

月球熔岩管探测与开发方案设计

童玉奇¹, 崔宇新^{2,3}, 许惟扬¹, 韩亮亮¹, 方蒙生³, 张崇峰³, 肖龙⁴, 王江⁴

(1. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109; 2. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191;
3. 上海航天技术研究院, 上海 201109; 4. 中国地质大学行星科学研究所, 武汉 430074)

摘要: 在总结前期探测成果和前人研究的基础上, 结合对地球熔岩管洞穴的实地考察, 深入分析月球熔岩管洞穴的探测开发价值与挑战。结合月球遥感探测数据, 针对不同洞口构造的熔岩管, 以中丰富海及静海两个典型熔岩管洞穴为案例, 构建了由月面平台、探测器及自主机器人等组成的联合探测方案。围绕未来建设月球熔岩管洞穴基地的目标, 深入分析熔岩管洞穴开发建设需求与挑战, 进一步提出了熔岩管洞穴内部场坪建设、通信能源部署以及居住设施建造方案。

关键词: 月球熔岩管; 月球地下探测; 载人月球探测; 月球基地; 月球建设

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)04-0328-10

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230146

引用格式: 童玉奇, 崔宇新, 许惟扬, 等. 月球熔岩管探测与开发方案设计[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(4): 328-337.

Reference format: TONG Y Q, CUI Y X, XU W Y, et al. A scheme design for lunar lava tube exploration and development[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(4): 328-337.

引言

作为地球唯一的天然卫星, 月球一直是国际航天活动的焦点。随着技术的不断进步, 月球探测正朝着更精密、更先进的方向发展。目前, 许多国家都提出了有关开展载人月球探测工程和月球基地建设的规划和设想。美国提出的“星座”(Constellation)计划^[1]和当前开展的“阿尔特弥斯”(Artemis)计划^[2], 以月球南极为重点, 旨在建立支持长期载人活动的前哨站。日本^[3]、俄罗斯^[4]、欧洲航天局(European Space Agency, ESA)^[5]也相继提出了未来月球开发的方案设想。中国通过空间站建造和探月工程“绕、落、回”任务积累了丰富的技术和资源, 已正式宣布启动载人月球探测工程, 计划在2030年前实现载人登陆月球。尽管月球已进入边探测、边认识、边利用新阶段, 但由于受到月球极端环境的限制, 实施载人月球活动和建设月球长期驻留基地仍然面临诸多挑战。

“阿波罗”(Apollo)计划是迄今唯一一次实现载人登月、月面停留和探测的载人登月项目。“阿波罗17号”(Apollo 17)宇航员在月球表面停留达75 h, 创下了人类在月球停留的最长记录。然而, 目前“阿尔特弥斯”任务计划的第一阶段计划持续时间为6.5 d^[6], 随

着月面驻留时间的延长, 人类月面长期生存也面临新的挑战。根据“嫦娥四号”(CE-4)中子与辐射剂量探测器(Lunar Lander neutrons and Dosimetry, LND)测量的月表辐射环境, 月表辐射剂量相当于 $1\ 369\ \mu\text{Sv/d}$ ^[7], 是地球的200倍, 长期辐射暴露可能会超出宇航员辐射剂量阈值^[8]。月球微流星撞击可覆盖约6.6%的月面^[9], 增加了设施受损的风险。根据“阿波罗号”探测数据, 月表昼夜温差可达 $300\ ^\circ\text{C}$ ^[10-11], 月球表面的极端高低温环境将使工程材料承受极端的热负荷。此外, 月表月尘的不规则尖锐边缘及其在设备表面的覆盖积累、静电吸附会对人员、机构、器械带来危害。

月球熔岩管内部存在巨大的空间, 提供天然庇护的优势, 成为解决这些挑战的潜在方案之一。与月球表面相比, 月球熔岩管道内部相对稳定, 空间相对平整, 可能存在天然的入口(熔岩管洞穴), 具备形成加压密封空间的开发潜力。熔岩管内部不存与月表类似的昼夜温度循环, 能够保持相对温和且恒定的温度, 平均约 $20\ ^\circ\text{C}$ ^[10-11]。月表月壤层能够起到屏蔽太空辐射的作用, 与将栖息地覆盖在月壤下或埋在地表下相比, 利用月表下天然的熔岩管作为避难所更因地制宜, 因此熔岩管壁是抵御宇宙射线辐射、月尘和陨石、微陨石的天然屏障^[12]。此外, 熔岩管内部永久阴

影区可能赋存挥发分或水冰^[13],为未来资源开发和生存提供新机遇。因此月球熔岩管及熔岩管洞穴兼具科学价值和宜居潜力,备受国际各机构和学者的关注,已成为长期载人月球驻留选址的热门方向。

虽然改造和利用星球洞穴是早期星球开发和文明扩张的有利途径,但将这些洞穴转变为适合人类居住的空间并非没有挑战。

本文将在综合前人研究的基础上,深入探讨熔岩管的潜在价值,并结合未来月球基地建设的实际需求,制定月球熔岩管的探测和改造方案,为人类重返月球建设长期基地提供参考依据。

1 月球熔岩管探测与开发目标分析

1.1 月球熔岩管探测现状

在“阿波罗”计划(20世纪60—70年代)期间,地质学家Greeley^[14-15]首次提出了月球可能存在熔岩管道的猜测,他认为熔岩流可在月表下形成蜿蜒数千米的管道。随后,Murase^[16]的分析显示,月球上的熔岩流黏度至少比地球低一个数量级,外加月球表面的重力只有地球的六分之一,月球熔岩流速度大约是地球的两倍,月球上的熔岩管规模应该更大。此外,在“阿波罗15号”(Apollo 15)任务期间,宇航员Dave Scott等在月球巡游车的帮助下对月溪进行拍摄,得到了人类迄今为止最接近熔岩流痕迹拍摄的照片,为地下熔岩管道的存在提供了潜在证据^[15]。

