

# 火星取样钻探技术分析

孙平贺<sup>1,2,3</sup>

(1.有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室,湖南长沙 410083; 2.中南大学地球科学与信息物理学院,湖南长沙 410083; 3.美国亚利桑那州立大学,坦佩 85282)

**摘要:**火星探测一直是人类空间探测的热点。“好奇号”火星车着陆 6 年多来,先后完成了 16 次取样钻探,为人类探测火星提供了直接依据。本文根据 NASA(美国国家航空航天局)公开的技术资料,围绕取样钻探的设计要求、取样钻探系统结构设计及接触式稳定系统、辅助结构系统、压力和回转传递系统、封闭保护壳(稳定器)系统、钻头系统、转盘系统、主动轴系统和冲击钻进系统等展开了论述。系统设计主要结合智能化、模块化、轻量化要求开展,并先后经过 12 次的室内联动测试,完成了同火星车的岩屑运移、样品处理分析、数据存储、仪器控制等系统的高度集成,并通过机械臂完成了搭载试验。由于火星取样钻探的首次尝试和 NASA 的技术保密原因,论文阐述的相关内容仅作为我国开展火星取样钻探研究和地球深部智能钻探研究的参考。

**关键词:**火星探测;取样钻探;行星地质;“好奇号”火星车;智能钻探

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7328(2018)10-0160-06

**Study on Mars Sample Drilling Technology/SUN Ping-he<sup>1,2,3</sup>** (1.Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Non-ferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, Changsha Hunan 410083, China; 2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China; 3. Arizona State University, Tempe 85282, USA)

**Abstract:** Mars exploration has always been a hot spot in human space exploration. The “Curious” Mars Rover has been landing for more than six years, and it has completed 16 drilling samplings, providing a direct basis for humans to recognize Mars. This paper is based on the technical data published by NASA (National Aeronautics and Space Administration), around the design requirements of sampling drilling, sampling drilling system structural design and contact stability system, auxiliary structural system, pressure and rotary transmission system, closed protective shell (stabilizer) systems, rotary drill systems, turntable systems, drive shaft systems, and impact drilling systems have been discussed. The system design is mainly combined with intelligent, modular and lightweight requirements. After 12 times of indoor linkage testing, it has completed the high integration of the cuttings, processing analysis, data storage and instrument control of the Mars. The carrying test was completed by the robot arm. Due to the first attempt of Mars sampling drilling and the technical confidentiality of NASA, the relevant content of the paper is only used as a reference for study on Mars sampling drilling and deep earth intelligent drilling in China.

**Key words:** Mars exploration; sample drilling; planetary geology; “Curious”; intelligent drilling

## 0 引言

人类对火星的探测一直都是空间探测的热点。1960 年前苏联发射的首颗火星探测器拉开了这一科学过程的序幕,此后,美国、俄罗斯、欧洲、日本、印度和中国陆续实施了一系列的火星探测活动。由于火星是距离地球最近的类地行星,其是否存在水和

生命,可否成为人类另外家园等问题是人类探测活动的最初动力。同时,行星地质学家根据火星表面的影像分析资料,初步建立了其表面可能的地层分布情况<sup>[1-2]</sup>,如图 1 所示,也进一步推动了人类认识火星的进程。此外,近些年的探测活动同样推动了材料、制造、通信等领域的技术进步。2018 年 5 月,

收稿日期:2018-07-27

**基金项目:**国家自然科学基金项目“微观和宏观下离子稳定剂对煤层气钻孔的化学与力学护壁机理研究”(编号:41602372);国土资源部复杂条件钻采技术重点实验室开放基金项目“煤层气储层保护离子固结钻井液技术研究”(编号:DET201612);“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室(西南石油大学)资助项目“湘中页岩气孔内原位探测及钻井液关键技术研究”(编号:PLN201609);国家留学基金访问学者项目“智能钻进与非开挖水平定向钻进关键系统集成”(编号:201706375018)

