

# 火星钻进与定点取芯方案设计及验证

季节<sup>1</sup>, 高翔宇<sup>1</sup>, 刘雅芳<sup>1</sup>, 潘冬<sup>1</sup>, 高舰<sup>1</sup>, 邹猛<sup>2</sup>, 张伟伟<sup>3</sup>

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2. 吉林大学 工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025;  
3. 哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 中国将实施火星采样返回任务, 开展火星钻取采样任务分析, 系统归纳深层采样面临的工程技术瓶颈, 结合任务需求构建火星钻取采样装置的设计准则, 并提出一种最大钻深2 m、可以实现定点取芯采样的钻取装置设计方案。构建了钻取采样测试平台, 使用JLU Mars系列模拟火壤和岩石开展了原理验证测试, 对所提出钻取采样方法的操作参数、钻具构型、异常情况的处置策略等进行了测试和优选, 并验证了钻进2 m深度获取样品的能力。研究成果初步验证了所提出方案的可行性, 为中国未来的火星采样返回任务提供了可选方案。

**关键词:** 火星; 采样返回; 钻取采样; 方案设计; 试验验证

**中图分类号:** V447.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2025)03-0271-13

**DOI:** 10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20250001

**引用格式:** 季节, 高翔宇, 刘雅芳, 等. 火星钻进与定点取芯方案设计及验证[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12(3): 271-283.

**Reference format:** JI J, GAO X Y, LIU Y F, et al. Drilling and sampling on Mars: concept design and verification[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(3): 271-283.

## 引言

作为地球的时空对照体, 火星保存了太阳系早期演化记录, 其表面氧化环境与地球早期生命起源环境具有可类比性<sup>[1]</sup>。经过近60年的发展, 对火星的研究已经取得了包含火星早期和现代的水活动证据、地质环境多样性、甲烷和有机物的发现等一系列重大科学发现<sup>[2]</sup>。基于探索发现地外生命的潜在可能, 美国国家科学院(National Academy of Sciences, NAS)在其《行星科学十年调查(2023—2032)》报告中明确将火星采样返回任务列为未来10年行星科学最高优先级任务。

对火壤的土壤样品进行采样、原位分析或返回分析是揭示行星演化与生命宜居性的核心科学手段。火星深层样本因火壤的屏蔽效应可保留更多生物标志物前体, 但现有技术在采样深度与样本保真度方面仍存在显著局限。自1976年“海盗1号”(Viking 1)和“海盗2号”(Viking 2)任务首次通过机械铲实现10 cm量级深度的土壤采集和原位分析<sup>[3]</sup>以来, 后续任务虽逐步提升探测能力, 但采样深度长期局限于亚米级: “机遇号”(Opportunity)和“勇气号”(Spirit)火星车

(2003年)的岩石磨削工具仅能去除岩石表面风化层至毫米级深度, 仅满足为显微成像光谱仪提供观测界面的需求<sup>[4]</sup>; “凤凰号”(Phoenix)探测器(2008年)虽在火星北极地区发现火壤中埋藏的水冰, 但其配备的直径6.35 mm的钻头仅能对水冰进行亚厘米级的钻进以获取碎冰样本<sup>[5]</sup>; “好奇号”(Curiosity)火星车(2012年)配备的PADS(Powder Acquisition Drill System)冲击式钻机系统将对岩石的钻进取样深度提升至最大6.5 cm<sup>[6]</sup>; “毅力号”(Perseverance)火星车(2020年)使用重新设计的岩石取芯钻探装置将岩石钻进深度扩展至8.5 cm, 并配合密封缓存系统为样品的保存和返回奠定了基础<sup>[7]</sup>。“洞察号”(Insight)任务(2018年)尝试通过冲击式贯入器实现次表层火壤穿透, 尽管其最终达到的37 cm穿透深度已经是上述任务中在火壤中达到的最深位置记录, 但仍未达到其最初5 m的钻入深度设计目标, 且缺乏对火壤的采样功能<sup>[8]</sup>。与此同时, 新一代技术虽尝试突破分米级瓶颈, 但工程化进程受阻: 美国的Icebreaker钻机(2018年)原计划实现1 m深度火星钻取采样<sup>[9]</sup>, 后技术移植至面向月球极区钻取采样的TRIDENT钻机<sup>[10-11]</sup>, 又随任务取消而陷入停滞; 欧洲ExoMars(Exobiology on Mars)计划

收稿日期: 2025-01-06 修回日期: 2025-05-23

基金项目: 基于着陆污染影响的取样技术(国防科工局课题)

同样因计划变动而陷入停滞,其设计的2 m多杆钻机虽具备火壤钻取采样能力,但限于任务设计也无法将样品返回地球<sup>[12]</sup>。可以说,人类还从未触及火星几十厘米以上深度的次表层土壤。

中国计划在未来几年实施第二次火星探测任务,将对火星的土壤、岩石和大气进行采样,并将样品返回地球。如果使用钻取装置对火星的次表层土壤进行采样,获得人类的首份次表层火星样品并返回地球,将产生前所未有的科学与工程价值。基于此背景,本文分析了在火星进行钻取采样的难点和设计需求,在此基础上提出了一种使用钻取装置对次表层火壤进行定点采样的概念方案,最大钻进采样深度可达2 m,并可以实现多次采样来获取不同深度的样品。对所提出的方案设计了地面验证试验,验证了钻取采样的运动参数和钻具的构型的设计,并验证了使用这一方案进行2 m钻孔和采集样品的能力。

## 1 火星钻采任务分析

### 1.1 火星钻取采样任务的难点

#### 1) 火星风化层多样性强

风化层指固态天体表面基岩之上的细颗粒层,其中包含亚厘米尺度的细粒径土壤和不同大小的块状岩石<sup>[13]</sup>。通过国际上数十年来对月壤的原位探测和样品的返回分析,月球风化层的特性已经得到较好的了解,中国的“嫦娥五号”“嫦娥六号”两次月球采样返回任务得以借此成功实施。但对于火星风化层,目前尚没有样品返回地面进行精细分析,只能通过已经实施的火星表面任务数据对火壤的特性进行反演和估计。Golombek等<sup>[14]</sup>基于遥感与火星表面任务的观测数据,对火星表面5次成功降落点的火壤力学参数给出了估计值,如表1所示。对于粒径小于1 cm的部分,容重、内聚力、摩擦角等参数都有较大的变化范围。在美国“洞

表1 5次成功降落点的火壤力学参数估计<sup>[14]</sup>

Table 1 Estimation of mechanical parameters of Martian soil at five successful landing sites<sup>[14]</sup>

风化层类型	容重/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	粒径/ mm	内聚力/ kPa	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )	热惯性/ ( $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1/2}$ )
沉积物	1.0~1.3	0.001~0.01	0~3	15~21	40~125
沙子	1.1~1.3	0.060~0.20	0~1	30	60~200
土壤碎块	1.1~1.6	0.005~0.50	0~4	30~40	200~326
大块土壤	1.2~2.0	0.050~3.00	3~11	25~33	368~410
岩石和火山岩	2.6~2.8	2~2000	1 000~10 000	40~60	>1 200~2 500
碎屑岩	~2.0	—	—	—	620~1 100
硫酸盐岩石	<2.0	—	—	—	>400~1 100

察号”火星探测任务中,设计了可以自动贯入火壤的热流和物理特性探测仪(HP<sup>3</sup>),计划贯入到火星表面以下约5 m位置<sup>[8]</sup>。HP<sup>3</sup>的设计对于低内聚、中度至不良分选和近似沙子大小的颗粒能够实现高效贯入。但“洞察号”着陆点火壤的黏聚性高于预期,无法为HP<sup>3</sup>提供足够的摩擦力以抵消贯入阻力,在第一次钻探到大约30 cm位置时便无法继续深入<sup>[15]</sup>。这说明,火壤具有多样性,特别是在黏聚性与流动性方面。