在Greeley^[14-15]及其同时代研究者对熔岩管进行初步的表征后,与月球熔岩管相关的研究迅速增加。部分科学家开始着眼于熔岩管探测方法开发、月球熔岩管物理和力学参数研究^[17]。但直到几十年后,随着月球表面成像技术的发展与新一代轨道器的发射,科学家们通过高分辨率成像仪等设备才绘制出熔岩管细节。2010年以来,美国“月球勘测轨道器”(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)通过搭载的窄角相机高分辨率成像仪(high-resolution Narrow Angle Camera, NAC)发现了多个直径5~900 m的熔岩管洞穴^[18-20]。2011年,印度“月船1号”(Chandrayaan 1)任务利用地形测绘相机(Topographic Mapping Camera, TMC)和超光谱成像仪(HyperSpectral Imager, HySI)建立了天窗周围区域的高精度地形剖面图^[21]。而美国“圣杯轨道器”(Gravily Recovery And Interior Laboratory, GRAIL)基于对月球浅部重力的探测,发现熔岩管宽度可超千米^[22]。

1.2 月球熔岩管探测与开发目标

月表坍塌形成的空洞的特征、来源和性质目前未

形成定论,可能存在有多种起源^[23]。目前较广泛的起源解释之一认为,在月球早期地质活跃时期,由地下熔岩流动冷却后形成的巨大、类似隧道的相对稳定和平坦的内部空间,即月球熔岩管,由于长期的地质活动、碰撞事件和月震等因素的影响^[24],月表下较浅层的熔岩管道部分坍塌,形成可以进入的天窗,即熔岩管洞穴。与月球表面相比,月球熔岩管洞穴内部具备清洁、恒温、结构稳定和防辐射等特点,因而兼具科学价值和宜居潜力,熔岩管洞穴的探测与开发主要围绕科学目标、原位资源利用与原位建造3个方面开展。

1) 科学目标

熔洞是人类首次进入和探索地外天体地下空间的重要机遇,探测熔洞,可提供熔洞起源最直接的证据,研究熔岩管内部物质和环境,具备巨大的科学价值。

- (1) 通过岩浆活动性质理解月球地质演化;
- (2) 获取未经空间风化的地下样品深化对太阳系起源的理解;
- (3) 入口附近可能存在保存良好的撞击溅射物;
- (4) 永久阴影区可能存在挥发分或水冰;
- (5) 适合开展极端环境生物学研究。

2) 原位资源利用

在月球表面环境下,羟基或水分子不容易保存,而熔岩管内部的环境与极区永久阴影区非常相似,可保存彗星、小行星、太阳风植入、内部排气和其它来源在较长时间内释放的挥发物,具备水和氧气等原位资源利用潜力。

3) 原位建造

熔岩管具备巨大的可利用地下空间,月球上的熔岩管可达数十米深、百米宽,延伸的长度甚至可达千米。此外在月球上3.5 m厚的熔岩管顶部可以支撑275 000 kg/m²的负荷,而现有的观测数据表明,月球熔岩管的顶部厚度可以达到数十米,能够承受更大的负荷^[25]。熔岩管内部具备原位建造的主要材料:月壤、月岩及潜在水资源。月面极端环境,包括超真空、低重力和大温差,对建造材料的制备过程(如烧制制砖)具有显著影响^[26],材料在恶劣的服役环境下要求具备高性能,而材料在熔岩管温和的服役环境下,可降低性能要求。

在过去的50多年里,很多科学家都提出过利用月球熔岩管原位建立月球基地的设想。随着科技水平持续提升,人类探索月球的步伐不断加速,为了实现熔岩管宜居性改造这一未来愿景,对熔岩管的探测变得愈加紧迫和关键。

2 月球熔岩管探测任务设想

2.1 熔岩管特征及探测挑战

月球熔岩管成因与地球熔岩管相似，并具有相似的形貌特征^[25]。通过对海口熔岩管洞穴实地考察（图1），深入分析月球熔岩管内部形貌特征。



图1 地球海口熔岩管的形貌特征

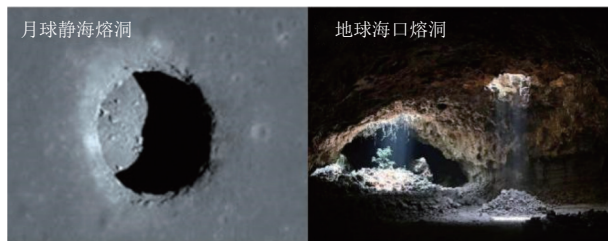
Fig. 1 Morphological characteristics of Haikou lava tubes

如图1所示，熔岩管道内部具有的巨大、类似隧道的相对稳定和平坦的内部空间。熔岩管道底部遗留岩浆流动和冷却痕迹，在地质活动影响下，熔岩管底部存在一定量的碎石。

根据对熔岩管洞穴的入口类型的分类，可以将熔岩管洞穴分为垂直熔洞（开放于地表面）和斜坡熔洞（入口被土壤或岩石覆盖）两种。

1) 垂直熔洞（图2）：垂直入口是目前已发现的月球熔岩管洞穴主要形式，其特点是存在塌陷天窗，需通过部署垂直升降设施或采用飞行方式进入，天窗底部存在大量塌陷碎石及月壤堆积。

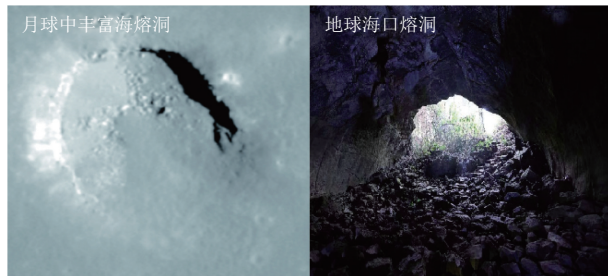
2) 斜坡熔洞（图3）：斜坡式入口属于半塌陷式结构，由于部分较浅层熔岩管洞穴洞口塌陷并堆积形成，存在直接移动进入熔岩管洞穴内部的可能，是早