**作者简介:**孙平贺,男,汉族,1982 年生,副教授,硕士生导师,地质工程专业,博士,主要从事深部岩土钻掘及非开挖工程学的教学与科研工作,湖南省长沙市岳麓区麓山南路 932 号中南大学本部地学楼 100 室, pinghesun@csu.edu.cn。

美国“好奇号”火星车探测结果显示:火星上存在含硫的有机质,同时甲烷浓度随季节更迭呈现规律性变化<sup>[1]</sup>,而这重大发现是依赖于其钻探样品自动分析结果,因此,取样钻探是火星探测中不可或缺的关键技术。

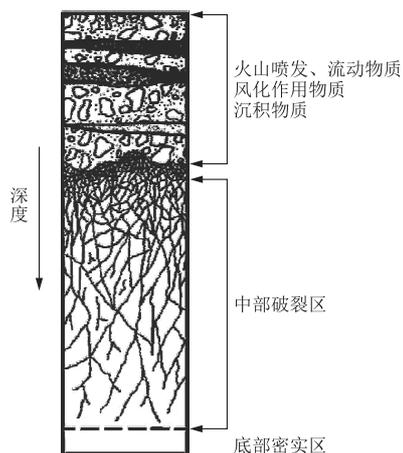


图 1 火星表面可能的地层分布

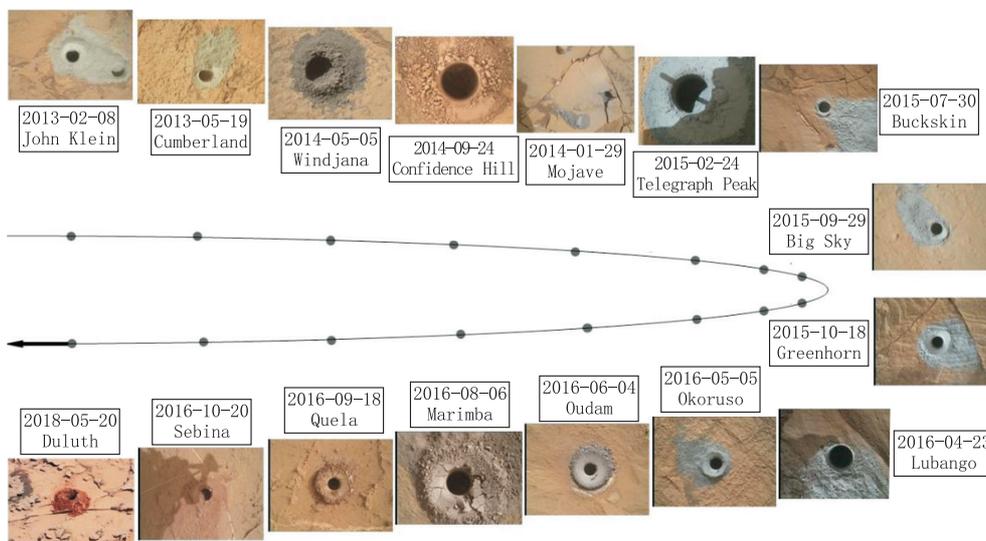


图 2 “好奇号”火星钻孔概况

## 1 钻探要求与系统组成

火星表面的环境和人类对其认知程度的限制,使“好奇号”火星车取样钻探设计难度较大,不确定的因素成为潜在的运行风险。依据行星地质学家已掌握的基本环境、温度、地质因素,取样钻探系统在设计中需要满足如下要求<sup>[1]</sup>。

(1)长寿命运行要求。地球取样钻探的长寿命一般以累积进尺深度作为衡量指标,“好奇号”钻探

“好奇号”火星车于 2012 年 8 月着陆,2013 年 2 月实施首次取样钻探,并成功完成直径为 16 mm、深度为 64 mm 的钻孔作业。着陆 6 年来,其先后完成了 16 次取样钻探(截至 2018 年 5 月 20 日)<sup>[3]</sup>,为科学家认识火星提供了直接依据,如图 2 所示。美国国家航空航天局(NASA)火星探测中心公开的资料显示,科研人员花费了十余年对火星钻探取样技术展开研究<sup>[4-6]</sup>,主要关注的是两大难点:其一是火星不确定的环境因素;其二是取样钻探的动力技术问题。尤其是针对火星样品的取样工艺问题<sup>[7-8]</sup>。科研人员认为获取岩屑的全面钻探工艺对动力的要求要超过取心钻探工艺,且在不具备流体钻井液的情况下,岩屑的有效排除同样是技术难点,因此,最终确定了取心钻探工艺技术。由于“好奇号”火星钻探是不同于传统钻探的智能、集成、轻量系统,加之国外对核心技术的保密,本文依据现有技术资料,着重介绍了取样技术的系统组成,有望对国内相关研究提供参考。

