

地外天体取心钻头技术研究进展及关键突破

李振祥^{1,2}, 蔡家品^{2*}, 沈立娜², 吴海霞², 李 春², 孟 凡²

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要: 地外天体钻探是获取地外科学数据的核心手段, 取心钻头作为关键部件, 受地外极端环境与复杂地层制约, 面临诸多技术挑战。本文基于地外天体取心钻头的相关文献调研, 以月球、火星、小行星与彗星等典型天体钻探中应用的取心钻头为研究对象, 通过分析重力、温度等极端环境特征及地层地质条件对取心钻头可靠性及钻进效率的影响, 系统梳理了各类地外天体取心钻头的技术研究进展与工程应用现状。研究表明: 现有硬质合金钻头在月球浅层取样中应用效果良好, 但难以应对含碎石月壤层及深部月岩; 超硬材料钻头地面模拟试验性能优异, 但尚未在月球探测任务中实际应用; 火星钻探虽已实现硬岩取心, 但取心深度有限; 小行星与彗星钻探实际应用效果尚未获得充分数据支撑。未来研究重点应围绕超硬耐磨梯度复合材料、复杂地层适应性高效钻进结构等关键方向开展技术攻关。研究成果可为地外天体取心钻头的研发与应用提供理论参考与工程借鉴, 支撑深空资源开发利用与地外生命痕迹探测任务的实施。

关键词: 地外天体; 取心钻头; 钻探技术; 深空探测; 硬质合金; 超硬材料; 结构优化; 月球钻探; 火星钻探

中图分类号: P634.4⁺1; P184; P185 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)03-0010-14

Research progress and key breakthroughs of coring drill bits for extraterrestrial bodies

LI Zhenxiang^{1,2}, CAI Jiapin^{2*}, SHEN Lina², WU Haixia², LI Chun², MENG Fan²

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: Drilling on extraterrestrial bodies is a core means to obtain extraterrestrial scientific data. As a key component, the coring drill bit faces numerous technical challenges constrained by extreme extraterrestrial environments and complex stratigraphic conditions. Based on a literature review of extraterrestrial coring drill bits, this paper investigates the coring bits applied in drilling missions for typical celestial bodies, including the Moon, Mars, asteroids, and comets. By analyzing the impacts of extreme environmental characteristics such as gravity and temperature, as well as stratigraphic and geological conditions, on the reliability and drilling efficiency of coring bits, the study systematically reviews the technical research progress and engineering application issues of various extraterrestrial coring bits. The results indicate that existing cemented carbide drill bits perform effectively in shallow lunar sampling but struggle to cope with lunar soil and granule layers and deep lunar rocks. Superhard material drill bits exhibit excellent performance in ground-based simulation experiments but have not yet been practically applied in lunar exploration missions. While hard rock coring has been realized in Mars drilling, the coring depth remains limited; furthermore, the practical application effects of coring drill bits in drilling on asteroids and comets lack sufficient data support. Future research should focus on technological breakthroughs in key areas such as superhard and wear-resistant gradient composite materials and efficient drilling structures adaptable to complex formations. The research results

收稿日期: 2025-11-11; 修回日期: 2026-01-13 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.03.002

第一作者: 李振祥, 男, 汉族, 2000年生, 硕士研究生, 地质工程专业, 研究方向为干钻硬岩取心钻头技术, 北京市房山区良乡工业开发区二期创新路1号(102400), 1670133721@qq.com。

通信作者: 蔡家品, 男, 汉族, 1967年生, 教授级高级工程师, 探矿工程专业, 从事金刚石钻头和取心技术等研究工作, 北京市海淀区学院路29号探工楼201室, caijp@bjiee.com.cn。

引用格式: 李振祥, 蔡家品, 沈立娜, 等. 地外天体取心钻头技术研究进展及关键突破[J]. 钻探工程, 2026, 53(3): 10-23.

LI Zhenxiang, CAI Jiapin, SHEN Lina, et al. Research progress and key breakthroughs of coring drill bits for extraterrestrial bodies [J]. Drilling Engineering, 2026, 53(3): 10-23.

provide theoretical references and engineering guidance for the development and application of extraterrestrial coring drill bits, supporting the implementation of deep space resource exploitation and utilization and extraterrestrial life trace detection missions.

Key words: extraterrestrial bodies; coring drill bit; drilling technology; deep space exploration; cemented carbide; superhard material; structural optimization; lunar drilling; Mars drilling

0 引言

对地外生命的探寻与地外资源的利用,是人类开展深空探索的两大核心目标。地外天体钻探技术是人类直接获取此类关键科学数据的核心手段^[1-2]。取心钻头作为钻探技术的核心,已成为地外天体取样的关键工具,并在实际应用中取得一定成果^[3-6]。例如,在月球钻探领域,美国 Apollo 计划实现了最大 3.05 m 的钻探深度^[7]。地外天体的极端环境(如月球真空、火星沙尘等)对地外取心钻头的可靠性提出了严峻挑战^[8-12],且在多个任务中出现了多种问题,如嫦娥五号在钻探过程中遇到碎石层,未实现 2 m 钻探计划^[13-14]。本文以取心钻头应用的天体环境为分类依据,分析其重力、温度、表层环境等特征对钻头设计的差异化需求,系统梳理硬质合金钻头、超硬材料钻头等地外天体取心钻头关键技术,以期为地外天体取心钻头研究与应用提供一定参考。

1 地外天体环境特征与取心钻头设计挑战

在深空探测任务中,受限于当前科学技术水平,人类难以对数量庞大的地外天体开展系统性研究^[1,15]。因此,基于科学价值与工程可行性的综合评估及行星科学界的共识^[2,16],在地外天体钻探领域主要聚焦以下具有代表性的天体目标:(1)月球:作为地球的唯一天然卫星,其特殊的地月系统演化历史为研究行星-卫星相互作用提供了独特窗口^[17-18];(2)火星:这颗类地行星因其保存完好的地质记录和潜在的古宜居环境特征及距离地球很近,成为天体生物学研究的首要目标^[19-22];(3)小行星和彗星:这些太阳系原始物质的残留体为研究行星形成早期的物理化学过程提供了关键样本^[22-26]。

在地外取心钻头的设计过程中,首先要考虑月球、火星、小行星(或彗星)等典型地外天体相较于地球表面更为极端的环境影响,如真空或稀薄大气环境、低或微重力环境、极端温度等,具体见表 1^[27-28]。

表 1 地球与典型地外天体环境钻探采样影响因素对比

Table 1 Comparison of environmental parameters relevant to drilling and sampling between Earth and representative extraterrestrial bodies

影响因素	地球表面环境	月球表面环境	火星表面环境	小行星和彗星表面环境
大气	有大气	真空	稀薄大气	真空
水	含水	目前无液态水	存在含水痕迹	部分可能含水
重力加速度/(m·s ⁻²)	9.81	1.62	3.71	≈0
极端温度/℃	−89~58	−173~127	−125~20	−50~100
辐射	低辐射	高辐射	高辐射	高辐射
采样对象	不确定性小	不确定性大	不确定性大	不确定性大
时间窗口	一般不受限	严格要求	严格要求	严格要求
功率限制	一般无限制	严格受限	严格受限	严格受限
轻量化要求	一般无要求	严格要求	严格要求	严格要求
体积要求	一般无要求	严格要求	严格要求	严格要求
作业方式	一般有循环介质	干式钻探	干式钻探	干式钻探
控制	一般近程无延迟	远程高延迟	远程高延迟	远程高延迟

由表 1 可知,上述典型地外天体环境要比地球环境更加恶劣,且不同天体间环境特征具有显著区

别。这些极端环境对地外取心钻头的设计主要有以下 4 点影响。

(1)设备质量和功耗限制^[29]。目前深空探测经济成本高昂,要求深空探测设备质量轻且强度高,导致设备为钻头提供的钻压很小,这就要求钻头通过优化切削齿形状和钻头壁厚设计,提高钻头在低钻压下切入地层的能力。深空探测一般采用太阳能供能,钻进时功耗受限,从系统层面约束了取心钻头的设计:机械钻速需与设备排屑能力协同,同时结构设计需以降低全程摩擦功耗为导向,将有限功率最大限度用于实现高效、完整的岩心采取。

(2)极端环境条件。上述典型地外天体基本处于真空或稀薄大气及无液态水的环境中,导致钻头在钻进过程中产生的钻屑和摩擦热无法通过循环介质排出。热传导理论分析表明,干钻温升主要源于剪切热与摩擦热,可通过建立钻头-岩石-岩屑三维导热微分模型对其进行预测与调控^[30]。地面试验进一步量化了这一热管理挑战:一方面,干钻试验中转速对钻头升温速率影响极大,且呈非线性增长^[31];另一方面,孕镶金刚石钻头在钻进时,孔底岩粉烧结表明其局部瞬时温度可达1000℃甚至更高^[32]。这要求钻头具有稳定且高效的排屑结构设计和合理控制钻头温升的散热结构设计^[33]。在地外天体低重力和微重力环境下,相同质量的设备所能提供的钻压远小于地表,因此需优化钻头结构设计,以提高其切入地层的能力及在失重环境下的钻进稳定性。地外天体表面极端的温度变化更是要求钻头材料具有极好的热稳定性。高辐射环境会降低材料的强度,要求钻头设计时需结合室内模拟试验适当提高设计强度,或者使用防辐射材料。