(a) 月球垂直熔洞 (b) 地球垂直熔洞

图2 月球垂直熔洞和地球垂直熔洞

Fig. 2 Lunar lava tube with vertical entrance and Earth lava tube with vertical entrance



(a) 月球斜坡熔洞 (b) 地球斜坡熔洞

图3 月球斜坡熔洞和地球斜坡熔洞

Fig. 3 Lunar lava tube with slope entrance and Earth lava tube with slope entrance

期可通过月面移动探测器进入的优选目标。

基于对海口火山地质公园、黑龙江镜泊湖等多个地球熔岩管的实地考察，绘制熔岩管洞穴的结构特征图。如图4所示，熔岩管洞穴入口地形复杂，存在较大陡坡甚至垂直落差，洞口存在较多深坑与巨大石块，内部为管道地形，无自然光照。这使熔岩管洞穴探测存在诸多难点及挑战。

1) 极端地形的通过及进入

熔岩管洞穴入口地形复杂，存在较大落差和巨大



图4 熔岩管洞穴的结构特征

Fig. 4 Structural features of lava tube caves

石块, 相较于平坦的月球表面活动, 设施进入熔岩管洞穴内部需具备崎岖地形下较强的通过能力。

2) 黑暗环境下的导航与探测

作为地下空间的探测任务, 熔岩管内部无光照, 且在接近真空环境下即使采用主动光源能见度依然较低, 需具备在黑暗环境下导航和探测的能力。

3) 通信及能源支持问题

熔岩管内部对太阳及地球不可见, 需在洞外部署发电及对地通信中继设施, 通过有线或无线跳转的方式实现对洞内能源和通信支持。

2.2 月球熔岩管探测任务设想

近10年来, 利用环月遥感探测数据, 已在月面中低纬度地区发现约8个典型的熔岩管洞穴^[27], 及其下部可能存在的长达千米的熔岩管道。如表1所示, 分别分布在死湖、丰富海中部、静海、智海、丰富海西南部、马里乌斯山、施吕特撞击坑和施密特海/朗格撞击坑。由于半塌陷熔岩管洞穴从遥感影像数据上较难判定, 目前仅确定有中丰富海熔岩管存在斜坡式入口。洞穴天窗之外的地下是否存在延伸管道至今仍缺乏关键就位探测证据。

表1 月球熔岩管洞穴的分布^[25]

Table 1 Distribution of lunar lava tubes^[25]

洞穴位置	纬度/ (°)	经度/ (°)	洞口内径		洞口外径	
			尺寸/m	深度/m	尺寸/m	深度/m
死湖	44.962	25.610	140 × 110	80	280 × 210	35
丰富海中部	-0.917	48.660	130 × 110	~30	190 × 160	~15
静海	8.335	33.222	100 × 88	105	170 × 150	~5-9
智海	-35.948	166.053	100 × 68	45-65	160 × 130	15-20
丰富海西南部	-6.752	42.759	16 × 14	~35	60 × 55	~40
马利厄斯山	14.091	303.230	58 × 49	40	70 × 80	~4-10
施吕特撞击坑	-5.839	276.950	40 × 20	~45	65 × 50	~15
朗格撞击坑	-2.702	86.780	17 × 13	5	27 × 27	无法获取

月球正面低纬度及赤道月海区域存在多个熔岩管洞穴, 该区域穿越多个月球地址带, 整体地形较为平缓, 通信、移动、飞行部署等条件较好, 适合利用月面可移动探测器开展连续的大范围移动探测。如图5所示, 设计覆盖静海到中丰富海两个典型熔岩管洞穴目标的580 km探测路线, 通过串联任务一次完成静海及中丰富海熔岩管洞穴探测, 此外通过兴趣点的设置, 实现途径高价值区域如火山地质单元、撞击坑及溅射物、构造运动的全面探测。

月面熔岩管的探测任务涵盖多个方面, 包括外部环境、内部结构、物质组成以及挥发性物质的研究等, 以深入了解月球地质和环境, 为熔岩管洞穴开发奠定基础。

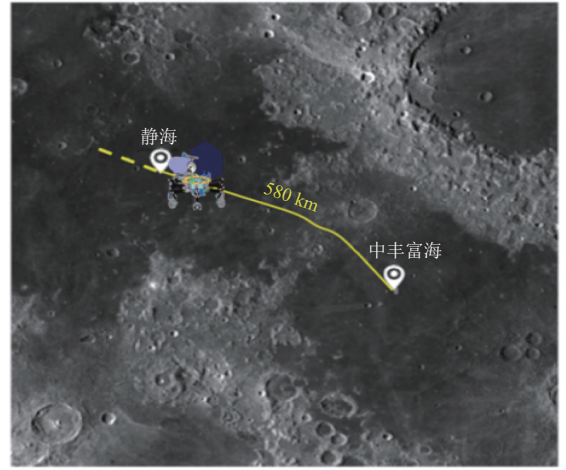


图5 熔岩管洞穴探测路线
Fig. 5 Lava tube caves exploration route

外部环境特征探测: 包括测量熔岩管洞穴周围地表的坡度、高低差、碎石分布, 以了解熔岩管洞穴的地貌环境; 研究熔岩管洞穴的入口形状、大小和方向, 塌陷迹象及牢固程度; 测量熔岩管洞穴上方覆盖的岩石类型、分布和厚度, 以理解地下结构和地质条件; 测量熔岩管洞穴周围光照水平和光照周期, 有助于规划探测任务和决定能源需求; 测量熔岩管洞穴周围地表温度及月尘含量。

熔岩管洞穴内壁物质成分分析: 熔岩流的层状堆叠序列(如图6所示), 保留了不同期次的熔岩, 通过分析其成分可以得知玄武岩熔岩流的不同期次成分变化特征。了解与古代月球玄武岩熔岩流有关的地质过程, 以绘制地表基岩的分布和年龄。