长寿命的定义为:能够至少获取到火星表面 81 个不同地点的岩屑样品。由于目前样品是采用自动分析系统完成预定科学目标,因此需要系统能够对不同样品进行有效区分,重点是保证取样前系统的清洁度,避免岩屑交叉混淆。另外,为了确保在无水环境下的干钻顺利进行,选取冲击回转钻进工艺来提高钻头的寿命,并要求能够实现自动换钻头 1 次,以确保在不确定岩层的取样钻探质量。

(2)高效密封和极端条件下的系统稳定要求。

火星表面的粉尘较大,而钻探系统又是依赖于各机械组件的力学传递实现取样目标的,因此,需要对这些组件进行高效密封,防止粉尘侵入后造成机械故障。同时,不少取样地点都是位于崎岖不平的坡地中,最大坡度为 $20^{\circ}$ ,火星车极易发生滑移,造成钻头卡钻,进而形成锁死状态。因此,要求钻头直径应足够大,在一定深度条件下,保证岩屑采集的体积。机械部分的设计应考虑复杂地形产生的极限荷载。

(3)相对独立的模块设计要求。取样钻探系统是高度集成的智能系统,但在设计上需要各自保持独立。模块设计目的是确保在极端条件下,某个机构的力学、机械或者电子故障不会影响到其他机构。比如对于钻头部分,一旦发生卡钻,可通过系统的强力起拔而将钻头拉断后放弃,更换新钻头后可重新作业。由于受到体积的限制,在室内测试中,技术人

员发现40%的极端情况下,单纯依赖系统的强力起拔无法实现拉断钻头,而利用冲击机构的辅助作用,可大大减少极限起拔力。

根据上述设计要求,技术人员历经4年及12次室内联动测试,完成了取样钻探系统的结构设计,如图3所示。钻探系统同岩屑运移系统、岩屑处理分析系统、控制仪器系统、数据存储系统等高度模块化集成为一体,再通过机械臂搭载于“好奇号”火星车的前部。在实际取样钻探中,依靠机械臂的移动、转动实现对取样地点的精准定位。取样钻探系统由8个子系统构成,分别为接触式稳定系统、辅助结构系统、压力和回转传递系统、封闭保护壳(稳定器)系统、钻头系统、转盘系统、主动轴系统和冲击钻进系统<sup>[9-10]</sup>,如图4所示。

