜其他方向自由度。

表2　第一组样品测量结果

Table 2　Measurement results for sample set 1

测量位置	脊线宽度/μm	脊线间距/μm	A
上部	263,277,299,248,284,284,	435,486,522,529,450,450,	1.65,1.75,1.75,2.13,1.58,1.58,
中部	332,318,304,312,304,261,	546,475,475,496,489,432,	1.64,1.5,1.56,1.59,1.61,1.65,
下部	334,325,339,289,311,289,	539,489,495,439,532,513,	1.61,1.5,1.46,1.52,1.71,1.78

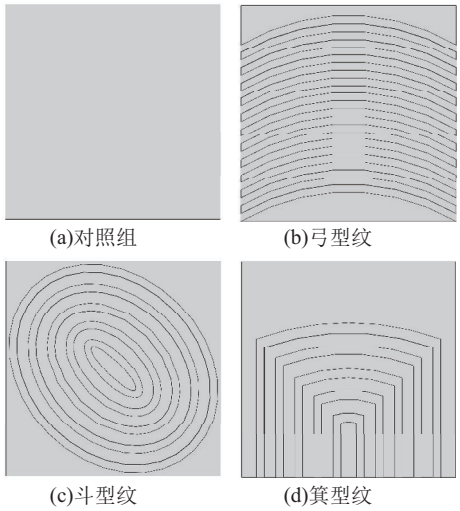


图13 3种指纹类型对应的仿生波纹

Fig.13 Bionic ripple patterns derived from three types of fingerprints

以光滑表面为对照组，基于3种指纹类型为仿生原型，设计了对应的仿生波纹。研究过程中波纹曲率半径、厚度、宽度、间距不变，为保障数值模拟结果的可靠性与可重复性，每组模型均开展2次重复模拟，且各组模型的参数设置均保持一致，模拟结果如图14所示。

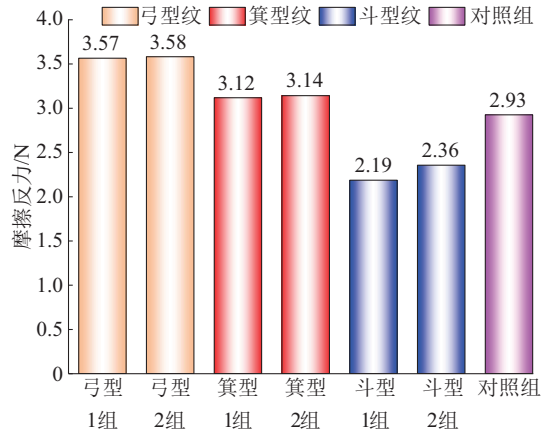


图14 3种指纹类型对应的仿生波纹摩擦力模拟结果

Fig.14 Friction simulation results of bionic corrugation patterns for three fingerprint types

结果表明，以弓型纹和箕型纹为仿生原型的非光滑表面均表现出明显的增阻效果，其中弓型纹原型的增阻效果最为显著。而以斗型纹为仿生原型的非光滑表面则呈现减阻趋势。基于以上结果，后续研究优选弓型纹作为仿生原型进行深入探讨。

3.3 增阻结构模拟及正交极差分析

模拟划分3组（表3）：组①光滑表面对照组，组②竖直波纹设计，组③水平波纹设计。组②与组③采用相同波纹宽度、间距、厚度、曲率半径。3组模拟数据均符合摩擦力核心理论，即先出现最大静摩擦力，随后切换为逐渐增长的动摩擦力。其中，组②和组③存在明显的波峰-波谷-波峰-波谷趋势，这是因为月壤与仿生波纹接触过程中，存在接触—挤压变形—变形恢复—再挤压变形—再变形恢复的过程。

表3 增阻结构模拟结果

Table 3 Preliminary simulation results of the friction-augmentation design

编号	波纹宽度/mm	波纹形态	间距/mm	波纹厚度/mm	摩擦力/N
①		光滑			2.925113
②	0.5	竖直波纹	0.5	0.1	2.953933
③	0.5	水平波纹	0.5	0.1	3.415141