与火壤特性的多样性相似,地面制造的火壤模拟物也具有较强的多样性。基于对火壤的研究,很多种模拟火壤被开发出来,包括JSC Mars-1<sup>[16]</sup>、MMS系列<sup>[17]</sup>、ES系列<sup>[18]</sup>、SSC系列<sup>[19]</sup>等。根据过去的经验,在不考虑水分影响的情况下,影响土壤黏聚性和流动性的最主要因素是粒径和颗粒的形状。上述多种模拟火壤的粒度曲线汇总于图1,各种模拟火壤的粒度分布可以概括为以下特征:①一个系列的模拟火壤中倾向于包含不同粒度等级的模拟物,以实现火壤多样性的覆盖,例如MMS系列、ES系列、SSC系列,这与JSC-1A等模拟月壤粒径级配相对固定的特点不同;②多数模拟火壤的中值粒径( $D_{50}$ )都大于200  $\mu\text{m}$ ,仅部分火壤系列中细粒径级配的中值粒径小于100  $\mu\text{m}$ (ES-1、MMS dust I、MMS dust II、SSC-2、ES-2),而根据统计数据,月壤的中值粒径在60~150  $\mu\text{m}$ <sup>[20]</sup>,这表明火壤的典型粒径预期比月壤更粗。在缺少细粒径部分的情况下,大多数模拟火壤会具有较好的流动性和较差的黏聚性,这正是HP<sup>3</sup>地面测试中常用的情况<sup>[21]</sup>。

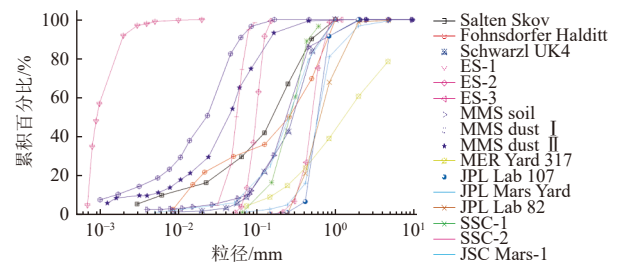


图1 不同模拟火壤的粒度分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curves of different Mars regolith simulants

火星地质演化的成熟度相比月球更高,因此岩石的种类也更加丰富。关于火星表面尤其是表面岩石有大量的探测研究记录,火星表面岩石分布如图2所示,图中不同颜色表示不同类型的岩石<sup>[22]</sup>。与之相比,月球的岩石主要由斜长岩、玄武岩等火成岩组成。对于钻取采样任务来说,岩石种类的丰富程度意味着岩石强度的多样性。“毅力号”火星车在火星表面进行第一次岩石钻取时意外未能获得岩芯样品,研究团队经分

析认为原因是所钻进的岩石对象虽然看似质地坚硬,但实际上是酥脆类型的<sup>[23]</sup>,如图3所示。岩石经过钻头的切削钻进后不能形成整块的岩石芯柱,而是解体变为碎屑形态,因此没能被“毅力号”的取芯钻头收集到。这一案例印证了火星岩石的多样性特点,意味着钻取采样装置需要尽可能适应不同特性的岩石,保证对尽量多类别的岩石都能够可靠获取样品。

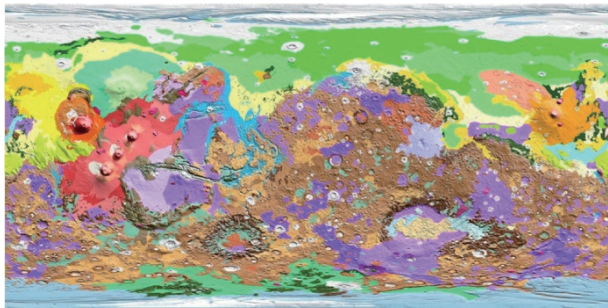
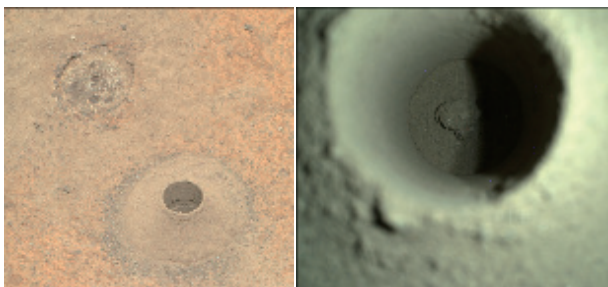


图2 火星表面岩石分布简略图<sup>[23]</sup>

Fig. 2 Sketch map of rock distribution on Mars surface<sup>[23]</sup>



资料来源: NASA/JPL-Caltech/ASU。

图3 “毅力号”在火星表面的首个岩石钻孔

Fig. 3 First rock borehole of Perseverance rover on the surface of Mars

## 2) 火星次表层特性未知

如前所述,过去人造工具与火壤的交互仅限于铲挖、磨蚀、浅钻、贯入4类,其中铲挖所到达的深度不超过几十厘米,磨蚀仅作用于岩石表面厘米量级深度,由“好奇号”与“毅力号”所实施的浅钻深度不超过10 cm,“洞察号”所实施的火壤贯入也仅达到了37 cm深度。火星表面37 cm深度以下仍然是人类尚未触及的地方。面向钻取采样的需求,更深层的火星风化层具有什么样的特性尚缺乏直接证据。月壤特性随深度变化的模式在月球全球具有普适性<sup>[13]</sup>。但由于火壤与月球土壤演化机制的显著区别,以及火星表面风暴、流水的特殊作用,这种模式对于火壤是否适用尚不能得到证实。通过对HP<sup>2</sup>贯入过程的反演,得出“洞察号”着陆点地面31 cm以下的地层中岩石颗粒含量较高<sup>[24]</sup>。“毅力号”火星车与“祝融号”火星车均搭载了探地雷达,可以对火星地下的浅层结构进行探测。根据“祝融

号”火星车上搭载的高频雷达获得的浅层数据推测:火星乌托邦平原(Utopia Planitia)的表层存在有10~20 cm厚的固结硬壳,硬壳下为混有不同粒径岩石的松散风化物,岩石块遍布于地下5 m的范围内<sup>[25-26]</sup>。而“毅力号”探地雷达的数据分析结果表明,耶泽罗陨石坑(Jezero Crater)底部的地下5 m内测量得到了高的平均地下介电常数,这与致密、低孔隙度的火成岩的存在一致,表明耶泽罗陨石坑底部的地下更有可能是由未经风化的原生火成岩组成<sup>[27-28]</sup>。上述几次任务对火星地下的探测结果各不相同,表明火星的浅次表层结构可能存在多样性,并且与着陆点所处区域的地质演化过程强相关。在这种情况下,在对钻取采样装置进行设计验证时,需要考虑尽可能多的情况以全面测试钻取采样装置对于不同情况的适应性。

## 3) 通信时延要求全自主

火星与地球之间距离遥远,而且这个距离会随着二者公转轨道位置的变化而变化。地火距离最远时,通信的单向时延可达到20 min,这意味着由地面人员根据遥测数据进行实时遥控的飞行控制模式是不可行的。另一方面,遥远的地火距离也导致火星着陆器的直接对地通信带宽受到较大限制,图像等大容量数据传输更多依靠火星轨道器的中继通信。而轨道器每次过顶的中继通信时间十分有限,也无法保证长时间连续的大容量数据传输。因此,可行的飞行控制模式是,在火面作业开始前就通过中继通信上注一个工作周期内的全部任务指令,过程中钻取采样装置需要完全依靠自身的自主控制能力处理所遇到的各种情况。也就是说,钻取采样装置需要具备对完整作业流程的自主控制能力,自动判断所遭遇的钻进工况与故障,并采取相应的策略调整操作参数或进行故障处置。这对于钻取控制策略的设计和地面验证提出了很高的要求。

## 4) 行星保护要求严格

寻找火星生命是火星探测最重要的科学目标之一。对于火星探测需要采取最为严格的行星保护措施,避免地球与火星之间产生有机物和微生物的交叉污染。钻取采样装置在设计之初就需要将行星保护纳入考虑,避免地球物质对采集的火星样品造成污染。例如,在材料选择方面,与火星样品直接接触的部分不能使用有机材料;在制造、装配、集成、测试全链路保证钻具的生物消杀,避免二次污染。

## 5) 火面作业的资源受限

重量、能耗、尺寸的限制是实施地外天体钻探的共性约束,但火星与地球的距离相比月球更加遥远,

运输成本更加高昂,且太阳光的辐照强度也大幅降低,导致在重量和能耗等方面的限制更加突出。

## 1.2 火星钻取采样装置的设计准则

与实施火星钻取采样任务的难点相对应,火星钻取采样装置除了需要满足轻量化、低功耗等常规航天器机构的设计要求外,还需要满足以下准则:

1) 能对不同类型的土壤和岩石钻孔。火星的土壤和岩石存在多样性,土壤粒径可能从极细到粗糙,流动性(或相反的黏聚性)可能很好或很差,岩石的强度可能高或低。一般来说,黏聚性强、密实度高的土壤和强度高的岩石更加难以钻进突破,钻机的能力应尽量多覆盖不同的土壤和岩石类型来降低采样失败的风险。

2) 对采集的样品可靠收纳。与钻孔的难度相反,松散且流动性好的土壤难以被密封收纳。容纳样品空间的封口处不应存在缝隙,否则这种土壤容易泄漏,无法从钻孔中被提取出来。对于岩石样品,关键是在钻孔后将芯柱折断以断开和岩石的连接,并将岩芯从钻孔中提取出来。

3) 采样机构可多次重复使用。基于在月球钻取采样上获得的经验,我们认为增加钻机可以执行的钻取采样次数是必要的。如果只有一次采样机会,那么成功靠运气,而可重复使用的采样机构能够提高采样作业的容错率。通过满足设计准则1~3,钻取采样装置可具备对不同类型土壤、岩石实现钻孔与样品的可靠收纳能力和重复使用能力,从而在面对复杂多样且非确知的火壤环境时大大提高采样任务成功的概率。

4) 具备自主控制钻进能力。火星风化层的钻取采样预计会遇到多样性的故障情况,包括土壤密度的变化、岩石颗粒的阻碍、水分相变的影响等。通信时间延迟要求钻机能够自动识别和处理所遇到的各种情况。在初步设计阶段,自主控制能力体现在对特定问题都可以确定一套固化动作序列来解决故障。

5) 满足行星保护要求。在初步设计阶段,行星保护要求主要体现在选择合适的材料制造与样品存在直接接触的零件。需要避免使用有机材料(例如凯夫拉)和与行星保护消杀手段不兼容的材料。

## 2 钻取采样系统设计

### 2.1 钻取采样装置组成

根据钻取采样方案设计准则,本文提出了一种火星钻取采样系统方案设计,可以实现火星次表层土壤的钻进和定点取芯,如图4所示。

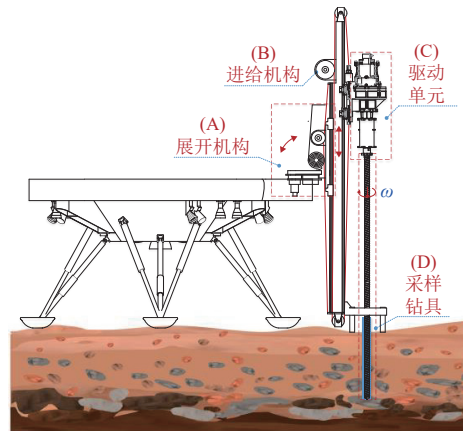


图4 火星采样钻的组成

Fig. 4 Components of robotic drill for Mars sampling

装置由展开机构、进给机构、驱动单元和采样钻具4个主要部分组成。展开机构可以将钻机由水平姿态调整为竖立姿态,使用蜗轮蜗杆机构实现大减速比力矩放大和机构自锁;进给机构实现钻机的上下运动,可继承“嫦娥五号”“嫦娥六号”钻取采样装置的钢丝绳驱进给方案,在减轻重量的同时定位精度优于1 mm;驱动单元为钻具的回转切削和冲击提供动力,可以通过冲击加强对岩石的钻进能力;采样钻具用来实现对火壤风化层的钻孔和采样,并且可以多次重复使用。

### 2.2 取芯机构设计

采样钻具的前端内部集成了一套可以实现样品容腔开合的取芯机构,由电机、减速器、双向丝杠和封口弹片等组成,如图5所示。钻头分为中心钻头与外圈的环形钻头两部分,其中中心钻头可以沿钻具的轴线方向往返运动。在钻杆内部嵌入了一台电机,通过电机驱动丝杠将旋转运动转化为直线运动。丝杠具有两个旋向相反的螺旋,可以使中心钻头和封口片同步运动,但方向相反。在一次钻取采样过程中,钻具机构的工作过程包括钻进、钻头避让、取芯采样、钻口封装、提钻和放样共6个过程:

1) 钻进。在采样钻具钻进至采样深度之前,取芯机构一直处于钻进工作状态,此时驱动中心钻头的螺母处于双向丝杠的最前端工作位置,封口片的螺母处于双向丝杠的最后端工作位置,取芯筒处于封闭状态,如图5(a)所示。

2) 钻头避让。当钻头到达采样位置时,电机工作通过双向丝杠驱动中心钻头向上运动,使取芯筒处于打开状态,外钻头切削破碎火星目标采集样本使其进入到取芯筒中。同时,在双向丝杠的作用下封口片向下运动(但未推出),如图5(b)所示。

3) 取芯采样。在钻具开口状态下继续钻进,火星

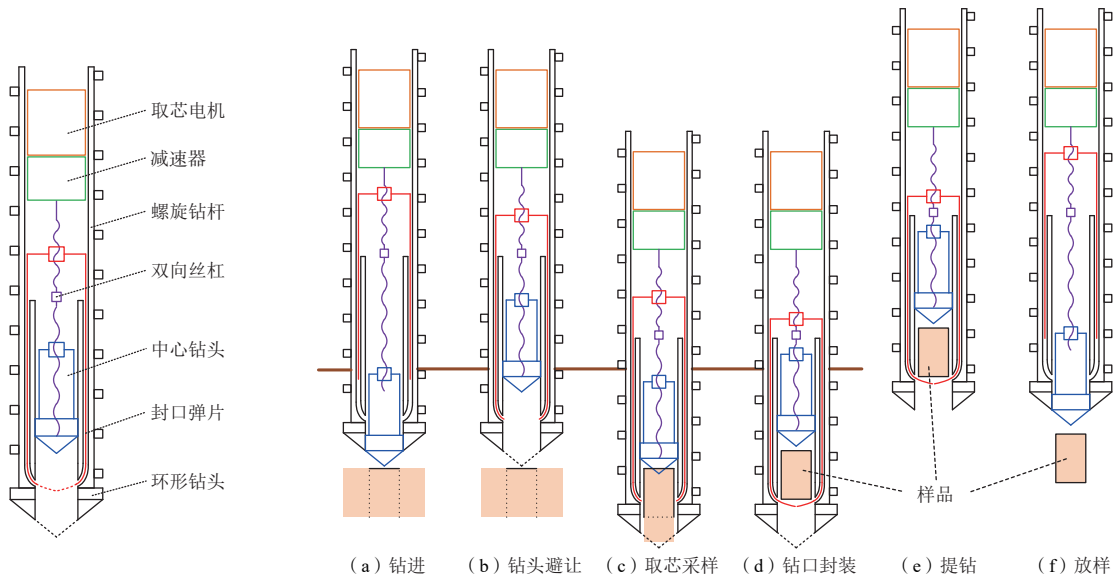


图5 采样钻具工作过程

Fig. 5 Working process of sampling mechanism

样品进入取芯腔体, 如图5 (c) 所示。

4) 钻口封装。当取芯腔体中的火星目标采集样本装满时, 会进行样品封装。此时, 在双向丝杠的作用下, 中心钻头继续向上运动, 同时弹片被从腔体侧壁推出并在样品下方闭合封口, 如图5 (d) 所示。

5) 提钻。钻具从钻孔中提出, 采样腔体始终处于封闭状态, 如图5 (e) 所示。

6) 放样。此时取芯机构的电机工作, 驱动弹片向上运动收回, 同时使内钻头向下运动将样品推出, 如图5 (f) 所示。

采用这种方法, 选取具有高切削效率的钻头配合冲击的辅助作用, 可以提高对岩石的钻进效率。采用4片预制形状的金属弹片实现封口, 闭合后没有缝隙, 可以对采集的火星样品进行可靠的封口 (如图6所示)。机构是可以重复使用的, 可以进行多次采样以降低任务失败的概率, 并且可以通过起竖机构的角度调整更改钻孔的位置。整个采样机构均由金属材料制造, 经过消杀后可以满足行星保护的要求。