(3)地层地质条件复杂,不确定性大^[34]。地外天体取样钻探时,对地层地质情况了解主要依靠遥感测绘的手段,由于距离非常远,精度不如地表,无法获得准确的地质条件,要求钻头设计时需要具备广谱性,更好地适应复杂地层和未知地层的地质条件,钻头的钻进能力或破岩能力应覆盖并超越目标地层的预估可钻性等级。

(4)模块化系统空间兼容性设计。为提高地外天体钻探成功率,取心钻头需要配备温控系统、智能钻进系统和监测系统等,在设计时需要为这些系统预留一定的空间。这与低钻压、低功耗要求的小壁厚设计需求相矛盾,在取心钻头设计时需在钻头壁厚上寻求兼容方案。

2 地外天体取心钻头技术研究进展

在深空探测领域,地外天体钻探技术是目前直接获取地外天体样本的唯一技术手段。取心钻头作为地外天体钻探装备的重要组成部分,主要作用是高效破碎地层并获取目标样本,同时要最大限度保持样本的原始物理结构、化学成分及层序信息^[2,34-35],为科学研究与工程应用提供关键数据支撑。地外天体极端环境和天体间地质特征的差异性决定了取心钻头的两大设计原则:(1)取心钻头设计始终围绕“如何在地外天体极端环境中高效钻进和高质量取心”这一科学命题进行技术攻关;(2)不同地外天体的环境差异和地层地质条件要求地外天体取心钻头采用“一星一策”的设计思路。现从地外取心钻探应用的典型天体出发,系统论述地外天体取心钻头技术的发展变化。

2.1 月球取心钻头技术研究进展及应用

月球作为地球的天然卫星,一直以来是深空探测的重要研究对象。在探月工程中,月球取心钻头根据切削齿材质不同可以分为硬质合金钻头和超硬材料钻头两种。从取心钻头技术演进的角度出发,系统梳理月球取心钻头的技术研究进展及其科学价值。

2.1.1 硬质合金取心钻头

硬质合金钻头具有较高的硬度(HRA 89~93)和耐磨性,可有效应对月壤中少量碎石对钻头的磨损,适用于以月壤为主的月球表层及浅层钻探^[36-37]。硬质合金具有良好的抗冲击韧性($\geq 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)^[38],可以承受钻进过程中由月壤到月岩突变引起的冲击载荷,避免崩齿。硬质合金具有优异的热稳定性^[39],线膨胀系数仅为 $5.2 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$,高温硬度保持能力强,热疲劳抗性优异。硬质合金凭借上述优势成为月球浅层钻探任务中的主要材料。目前应用在月球浅层钻探的硬质合金钻头主要有3类^[2,4,40]:苏联Luna系列取心钻头、美国Apollo系列取心钻头、中国嫦娥系列取心钻头,如图1所示。

(1)苏联Luna系列探测任务取心钻头采用了阶梯基体、线性排列柱状切削齿,针对月球真空环境开创性地采用了外螺旋排屑,在钻进过程中遭遇月岩并数次出现过热现象。在苏联的Luna系列任务中,Luna 16、20探测器采用摆杆式回转采样机构,采样目标是月面浅层月壤,其中Luna 16钻进深度350 mm,但未完全实现预定深度目标,因负载过大,

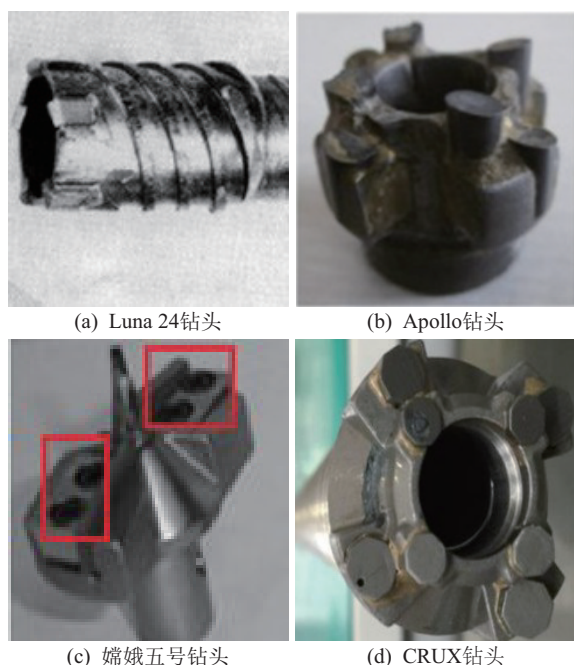


图1 月球钻探硬质合金取心钻头

Fig.1 Lunar cemented carbide core bits

钻进被迫中断,取样量为101 g。Luna 20钻进深度250 mm,也未完全实现预定深度目标,钻机在钻进过程中遭遇月岩并数次出现过热现象,最终取样量为55 g。Luna 24任务是苏联Luna系列探测工程中最成功的一次钻探取样任务。该探测器采用滑轨式回转冲击采样装置,取样装置为无滑差柔性取样袋结构,设计采取月表下2.5 m深度的连续月壤样品。Luna 24任务最终取样深度为2.25 m,采样质量为170 g。钻进过程中,钻机多次因负载过大触发报警^[4,40-43]。Luna系列任务出现负载过大报警的可能原因有:①月球浅、表层可能存在设计时未预料到的硬质岩石层或高密度碎石层,导致钻头切入阻力剧增,扭矩需求超过系统上限;②月壤颗粒具有极高的棱角性和黏附性,在干钻条件下通过螺旋排屑时,可能因摩擦热量积累进一步增大机械阻力;若钻头排屑不畅或钻头和螺旋杆的排屑能力不匹配,引发钻屑堆积,会显著增加阻力;③早期钻机可能缺乏动态调节能力,无法根据地层硬度自动调整扭矩或冲击频率,当突遇硬岩时,固定功率输出导致系统过载。Luna 20出现过热现象的主要原因可能是在钻探过程中遇到了月岩,切削阻力陡增,增加了重复性研磨破碎,从而产生了大量的摩擦热,导致钻头温度迅速升高;次要原因在于真空环境无

对流散热,以及材料热导率不足,无法及时排出大量摩擦热。

(2)美国Apollo钻头(图1b)采用了平面基体直切削齿设计。该钻头除了钻头基体形状与苏联Luna系列不同,其他主要特点均类似。在Apollo 11、12、14任务中,宇航员采用冲击贯入式取心实现月面多点采样,平均贯入深度约350 mm。在Apollo 15、16、17任务中,宇航员携带了手持式回转冲击钻机ALSD,回转速率为280 r/min,冲击频率为37.8 Hz。ALSD钻机的采样钻具由外螺旋钻杆、岩心管、硬质合金钻头和取心装置组成。Apollo计划实现了最大3.05 m的月球钻进取样深度,通过各种取样方法累计获取381.7 kg月壤样品,为研究月球地质历史提供了宝贵资料^[44-48]。

(3)中国嫦娥系列取心钻头(以嫦娥五号为例,图1c),采用双排阶梯结构,以实现分层切削,阶梯落差形成天然排屑通道,避免岩屑堆积。切削齿形状为八棱柱状,有利于排屑,提高了抗偏载能力。嫦娥五号探测器首次成功完成月壤采集工作,采用钻机钻取和机械臂表取两种采集方式,共取得1731 g月壤样本。其中钻取式采集机构采用了带冲击功能的外螺旋、内中空软袋取心技术,整体钻探设备功率超过1000 W。但在钻取过程中遇到了碎石层,只钻进了1 m左右。嫦娥六号首次实现月球背面采样,同样是在钻进约1.1 m时遭遇碎石层而停止钻进,携带1935.3 g样品准确着陆于内蒙古四子王旗预定区域^[49-51]。

此外,美国蜜蜂机器人公司为应对未来月球南极可能存在水的探测需求,设计并制造了CRUX钻头^[52]。其中一种为具有 $+5^\circ$ 前角的硬质合金钻头(图1d)。 $+5^\circ$ 尖状前角主切削齿有利于切入月壤,基体中的4个孔洞构成非对称桁架结构(图中标红区域),在减少质量的同时降低了应力集中系数,有利于在全面钻进时排出钻屑。在模拟冰封月球表土(冰质量分数10%、密度 2 g/cm^3 、温度 -85°C)的测试中,该钻头仅需120 N的钻压即可完成钻进。

2.1.2 超硬材料取心钻头

虽然硬质合金钻头在月球浅层钻探中优势明显,但在更深或复杂月壤地层钻进中仍存在诸多问题。如苏联Luna 16和Luna 24因负载过大被迫中止,Luna 20在钻进中遭遇月岩并出现数次过热现象;嫦娥五号在钻进过程中遇到了比较密实的月球