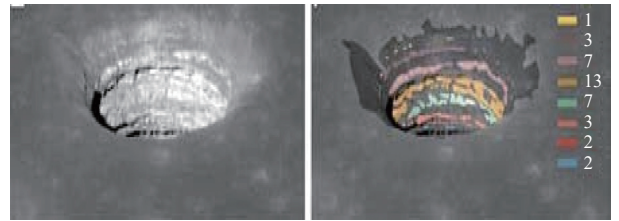


图6 静海熔岩管洞穴熔岩流层状堆叠现象^[28]
Fig. 6 The phenomenon of layered stacking of lava flows^[28]

熔岩管洞穴内部探测: 熔岩管内部空间的大小, 包括长度、宽度和高度; 熔岩管内部整体空间结构, 包括延伸范围和弯曲程度; 底部的平坦度、坡度和可能的塌陷物分布, 以评估管道底部的稳定性和地质特征; 熔岩管顶部的厚度以及相关的支撑结构强度, 评估管道的支撑强度; 温度、宇宙射线强度以及月尘、水和挥发性物质含量测量。

2.3 月球熔岩管探测方案

为深入了解熔岩管洞穴周围的地形、光照、通信

及内部信息,以中低纬月海区域的静海垂直熔洞、中丰富海斜坡熔洞为例,分别开展探测方案设计。

2.3.1 月球静海熔洞探测方案(垂直熔洞)

静海熔岩管洞穴为垂直熔洞,熔岩管洞穴洞口为椭圆形坑穴,外径约为 $170\text{ m} \times 150\text{ m}$,漏斗形状的岩壁约 10 m 深,内径约为 $100\text{ m} \times 88\text{ m}$,熔岩管洞穴外沿到坑底的最大深度达到了 115 m ,坑壁垂直,部分存在突出或凹陷,坑底平坦,覆盖着巨石。主探测器难以直接进入,因此需采用主探测器+子探测器的联合探测方案。其中,主探测器的任务包括:①携带子探测器实现千米级月球表面机动越障,将子探测器从着陆点转移至熔岩管洞穴外沿;②实施熔岩管外沿区域详查,测量通往入口的坡度,调查碎石和坍塌结构,确定子探测器释放位置;③完成子探测器部署:在选定位置释放子探测器,并提供通信支持。

子探测器负责实施熔岩管洞穴内部详查探测,按进入方式划分,可包括系留进入式子探测器和飞跃进入式子探测器两类。其中,典型系留进入式子机器人如图7(a)所示,该系留机器人采用有线滚动机器人形式,通过两轮独立驱动,枢轴转向,具备灵活的移动性,与主探测器通过有线连接,由绳系提供供电、通信,实现长时间持续探测。双轮滚动进入深坑等地形,完成任务后依靠绳系连接返回,可重复多次使用。

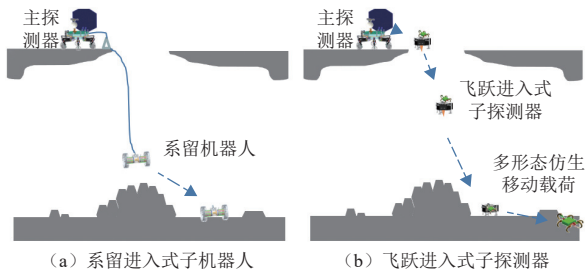


图7 静海熔岩管洞穴探测任务

Fig. 7 Mare Tranquility lava tube cave exploration

如图7(b)所示,飞跃进入式子探测器配备轻量化激光三维成像敏感器,由主探测器上方起飞后,可对熔岩管洞穴内部地形进行扫描成像,并实施导航避障飞行,并着陆于熔岩管洞穴底部平坦区域。飞跃进入式子探测器可采用轮腿一体式着陆缓冲系统,着陆后可进行熔岩管洞穴内部行走探测。为提高探测效率和成功率,可搭配多形态仿真移动载荷。其蜘蛛模式可进行多腿爬行,适用于崎岖、多障碍地形;滚动模式适用于斜坡和坑洼地形,具有较好的探测效率。

2.3.2 月球中丰富海熔洞探测方案(斜坡熔洞)

中丰富海熔岩管洞穴为斜坡熔洞,入口内径约为 $130\text{ m} \times 110\text{ m}$,深度约为 30 m 。沉积物主要分布在东

南侧和西北侧,西北侧的沉积物水平延伸约 30 m ,坡度为 $20^\circ \sim 65^\circ$ 。东南侧已经严重坍塌,形成相对较缓的坡度($10^\circ \sim 35^\circ$),多数沉积物的颗粒约小于 1.1 m 。坑洞底部相对较平坦($<10^\circ$),存在些许米级大小的岩石。主探测器可沿东南侧斜坡最缓处直接进入洞内,因此可开展主探测器与子探测器联合作业。

典型任务过程可如图8所示。探测器从着陆器释放后到达中丰富海熔岩管洞穴外沿,在熔岩管洞穴外沿利用科学载荷获取中丰富海熔岩管洞穴外部地形和地质情况数据,开展进入路径规划。随后主探测器沿最小坡度轨迹到达熔岩管洞穴入口,释放多形态仿真移动载荷或绳系机器人载荷,从机器人以爬行或滚动状态再熔岩管洞穴内部行进,到达合适区域后投放载荷。如图9所示,在熔岩管洞穴内环境初步探明、通过性满足条件的情况下,主探测器可向熔岩管洞穴内部移动,为保证探测过程中的通信要求,可在洞外额外部署通信中继设备。