图6 弹片闭合状态

Fig. 6 Sealing pieces and their closed state

### 2.3 钻具结构设计

采样钻具由螺旋钻杆、中心钻头和取芯钻头3部分组成。中心钻头采用锥形基体, 刀片由硬质合金制

成, 焊接到钢质的钻头基体上。取芯钻头在中心钻头的外圈, 将会涉及对火星岩石的切削钻进, 需要能够高效切削岩石。设计了3种不同材料、构型的取芯钻头, 如图7所示。

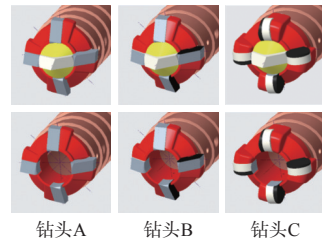


图7 3种钻具设计

Fig. 7 Design of three drill bits

钻头A、钻头B的构型相同, 均采用圆锥形钻头基体焊接直线型刮刀切削刃, 区别在于钻头A的切削刃完全采用硬质合金材料, 而钻头B的切削刃采用聚晶金刚石复合片 (Polycrystalline Diamond Compact, PDC), 主切削刃与前刀面为金刚石材料, 能够显著提高对岩石的切削效率。钻头C采用圆锥形钻头基体与斧形PDC切削刃, 切削刃无尖角, 用切削能力的下降换得切削刃抗损伤能力的提高。将进一步开展试验对3种取芯钻头的性能进行对比测试。

取芯容腔的内部直径与中心钻头的直径相同。开始取芯时, 中心钻头向内收回, 弹片同步向下方运动, 当弹片运动至尖端即将从腔体内壁的开口伸出时停止, 在这个状态下开始进行取芯钻进。此时, 腔体开口到中心钻头尖端的距离定义为取芯容腔的长度, 如图8所示。

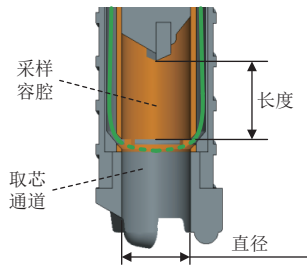


图8 采样容腔的尺寸示意  
Fig. 8 Dimensions of sampling chamber

## 2.4 钻进操作参数设计

钻进操作参数的核心是钻具转速和进给速度，转速的高低影响钻头的切削能力和钻杆的排屑能力，调整转速与进给速度的比值可以引导钻屑的流向。由于采用了可开合的采样容腔，钻进与采样过程可以解耦考虑。钻进过程可以采用适当高的钻具转速提高钻进和排屑效率；采样过程可以适当降低钻具转速来引导钻屑向取芯通道中流动，提高采样量。对钻进、采样、提钻各个过程的每个操作参数，给出了根据经验确定的额定参数，以及相应的调整范围。表2中，取芯钻进长度指钻具在取芯过程中，开始提钻前在进给方向上运动的距离。表2中的取芯长度是指钻具在取芯过程中沿进给方向移动直至封口阶段开始的距离。将对各个参数对于采样量的影响进行试验测试，最终确定合理的数值。

表2 操作参数设置

Table 2 Operating parameters setting

阶段	操作参数	名义值	调整范围
钻进	钻具转速/( $r \cdot \min^{-1}$ )	110	60~110
	进给速度/( $\text{mm} \cdot \min^{-1}$ )	100	20~100
采样	钻具转速/( $r \cdot \min^{-1}$ )	60	30~110
	进给速度/( $\text{mm} \cdot \min^{-1}$ )	100	50~150
	采样长度/mm	60	60~100
提钻	钻具转速/( $r \cdot \min^{-1}$ )	10	10~30
	进给速度/( $\text{mm} \cdot \min^{-1}$ )	300	200~300

## 2.5 对含岩石颗粒土壤钻进策略设计

在含有岩石颗粒的模拟土壤中进行钻进时，钻孔路径上存在的岩石颗粒会阻挡钻头的运动，使钻具的运动速度和负载发生剧烈的波动。在极端情况下，阻力会超过钻具的驱动扭矩，导致钻头被岩石颗粒卡住而停止旋转，即“堵转”。堵转发生后，钻具不能再对土壤进行切削和排屑，进给运动也会因为阻力增大而停止。

制定了钻进过程中遇堵转问题后的处理策略(图9)，具体包括以下步骤：①发现钻具的旋转运动因为钻头卡住岩石颗粒而堵转后，停止所有电机的运

动；②钻具整体向上运动10 mm(不旋转)。如果在这个过程中无法将钻具提升到目标位置，则使钻具以10 r/min的速度交替正向和反向转动，直到钻具提升到目标位置；③钻具开始缓速启动正向旋转(定义为使切削向孔外排出的转动方向)，直至达到110 r/min的额定速度；④进给机构以低速(如20 mm/min)开始向下运动，超过钻头卡停时的深度后再将进给速度恢复至100 mm/min。如果仍然出现钻头被岩石卡住停止旋转的问题，则循环执行一次上述步骤。当循环执行两次仍不能解决问题时，则在钻头第3次卡停时直接启动冲击，等待钻头开始稳定旋转后，关闭冲击。

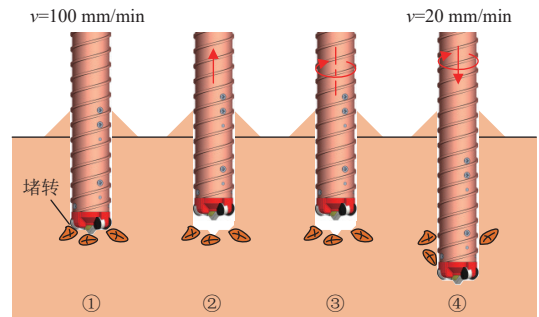


图9 解决钻进过程岩石阻挡的策略  
Fig. 9 Strategies for penetration in regolith with rock particles

## 3 试验验证

对照所提出的设计目标，火星钻取采样装置需要实现的核心功能是对不同类型的土壤和岩石进行钻孔，并对所采集的样品进行可靠收纳。为实现这个目标，需要从钻头结构、操作参数、采样策略等方面开展优化和验证。本文报告了基于火星模拟物所开展的地面试验工作以及所取得的成果。本文所开展的所有试验工作均在大气压环境下开展。

### 3.1 钻取测试平台构建

钻进测试平台能够实现钻具的回转、进给、冲击运动，且配有相应的扭矩和位移传感器，实现钻取采样过程的测量。输出轴配有滑环实现钻杆内部电机的供电与信号传输。钻进测试平台如图10所示：

1) 钻具的回转驱动。转速输出能力为0~500 r/min，转矩输出能力为0~30 Nm，本文所有试验中转矩输出能力通过软件限制为20 Nm，作为钻进能力测试的基线。钻具的实际转速通过驱动电机的编码器测量，并根据减速比计算得出。钻具的扭矩通过扭矩传感器测量得出。

2) 钻具的进给驱动。钻机的进给运动通过链条传动实现。进给速度的驱动能力为0~500 mm/min，进给力输出能力为0~1 000 N。本文所有试验中进给力

的输出能力通过软件限制为400 N。钻机在进给导轨上的位置通过磁栅尺测量, 进给速度通过驱动电机的编码器测量, 进给力通过钻机与链条连接处的两个力传感器测量值相减得出。

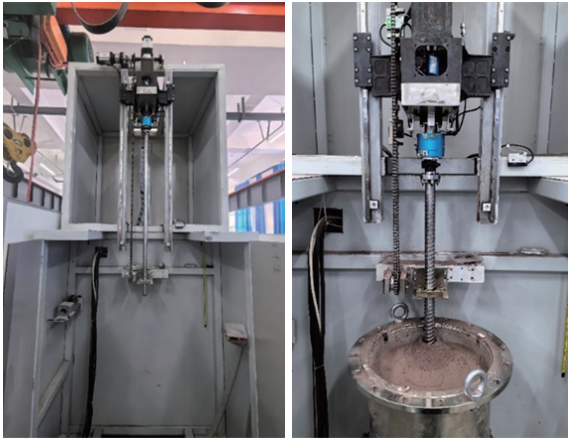


图 10 钻进测试平台  
Fig. 10 Drilling test platform

3) 钻具的冲击驱动。单次冲击功固定为3 J, 与“嫦娥五号”钻机的冲击功接近。冲击频率输出能力为0~20 Hz, 实际冲击频率通过冲击驱动电机的编码器测量, 并根据减速比计算得出。