碎石层,钻进了约1 m。这说明硬质合金钻头在钻进月岩时适应性较差。针对这种情况,金刚石、立方氮化硼等超硬材料钻头凭借其卓越的性能成为钻探月壤地层和月球深部地层的另一种选择,其性能优势有:(1)硬度($HV \geq 40$ GPa)和耐磨性高^[53-54],如金刚石是地球已知最硬的天然材料;(2)热导率好^[55-57],如金刚石的热导率为 $2000 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,远超硬质合金的 $80 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,能快速将摩擦热传递至钻杆,避免局部过热导致材料失效。在地面试验中,PDC钻头的切削温度明显低于硬质合金钻头,显著降低热应力裂纹产生的风险;(3)抗腐蚀性好^[58],超硬材料对月壤中的带电颗粒(如太阳风注入的氢、氦离子)具有更强的抗腐蚀性。目前研制的月球钻探超硬材料取心钻头如图2所示。

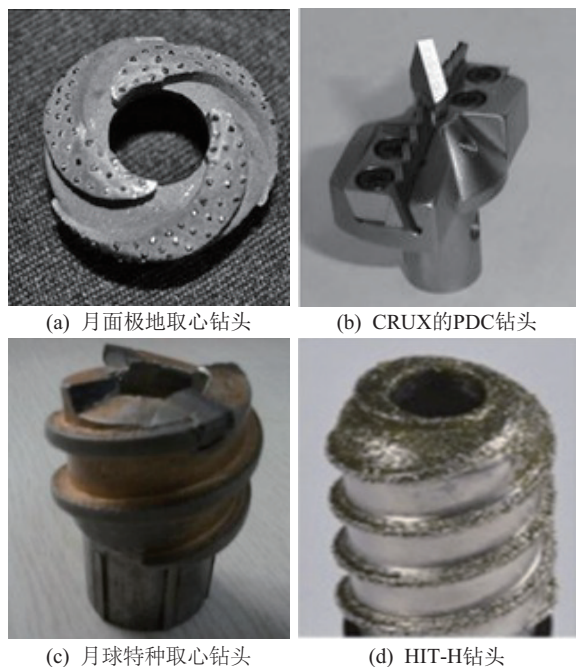


图2 月球钻探超硬材料取心钻头

Fig.2 Lunar superhard material core bits

(1)美国北方先进技术中心为美国宇航局的月球极地探测计划研发的月面极地取心钻头(图2a)。钻头均匀分布三个螺旋状切削齿,可以提高钻头的排屑能力和钻进时的稳定性,防止钻头在切削过程中过度研磨钻屑使钻头温升过快和钻进效率降低。同时,针对含碎石月壤层在钻头切削齿表面镶嵌金刚石颗粒,提高钻头的耐磨性和强度。在地面测试中该钻头能够在80 K的温度环境下钻进,并穿透松

散的月球模拟物及更硬的岩石,例如玄武岩和斜长岩^[59]。

(2)美国蜜蜂机器人公司为探测月球南极是否有水存在,设计制造的具有一 15° 前角的复合片钻头(图2b)^[52]。负前角可以产生楔形切入效应,在冰岩混合地层中产生局部压强。该钻头可以用于回转、冲击回转和冲击等钻进方式,最大回转扭矩 $45 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、转速 $200 \text{ r}/\text{min}$ 、钻压 1000 N 、冲击频率 25 Hz 。

(3)中国地质大学(武汉)李大佛等^[60]为中国月面采样返回工程研制的月球钻探特种取心钻头(图2c)。该钻头采用金刚石复合片为切削齿,其排布借鉴地表PDC钻头, -15° 前角保证钻头切削速率和寿命, 5° 旁通角有利于钻头排屑。在室内试验中,钻头可以钻进岩石可钻性 ≤ 6 级的泥灰岩等岩石,但是在8级玄武岩中钻进时进尺只有1 mm,温度为 86°C 。2016年,赵德明^[40]针对月壤排屑与取心特性,提出了HIT-H型球面螺旋钻头,并在表面镶嵌CBN颗粒(图2d)。由于HIT-H型钻头基体采用球面螺旋和阻隔环结构,在月壤排屑效率和取心率方面具有突出优势。相同钻进规程条件下,曲面螺旋型钻头负载明显低于平面基体、锥形基体、阶梯基体等结构钻头,其中曲面螺旋型钻头回转扭矩约为平面和锥形基体钻头的30%,约为阶梯基体钻头的50%。但受颗粒磨削破碎岩石方式的限制,HIT-H型取心钻头对岩石类样本的钻进效率较低,钻进温升较高^[61-62]。

多国探月工程实践证明,硬质合金取心钻头适用于浅层月壤采样,但是在钻进时遇到月表碎石层或月岩容易出现过载、过热导致停钻。超硬材料取心钻头虽在地表模拟试验中有一定优势,但由于目前月球钻探任务的主要对象为月球浅层(月壤为主)及本身研究尚不成熟,还没有应用到月球钻探任务中。

2.2 火星取心钻头的技术进展及应用

火星是太阳系中最接近地球环境的行星,其地质演化历史、潜在生命痕迹及宜居性研究对人类理解行星演化具有重大意义。取心钻头的设计同样与地层紧密相关,针对硬质地层采用金刚石、立方氮化硼等超硬材料,对于松软地层则是采用硬质合金钻头。下面介绍目前开展的典型火星探测任务及应用的取心钻头。

2013年2月,美国宇航局的好奇号火星车在火

星表面开展了首次钻探取样任务。好奇号的取样目标为火星表面浅层岩石,其钻头(图3)由商业钻头改造而成,切削齿为高硬度、高耐磨性的硬质合金(钨钴类合金)齿,钎焊在钢质基体上,在地面试验中可以钻透硬度 230 MPa 的致密玄武岩^[63]。好奇号使用旋转冲击方式在火星表面钻探岩石,累计钻探超过 42 次,采取样品的深度为 20~60 mm,钻孔直径为 16 mm,采集的样本主要为粉末状^[64-65]。通过样本分析,首次发现火星岩石中存在灰色粉末样本,意味着火星古代可能存在水环境^[66]。

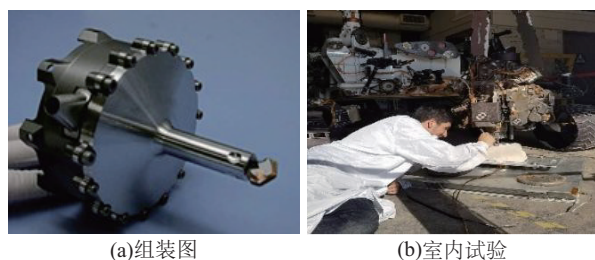


图3 好奇号钻头

Fig.3 Curiosity's drill bit

2021年2月,美国毅力号火星车着陆火星,同年9月进行岩心采样,其目标取样位置主要在火星杰泽洛陨石坑^[67-68]。由于火星岩石蕴含着丰富的地质信息,毅力号主要钻取对象为特定地层的岩石,如古河流三角洲沉积岩石、火山熔岩和古老高地岩石等。毅力号取心钻头(图4a)基体为表面涂有氮化钛的圆柱钢体,4个切削齿为硬质合金齿,具有硬度高、耐磨性好、热稳定性好及抗冲击性优异等特性,钻头外径为 27 mm(图4b),内径通常为 13 mm,取心长度 61~81 mm^[69]。该钻头成功在火成岩(玄武质、橄榄石富集堆晶岩)和沉积岩(粉砂岩、砂岩)等多种类型岩石中钻进^[69]。通过对获取样本进行分析,发现了火星存在水和有机物的证据^[70-71]。

欧空局(ESA)的火星探测计划 ExoMars 采用

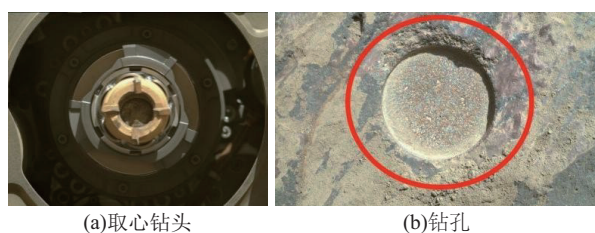


图4 毅力号取心钻头及钻孔

Fig.4 Perseverance's coring drill bit and hole

多杆组接的方式,旨在实现目标深度的火星土壤样品钻取采集。该钻头尖端可回缩至钻杆内,能实现定点取心,基体为锥形,钻头尖端设计有4个均布在锥形基体上的导向破碎切削齿,如图5所示。锥形基体设计可以减少钻头与孔底的接触面积,降低摩擦阻力,同时具有导向作用,尤其适应火星松软浮土与硬质岩石交替的地层环境。ExoMars 钻具的设计钻探深度为 2 m,取样直径为 10 mm,单次取心长度 20~30 mm^[72-73]。