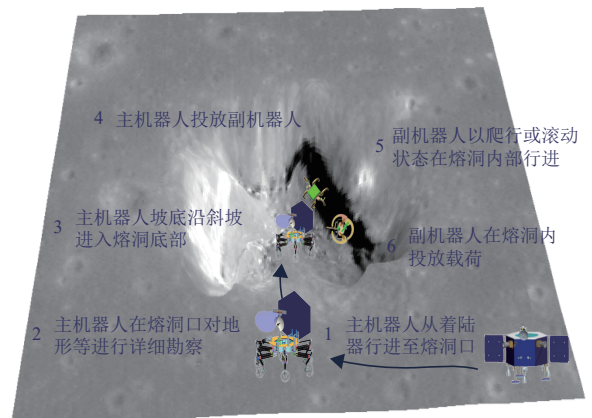


图8 中丰富海熔岩管洞穴探测任务

Fig. 8 Mare Fecunditatis lava tube cave exploration



图9 主探测器与子探测器联合作业

Fig. 9 Main detector and sub-detector joint operation

如图10所示,在熔岩管洞穴探测系统的组成上,主探测器具备极端地形多次出入移动能力,从探测器具备复杂未知地形的单次探测能力,通信、能源模块设备具备熔岩管洞穴外的保障支持能力。

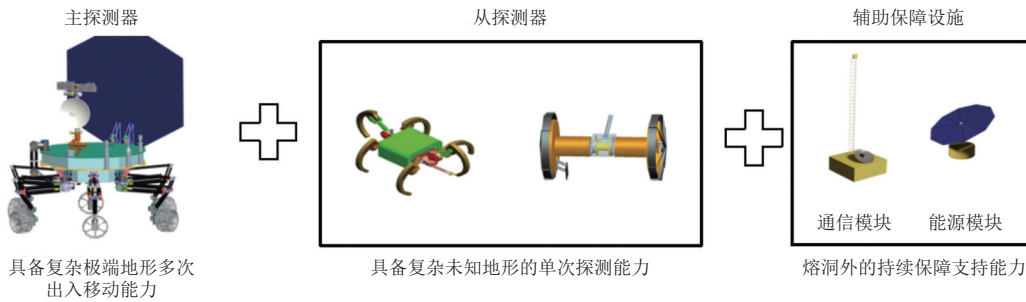


图 10 熔岩管洞穴探测器系统方案
Fig. 10 Lava tube exploration system method

如图11所示, 通过“主从式”探测器, 以及能源、通信等辅助保障设施, 实现具有多种探测模式、多样

化进入能力的“1 + N + N”的三维复合探测系统, 形成熔岩管洞穴进入与探测的通用系统方案。

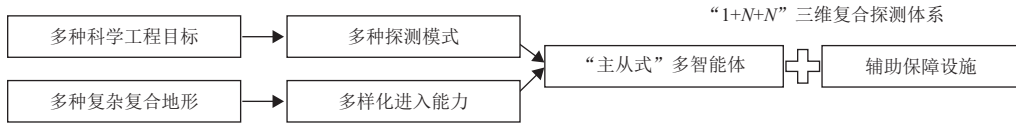


图 11 “1+N+N”的三维复合探测体系
Fig. 11 “1+N+N” three-dimensional composite exploration method

3 月球熔岩管洞穴建设任务设想

3.1 熔岩管洞穴建设需求及挑战

月球熔岩管洞穴作为月面的天然洞穴, 具备重要的建设开发价值。因此面向后续建设载人月球基地的美好愿景, 进一步提出关于月球熔岩管洞穴基地建设方案的设想。以建立熔岩管洞穴内载人科研站为目标, 进行适宜性改造工程, 如图12所示, 主要内容包括: 通过熔岩管洞穴底部碎石清理、地形改造等实现熔岩管洞穴内部场坪建设; 通过熔岩管洞穴入口通道建立实现人员/货物进出; 通过在月表部署通信站、能源站实现熔岩管洞穴内部通信、能源支持; 通过在熔岩管洞穴内部部署舱体设施、原位打印建造居住空间或整体改造熔岩管洞穴等方式实现月球站建设。

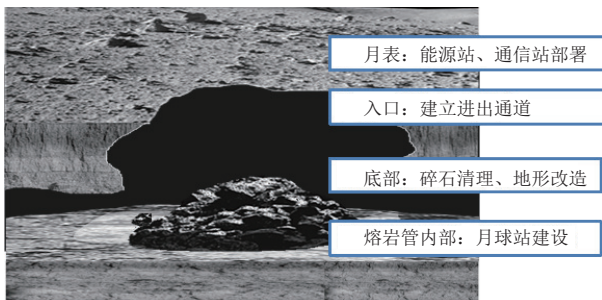


图 12 月球熔岩管洞穴建设需求
Fig. 12 Lunar lava tube construction requirements

因此, 熔岩管洞穴建设需面临大型设施及人员进入、天然地形的改造、原位建造材料的使用及运输、熔岩管洞穴结构气密性研究等多重挑战。

1) 大型设施及人员进入

对熔岩管洞穴进入通道的建设, 将大型设施及人员部署至熔岩管洞穴内部。

2) 天然地形的改造

对熔岩管洞穴底部碎石清理和平整, 对岩壁及顶部的修正和加固。

3) 原位建造材料的使用及运输

熔岩管洞穴内部经分析主要为熔岩冷却的玄武岩结构及受撞击掉落的碎石, 对采用月壤原位建造工艺或从月球表面大量开采和运输提出要求, 建造材料的选择需考虑表层月壤放射性的影响。

4) 熔岩管洞穴结构气密性研究

考虑直接利用熔岩管洞穴内部空间开发或填补形成密闭空间, 形成整体式地下月球基地, 需进一步了解月球熔岩管洞穴岩壁结构的气密性, 或提出相应加压处理方案。

3.2 建设方案

熔岩管洞穴建设的主要内容包括熔岩管洞穴内部地形改造、人员/货物进出通道、熔岩管洞穴内部通信、能源支持以及加压环境部署或建设。

3.2.1 场坪建设方案

熔岩管洞穴入口地势复杂, 且因塌陷洞底存在较多碎石。为了便于实施月面建造, 需首先进行场坪建设, 如图13所示。对于斜坡熔洞, 可部署月面工程建造设备(月壤铲取、转移机器人等)直接进入, 实施洞穴内部表层可能的放射性月壤及多余月壤清理, 按需预留部分月壤开展原位建造, 实施地面填平、夯实