### 3.2 火壤模拟与制备

在试验测试中使用了由吉林大学开发的JLU Mars系列模拟火壤, 原料取自中国吉林省靖宇县双山火山的火山渣, 经烘干、机械粉碎、粒径分级、混料等步骤制备而成<sup>[29]</sup>, 在中国“天问一号”任务中被用于火星车的行驶能力测试<sup>[30]</sup>。选取JLU Mars系列中的3种配比作为模拟火壤的基础原料, 即JLU Mars-1、JLU Mars-2、JLU Mars-3。3种模拟火壤的粒径曲线如图11所示。其中, JLU Mars-1的粒径配比与MMS dust II接近, 中值粒径为约35 μm; JLU Mars-2的粒径配比与MMS soil接近, 中值粒径为约190 μm; JLU Mars-3的粒径配比与ES-3接近, 中值粒径约720 μm。使用3种配比的模拟火壤分别代表细粒径、中粒径和粗粒径的火壤, 来扩展试验测试的覆盖性。3种模拟火壤的其它关键参数汇总于表3, 其中 $D_{50}$ 表示中值粒径,  $D_{10}$ 和 $D_{90}$ 分别表示占比10wt%和90wt%颗粒的粒径所小于的尺度,  $\rho_{min}$ 和 $\rho_{max}$ 分别表示最小和最大干密度。我们发现JLU Mars-1具有和JSC-1A等模拟月壤相似的特性, 即高的黏聚性和差的流动性, 这可能是由其中值粒径与模拟月壤较为接近导致的。相反, JLU Mars-2和JLU Mars-3具有很好的流动性(类似沙子), 这可能是因为它们中缺少了极细粒径的部分。

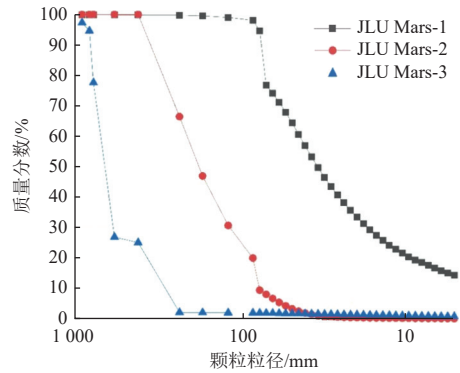


图 11 JLU Mars粒径曲线测试结果  
Fig. 11 Particle size distribution test results of JLU Mars

表 3 JLU Mars系列模拟火壤关键参数

参数	JLU Mars-1	JLU Mars-2	JLU Mars-3
$D_{10}/\mu\text{m}$	3	80	310
$D_{50}/\mu\text{m}$	35	190	720
$D_{90}/\mu\text{m}$	75	390	875
$\rho_{min}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.22	1.48	1.80
$\rho_{max}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.98	1.23	1.48

火星的土壤中存在岩石颗粒。虽然火壤中岩石颗粒的典型配比和含量尚不明确, 但是基于在开发月球采样装备时积累的经验, 为火星钻取装置初步定义了地面测试使用的几种岩石颗粒配比, 用于对硬件进行测试, 并摸索钻进和采样能力的边界。所使用的岩石颗粒与用来制造模拟火壤的岩石来源相同, 均为红色玄武岩。所确定的3种颗粒工况如表4所示。其中“<1 mm”指的是表3中的3种模拟火壤中的任意一种。因此, 模拟火壤可以与颗粒工况组成9种可能的组合。例如, 标记“标称1”代表JLU Mars-1和标称工况的组合。

表 4 3种颗粒工况的颗粒比例、相对密度

工况参数/mm		标称/%	挑战/%	极端/%
粒径 级配	<1	75.0	65.0	60
	1~2	8.0	10.0	10
	2~4	5.5	8.5	8.5
	4~10	5.5	8.5	8.5
	10~41	6.0	8.0	13
相对 密实度	0~300	74 ± 2	77 ± 2	80 ± 2
	300~600	92 ± 2	95 ± 2	98 ± 2
	>600	98 ± 2	98 ± 2	98 ± 2

在模拟火壤的相对密实度控制方案, 采用了三维振动密实方法。将一定量的配置好模拟火壤填充到模拟火壤容器中, 然后用三维振动台振动, 直到模拟火壤表面达到设定的数值高度。容器中模拟火壤的高度

是根据其中模拟火壤的总质量和期望的密度计算得出的。重复上述操作，直到模拟火壤容器完全装满。这种方法可以确保容器中模拟火壤的密度均匀性。

为了对不同强度的火星岩石均具有代表性，选取两种岩石用来测试火星钻机对不同强度岩石的钻进能力。其中，砂岩的单轴抗压强度约为30 MPa，灰岩的单轴抗压强度约为100 MPa。两种岩石均为致密的均质岩石，如图12所示，以便减少由于岩石节理造成的影响。

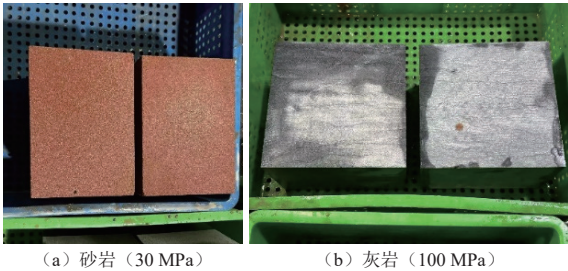


图 12 两种强度等级的岩石  
Fig. 12 Rock blocks of two strength classes

### 3.3 钻取采样操作参数验证

钻进采样操作参数对采样量的影响分析使用不加入岩石颗粒的JLU Mars模拟火壤进行试验，目的是排除岩石颗粒对采样过程的干扰，并测试采样过程中不同的钻具转速与进给速度对采样量的影响，通过采样量结果确定合理的操作参数组合。对JLU Mars-1、JLU Mars-2、JLU Mars-3这三种模拟火壤都进行了测试，以覆盖不同粒径和不同流动性的土壤。试验中还使用了不同钻头，对比了钻头构型对于采样量的影响。

火壤钻孔采样涉及钻进、取芯、提钻3个阶段，涉

及多个运动参数，在3种细粒径模拟火壤中对多种运动参数下获得的采样量进行了对比试验，重点对比了不同作业规程参数对采样量的影响。在细粒径火壤中，每个钻孔进行4次采样，分别在钻进到80、300、700、900 mm深度位置时，开始中空取芯采样，每个钻孔只使用一种参数组合进行采样，取4个深度采样量的平均值和极值绘制误差棒图作为统计结果进行对比分析。

经过试验，发现在钻进阶段和提钻阶段中，钻具的转速与进给速度对采样阶段获取的样品质量没有明显影响。这是因为采样管直到采样阶段才会打开来容纳样品，并在采样结束后关闭，在密封良好的情况下与之前的钻进和之后的提钻阶段没有关系。因此，在此仅展示了采样阶段转速与进给速度、采样阶段钻进长度对于采样量的影响。

#### 1) 取芯转速与进给速度的影响

中心钻回避让，钻头构型变为取芯钻后，进入取芯钻进阶段。对这一阶段钻具的转速和进给速度对于采样量的影响进行了测试，测试工况包括JLU Mars-2、JLU Mars-3、JLU Mars-1这三种细粒径模拟火壤和钻头A、钻头C两种钻具。

在3种模拟火壤中获得的采样量结果如表5所示。在保持进给速度为100 mm/min的情况下，测试了钻具转速为15、30、60、90、110 r/min的5种运动参数组合；还测试了30 r/min + 50 mm/min以及90 r/min + 150 mm/min两种运动参数组合，从而与基准规程60 r/min + 100 mm/min保持进转比一致。对每一种模拟火壤进行了两种不同情况下的测试，对比了不同密实度、不同钻头构型对于采样量的影响。