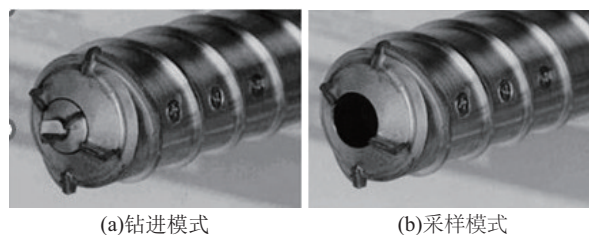


图5 欧空局 ExoMars 任务的取心钻头

Fig.5 ExoMars's coring drill bit

2008年,伽利略航空电子实验室联合赫尔辛基理工大学为 ExoMars 火星探测计划研制了冲击钻进试验台(DHM),针对不同结构形式的商业钻头开展了岩石钻进试验研究,并研制了一款新型薄壁取心钻头,如图6所示。该钻头在回转转速 0.26 r/min、进尺速率 0.022 mm/min、冲击频率 1~2 Hz 的钻进条件下,所需钻压为 100 N 左右^[59]。

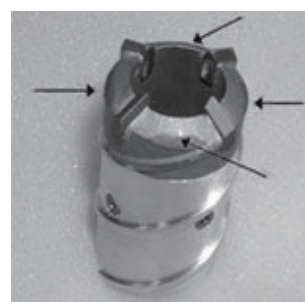


图6 为 ExoMars 研制的取心钻头

Fig.6 The coring drill bit for the ExoMars

美国喷气推进实验室在 2012 年前后为火星探测返回任务(MSR)研制了一款取心钻头,钻头为平面型基体,简化了结构,增加了刚性,端面镶嵌硬质合金切削齿,沿着切削齿前端刀面放射状排列的排屑沟槽与钻杆螺旋槽相接,形成双级排屑通道,有利于高效排屑(图7)^[74-75],钻进过程中因排屑堆积产

生的负载变化较小。采样对象为火星岩石,设计钻进深度 100 mm。该钻头在冲击作用的协助下可获取石灰石、高岭石、泥砂岩、玄武岩、火山角砾岩等五种不同岩石样本^[76-77]。

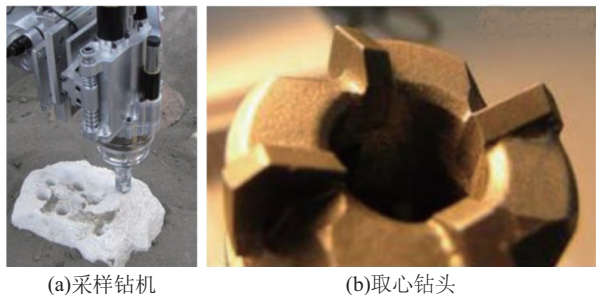


图7 JPL研制的火星岩石采样钻机及其取心钻头
Fig.7 The Mars rock sampling drill and its coring bit developed by the Jet Propulsion Laboratory (JPL)

美国蜜蜂机器人公司 Zacny 等^[78]针对火星表面坚硬物质的钻探采样,研制了PDC取心钻头(图8)。钻头采用 -10° 前角,减小切削硬岩(玄武岩)时的刃口受力,降低金刚石层崩裂风险,同时满足对软岩、冰的切削需求,具有较强的通用性。钻头内外径材料为孕镶金刚石,保证了取心质量。离散式的PDC切削齿布齿减少了岩屑或冰屑的堆积与堵塞,解决了传统孕镶钻头在冰、岩混合物钻进中冰屑重结晶黏附钻头的问题。在模拟火星环境的地面试验中,该钻头在钻进玄武岩时比能为 40 J/cm^3 ,转速为 70 r/min ,充分验证了其硬岩切削能力。试验后,PDC切削齿出现 0.2 mm 宽的磨损平面(金刚石层磨损),但通过对钻压(WOB)合理调整,仍可维持有效钻进至数米深度。同时,该钻头在模拟火星低压、低温环境下,未出现冰屑堵塞、刃口崩裂等问题,成功实现了单一钻头适应多种地层的目标,展现出良好的环境适应性与多场景应用潜力。Manthri 等^[79]也设计了类似结构的紧凑型PDC钻头(图8b),进行了模拟火星干钻玄武岩试验。该研究表明,PDC钻头在模拟火星环境的干钻条件下,能够有效钻进高强度玄武岩(抗压强度 $448\sim 667 \text{ MPa}$)。试验发现主要磨损形式为切削齿后刀面磨损,该钻头在推力、功率等严格条件下(功率 $\leq 150 \text{ W}$,推力 $200\sim 900 \text{ N}$),通过优化参数可实现最大 350 mm 的钻孔深度,最优钻进参数组合为:转速 180 r/min 、给进速度 18 mm/min 、进给量 0.021 mm/

r 、 -25° 前角。

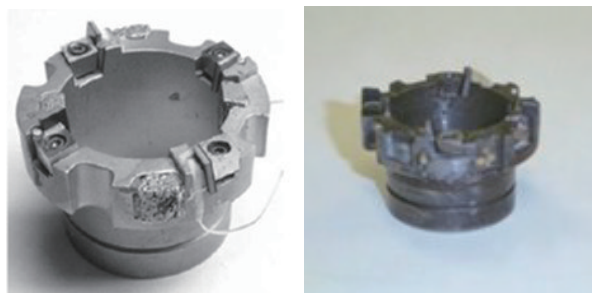


图8 美国蜜蜂机器人公司设计的两款PDC取心钻头
Fig.8 Two coring bits designed by Honeybee Robotics

芬兰赫尔辛基大学 Ylikorpi 博士为 MicroRoSA2 钻具设计的钻头(图9)采用硬质合金(DZ05)切削齿,外径 17 mm ,可采集直径 9 mm 、长度 20 mm 的岩心,并通过内置次级刀片将岩心上端研磨排出,且切削齿与地层的接触面积逐渐增大,有利于提高初始机械钻速,实现持续钻进。钻头采用双螺旋排屑结构,在无冲击的工况下,能以转速 30 r/min 、钻压 30 N 钻进较软的岩石(如大理石和石灰石),钻进深度 15 mm ^[80]。

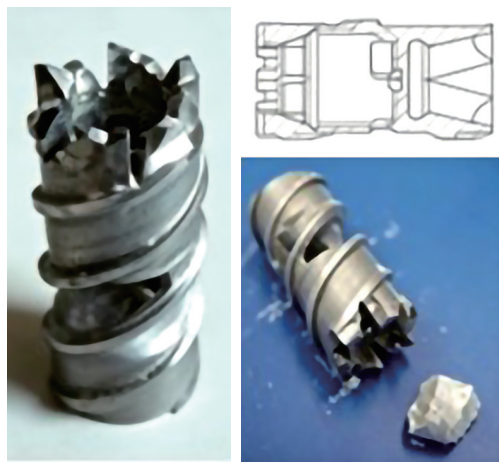


图9 MicroRoSA 钻具及钻头
Fig.9 MicroRoSA drilling tool and bit

当前火星钻探技术已形成适应不同地层的技术体系,表面硬质地层以碳化钨等硬质合金钻头为主,PDC等超硬材料钻头经地面试验验证具备较强的钻进能力;松软地层则采用锥形等特殊构型的硬质合金钻头,适应浮土与硬岩交替地层。其发展趋势是追求更长岩心、更大钻深、更低功耗及对冰、硬

岩、软岩等多种地层的通用性,以支撑火星生命探测、地质演化研究和未来样本返回等核心目标。

2.3 小行星和彗星取心钻头技术研究进展及应用

小行星和彗星的地外钻探任务旨在揭示太阳系的起源、生命的起源及行星演化过程。通过钻取彗星和小行星的风化层样本进行分析,科学家们能够获得关于这些天体内部结构、组成和历史等重要信息。目前针对小行星和彗星取心钻头的典型任务及研究进展如下。

2004年ESA发射的Rosetta彗星探测器于2014年抵达彗星,该探测任务被誉为21世纪最伟大的太空探索成就之一。Rosetta取心钻头为螺旋钻,主体结构采用奥氏体不锈钢材质,具有耐低温、高强度(适应彗星 -100°C 环境)和抗太空腐蚀的优势。该钻头采用金刚石强化钻头,在 $10\sim 15\text{ N}$ 钻压可钻探彗星坚硬土壤(2 MPa)^[81-82]。该探测器搭载SD2采样机(图10),设计钻探深度为 230 mm ,实际钻探深度只有不到 10 mm ,可能由于着陆位置不佳、能源不足导致^[83]。该探测任务发现了彗星表面存在有机分子(如甘氨酸)及磷元素,支持生命前体物质可能来自彗星的理论,探测结果显示彗核无磁场^[84-85]。