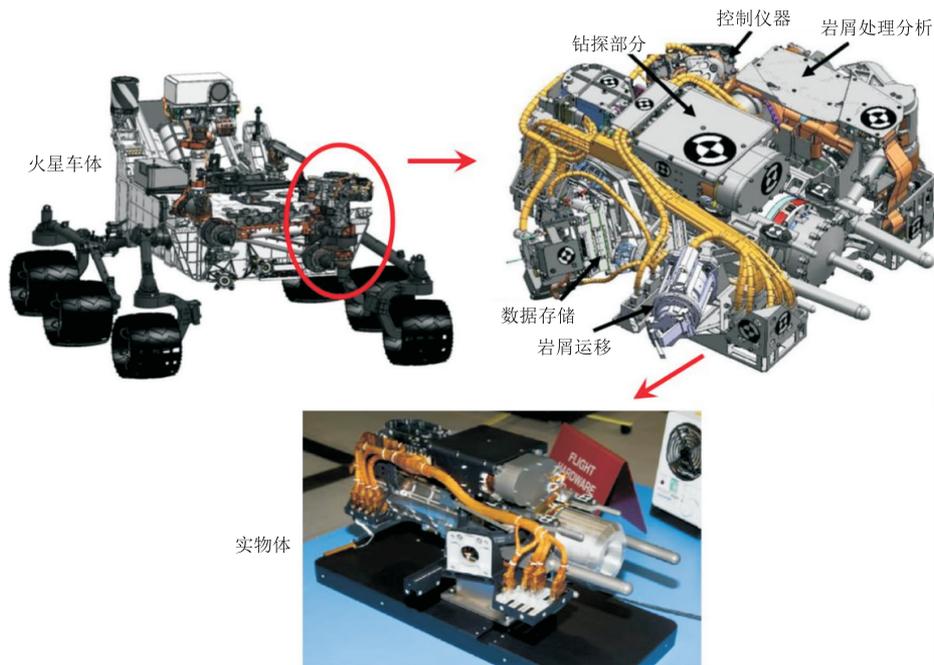


图3 取样钻探系统结构设计

## 2 钻头系统

作为旋转扭矩和冲击荷载的承载体,钻头系统是获取火星表面样品的关键。钻头直径为16 mm,表面加工成螺旋深槽,便于钻屑的运移。钻头体的外部是钻屑收集钢管,也是岩屑进入岩屑仓的唯一通道,如图5所示。为了提高钻进过程的稳定性,岩屑收集管具有较大的壁厚,同时在底部设有4个凹槽,用于换钻前固定钻头体。钻头体上部同嵌在壳

体的轴承相连,而壳体又通过2个钛膜片连接到岩屑收集管的上部。作为唯一固定钻头的轴承,其密封性至关重要,设计中采用弹簧加压密封和集成外罩保护,以提高其工作稳定性。岩屑仓位于钻头体上部的腔体中,由前、后两部分仓体组成,两个仓体通过单通道相连,在通道对面设有岩屑出口,是获取到的样品进入岩屑运移系统的起始端。在岩屑仓上部均匀分布8个卡孔,用于钻头系统同转盘系统相连接,实现扭矩和冲击荷载的传递。