表 5 取芯转速与进给速度对采样量影响

Table 5 Effect of rotation speed and feed rate on sample mass

模拟物	JLU Mars-2	JLU Mars-3	JLU Mars-1
	<p>JLU Mars 2火壤 (59%密实度) 不同取芯规程采样量</p> <p>首次钻孔 钻进规程: 110/100 取芯长度: 60 mm 提钻规程: -8/216</p>	<p>JLU Mars 3火壤 (84%密实度) 不同取芯规程采样量</p> <p>钻头A 钻进规程: 110/100 取芯长度: 60 mm 提钻规程: 10/300</p>	<p>JLU Mars 1火壤 (71%密实度) 不同取芯规程采样量</p> <p>钻头A 钻进规程: 110/100 取芯长度: 60 mm 提钻规程: 10/300</p>
测试结果	<p>Dr = 59%, 钻头A</p> <p>JLU Mars 2火壤 (84%密实度) 不同取芯规程采样量</p> <p>首次钻孔 钻进规程: 110/100 取芯长度: 60 mm 提钻规程: -8/216</p>	<p>Dr = 84%, 钻头A</p> <p>JLU Mars 3火壤 (84%密实度) 不同取芯规程采样量</p> <p>钻头C 钻进规程: 110/100 取芯长度: 60 mm 提钻规程: 10/300</p>	<p>Dr = 71%, 钻头A</p> <p>JLU Mars 1火壤 (71%密实度) 不同取芯规程采样量</p> <p>钻头C 钻进规程: 110/100 取芯长度: 60 mm 提钻规程: 10/300</p>

注：图中“规程”标识的含义为：回转转速 (r/min) /进给速度 (mm/min)。

对于JLU Mars-2模拟火壤, 试验结果显示, 采用30 r/min + 100 mm/min、15 r/min + 100 mm/min两种取芯规程虽然在获得较多样品量方面具有优势, 但由于进转比过大, 来不及排屑, 会导致测试台进给力超限 (>400 N), 最终导致堵钻故障, 因此排除这两种高进转比规程组合。采用110 r/min + 100 mm/min规程时, 由于进转比过小, 排屑顺畅, 进入取芯钻头内部的质量少, 因此获得的平均采样量仅有1.54 g。该结果表明采样阶段不能使用过高的钻具转速。其余4种规程组合 (60 r/min + 100 mm/min、30 r/min + 50 mm/min、90 r/min + 150 mm/min及90 r/min + 100 mm/min) 获得的平均采样量在3.20~3.48 g之间, 结果相差不大, 表明对于JLU Mars-2模拟火壤, 这些参数区间内的运动参数组合均为可选参数。

对于JLU Mars-3模拟火壤, 两种钻头的试验结果均显示, 采用30 r/min + 100 mm/min取芯规程的采样效果最好、30 r/min + 50 mm/min其次、60 r/min + 100 mm/min最差, 但与30 r/min + 50 mm/min的结果相接近, 两种规程的采样量平均值都在4.48~6.02 g。因30 r/min + 100 mm/min规程存在钻进负载超限风险, 选取30 r/min + 50 mm/min或60 r/min + 100 mm/min两种规程均可。

对于JLU Mars-1模拟火壤, 采样量结果显示, 60 r/min + 100 mm/min、30 r/min + 50 mm/min与30 r/min + 100 mm/min 3种取芯规程获得的采样量存在递增规律, 但平均值都在26.64~28.75 g。这个结果表明对于JLU Mars-1所测试的3种取芯规程影响不大, 均可采用。

综上, 综合考虑采样量、作业时间、钻进负载, 选取转速60 r/min、进给速度100 mm/min作为优选的取芯钻进规程, 并可以按需要向30 r/min + 50 mm/min或者90 r/min + 100 mm/min调整。

另外, 前述试验结果显示, 取芯钻具在JLU Mars-1中的采样量明显多于JLU Mars-2和JLU Mars-3。分析原因, 一方面是因为JLU Mars-1的流动性差, 不易被钻杆输送排屑, 因此更倾向于向钻头内的取芯通道填充; 另一方面是因为JLU Mars-1的黏聚性强, 容易形成力链自锁的土壤团块, 弹片封口提钻后, 封口处下方的取芯通道内仍然会堵塞残留大量的火壤样品不会掉落 (如图13所示), 因此在放样时也会随取芯容腔内的样品被一同计入样品质量, 导致采样量增加。

与之相比, JLU Mars-2和JLU Mars-3的流动性强, 颗粒难以团聚成块, 在弹片封口后, 弹片下方没有被兜住的火壤会随着钻具的提钻动作从取芯通道内掉出; 相反JLU Mars-1则不会。因此, 未来应减小取芯钻头入口边缘到封口弹片内限位套下边缘的距离,

减少已进入取芯通道内的火壤样品的浪费, 增加高流动性火壤的采样量。

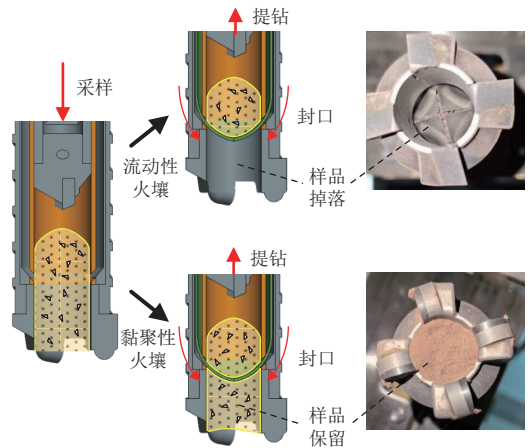


图13 不同火壤采样现象

Fig. 13 Phenomenon at coring channel when sampling different simulants

## 2) 取芯钻进长度的影响

取芯钻进长度指从中心钻头收回、钻头构型变为取芯钻时刻开始计算, 至取芯钻进完成、弹片开始封口时刻, 钻具在火壤中进一步钻进的深度。中心钻内收避让后, 从取芯钻头下边缘到中心钻尖端距离约为50 mm, 其中从弹片内限位套下边缘到中心钻尖端距离约为20 mm (定义为取芯容腔长度)。选择取芯钻进长度分别为60、100 mm, 超过50 mm的取芯通道长度, 理论上可保证取芯容腔填满。使用钻头A、JLU Mars-2进行了取芯长度对采样量影响的对比试验, 模拟火壤的相对密度为84%, 结果如图14所示。

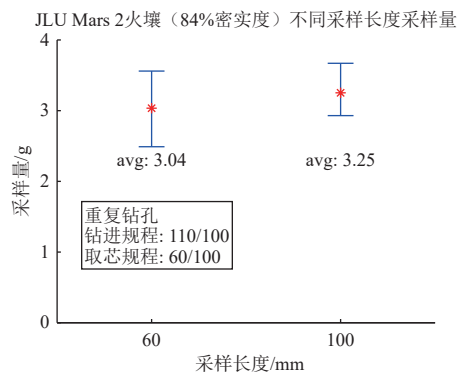


图14 取芯钻进长度对采样量影响

Fig. 14 Effect of coring length on sample mass

采样量数据表明, 取芯钻进长度从60 mm增加到100 mm, 采样量平均值仅从3.04 g增加到3.25 g, 效果不明显。根据取芯容腔内体积和模拟火壤堆积密度估算, 填充满取芯容腔时的采样量应至少在7 g以上。这说明, 即使取芯钻进长度增加, 火壤样品也不能填

满取芯容腔,而是在进入取芯通道一定长度后就无法继续进入,导致样品量较少。为解决这一问题,后续可对钻头和取芯单元的结构进行改进,减少取芯钻头下边缘到弹片内限位套下边缘的距离。