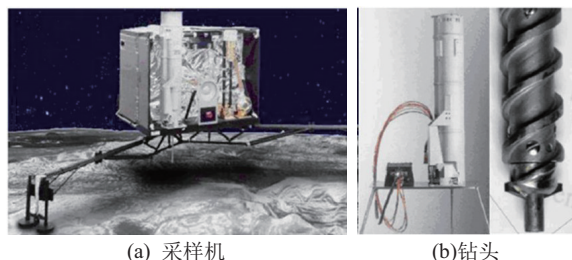


图10 SD2采样机及钻头
Fig.10 SD2 sampling mechanism and drill bit

美国蜜蜂机器人公司设计的SATM彗星钻探采样钻具直径为 12 mm ,总质量为 9 kg 。如图11所示,钻具采用钻头加双螺旋钻杆形式,钻杆的槽宽较大,钻头的两个切削齿对称布置,中心设计了切削刃尖用来定向。钻头一侧有采样孔,钻具到达表层以下 1 m 深度后采样孔打开,钻头在回转破碎时将彗星土壤样品收集到空心钻杆内部,可以避免钻进过程中的样本污染。当转速为 192 r/min 且钻压为 55.6 N 时,该钻具以 0.88 mm/min 的速度钻进石灰岩,消耗功率为 25 W ^[86]。

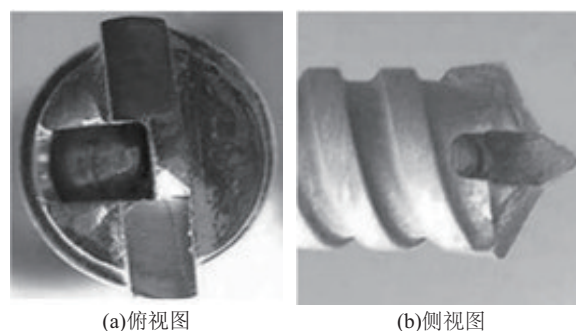


图11 SATM彗星钻探采样钻具
Fig.11 SATM comet drilling tool

SAS-1m是欧洲航天局彗星采样返回任务中的一个钻取计划,所用钻头如图12(a)所示。钻头基体为不锈钢材质,聚晶金刚石切削齿沿3个不同高度(即台阶)布置,实现渐进式切削,每个台阶设置2对切削齿,其切削包络面之间存在轻微重叠,每个切削齿为 -10° 前角、 15° 后角,切削齿长度为 3.5 mm 或 4.5 mm ,钻头外径 150 mm ,内径 100 mm ^[87]。核心设计是钻具前端的两个半球形叶片在钻进深度达到 1 m 时自动闭合,从根部将岩心切断,完成取样,且钻头切削齿的薄壁设计有利于稳定取样和叶片闭合。该钻头适合钻进松软地层。如图12(b)所示,在对浸入液氮中的固态雪进行的钻进试验中,钻压 $<100\text{ N}$ 、扭矩 $<50\text{ N}\cdot\text{m}$ 时,钻进功率 $<100\text{ W}$ ^[88]。

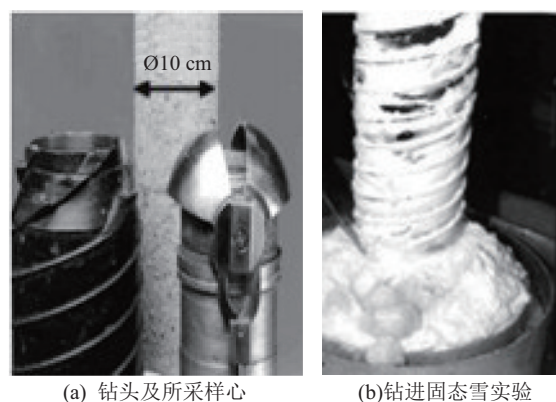
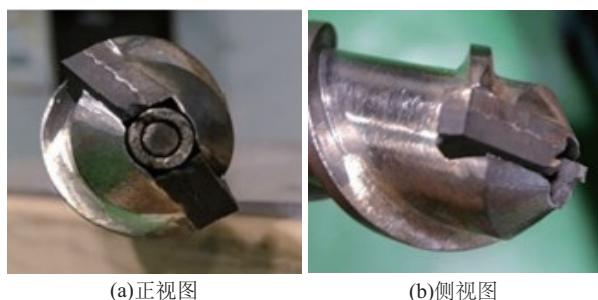


图12 SAS-1m钻头
Fig.12 SAS-1m spiral sampling drill bit

北京航空航天大学研究团队为未来中国探测彗星设计了DSSHS钻探、采样和样品处理的一体化系统,钻头设计针对6级硬岩,为右旋双螺旋钻(图13),总长度 600 mm 。考虑到复合片在软地层

钻探中效率很高,浸渍金刚石有助于在硬地层中破碎岩石,故钻头2个均布的切削齿由浸渍金刚石和金刚石复合片两部分组成。室内试验时,该钻头在最大钻压50 N的情况下,120 s内钻入硬度为6级的岩石5 mm^[89]。



(a)正视图

(b)侧视图

图13 DSSH螺旋钻

Fig.13 DSSH spiral drill bit

哈尔滨工业大学研究团队针对地外小行星微重力或低重力环境设计了一种适用于岩石取样的旋转冲击式超声波钻头(RPUD),如图14所示。超声波钻头通常由传感器、自由质量块和钻具组成,但该钻头只由传感器和钻具两部分组成,提高了能量传递效率,同时具有体积小、质量轻、功率低、扭矩小等特点。试验结果表明,RPUD在旋转冲击模式下的钻进速度高于冲击模式,且仅需5 N钻压即可钻进岩石并及时排出岩屑。随着钻压增大,冲击钻进的速度先快速上升,当钻压达到3 N后,上升趋势逐渐平缓;而旋转冲击钻进速度则随钻压增大持续快速上升,在钻压为5 N时达到12.4 mm/min。故与冲击钻进相比,旋转冲击模式可以显著提高钻进效率。这表明RPUD在某种程度上优于传统的冲击式超声波钻头^[90]。

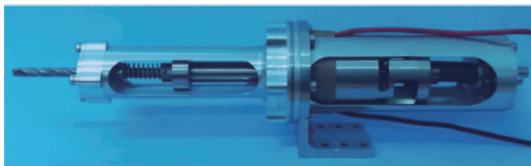
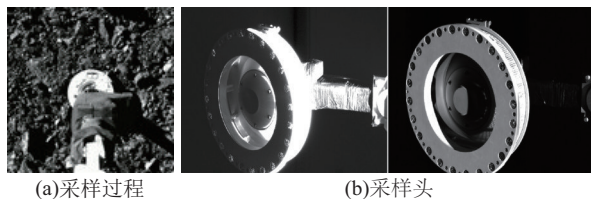


图14 旋转冲击式超声波钻头

Fig.14 Rotary-percussive ultrasonic drill

此外,日本的隼鸟2号和美国的OSIRIS-REx任务也开展了小行星取样,但是采样方式不同于常规取心钻探,设计的采样头无需破碎地层,只用于收集样本^[91-92],如图15所示。



(a)采样过程

(b)采样头

图15 OSIRIS-REx采样头和采样过程

Fig.15 OSIRIS-REx sampling head and sampling process

就现有探测实践和研究数据而言,取心钻头在小行星和彗星探测中的实际应用效果尚未形成充分的数据支撑,如Rosetta任务钻探深度远未达到预期,其他任务多处于设计或地面试验阶段,缺乏深空环境下的完整性能数据。但不同地面模拟试验已经验证了不同类型钻头在模拟地外天体地层中的钻进能力,表明取心钻头技术在理论和试验层面具备可行性。

3 地外天体取心钻头关键技术突破

前述研究表明,地外天体取心钻头在月球、火星、小行星及彗星的表层、浅层取样中已取得阶段性成果,但受极端环境与复杂地层的双重影响,仍面临技术瓶颈:月球钻探中,硬质合金钻头遇碎石层易过载停钻、超硬材料钻头因热稳定性不足尚未得到应用;火星钻探中,超硬材料钻头硬岩取心深度一般不超过81 mm,难以应对硬岩与松软地层交替的复杂地质条件;小行星与彗星钻探中,钻头则受微重力与真空环境限制,存在排屑效率低、冲击荷载耐受能力弱等问题。

上述问题的关键在于现有技术无法同时满足极端环境与复杂地层钻进需求。传统干式取心钻头的材料性能难以同时满足地外天体极端环境对钻头材料超硬耐磨、耐高温、高韧性和高热导率的要求;钻头结构设计存在低钻压下难以有效破碎地层与排屑能力不足等问题。因此,需从钻头切削齿材料、结构设计等方面突破,为地外天体微扰动取样提供支撑。

3.1 超硬耐磨梯度复合材料

目前在地外天体取心钻头切削齿主要采用硬质合金和超硬材料,其中应用的超硬材料有金刚石、立方氮化硼、金刚石复合片等,材料性能对比及主要适应地层见表2。

由表2可知,硬质合金的抗冲击性和热稳定性

表 2 钻头切削齿主要材料性能及适用地层
Table 2 Performance comparison of mainly applied cutting edge materials
for drill bits and analysis of applicable formations