由模拟结果可看出，组③具备明显增阻效果，而组②增阻效果较差。该结果与康剑莉等[20]通过对比试验获得的人体指纹结构摩擦力数值随滑移方向改变存在显著差异的研究结论一致。基于上述结果，后续研究将以组③为基础开展增阻设计，即以水平波纹为基础，选取波纹宽度、间距、厚度、曲率半径为研究因素开展系列数值模拟分析。以波纹宽度d（0.5、1、1.5 mm）、波纹间距（1.5d、2.25d、3d）、波纹厚度（0.1、0.15、0.2 mm）和波纹曲率半径R（R=0.5L、1.5L、2.5L，其中L为波纹弦长）为研究因素，并对每个研究因素设置3个水平，建立四因素三水平正交表（表4）。

强化膜试样中L=14 mm，基于表4，采用SolidWorks软件在强化膜试样（长14 mm，宽14 mm）上建立相应的仿生波纹表面形态，见图15。

通过模拟9组不同表面形态的强化膜与月壤间的接触摩擦滑动过程，得到不同表面形态强化膜从静止状态至匀速滑动状态过程中接触面受到的摩擦力的大小，结果见表5。根据以上结果进行正交极差分析，结果见表6。

由以上极差分析结果可看出，四因素对增阻效果的影响程度排序为波纹宽度＞波纹曲率半径＞波纹间距＞波纹厚度，且各因素的影响程度均难以忽

表4　强化膜仿生形态正交表

Table 4　Orthogonal array for the bionic morphology of the reinforcement membrane

因素组号	波纹宽度 d/mm	波纹间距	波纹厚度/mm	曲率半径
1	0.5	1.5d	0.1	0.5L
2	0.5	2.25d	0.15	1.5L
3	0.5	3d	0.2	2.5L
4	1	1.5d	0.15	2.5L
5	1	2.25d	0.2	0.5L
6	1	3d	0.1	1.5L
7	1.5	1.5d	0.2	1.5L
8	1.5	2.25d	0.1	2.5L
9	1.5	3d	0.15	0.5L

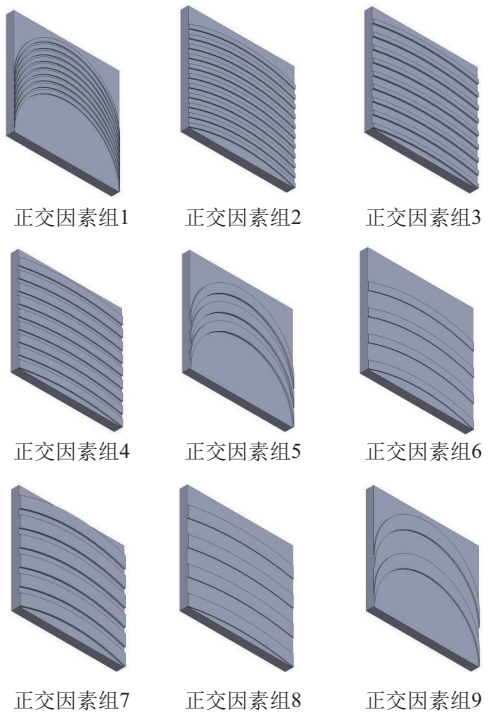


图15　仿生波纹表面形态设计

Fig.15　Surface morphology design of bionic corrugations

略;影响因素的最佳组合为波纹宽度0.5 mm,波纹间距2.25d,波纹厚度0.15 mm,波纹曲率半径1.5L。

3.4　增阻波纹厚度模拟

优选上一阶段模拟最佳组合2号因素组为基础,波纹宽度0.5 mm,间距2.25d,曲率半径1.5L,调整五水平波纹厚度,分别设置为0.1、0.125、0.15、0.175、0.2 mm,进一步优选波纹厚度,如表7所示。

通过分析以上数据,0.15 mm厚波纹增阻效果最佳,摩擦力提升22.89%。0.15 mm接近嵌锁效应与土壤侧移坍塌程度的最优平衡点,当波纹太薄时,波纹嵌入月壤深度不足,难以形成有效嵌锁,摩擦以表面接触为主;当波纹太厚时,波纹嵌入月壤时对月壤侧面压力会导致侧移坍塌,有效嵌锁面积缩减;0.15 mm时,波纹能嵌入月壤形成稳定剪切面,既利用了月壤抗剪阻力,又避免了月壤松动,嵌锁摩擦最强。观察组3与组4波纹下单元变形情况(图16),可看出组4单元的Y向应变明显大于组3