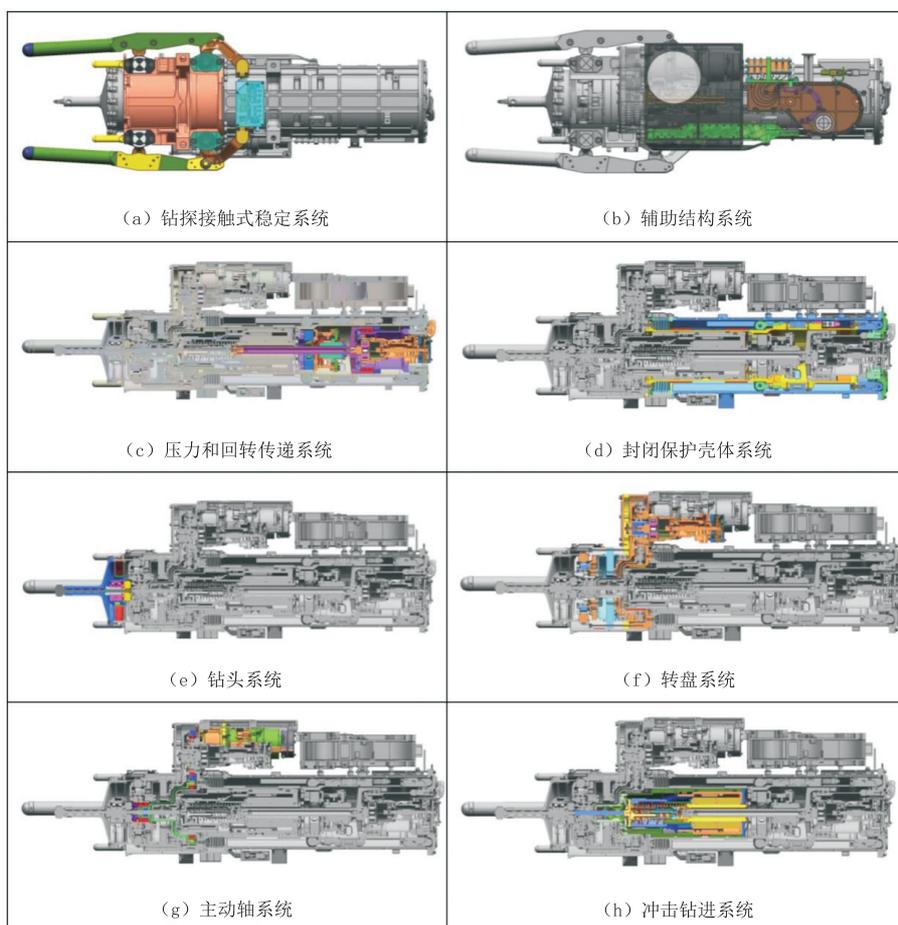


图 4 取样钻探系统组成

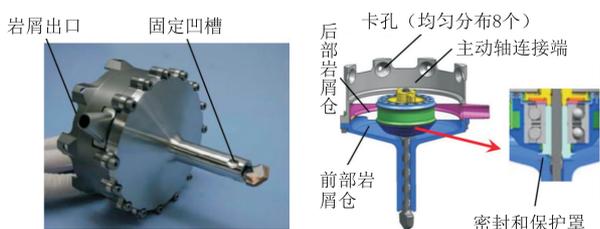


图 5 取样钻头部分组成

### 3 转盘系统

同传统的钻进设备一样,转盘系统主要为钻头提供扭矩,并实现钻头体的锁紧与释放,如图 6 所示。该系统主要由电换向齿轮电动机驱动,电动机通过齿轮传动装置驱动主轴。输出轴由机头轴承和后部嵌入式轴承作为支撑,最大平均接触应力保持较低状态,以防止润滑油降解失效。安装在轴上的是耐久性较好的扭矩联轴器,用于钻头和主轴之间的轴向、径向和角度运动。钻头的卡盘机构不仅能

够实现钻头的锁紧和释放,还可以进行钻头的自动更换。该机构由 8 个不锈钢球组成,通过旋转凸轮径向推出。凸轮由换向制动器进行控制,包括电动换向减速电机、齿轮组和谐波传动装置。

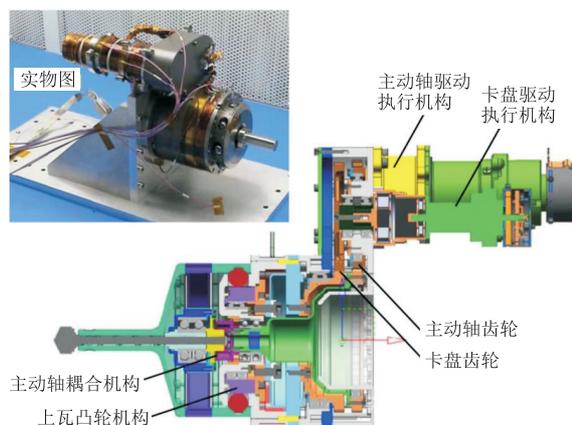


图 6 转盘驱动系统组成

转盘系统具有高效的密封和耐久性能,不受火星空气中的尘埃颗粒和钻进产生的岩屑颗粒影响,

同时,其极限荷载通过室内测试结果进行设定,确保在卡钻时能够及时释放被表面卡住的钻头,实现对整体系统的自动保护。润滑系统中采用了改进后的 Lub-Lock4306 型号干润滑剂,可有效降低极端条件下结构的机械磨损。

#### 4 冲击钻进系统

冲击钻进系统的结构相对较为简单,主要由重锤、弹簧和壳体等组成,如图 7 所示。重锤的质量为 400 g,冲击的频率为 30 Hz,可变冲击能量为 0.05~0.8 J。弹簧具有较高的热膨胀系数,能够适应结构内、外部的连接。壳体部分开有凹槽,用以嵌入弹簧组,以保证内部组件径向尺寸的变化。同时,在壳体内部设有三个导轨,其阳极氧化表面进行了抛光处理,并由智能电子组件实现自动控制。整个冲击钻进系统由位于美国加州的 BEI Kimco 公司(<http://www.beikimco.com>)研发,并展开了联动测试。