和涂层处理, 确保地面的平整度和稳定性; 对于纵深较高的垂直熔洞, 则需先行布设起吊设施, 以满足工程建造设备进入需要。各类工程建造设备的电源和通信

信由熔岩管洞穴外侧能源与通信中继设备保障。熔岩管洞穴内场坪平整的面积可结合熔岩管洞穴内部基地建设预期规模分阶段扩大。

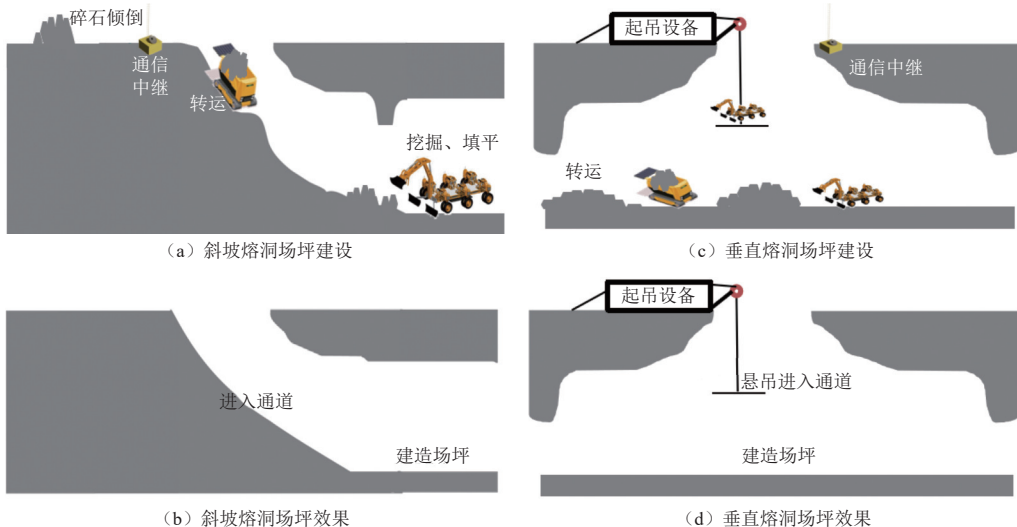


图 13 场坪建设方案

Fig. 13 Ground base construction

3.2.2 通信设施建设方案

为了保持熔岩管洞穴内部与地球的有效通信, 熔岩管洞穴外沿需设置地对地定向天线, 熔岩管洞穴内需部署通信及数据管理中心, 器间通信需部署有线链路或UHF基站。

如图14所示, 熔岩管洞穴内部中继组网分为固定与移动两部分以最大化通信覆盖; 移动中继, 例如建造机器人或无人车, 为熔岩管洞穴建设提供支援。

熔岩管洞穴位于中低纬区域, 无长期光照条件, 因此过月夜可考虑太阳能电池阵+储能电池的组合方案, 或使用月面反应堆电源。其中, 前者技术成熟度较高, 但系统质量较大, 适用于功率较小的建设初期; 核反应堆电源主要涉及反应堆部署与填埋问题, 美国航天局公布的月面反应堆电源项目征集书指出, 月面1 km 远处的剂量率不得比本底高50 mSv/a。常规的反应堆屏蔽结构笨重, 考虑到从地球到月球的运输成本, 如图15所示, 可通过反应堆的洞外精确部署和地下填埋实现放射性热稳定性管理, 最大程度降低辐射对月表环境的污染。



图 14 通信设施建设方案

Fig. 14 Communication facility construction

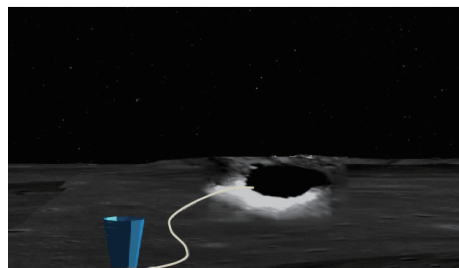


图 15 能源设施建设方案

Fig. 15 Power facility construction

3.2.3 能源设施建设方案

为了满足航天员长期驻留需求, 熔岩管洞穴内基地需具备不间断的能源供应能力, 满足月夜期间设备、舱段温度保持及设备运行功率需求。由于大多数

3.2.4 月球熔岩管居住设施建造方案

1) 充气舱方案

熔岩管洞穴建设初期可依赖充气舱作为临时或半永久性居住设施, 对于斜坡熔洞, 如图16所示, 可利

用运载器将带有在地预制的核心舱体及其内部设备着陆在月球熔岩管洞穴附近的适当位置, 然后运至拟建洞穴选址地点。充气舱方案具有快速部署、低成本、轻便、可移植性的特点, 作为临时居住设施是熔岩管洞穴建设初期一种快速、经济和灵活的解决方案。



图 16 充气舱方案
Fig. 16 Inflatable cabin solution

2) 整体式部署方案

通过大型运载实现熔岩管洞穴科研试验站的整体式部署, 即将居住模块、试验模块、能源模块以及其他模块以一体化运输, 图17为月球重型运载实行整体式部署过程示意、从上往下依次为行李/设备舱、植物栽培/健身舱、睡眠舱/餐厅、驾驶室等。通过进入式着陆系统有效实现在熔岩管洞穴内的一次性部署, 该部署模式能够大大缩短建设周期, 但对于导航运载能力要求较高, 科研实验站整体规模有限。