表5　强化膜与月壤接触摩擦力的特征参数

Table 5　Key parameters of the membrane-regolith frictional reaction

因素组号	摩擦力/N
1	3.27732
2	3.59492
3	3.12602
4	3.08211
5	2.98341
6	2.97085
7	3.11589
8	2.94198
9	2.95328

表6　极差分析结果

Table 6　Range analysis results

项目	波纹宽度	波纹间距	波纹厚度	波纹曲率半径
K_1	9.998260	9.475320	9.190150	9.214010
K_2	9.036370	9.520310	9.630310	9.681660
K_3	9.011150	9.050150	9.225320	9.150110
$\bar{K}_1$	3.332753	3.158440	3.063383	3.071337
$\bar{K}_2$	3.012123	3.173437	3.210103	3.227220
$\bar{K}_3$	3.003717	3.016717	3.075107	3.050037
R	0.329036	0.156720	0.146720	0.177183

表7　增阻波纹厚度模拟

Table 7　Thickness simulation of the friction-augmentation corrugations

编号	波纹厚度/mm	摩擦力/N	整体Z向位移/mm
1	0.1	3.22268	0.03663
2	0.125	3.26627	0.05266
3	0.15	3.59493	0.06152
4	0.175	3.43476	0.05121
5	0.2	3.48866	0.0646

单元，符合上述分析。

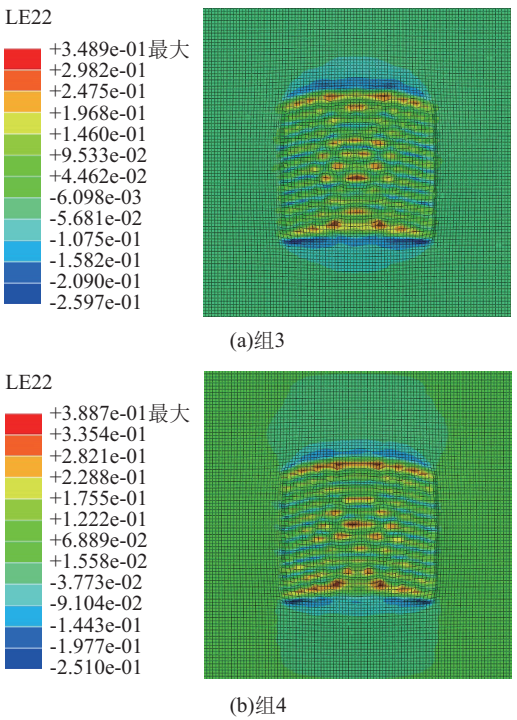


图16 组3与组4波纹下单元应变云图

Fig.16 Strain contour plots for elements beneath corrugations in group 3 and group 4

3.5 增阻波纹宽度、间距模拟

基于前面的模拟结果，将波纹曲率半径优选为1.5L，将波纹厚度优选为0.15 mm，为进一步研究波纹宽度与间距对摩擦力的影响，以指纹样品测量结果为依据，设计10组模拟，如表8所示，其中第10组为光滑表面对照组。

通过分析以上数据，以相同相邻间距对以上表面结构进行分组，对比摩擦力进而分析宽度、间距对增阻效果的影响，如图17所示。分析结果显示，波纹宽度较小时，其增阻效果最优的组合所对应的间距亦较小；而波纹宽度增大时，最优间距也随之增大。为深入探究波纹宽度与间距对增阻效果的影响，依据指纹样品测量数据及前述模拟结果，增设多组模拟，如表9所示。

将模拟结果进行多项式拟合，得到3D曲面图，见图18。观察曲面图发现，当波纹宽度较小(<1 mm)时，增阻效果最佳的波纹间距与宽度的组合分布在直线A=1.65附近，处于A=1.5～1.8的范围内，该趋势与指纹样本的观测结果一致；当波纹宽度较大时，最佳的间宽比随宽度增加逐渐偏离A=1.65直线。在曲面图中，波纹宽度为0.5 mm、间距为0.825 mm时摩擦力达到最高值3.975 N，摩擦力提升35.89%，为最优参数组合。