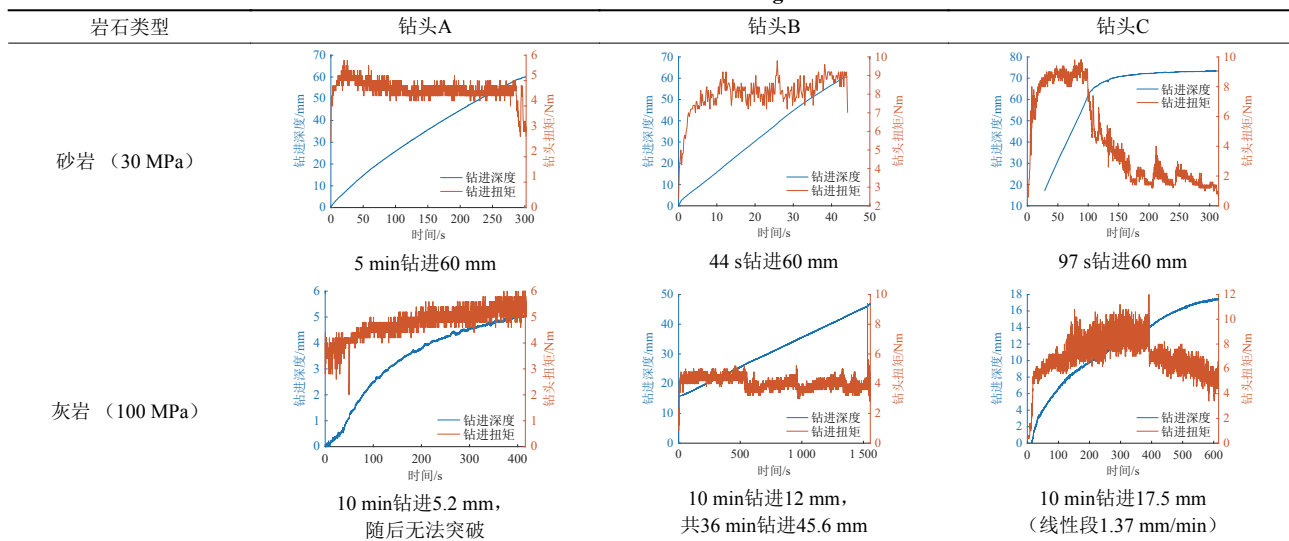
### 3.4 钻具构型设计验证

基于钻孔效率对钻头的构型进行优选。使用A、B、C 3种钻头对不含岩石颗粒和含有岩石颗粒的JLU Mars模拟火壤进行了钻进测试,以评估3种钻头的钻进效率。钻头以固定的转速和进给速度对模拟火壤进行钻孔,通过传感器测量驱动的扭矩和力来评估钻进效率。然而,所设计的钻头对上述模拟火壤的钻孔效率没有表现出明显的差异。进一步测试了3种钻头对岩石的钻进效率,并发现了明显的差异。因此,钻头构型的优选主要依据对岩石的钻孔效率测试开展。

使用A、B、C 3种钻头对砂岩、灰岩进行钻进取

芯试验,测量获得了钻进速度、取芯长度数据。钻进过程钻具转速统一为110 r/min,钻压力由进给机构自由状态下钻机重力提供,配置为恒定300 N,冲击频率10 Hz。A、B、C 3种钻头对两种岩石钻进过程的钻进深度/扭矩-时间曲线、钻进速度结果如表6所示。试验结果显示,钻头A(硬质合金直线刃)在砂岩中钻进5 min实现了60 mm的钻进深度,而在灰岩中无法实现持续钻进。B、C两种PDC钻头C对岩石的钻进能力相比钻头A显著提升,能够稳定钻进砂岩、灰岩并获取岩芯。比较B、C两种钻头的钻进速度,钻头B(PDC直线刃)在砂岩中仅耗时44 s即完成60 mm深度钻进,而钻头C(PDC斧形刃)耗时97 s完成砂岩60 mm钻进;对于灰岩,钻头B能够达到的稳定钻进速度约为1.2 mm/min,而钻头C约为1.37 mm/min,稍快于钻头B但二者基本相当。

表6 岩石钻进试验结果  
Table 6 Results of rock drilling tests



观察完成试验后的钻头损伤情况,钻头A切削刃上边缘尖端处出现一处崩刃损伤;而钻头B切削刃刀尖出现两处崩刃损伤,切削刃上边缘尖端处出现一处崩刃损伤,钻头C切削刃可见磨钝但未出现明显损伤,如图15所示。

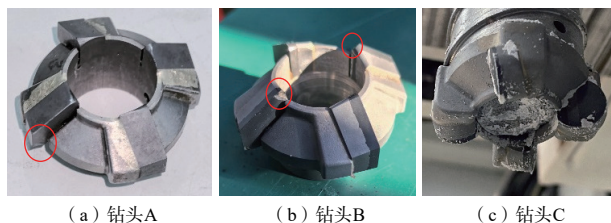


图15 试验后钻头损伤情况  
Fig. 15 Damage to drill bit after test

根据以上现象总结,试验结果表明:

1) 采用PDC作为钻头切削刃材料能够显著提高钻头对于岩石的钻进能力,与之相比,硬质合金切削刃对岩石的钻进能力差;

2) PDC直线刃钻头(钻头B)刀尖锋利,对岩石的切削效率最高,且钻进温升高,性能优良,但金刚石材料脆性强,导致钻头容易发生崩刃损伤;

3) PDC斧形刃钻头(钻头C)相比直线刃钻头刀尖锋利程度降低,耐损伤的能力明显增强,且相比钻头B对岩石的钻进效率下降不明显,仅钻进温度有一定升高,在钻头效能和寿命之间取得了较好的平衡。

根据以上试验结果,钻头C具有较好的综合性能,因此初步选定钻头C作为取芯钻头结构设计方案。

### 3.5 钻进策略验证

使用制定的对含岩石颗粒火壤钻进策略,在“标称1”“标称2”“标称3”“挑战3”4种模拟火壤工况下进行了2 m全深度的钻进测试。试验结果表明,当钻进过程中遭遇堵转情况时,采用制定的策略可以实现解除堵转状态,并使钻头突破当前岩石颗粒的阻挡,实现继续钻进。采用制定的策略,在已开展的所有标称工况和一种挑战工况下均能够实现2 m深度的钻进和采样,验证了所设计的采样方案能够实现2 m深度的钻进和样品采集。

## 4 小 结

经过本文的试验研究,初步验证了所提出方案的可行性,实现的采样性能指标与其它火星采样方案对比结果如表7所示。本文方案可满足火壤、岩芯多类采样对象需求,采样深度大,钻取相同采样深度时相比ExoMars钻机显著节省时间,且可获得的样品体积最大,具有显著的优势。

表7 设计方案采样性能指标对比

Table 7 Comparison of sampling performance indicators of design schemes

采样方案	采样对象	采样深度/cm	采样体积
铲挖式	火壤	<30	单次可>100 ml
“凤凰号”冲击钻	火壤、冰屑	<1	<1 ml
“好奇号”PADS	火壤、岩粉	6.5	<1 ml
“毅力号”取样钻	火壤、岩芯	8	$\phi 13 \times 61$ mm, 8 ml
ExoMars组接钻	火壤、岩芯	200 (用时500 min)	$\phi 10 \times 30$ mm, 2.6 ml
本文方案	火壤、岩芯	200 (用时100 min)	$\phi 19 \times 36$ mm, 10.2 ml

本文工作仍存在一定的局限性,具体包括以下几方面:

1) 火壤和岩石的覆盖性应进一步扩展: 试验测试只覆盖了标称工况和一种挑战工况,岩石的强度最高达到100 MPa。未来火壤测试应增加挑战和极端工况、岩石测试应增加更高强度的玄武岩工况,并且考虑将火壤的粒径范围进一步扩展;

2) 根据试验的结论,封口时针对含岩石颗粒的火壤、软岩、硬岩需采用不同的策略。后续需要进一步开展钻进对象辨识的研究工作,从而在预先不知道钻进和采样对象的情况下选择正确的策略;

3) 已经完成的所有试验均在地球大气和常温环境下进行,未来应在模拟火星的气压和温度条件下开展试验,进一步测试火星的环境条件对于钻取采样的影响。

## 5 结 论

本文面向火星采样返回背景,开展了钻取采样的任务分析,并提出了一种钻取采样装置的概念设计。使用JLU Mars系列模拟火壤和岩石开展地面试验,取得以下结论:

1) 确定了影响采样量的操作参数主要是取芯阶段的钻进转速和进给速度,优选参数组合为60 r/min + 100 mm/min;

2) 对所设计的3种钻头进行了对比测试,结果表明在土壤工况下3种钻头的差异不大,而在钻进岩石时,钻头C在钻头效能和使用寿命之间取得了较好的平衡;

3) 确定了在含岩石颗粒的土壤中解决堵钻问题的处置策略,并经试验验证有效;