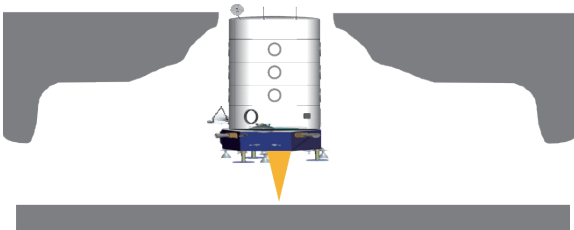


图 17 整体式部署方案
Fig. 17 Direct deployment solution

3) 舱体组装方案

大型垂直熔洞可将基于地球或月球原位建造的设备设施, 设计成模块化和自动化以便快速部署和连接。熔岩管洞穴建设初期, 可利用运载器将带有在地预制的舱体着陆在月球熔岩管洞穴附近的适当位置, 然后运至拟建洞穴选址地点, 如图18所示, 通过在洞口设置吊装转移机构, 完成舱体的组装衔接。熔岩管洞穴建设中后期, 可充分利用月球原位资源, 通过月壤烧结直接使用月球表面原材料进行3D打印制造舱体。

该部署模式以模块化、自动化和中后期原位资源利用为特点, 能够快速建造和部署设备及设施, 可在熔岩管洞穴建设多阶段应用, 熔岩管洞穴实验站规模将不受限。它具有灵活性、可持续性和成本效益, 但建设初期依赖运载器, 具有一定的技术挑战。

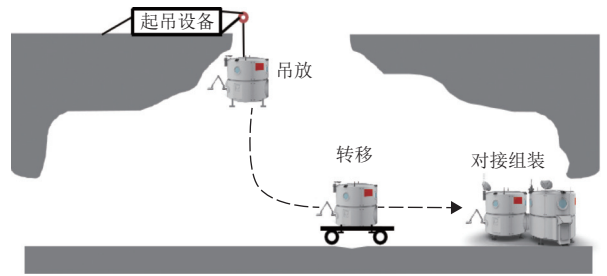


图 18 舱体组装方案
Fig. 18 Cabin assembly solution

4) 原位建造方案

熔岩管的玄武岩结构稳定, 但内部孔隙结构较复杂(图19), 气密性主要取决于岩石结构和孔隙度^[29]。目前尚缺乏月球熔岩管玄武岩孔隙连通性的研究, 若月球熔岩管玄武岩气密性低, 在加压前需密封改造处理。如图20所示, 对于小型熔岩管洞穴, 可通过3D打印等作业机器人, 对熔岩管洞穴岩壁进行结构加固、密封镀膜处理, 完成基本结构建设和设备装配后, 对洞穴入口进行封闭建造, 建设月面电梯。如图21所示, 对于大型熔岩管洞穴, 可分区进行大规模改造、大规模原位建造, 将熔岩管内部部分区封闭形成气密空间, 形成具有多功能区的熔岩管宜居生态系统。

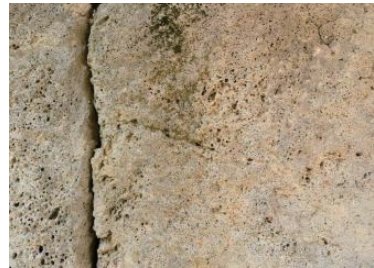


图 19 海口熔岩管洞穴多孔玄武岩
Fig. 19 Porous basalt from Haikou lava tube

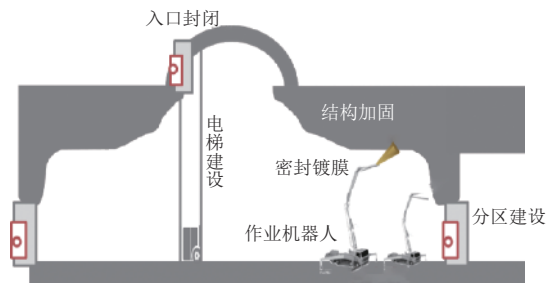


图 20 熔岩管洞穴原位建造方案
Fig. 20 Lava tube cave in-situ construction solution

建设支持载人长期运行的月球科研站, 需通过分步建设形成不同功能区域^[31]。通过充分利用月球熔岩管洞穴, 逐步建设月球研究站, 如图22所示, 最终月球熔岩管被建设为涵盖了资源开发、科研试验与日常

生活所需的8个主要功能区,形成功能完善可持续运行及拓展的月球熔岩管科研站。



图 21 大型熔岩管原位建造^[30]
Fig. 21 Large-scale lava tube cave in-situ construction

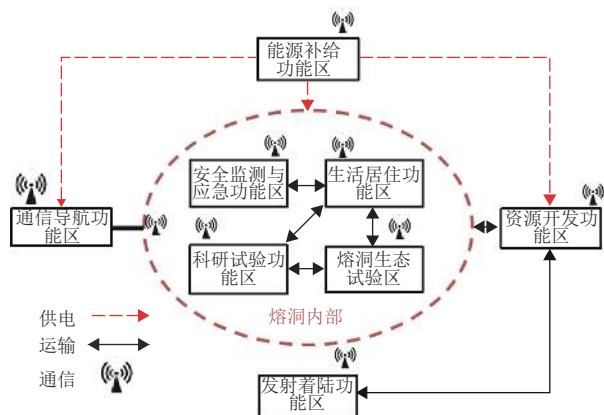


图 22 熔岩管月球站功能区域建设
Fig. 22 Lunar lava tube station functional areas

4 结 论

月球熔岩管的探索 and 开发极具创新性和挑战性。本文基于对月球熔岩管前期探测研究成果的总结以及对地球熔岩管的实地考察,提出了月球熔岩管洞穴的探测与开发路线。以中丰富海斜坡熔洞和静海垂直熔洞为典型案例,构建了由月面平台、探测器和自主机器人等组成的联合探测方案,为月球熔岩管的开发实现科学探测及工程探测数据输入。围绕月球熔岩管基地的建设需求,提出了熔岩管内部场坪、通信能源、居住设施等方案设想,为未来月球基地建设提供了重要的参考依据。

参 考 文 献

[1] RHATIGAN J L. Constellation program lessons learned: Volume I- Executive summary: NASA/SP-2011- 6127/VOL I [R]. Washington, DC, USA: National Aeronautics and Space Administration, 2011.