综合图表分析可知，当波纹宽度处于实际指纹脊线宽度范围内时，基于指纹样本测得的间宽比(A≈1.65)具有良好的增阻效果，适宜作为仿生表面增效设计的依据；而当波纹宽度显著偏离实际指纹脊线尺寸时，该比例关系则不再适用。

表8 强化膜波纹宽度、间距模拟a

Table 8 Width and spacing simulation of the reinforcement membrane corrugations-option a

编号	波纹宽度/mm	相邻间距/mm	波纹间距/mm	A	摩擦力/N
1	0.5	0.5	1	2	3.45209
2	0.5	1	1.5	3	3.36669
3	0.5	1.5	2	4	3.1996
4	1	0.5	1.5	1.5	3.02062
5	1	1	2	2	3.10984
6	1	1.5	2.5	2.5	3.24556
7	1.5	0.5	2	1.33	3.02685
8	1.5	1	2.5	1.67	3.1226
9	1.5	1.5	3	2	3.26192
10					2.925113

注：A=波纹间距/波纹宽度。

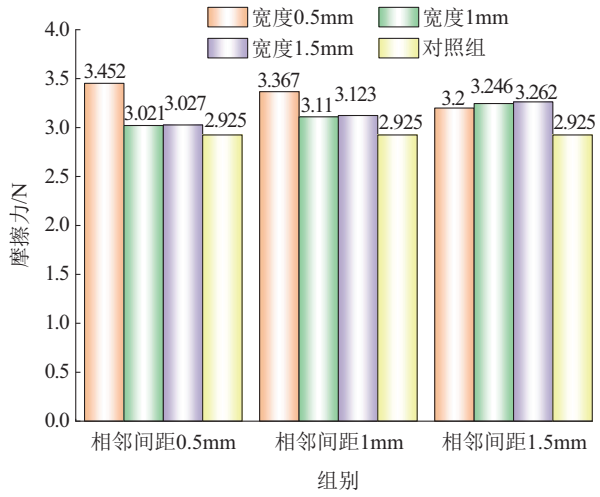


图17 相同相邻间距不同波纹宽度的表面结构摩擦力对比

Fig.17 Comparison of frictional reaction forces for surface structures with identical adjacent spacing but varying corrugation widths

表9　强化膜波纹宽度、间距模拟b

Table 9　Width and spacing simulation of the reinforcement membrane corrugations-option b

编号	波纹宽度/mm	相邻间距/mm	波纹间距/mm	A	摩擦力/N
11	0.5	0.325	0.825	1.65	3.97193
12	1	2	3	3	3.00792
13	1.5	3	4.5	3	3.00668
14	0.5	2	2.5	5	3.23864
15	0.5	3	3.5	7	2.95016
16	1	3	4	4	3.18269
17	1.5	2	3.5	2.33	3.26955
18	0.75	0.5	1.25	1.67	3.65354
19	0.75	1	1.75	2.33	3.47638
20	0.75	1.5	2.25	3	3.37031
21	0.75	2	2.75	3.67	3.23875
22	0.75	3	3.75	5	2.94346
23	1.25	0.5	1.75	1.4	3.3447
24	1.25	1	2.25	1.8	3.32202
25	1.25	1.5	2.75	2.2	3.31223
26	1.25	2	3.25	2.6	3.22644
27	1.25	3	4.25	3.4	3.09339

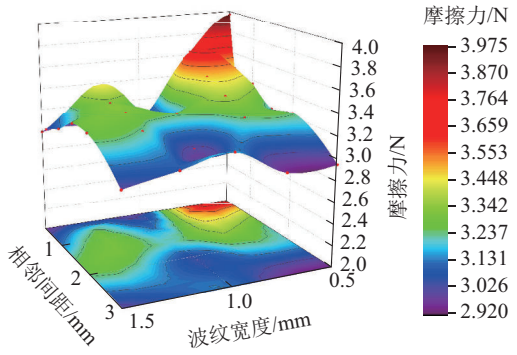


图18　不同相邻间距不同波纹宽度的表面结构摩擦力曲面及投影

Fig.18　Surface plot and contour projection of frictional reaction force versus corrugation width and adjacent spacing for textured surfaces