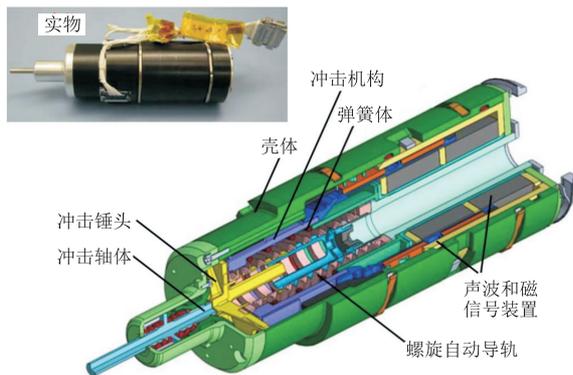


图 7 冲击钻进系统组成

#### 5 回转钻进和稳定外壳系统

回转钻进和稳定外壳系统主要是将上部的压力传递给钻头,实现轴向运动过程。其主要由三部分组成:连接轴承、外壳体和回转主轴,如图 8、图 9 所示。在取样钻进中,回转主轴可提供恒定的 120 N 钻进压力;在完成取样后,还可提供回拉力进行提钻作业。通过连接轴承,外壳体同转盘系统相连接,同时,壳体外部的自加力紧固装置和支撑机构可对内部元器件进行有效封装,以减少外部粉尘对系统稳定性的干扰。回转主轴由 6 对滚动轴承组进行固定,不同轴承的极限负载有所不同,以保证在特殊情况下能够有效释放或拉断主轴,起到系统保护作用。同时,为了准确获取压力的大小,在壳体内部设有多个

压力传感器,并由波形弹簧进行保护。室内 $\pm 70^{\circ}\text{C}$ 条件下的测试结果显示,回转钻进系统具有较好的稳定性,说明其在火星温度条件下可提供有效的轴向压力传递。

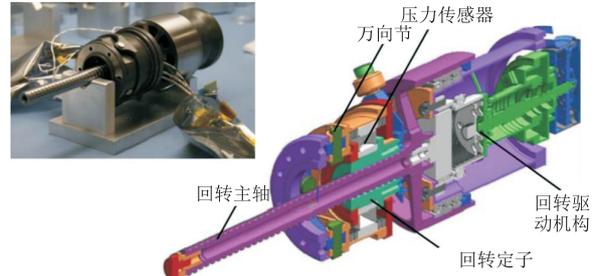


图 8 回转钻进系统组成

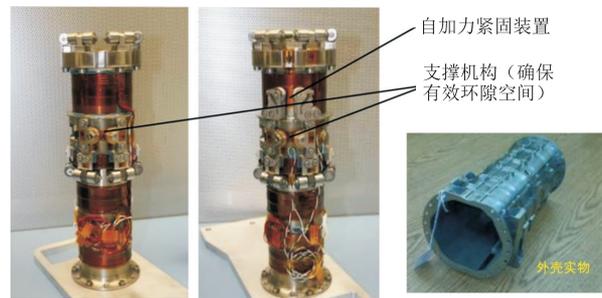


图 9 密封保护壳系统组成

#### 6 接触式稳定系统

接触式稳定系统包括钻进稳定装置和钻头稳定装置,如图 10 所示。在取样钻探中,该系统不仅对钻进过程提供空间稳定性保护,也是为钻头提供开始钻进命令的标志。当钻进稳定装置的两个铰接式触端触及火星表面时,系统能够根据中心目标点的位置对装置进行微调,以确保钻头中心同目标点相重合。一旦确定好空间位置(两个触端需同时接触火星表面),系统通过锁紧装置实现机械臂的三个平移自由度和一个回转自由度的锁定,确保整个钻进系统处于稳定状态,然后开始取样钻进。机械臂的锁定是根据接触系统的触发力大小确定的,系统的设定值为 40 N,可通过弹簧和密封元件的调整实现