4) 验证了钻进2 m深度获取样品的能力,并且可以重复使用。

本文研究成果初步验证了所提出方案的可行性,为中国未来的火星采样返回任务提供了可选方案。

### 参考文献

- [1] LAGAIN A, BOULEY S, ZANDA B, et al. Early crustal processes revealed by the ejection site of the oldest martian meteorite[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3782.
- [2] 赵宇鹤, 周迪圣, 李雄耀, 等. 国际火星探测科学目标演变与未来展望[J]. *科学通报*, 2020, 65: 2439-2453.  
ZHAO Y Y, ZHOU D S, LI X Y, et al. The evolution of scientific goals for Mars exploration and future prospects (in Chinese)[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65: 2439-2453.
- [3] SEGER R B, GILLESPIE V P. The Viking surface sampler[C]//*Proceedings of The 8th Aerospace Mechanisms Symposium*. Hampton, Virginia, USA: NASA Langley Research Center, 1973.
- [4] THOMSON B J, BRIDGES N T, COHEN J, et al. Estimating rock compressive strength from Rock Abrasion Tool (RAT) grinds[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2013, 118(6): 1233-1244.
- [5] BONITZ R G, SHIRAIISHI L, ROBINSON M, et al. NASA Mars 2007 Phoenix lander robotic arm and icy soil acquisition device[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2008, 113(E3): 1-10.
- [6] VASAVADA A R, ANDERSON R C, MSL Science Team. Exploring and sampling on Mars with NASA's 2012 Curiosity Rover [C]//*Proceedings of Earth and Space 2012: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*. Pasadena, California, USA: NASA/ACSE, 2012: 420-424.
- [7] ROBERT C M, LOUISE J, KEITH R, 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(5): 1-43.
- [8] SPOHN T, GROTT M, SMREKAR S E, et al. The heat flow and physical properties package (HP 3) for the InSight mission[J]. *Space*

- Science Reviews*, 2018, 214: 1-33.
- [9] ZACNY K, PAULSEN G, MCKAY C P, et al. Reaching 1 m deep on Mars: the Icebreaker drill[J]. *Astrobiology*, 2013, 13(12): 1166-1198.
- [10] PAULSEN G, ZACNY K, YAGGI B, et al. Development and testing of the lunar resource prospector drill (RPD)[C]//Proceedings of Earth and Space 2016: Engineering for Extreme Environments. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2016: 301-312.
- [11] ZACNY K, CHU P, VENDIOLA V, et al. TRIDENT Drill for VIPER and PRIME1 Missions to the Moon[C]//52nd Lunar and Planetary Science Conference. Huston, Texas, USA: Lunar and Planetary Institute, 2021 (2548): 2400.
- [12] ALTIERI F, FRIGERI A, LAVAGNA M, et al. Investigating the Oxia Planum subsurface with the ExoMars rover and drill[J]. *Advances in Space Research*, 2023, 71(11): 4895-4903.
- [13] HEIKEN G H, VANIMAN D T, FRENCH B M. Lunar sourcebook: a user's guide to the Moon[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [14] GOLOMBEK M P, HALDEMANN A F C, SIMPSON R A, et al. Martian surface properties from joint analysis of orbital, Earth-based, and surface observations the Martian surface[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [15] SPOHN T, HUDSON T L, WITTE L, et al. The InSight-HP<sup>3</sup> mole on Mars: lessons learned from attempts to penetrate to depth in the Martian soil[J]. *Advances in Space Research*, 2022, 69(8): 3140-3163.
- [16] ALLEN C C, JAGER K M, MORRIS R V, et al. JSC Mars-1: a Martian soil simulant[C]//Proceedings of Space 98, Albuquerque, New Mexico: American Society of Civil Engineers, 1998: 469-476.
- [17] PETERS G H, ABBEY W, BEARMAN G H, et al. Mojave Mars simulant—characterization of a new geologic Mars analog[J]. *Icarus*, 2008, 197(2): 470-479.
- [18] GOUACHE T P, PATEL N, BRUNSKILL C, et al. Soil simulant sourcing for the ExoMars rover testbed[J]. *Planetary and Space Science*, 2011, 59(8): 779-787.
- [19] SCOTT G, SAAJ C. Measuring and simulating the effect of variations in soil properties on microrover trafficability[C]//Proceedings of AIAA SPACE 2009 Conference & Exposition. [S.l.]: AIAA, 2009: 6468.
- [20] GROMOV V. Laboratory astrophysics and space research[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999: 121-142.
- [21] WIPPERMANN T, HUDSON T L, SPOHN T, et al. Penetration and performance testing of the HP<sup>3</sup> Mole for the InSight Mars mission[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 181: 104780.
- [22] 欧阳自远, 肖福根. 火星探测的主要科学问题[J]. *航天器环境工程*, 2012, 28(3): 205-217.
- OUYANG Z, XIAO F. Major scientific issues involved in Mars exploration[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2012, 28(3): 205-217.
- [23] FARLEY K A, STACK K M, SHUSTER D L, et al. Aqueously altered igneous rocks sampled on the floor of Jezero crater, Mars[J]. *Science*, 2022, 377(6614): eabo2196.
- [24] SPOHN T, HUDSON T L, MARTEAU E, et al. The InSight HP3 penetrator (Mole) on Mars: soil properties derived from the penetration attempts and related activities[J]. *Space Science Reviews*, 2022, 218(8): 72.
- [25] YANG J, SHAO Y, BIAN X, et al. Shallow subsurface structure of the Utopia Planitia based on Zhurong rover penetrating radar data[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2025, 42(1): 116-125.
- [26] LI H, WANG B, LI J, et al. The subsurface structure of the Martian Utopian Basin revealed by the radar data of the Zhurong rover[EB/OL]. [2025-02-06]. <https://europemc.org/article/PPR/PPR791662>.
- [27] HAMRAN S E, PAIGE D A, ALLWOOD A, et al. Ground penetrating radar observations of subsurface structures in the floor of Jezero crater, Mars[J]. *Science Advances*, 2022, 8(34): eabp8564.
- [28] CASADEMONT T M, EIDE S, SHOEMAKER E S, et al. RIMFAX ground penetrating radar reveals dielectric permittivity and rock density of shallow Martian subsurface[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2023, 128(5): e2022JE007598.
- [29] 薛龙. 工程用模拟火星壤研制与地面力学参数就位估计研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- XUE L. Engineering of Martian soil simulant and in situ identification of terrain parameter for planetary rovers[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [30] YUAN B, WANG C, ZOU M, et al. Experimental study on the durability of China's Mars rover's mobility system[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2021, 34(5): 04021047.
- 作者简介:  
**季节**(1995-), 男, 工程师, 主要研究方向: 航天器机构技术。  
 通信地址: 北京市海淀区友谊路104号院(100094)  
 电话: (010)68113436  
 E-mail: [jjjie2849@163.com](mailto:jjjie2849@163.com)  
**刘雅芳**(1986-), 女, 高级工程师, 主要研究方向: 航天器机构技术。  
**本文通信作者**。  
 通信地址: 北京市海淀区友谊路104号院(100094)  
 电话: (010)68746841  
 E-mail: [234281099@qq.com](mailto:234281099@qq.com)

## Drilling and Sampling on Mars: Concept Design and Verification

Ji Jie<sup>1</sup>, GAO Xiangyu<sup>1</sup>, LIU Yafang<sup>1</sup>, PAN Dong<sup>1</sup>, GAO Jian<sup>1</sup>, ZOU Meng<sup>2</sup>, ZHANG Weiwei<sup>3</sup>

(1. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

2. Key Laboratory of Bionic Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China;

3. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The upcoming Chinese Mars sample return missions are projected to acquire Martian subsurface samples at depths reaching 2 meters through drilling, representing the first endeavor of its kind. In this study, a comprehensive analysis of Martian deep drilling and sampling tasks was conducted, with engineering bottlenecks in subsurface excavation systematically identified. Design criteria for the drilling system were formulated according to mission requirements, leading to the proposition of a drilling and stationary sampling device prototype capable of core sampling at the depth of up to 2 meters. A dedicated drilling testbed was constructed, where verification experiments were performed using JLU Mars series soil/rock simulants. Operational parameters, drill bit geometries, and operational strategies were examined and optimized, with successful validation of the 2-meter drilling capability. The findings demonstrate the technical feasibility of the proposed solution, providing valuable insights for China's future Mars sample return missions.

**Keywords:** Mars; sample return; drilling and sampling; concept design; experimental verification

### Highlights:

- An analysis of Martian drilling and sampling missions was conducted, with engineering bottlenecks in deep subsurface sampling identified.
- Design criteria for drilling systems were established, followed by the proposition of a drilling and stationary sampling device.
- Sampling performance was validated via ground experiments, where the effects of operating parameters, drill bit geometries and operational strategies were thoroughly investigated.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]