3.6　增阻波纹曲率半径模拟

基于上述模拟结果,选取波纹厚度0.15 mm、波纹宽度0.5 mm、波纹间距0.825 mm,在此基础上对波纹曲率半径进行调整,进一步研究波纹曲率半径对增阻效果的影响,如表10所示。8组模拟的应力云图见图19。

通过对不同曲率半径波纹结构下月壤应力云图的对比分析发现,随着曲率半径的增大,应力集中区域逐渐由波纹中央向两侧扩散。当曲率半径R=0.5L~L,应力高度集中于波纹顶部中央区域,此时波纹较为陡峭,以切割姿态侵入月壤,使月壤发生局部剪切和分离,但与月壤有效接触面积小,被剧烈扰动的月壤体积有限,摩擦力较小。当曲率半径R=1.25L~1.5L,应力区逐渐向边缘扩散,此时波纹无法轻易切割月壤,而是推动嵌入波纹结构的楔形土体,有效接触面积显著增大,摩擦力增大。当曲率半径R>1.5L,应力区进一步扩散至边缘,但集中程度下降,尽管此时有效接触面积最大,但波纹过于平坦,难以对月壤产生剧烈剪切,应力强度下降,摩擦力减小。第8组模拟结果显示在曲率半径过大时,增阻效果会明显下滑,也佐证了以上结论。

表10　强化膜波纹曲率半径模拟

Table 10　Curvature simulation of the reinforcement membrane corrugations

编号	波纹曲率半径	摩擦力/N
1	0.5L	3.73565
2	0.75L	3.81889
3	1L	3.87068
4	1.25L	3.90398
5	1.5L	3.97193
6	1.75L	3.87643
7	2L	3.84041
8	2.5L	3.32233

4　结论

针对月球钻探孔壁强化难题,本文提出一种基于月球钻探自行走钻具的随钻孔壁强化机构,该机构采用随钻推出强化膜的护壁方法,围绕孔壁抗坍塌稳定性与动态工况下强化膜抗位移、抗脱落的可靠性2个维度开展研究,分别对应强化膜护壁效果与表面增阻效果。

(1)护壁效果:对比有无强化膜时的钻进过程,并结合受力云图与位移云图分析表明,强化膜可有效维持孔壁稳定,其整体受力随钻孔深度增加而增大,但局部应力集中可能导致较浅位置的受力高于较深区域。