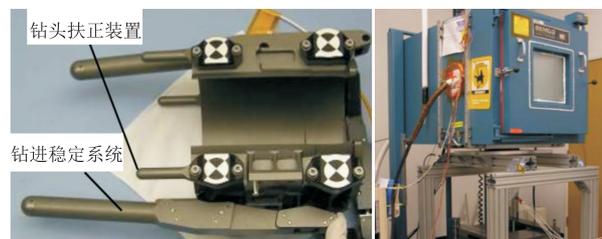


图 10 接触式稳定系统及极端条件室内测试(10 kN,  $-70^{\circ}\text{C}$ )

触发和复位的双过程。

取样钻进系统经过室内温度( $\pm 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、力学(10 kN)、气压(高、中、低)等多种变化环境的测试后,又相继开展了同岩屑运移、处理分析等系统的联动测试,验证其可靠性后进行了装载,为“好奇号”的火星探测提供了最为直接的科学手段。

## 7 结论

本文根据 NASA 的公开资料,分别从火星探测意义、“好奇号”火星车取样钻探概况、取样钻探要求和取样系统组成情况进行了论述,主要结论如下:

(1)火星表面不确定环境因素和取样钻探动力技术问题是系统设计中应考虑的主要技术因素,取样钻探工艺较全面钻探对动力要求低;

(2)取样钻探系统应围绕智能化、模块化、轻量化展开,从系统组成上可划分为接触式稳定系统、辅助结构系统、压力和回转传递系统、封闭保护壳(稳定器)系统、钻头系统、转盘系统、主动轴系统和冲击钻进系统;

(3)取样钻探系统技术原理同传统取心钻探既有类似之处,也有自身特殊要求,特别是接口设计、样品的收集、多因素影响下的密封和稳定性等需要综合多学科先进技术完成;

(4)由于对火星的取样钻探是人类的首次尝试,实施中出现技术问题无法避免,如:2016年底—2018年中旬,“好奇号”由于技术问题(未详细公开)一度处于停滞状态,加之相关技术资料的保密性,火

星取样钻探的研究工作亟待加紧实施,也是进一步认识火星的关键基础。

## 参考文献:

- [1] [https://www.nasa.gov\[EB/OL\]](https://www.nasa.gov[EB/OL]).
- [2] 牛磊星,孙平贺,王稳石,等.“好奇号”火星钻探概况[C]//中国地质学会探矿工程专业委员会.第十八届全国探矿工程(岩土钻掘工程)技术学术交流年会论文集.北京:地质出版社,2015:778—783.
- [3] Heldmann, J.L., Stoker, C.R., Gonzales, A. et. al. Red Dragon drill missions to Mars[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 141: 79—88.
- [4] Navarathinam, N., Lee, R., Borschiov, K. Northern light drill for Mars: Performance evaluation[J]. *Acta Astronautica*, 2011, 68(7—8): 1234—1241.
- [5] Szwarc, T., Aggarwal, A., Hubbard, S. A thermal model for analysis and control of drilling in icy formations on Mars[J]. *Planetary and Space Science*, 2012, 73(1): 214—20.
- [6] 蒋国盛,鄢泰宁,王荣璟,等.火星浅层钻探和取样技术分析[J]. *地质科技情报*, 2008, 27(1): 35—37.
- [7] Helmick, D., McCloskey, S., Okon, A., et. Al. Mars science laboratory algorithms and flight software for autonomously drilling rocks[J]. *Journal of Field Robotics*, 2013, 30(6): 847—874.
- [8] Winterholler, A., Roman, M., Miller, D. P., et. Al. Automated core sample handling for future Mars drill missions[J]. *European Space Agency ESA SP*, 2005, 603: 211—218.
- [9] Zacny, K., Cooper, G. Considerations, constraints and strategies for drilling on Mars[J]. *Planetary and Space Science*, 2006, 54(4): 345—356.
- [10] Cannon, H. N., Stocker, C. R., Dunagan, S. E., et. al. MARTE: Technology development and lessons learned from a Mars drilling mission simulation[J]. *Journal of Field Robotics*, 2007, 24(10): 877—905.