材料类型	HV 硬度	耐磨性	抗冲击性	热稳定性/℃	热导率/[W·(m·K) ⁻¹]	主要适用地层	局 限 性
硬质合金	1500~2000	低	好	800~1000	80~100	Ⅱ~Ⅶ级松软地层	硬度、耐磨性不足,难以有效钻进月岩等坚硬地层
金刚石	8000~10000	极高	差	<800	2000	Ⅸ级~Ⅺ级坚硬地层	脆性大,抗冲击载荷差,高温易石墨化
立方氮化硼	3000~4500	高	中	<1400	1300	可以钻进 V~Ⅷ级地层	脆性较大,且低温脆性增加;聚晶立方氮化硼在干钻下易发生界面分层
PDC	7000~9000	高	较好	<750	500~1000	理论上适用 I~Ⅺ级地层	金刚石层与硬质合金基体之间,干钻热循环下易发生界面分层失效

好,但是硬度、耐磨性和热导率较差;金刚石具有极高的硬度和耐磨性,但是抗冲击性极差;立方氮化硼各项性能比较均衡,其硬度、耐磨性、热稳定性等均表现良好,但单项性能并不突出;PDC 总体性能较优,但在地外天体地层研磨性强、表面环境复杂的条件下,容易出现界面分层脱落。综合分析表明,现有单一或简单复合的钻头材料体系均无法同时满足地外极端环境对钻头切削齿超硬耐磨、高韧性、高热稳定性及高界面强度的要求。未来的取心钻头材料发展必须超越简单的材料复配,转向基于微结构设计及界面工程的新型梯度复合材料,其潜在发展趋势有以下两方面。

(1)从硬质合金基体表面涂层到精细化梯度功能材料的演进,核心思路是通过构建成分与结构连续渐变的中间过渡层,实现热应力场的平缓过渡与高效耗散。有研究显示,采用熔丝制造等工艺可精确构筑多层梯度结构,显著提升结合强度与抗热震性^[93]。

(2)从传统 WC-Co 到多主元合金或纳米复合黏结相。为提升基体韧性与高温性能,可采用 CoNiFeCr 等高熵合金或多主元合金作为黏结相^[94]。此类黏结相不仅能通过固溶强化和界面钉扎效应抑制裂纹扩展,其低堆垛层错能还有助于提升变形能力。同时,在硬质相中引入纳米晶 WC 或添加稀土氧化物(如 Y₂O₃、CeO₂)作为晶粒抑制剂,可进一步提升材料的强韧性。

3.2 取心钻头结构优化

地外天体的极端环境对取心钻头结构设计提出两大核心挑战:在低钻压条件下实现高效稳定的破岩与钻进,以及在无循环介质的真空环境中同步解决排屑与散热难题。围绕这些挑战,当前研究已形成一系列针对性方案,并为未来研究指明了方向。

在低钻压钻进结构优化方面,Liu 等^[95]的离散元模拟研究表明,将钻头切削齿由圆柱形改为棱柱形(八边形),并在切削齿焊接处增加向内延伸的补环,形成阶梯状内壁,可有效消除切削齿向内突出形成的空隙。这一改进能显著阻止已进入取心管的样品颗粒从切削齿后方的缝隙泄漏,从而在相同钻进规程条件下将取样量提升约 88%(从 9.03 g 增至 16.96 g),且未明显增加轴向力与扭矩。同时在采用棱柱形切削齿的基础上,将钻头体从整体锥形改为漏斗形,可使钻进过程中的最大法向应力降低约 78%,轴向力与扭矩也明显下降,有利于在低钻压下实现稳定钻进。Li 等^[96]针对月球取心钻头的切削齿开展了系统的参数优化研究,建立了小切深条件下钻头与岩石的相互作用模型。实验验证发现,增大切削齿的前角与侧角可显著降低钻压与扭矩,将前角从 -25°优化至 0°、侧角从 0°优化至 25°后,钻压降低了约 29%。该研究为通过精细化几何参数设计实现低钻压高效破岩提供了明确的理论依据与实验数据。

在排屑散热协同结构设计方面,针对真空环境下岩屑易堆积与摩擦散热困难的问题,重点开发了

曲面螺旋基体与阻隔环防反流结构。其中,基于空间螺旋曲线包络的曲面螺旋型钻头,经试验验证其钻进负载仅为典型平面或阶梯构型的30%~45%,显著提升了钻进能效。该构型与螺旋升角 12.07° 的双螺旋钻杆相结合,形成了连续的排屑-热量输出一体化通道,有效从源头降低摩擦热积累^[40]。双螺旋阻隔式构型通过阻隔环对岩屑进行预处理与导向,促使钻屑有序向外侧螺旋槽运移;配合参数优化的双螺旋钻杆实现岩屑顺畅输送,增强了系统的热输运连续性。在材料与表面处理方面,采用正斜镶切削齿布局,选用铝基碳化硅等高导热材料,并辅以表面辐射涂层,进一步提升钻头在真空环境下的综合散热性能^[97]。未来结构优化可进一步深化:(1)优化切削齿形状,通过仿真优化异形齿、仿生齿形的几何参数(如微齿尺寸、切削角度),实现低钻压下动态适配的载荷均衡,增强对复杂地层的适应性;(2)排屑散热系统耦合优化,应建立岩屑运移、热量传递耦合模型,优化设计螺旋槽的几何参数,研究复合散热结构,从系统层面实现排屑与散热性能的协同优化;(3)地层适应性设计,需面向月球极区冰岩混合层、火星玄武岩等典型环境与岩性,构建针对性的钻头结构体系,通过切削齿形态、螺旋槽参数与散热构型的针对性匹配,提升钻具对特定探测任务的场景适应能力。

4 结论

本文以月球、火星、小行星与彗星等典型天体钻探应用的取心钻头为研究对象,通过分析重力、温度、取样地层等环境特征,系统梳理地外天体取心钻头的技术研究进展,得到以下主要研究结论。

(1)地外天体取心钻头的设计应始终围绕地外天体环境特征、目标地层地质条件、取样深度和取样质量要求;浅层、表层取心钻头技术取得一定进展,但在实际执行任务时仍存在钻头过热、地层适应性差等问题,部分任务未能达到设计钻探深度目标。

(2)目前月球钻探应用的取心钻头均为硬质合金钻头,该类型钻头适用于月球浅层取样,但是无法有效应对含碎石月壤层和深部月岩;针对月岩钻探,金刚石和立方氮化硼等超硬材料钻头在地表室内模拟试验中性能较好,但尚无在月球应用的案例。

(3)以碳化钨硬质合金为切削齿的钻头在火星已实现硬岩钻进和取心,但是取心深度较浅,尚未

超过81 mm。

(4)取心钻头在小行星和彗星探测中的实际应用效果尚未形成充分的数据支撑。但不同地面模拟试验已经验证了不同类型钻头在模拟天体地层中的钻进能力,表明取心钻头技术在理论和试验层面具备可行性。

目前地外取心钻头技术已在表层、浅层地层取样中取得阶段性进展,但仍需攻克极端环境适应性与复杂多层智能钻进难题,以实现地外天体表层、浅层取样甚至深层取样。未来,地外天体取心钻头技术发展需重点围绕超硬耐磨梯度复合材料、复杂地层适应性高效钻进结构等关键方向,实现地外天体微扰动取样,为深空资源开发利用与地外生命痕迹探测提供支撑。

参考文献(References):

- [1] Zhang Y L, Zhang T, Wei H Y, et al. Advances in extraterrestrial drilling technology to discover the secrets hidden inside celestial bodies[J]. Space Science Reviews, 2022,218(6):47.
- [2] Wang Y H, Wang J P, Zhang G Q, et al. Advances in drill-based sampling technology for extraterrestrial bodies[J]. Space Science Reviews, 2024,220(6):66.
- [3] Moeller R C, Jandura L, Rosette K, et al. The sampling and caching subsystem (SCS) for the scientific exploration of jezero crater by the mars 2020 perseverance rover[J]. Space Science Reviews, 2021,217(1):5.
- [4] Gao M Z, Wang X, Zhang G Q, 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.
- [5] Zhang C L, Wang J C, Ke X H, et al. Rock-breaking performance analysis of worn polycrystalline diamond compact bit[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023,221:211352.
- [6] Song D D, Yang Y X, Ren H T. Study on composite design suitable for high hardness and strong abrasive formation[J]. Journal of Advanced Thermal Science Research, 2021,8:41-49.
- [7] Sawaryn S J, Bustin P, Cain M G, et al. Lunar drilling-challenges and opportunities[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas: Society of Petroleum Engineers, 2018:SPE-191624-MS.
- [8] Zhang T, Zhao Z, Liu S T, et al. Design and experimental performance verification of a thermal property test-bed for lunar drilling Exploration[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(5):1455-1468.
- [9] Knez D, Khalilidermani M. A review of different aspects of off-earth drilling[J]. Energies, 2021,14(21):7351.
- [10] Wang H, Richardson M, Toigo A. Trajectories of major martian dust storms: EGU2020-9223[R]. Vienna: EGU General Assembly, 2020.
- [11] Berger J A, Schmidt M E, Gellert R, et al. A global mars dust