(2)增阻效果:仿生波纹厚度为0.15 mm时增阻效果较佳,摩擦力提升22.89%;波纹宽度小于1 mm

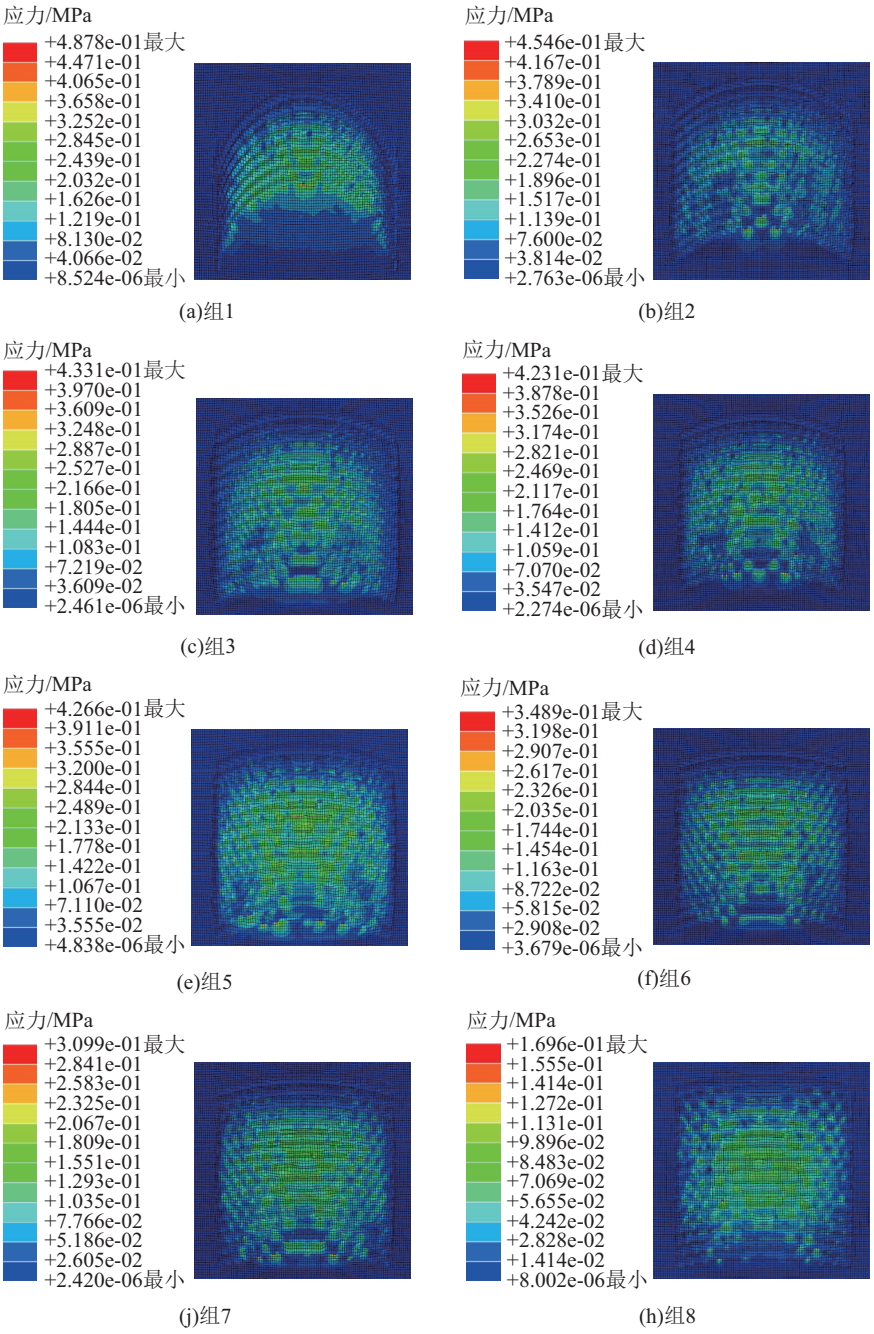


图19 八组模拟同时刻Mises应力云图

Fig.19 Mises stress contour plots from eight simulation cases at the same time point

时，间宽比A约1.65时增阻效果最优，其中宽度0.5 mm、间距0.825 mm的组合摩擦力达3.975 N，提升35.89%；波纹曲率半径为1.5倍波纹弦长时增阻效果最好，该比值在0.5～1.5范围时，摩擦力随曲率半径增大而上升，超过1.5则转为下降。

参考文献(References)：

[1] Johnston R S, Hull W E. Apollo Missions[M]//Johnston R S, Dietlein L F, Berry C A, et al. Biomedical Resultsof Apollo. Washington, DC: NASA Headquarters, 1975:9-40.

[2] Beattie D A. Taking Science to the Moon[M]. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2003:107-124.

[3] 陈浩文，冉恒谦，王艳丽，等.月球钻探模拟试验及技术展望[J].钻探工程，2023，50(S1)：192-199.
CHEN Haowen, RAN Hengqian, WANG Yanli, et al. Lunar drilling simulation experiments and technical prospects[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1):192-199.

[4] 高兴文，殷参，赖小明，等.月壤钻探取心机构的多方案比较与

分析[J].深空探测研究,2013,11(1):1-7.
GAO Xingwen, YIN Can, LAI Xiaoming, et al. Multi-scheme comparison and analysis of the drilling and coring mechanism for lunar regolith[J]. Deep Space Exploration, 2013,11(1):1-7.

[5] 陈浩文.月球取样钻探平台的研制及模拟试验研究[D].北京:中国地质大学(北京),2015.
CHEN Haowen. Development and simulation of the moon sample drilling platform[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.

[6] 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.