- composition refined by the alpha-particle X-ray spectrometer in gale crater[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(1): 67-75.
- [12] Wang J L, Rosenbaum J J, Prasad A N, et al. Potential health impacts, treatments, and countermeasures of martian dust on future human space exploration[J]. *GeoHealth*, 2025, 9(2): e2024GH001213.
- [13] Zhang T, Pang Y, Zeng T, et al. Robotic drilling for the Chinese Chang'E 5 lunar sample-return mission[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2023, 42(8): 586-613.
- [14] Zhou C Y, Jia Y Z, Liu J Z, et al. Scientific objectives and payloads of the lunar sample return mission—Chang'E-5[J]. *Advances in Space Research*, 2022, 69(1): 823-836.
- [15] 党伟, 骆军委, 郑作环, 等. 深空探测自主运行的一种可信性技术体系[J]. *空间科学学报*, 2024, 44(2): 228-240.
- DANG Wei, LUO Junwei, ZHENG Zuohuan, et al. Dependability technology system for autonomous operation of deep space exploration[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2024, 44(2): 228-240.
- [16] Rummel J D, Betsy Pugel D E. Planetary protection technologies for planetary science instruments, spacecraft, and missions: report of the NASA planetary protection technology definition team (PPTDT)[J]. *Life Sciences in Space Research*, 2019, 23: 60-68.
- [17] Wang Y R, Wu B, Xue H O, et al. An improved global catalog of lunar impact craters (≥ 1 km) with 3D morphometric information and updates on global crater analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, 126(9): e2020JE006728.
- [18] Campana C T, Merisio G, Toppito F. Low-energy earth-moon transfers via theory of functional connections and homotopy[J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2024, 136(3): 21.
- [19] Westall F, Foucher F, Bost N, et al. Biosignatures on mars: what, where, and how? Implications for the search for martian life[J]. *Astrobiology*, 2015, 15(11): 998-1029.
- [20] Jaumann R, Tirsch D, Adeli S, et al. Geological record of water and wind processes on mars as observed by the mars express high resolution stereo camera[J]. *Space Science Reviews*, 2024, 220(4): 45.
- [21] Eigenbrode J L, Summons R E, Steele A, et al. Organic matter preserved in 3-billion-year-old mudstones at Gale crater, Mars[J]. *Science*, 2018, 360(6393): 1096-1101.
- [22] Mastropietro M, Pajola M, Cremonese G, et al. Boulder analysis on the oxia planum exomars 2022 rover landing site: scientific and engineering perspectives[J]. *Solar System Research*, 2020, 54(6): 504-519.
- [23] Winebrenner D P. On using solar Radio emission to probe interiors of asteroids and comets[EB/OL]. (2015-12-18) [2025-8-12]. <https://agu.confex.com/agu/fm15/webprogram/Paper81162.html>.
- [24] Jacquet E, Dullemond C, Drązkowska J, et al. The early solar system and its meteoritical witnesses[J]. *Space Science Reviews*, 2024, 220(7): 78.
- [25] O'D Alexander C M, McKeegan K D, Altwegg K. Water reservoirs in small planetary bodies: meteorites, asteroids, and comets[J]. *Space Science Reviews*, 2018, 214(1): 36.
- [26] Vernazza P, Beck P, Ruesch O, et al. Sample return of primitive matter from the outer solar system[J]. *Experimental Astronomy*, 2022, 54(2): 1051-1075.
- [27] Holmstrom M, Lester M, Sanchez-Cano B. Future opportunities in solar system plasma science through ESA's exploration programme[J]. *npj Microgravity*, 2024, 10(1): 29.
- [28] 李谦, 高辉, 谢兰兰, 等. 月球钻探取样技术研究进展[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2021, 48(1): 15-34.
- LI Qian, GAO Hui, XIE Lanlan, et al. Review of research about lunar drilling technology[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2021, 48(1): 15-34.
- [29] Rosen P E, Zhang D, Jiang J H, et al. Impact of economic constraints on the projected timeframe for human-crewed deep space exploration[J]. *Galaxies*, 2022, 10(4): 88.
- [30] 管成凯, 黄帆, 谭松成, 等. 钻头干钻碎岩过程中的热传导理论分析与研究进展[J]. *钻探工程*, 2025, 52(6): 15-25.
- GUAN Chengkai, HUANG Fan, TAN Songcheng, et al. Theoretical analysis and research progress of heat conduction in the dry drilling and rock breaking process of bits[J]. *Drilling Engineering*, 2025, 52(6): 15-25.
- [31] 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.
- [32] 段隆臣, 孙武成, 王志明, 等. 孕镶金刚石钻头磨损研究现状与发展趋势[J]. *地质科技通报*, 2024, 43(3): 200-217.
- DUAN Longchen, SUN Wucheng, WANG Zhiming, et al. Research status and development trend on wear of impregnated diamond bits[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2024, 43(3): 200-217.
- [33] Liu X Q, Liu J W, Wang L S, et al. Study on thermal characteristics of drilling tools during lunar soil drilling coring process[J]. *Journal of Engineering Design*, 2019, 26(1): 73-78.
- [34] Zhang X, Zhang G Q, Xie H P, et al. A review of sampling exploration and devices for extraterrestrial celestial bodies[J]. *Space Science Reviews*, 2022, 218(8): 59.
- [35] Knez D, Khalilidermani M. A review of different aspects of off-earth drilling[J]. *Energies*, 2021, 14(21): 7351.
- [36] Li Y P, Cao W H, Bhushan Gopaluni R, et al. Early warning of drillstring faulty conditions based on multi-model fusion in geological drilling processes[J]. *Journal of Process Control*, 2023, 126: 26-35.
- [37] 吴玉程, 汤俊宇, 杨宇, 等. 矿用硬质合金摩擦、腐蚀行为研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2024, 53(8): 2361-2374.
- WU Yucheng, TANG Junyu, YANG Yu, et al. Research progress on friction and corrosion behavior of mining cemented carbide[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2024, 53(8): 2361-2374.
- [38] Zakharov D A, Amosov A P, Sal'nikov A V, et al. Drilling hard alloys based on high-temperature tungsten carbides[J]. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2015, 56(3): 319-324.
- [39] 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.
- [40] 赵德明. 月壤钻进排屑模型与曲面螺旋式取心钻具研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- ZHAO Deming. Research on lunar soil chip removing model and lunar subsurface coring drill [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [41] Bell S, Joy K, Moore K. 50 Years of Luna legacy [J]. *Astronomy & Geophysics*, 2022, 63(1):1.14-1.20.
- [42] Slyuta E. The Luna program [M]//Longobardo A. *Sample Return Missions*. Amsterdam: Elsevier, 2021:37-78.
- [43] Chan Q H S, Stroud R, Martins Z, et al. Concerns of organic contamination for sample return space missions [J]. *Space Science Reviews*, 2020, 216(4):56.
- [44] Taylor S R. *Lunar science: A Post-Apollo View* [M]. New York: Pergamon Press, 1975.
- [45] Parker R A, Baldwin R R, Brett R, et al. *Apollo 17 Preliminary Science Report: NASA-SP-330* [M]. Washington, DC: NASA, 1973.
- [46] Crouch D S. *Apollo Lunar Surface Drill (ALSD) Final Report: NASA-CR-92412* [M]. Washington, DC: NASA, 1968.
- [47] Crozaz G, Ross L M. Jr. Deposition and irradiation of the Apollo 17 deep drill core [C]//*Lunar and Planetary Science Conference*. Houston: NASA, 1979:80A23621.
- [48] Hidaka H, Yoneda S. Sm and Gd isotopic shifts of Apollo 16 and 17 drill stem samples and their implications for regolith history [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71 (4): 1074-1086.
- [49] Li C L, Hu H, Yang M F, et al. Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'E-5 mission [J]. *National Science Review*, 2021, 9(2):nwab188.
- [50] 周诚, 李浩然, 韩文彬, 等. 面向原位建造的月壤采集技术研究进展及展望 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 52 (8):65-75, 90.
- ZHOU Cheng, LI Haoran, HAN Wenbin, et al. Research progress and prospects of lunar soil collection technology for in-situ construction [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2024, 52(8): 65-75, 90.
- [51] 杨孟飞, 张高, 张伍, 等. 嫦娥六号探测器月背无人自动采样返回任务技术设计与实现 [J]. *中国科学(技术科学)*, 2025, 55 (7):1133-1146.
- YANG Mengfei, ZHANG Gao, ZHANG Wu, et al. Technical design and implementation of Chang'e-6 robotic sample return mission on the far side of the moon [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2025, 55(7):1133-1146.
- [52] Zacny K, Glaser D, Bartlett P, et al. Drilling results in ice-bound simulated lunar regolith [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2007, 880(1):838-845.
- [53] Devin L N, Grechuk A I, Lupkin B V. Drilling of composites using tools of polycrystalline superhard materials [J]. *Journal of Superhard Materials*, 2018, 40(1):58-64.
- [54] Xu L, Liu Y B, Sun Y H. Study on bionic diamond Bits for drilling superhard materials [J]. *Materials Science Forum*, 2018, 936:198-203.
- [55] Liu Y J, He D W, Kou Z L, et al. Hardness and thermal stability enhancement of polycrystalline diamond compact through additive hexagonal boron nitride [J]. *Scripta Materialia*, 2018, 149:1-5.
- [56] Huang X, Guo Z X. High thermal conductance across c-BN/diamond interface [J]. *Diamond and Related Materials*, 2020, 108:107979.
- [57] Dai J H, Tian Z T. Large thermal conductivity of boron suboxides despite complex structures [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(4):041901.
- [58] Cheng H X, Pan Z M, Fu Y, et al. Review—corrosion-resistant high-entropy alloy coatings: a review [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2021, 168(11):111502.
- [59] Bar-Cohen Y, Zacny K. *Drilling in Extreme Environments: Penetration and Sampling on Earth and Other Planets* [M]. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] Zhao D M, Tang D W, Hou X Y, et al. Soil chip convey of lunar subsurface auger drill [J]. *Advances in Space Research*, 2016, 57(10):2196-2203.
- [63] Anderson R C, Jandura L, Okon A B, et al. Collecting samples in gale crater, Mars; an overview of the Mars science laboratory sample acquisition, sample processing and handling system [J]. *Space Science Reviews*, 2012, 170(1):57-75.
- [64] Blake D, Tu V, Bristow T, et al. The chemistry and mineralogy (CheMin) X-ray diffractometer on the MSL curiosity rover: a decade of mineralogy from gale crater, Mars [J]. *Minerals*, 2024, 14(6):568.
- [65] Verma V, Carsten J, Kuhn S. The evolution of the curiosity rover sampling chain [J]. *Journal of Field Robotics*, 2020, 37 (5):729-753.
- [66] Tutolo B M, Hausrath E M, Kite E S, et al. Carbonates identified by the curiosity rover indicate a carbon cycle operated on ancient Mars [J]. *Science*, 2025, 388(6744):292-297.
- [67] Mangold N, Gupta S, Gasnault O, et al. Perseverance rover reveals an ancient delta-lake system and flood deposits at Jezero crater, Mars [J]. *Science*, 2021, 374(6568):711-717.
- [68] Cuevas-Quinones S C, Wray J J, Rivera-Hernández F, et al. Evidence for a composite volcano on the rim of Jezero crater on Mars [J]. *Communications Earth & Environment*, 2025, 6 (1):340.
- [69] Weiss B P, Mansbach E N, Carsten J L, et al. Oriented bedrock samples drilled by the perseverance rover on Mars [J]. *Earth and Space Science*, 2024, 11(3):e2023EA003322.