[7] CHEN Congjia, JIA Xiaoyu, ZHANG Gao, et al. Vision-based sampling implementation in the Chang'e-6 lunar farside sample return mission[J]. Light: Advanced Manufacturing, 2025, 6(1):79-91.

[8] 胡浩,王琼,黄昊,等.嫦娥六号任务总体设计与实现[J].中国科学(技术科学),2025,55(7):1194-1206.
HU Hao, WANG Qiong, HUANG Hao, et al. Overall design and implementation of Chang'e-6 mission[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2025,55(7):1194-1206.

[9] LI Chunlai, HU Hao, YANG Mengfei, et al. Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'E-5 mission[J]. National Science Review, 2021,9(2):nwab188.

[10] 高艳忠.基于松软煤层不提钻筛管下入技术的瓦斯抽采[J].煤炭科学技术,2014(9):115-118.
GAO Yanzhong. Gas drainage based on screen pipe placing in borehole technology without drilling rod lifting in soft seam[J]. Coal Science and Technology, 2014(9):115-118.

[11] 高科,刘正豪,秦小琳,等.自行走钻具给进系统中支撑机构的仿生增效研究[J].钻探工程,2024,51(5):24-35.
GAO Ke, LIU Zhenghao, QIN Xiaolin, et al. Study of bionic augmentation based on support mechanism in self-propelled feeding system[J]. Drilling Engineering, 2024,51(5):24-35.

[12] 宋江文.基于PFC3D月球钻探功率消耗仿真分析[D].北京:中国地质大学(北京),2017.
SONG Jiangwen. Simulation analysis on lunar drilling power dissipation based on PFC3D[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.

[13] 闻治瑄,辛伟闻,徐倩,等.蛇皮非对称结构启发增阻/减阻表面的设计与构筑[J].高等学校化学学报,2023,44(10):20230116.
WEN Zhixuan, XIN Weiwen, XU Qian, et al. Design and construction of increasing-and reducing-drag surfaces inspired by asymmetrical structure of snakeskin[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2023,44(10):20230116.

[14] 方星,陈梅,倪鹏平,等.江苏苏北地区汉族群体指纹特征分析[J].解剖学杂志,2014,37(2):248-251.
FANG Xing, CHEN Mei, NI Pengping, et al. Analysis of fingerprint patterns of Han adults in northern Jiangsu area population[J]. Chinese Journal of Anatomy, 2014,37(2):248-251.

[15] Gutiérrez-Redomero E, Alonso C, Romero E, et al. Variability of fingerprint ridge density in a sample of Spanish caucasians and its application to sex determination[J]. Forensic Science International, 2008,180(1):17-22.

[16] Zacharias G C, Nair M S, Lal P S, et al. Fingerprint reference point identification based on chain encoded discrete curvature and bending energy[J]. Pattern Analysis and Applications, 2017,20(1):253-267.

[17] 郑永春,欧阳自远,王世杰,等.月壤的物理和机械性质[J].矿物岩石,2004,24(4):14-19.
ZHENG Yongchun, OUYANG Ziyuan, WANG Shijie, et al. Physical and mechanical properties of lunar regolith[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2004,24(4):14-19.

[18] 徐钊,肖立平,王守一,等.月壤填充式折展舱壁仿生结构拓扑优化研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2024,52(8):41-47.
XU Zhao, XIAO Liping, WANG Shouyi, et al. Bio-inspired topological optimization of lunar regolith stiffened deployable capsule based on in-situ resource utilization[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024,52(8):41-47.

[19] 尹忠旺,丁希仑,郑岳山.基于ABAQUS的月壤有限元建模及仿真分析[J].军民两用技术与产品,2008(11):46-48.
YIN Zhongwang, DING Xilun, ZHENG Yueshan. Finite element modeling and simulative analysis for lunar regolith based on ABAQUS[J]. Dual Use Technologies & Products, 2008(11):46-48.

[20] 康剑莉,陈罡,罗福麟,等.指纹摩擦力的测试与研究[J].润滑与密封,2004(5):44-45,48.
KANG Jianli, CHEN Gang, LUO Fulin, et al. Test and analysis of fingerprint friction force[J]. Lubrication Engineering, 2004(5):44-45,48.

(编辑　王跃伟)