- [70] Scheller E L, Hollis J R, Cardarelli E L, et al. First-results from the perseverance SHERLOC investigation: aqueous alteration processes and implications for organic geochemistry in jezero crater, Mars [C]//53rd Lunar and Planetary Science Conference (2022). The Woodlands: LPSC, 2022:1-2.
- [71] Witze A. A month on Mars: what NASA's perseverance rover has found so far[J]. Nature, 2021,591(7851):509-510.
- [72] Magnani P G, Re E, Ylikorpi T, et al. Deep drill (DeeDri) for Mars application[J]. Planetary and Space Science, 2004,52(1/3):79-82.
- [73] Magnani P G, Re E, Senese S, et al. Different drill tool concepts[J]. Acta Astronautica, 2006,59(8/11):1014-1019.
- [74] Kriechbaum K, Brown K, Cady I, et al. Results from testing of two rotary percussive drilling systems [C]//International Conference on Engineering, Science, Construction, & Operations in Challenging Environments. Honolulu: American Society of Civil Engineers, 2010:1394-1401.
- [75] Hudson N, Backes P, DiCicco M, et al. Estimation and control for autonomous coring from a rover manipulator[C]//2010 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2010:1-10.
- [76] Klein K, Badescu M, Haddad N, et al. Development and testing of a rotary percussive sample acquisition tool [C]//2012 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2012:1-9.
- [77] Mattingly R, May L. Mars sample return as a campaign[C]//2011 Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2011: 1-13.
- [78] Zacny K A, Cooper G A. Coring basalt rock under simulated Martian atmospheric conditions[J]. Mars, 2007,3:1-11.
- [79] Manthri S, Pusavec F, Zacny K A, et al. Experimental investigation of drilling performance of PCD compact core drills on basalt simulating sustainable dry drilling on Mars[C]//11th Biennial ASCE Aerospace Division International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. Long Beach: American Society of Civil Engineers, 2008: 1-10.
- [80] Matti A. Concept evaluation of Mars drilling and sampling instrument [D]. Espoo: Helsinki University of Technology, 2012.
- [81] Di Lizia P, Bernelli-Zazzera F, Ercoli-Finzi A, et al. Planning and implementation of the on-comet operations of the instrument SD2 onboard the lander Philae of Rosetta mission[J]. Acta Astronautica, 2016,125:183-195.
- [82] Magnani P, Bologna P, Ercoli Finzi A, et al. Rosetta philae SD2 drill system and its operation on 67p/churyumov-gerasimenko [C]//13th ESA/ESTEC Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation. The Netherlands: Noordwijk, 2015: 1-5.
- [83] European Space Agency. Touchdown! Rosetta's Philae probe lands on comet [EB/OL]. (2014-11-12) [2014-11-25]. https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Rosetta/Touchdown!_Rosetta_s_Philae_probe_lands_on_comet.
- [84] Bieler A, Altwegg K, Balsiger H, et al. Abundant molecular oxygen in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko [J]. Nature, 2015,526(7575):678-681.
- [85] Auster H U, Apathy I, Berghofer G, et al. COMETARY SCIENCE. The nonmagnetic nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko [J]. Science, 2015, 349 (6247) : aaa5102.
- [86] Zacny K, Paulsen G, Davis K, et al. Honeybee robotics planetary drill systems[C]//39th Annual Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2008: 1355.
- [87] Coste P A, Fenzi M, Eiden M. Collecting cometary soil samples? Development of the Rosetta sample acquisition system: N94-29628 [R]. The Netherlands: European Space Agency (ESA), 1994.
- [88] Fenzi M, Pozzi E, COSTE P A. A system for the challenging task of collecting samples from a comet surface[C]//The Fifth European Space Mechanisms and Tribology Symposium. Noordwijk :ESA Publications Division, 1993: 6-37.
- [89] Zhang T, Zhang W M, Wang K, et al. Drilling, sampling, and sample-handling system for China's asteroid exploration mission[J]. Acta Astronautica, 2017,137:192-204.
- [90] Quan Q Q, Bai D, Zhao Z J, et al. Development of a rotary-percussive ultrasonic drill for extraterrestrial rock sampling [C]//2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). Washington, DC: IEEE, 2017: 1-4.
- [91] Watanabe S I, Tsuda Y, Yoshikawa M, et al. Hayabusa2 mission overview [J]. Space Science Reviews, 2017, 208 (1) : 3-16.
- [92] Lauretta D S. OSIRIS-REx Asteroid Sample-Return Mission [M]//Pelton J N, Allahdadi F. Handbook of Cosmic Hazards and Planetary Defense. Cham: Springer, 2015:543-567.
- [93] 邵众望,张绍和,荣令龙,等.安全高效钻探用梯度结构金刚石复合片制备技术研究[J].钻探工程,2024,51(4):38-45. SHAO Zhongwang, ZHANG Shaohe, RONG Linglong, et al. Research on the preparation technology of gradient structure diamond composite disc for safe and efficient drilling[J]. Drilling Engineering, 2024,51(4):38-45.
- [94] 钱斌,刘咏,刘彬,等.月球资源开发背景下钻探工具材料的挑战与机遇[J].中南大学学报(自然科学版),2025,56(11):4802-4815.
- [95] QIAN Cheng, LIU Yong, LIU Bin, et al. Challenges and opportunities of drilling tool materials in context of lunar resources exploitation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2025,56(11):4802-4815.
- [96] Liu T X, Zhou J, Liang L, et al. Effect of drill bit structure on sample collecting of lunar soil drilling[J]. Advances in Space Research, 2021,68(1):134-152.
- [97] Li P, Jiang S Y, Tang D W, et al. Design and testing of coring bits on drilling lunar rock simulant[J]. Advances in Space Research, 2017,59(4):1057-1076.
- [97] 田野.双螺旋阻隔式月壤取芯钻具设计及其性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015. TIAN Ye. Study on performance and design of the double spiral auger and barrier-type lunar soil coring drill [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

(编辑 王跃伟)