[2] BRIDENSTINE J. Artemis plan: NASA's lunar exploration program overview: NP-2020-05-2853-HQ [R]. Washington, DC, USA: National Aeronautics and Space Administration, 2020.

[3] 范唯唯. JAXA提出2030年载人登月计划实施方案[J]. 空间科学学报, 2017, 37(6): 643-643.

FAN W W. JAXA puts forward the implementation plan of manned moon landing plan in 2030[J]. Chinese Journal of Space Science, 2017, 37(6): 643-643.

[4] 王霄, 吴润生. 俄罗斯载人登月发展现状及趋势[J]. 国际太空, 2018(11): 44-49.

[5] CESARETTI G, DINI E, DEKESTELIER X, et al. Building components for an outpost on the lunar soil by means of a novel 3D printing technology[J]. Acta Astronaut, 2014, 93: 430-450.

[6] COAN D. Exploration EVA system concept of operations summary for Artemis Phase lunar surface mission [C]//Proceedings of EVA Exploration Workshop 2020. Houston, USA: [s. n.], 2020.

[7] REITZ G, BERGER T, MATTHIAE D. Radiation exposure in the moon environment[J]. Planetary and Space Science, 2012, 74(1): 78-83.

[8] NASA. The Apollo missions[EB/OL]. (2021)[2023-10-25]. https://www.nasa.gov/mission_pages/apollo/missions/index.html.

[9] CREMONESE G, BORIN P, LUCCHETTI A, et al. Micrometeoroids flux on the Moon[J]. Astronomy & Astrophysics, 2013, 551: A27.

[10] HORVATH T, HAYNE P O, PAIGE D A. Thermal and illumination environments of lunar pits and caves: models and observations from the diviner lunar radiometer experiment[J]. Geophysical Research Letters, 2022, 49(14): e2022GL099710.

[11] HARUYAMA J, SAWAI S, MIZUNO T, et al. Exploration of lunar holes, possible skylights of underlying lava tubes, by smart lander for investigating Moon(slim)[J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical And Space Sciences, 2012, 10: 7-8.

[12] ANGELIS G D, WILSON J W, CLOUDSLEY M S, et al. Lunar lava tube radiation safety analysis[J]. Journal of Radiation Research, 2002, 43: 41-45.

[13] HARUYAMA J, MOROTA T, KOBAYASHI S, et al. Lunar holes and lava tubes as resources for lunar science and exploration[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 139-163.

[14] GREELEY R. Lava tubes and channels in the lunar Marius Hills[J]. Moon, 1971, 3(3): 289-314.

[15] GREELEY R. Lunar Hadley rille: considerations of its origin[J]. Science, 1971, 172(3984): 722-725.

[16] MURASE T, MCBIRNEY A R. Viscosity of lunar lavas[J]. Science, 1970, 167(3924): 1491-1493.

[17] COOMBS C R, HAWKE B R. A search for intact lava tubes on the Moon: Possible lunar base habitats [C]//Proceedings of the Second Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century, Volume 1. Houston, USA: NASA Johnson Space Center, 1992: 219-229.

[18] HARUYAMA J, HIOKI K, SHIRAO M, et al. Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(21): L21206.

[19] STEIGERWALD B. NASA's LRO finds lunar pits harbor comfortable temperatures[EB/OL]. (2022)[2023-10-25]. https://www.nasa.gov/feature/goddard/2022/lro-lunar-pits-comfortable.

[20] MEYER J A. New methods for the discovery and characterization of lunar lava tubes using lunar reconnaissance orbiter data[D]. El Paso: University of Texas at El Paso, 2012.

[21] ARYA A, RAJASEKHAR R, THANGJAM G, et al. Detection of potential site for future human habitability on the Moon using Chandrayaan-1 data[J]. Current Science, 2011, 100(4): 524-529.

[22] BLAIR D M, CHAPPAZ L, SOOD R, et al. The structural stability of lunar lava tubes[J]. Icarus, 2017, 282: 47-55.

[23] WAGNER R V, ROBINSON M S. Occurrence and origin of lunar pits: Observations from a new catalog [C]//Proceedings of 52nd Lunar

- and Planetary Science Conference. [S. l.]: Virtual Event, 2021.
- [24] CRUIKSHANK D P, WOOD C A. Lunar rilles and Hawaiian volcanic features: possible analogues[J]. *Moon*, 1972, 3: 412-447.
- [25] 肖龙, 黄俊, 赵佳伟, 等. 月面熔岩管洞穴探测的意义与初步设想[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2018, 48(11): 87-100.
XIAO L, HUANG J, ZHAO J W, et al. Significance and preliminary proposal for exploring the lunar lava tubes[J]. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*, 2018, 48(11): 87-100.
- [26] 丁烈云, 徐捷, 骆汉宾, 等. 月面建造工程的挑战与研究进展[J]. *载人航天*, 2019, 25(3): 277-285.
DING L Y, XU J, LUO H B, et al. Lunar construction: challenges and research progresses[J]. *Manned Spaceflight*, 2019, 25(3): 277-285.
- [27] WAGNER R V, ROBINSON M S. Distribution, formation mechanisms, and significance of lunar pits[J]. *Icarus*, 2014, 237: 52-60.
- [28] XIMENES S W, ELLIOTT J O, BANNOVA O. Defining a mission architecture and technologies for lunar lava tube reconnaissance[C]// *Proceedings of Thirteenth ASCE Aerospace Division Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments, and the 5th NASA/ASCE Workshop On Granular Materials in Space Exploration*. [S. l.]: NASA, 2012.
- [29] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2015.
- [30] 宋清华, 张杨姝, 袁焕鑫. 利用熔岩管道建设月球基地的规划设想[J]. *城市建筑*, 2019, 16(7): 44-51.
SONG J H, ZHANG Y S H, YUAN H X. A tentative plan of lunar base under lava tubes[J]. *Urbanism and Architecture*, 2019, 16(7): 44-51.
- [31] 张崇峰, 许惟扬, 王燕. 载人月球探测月面活动发展设想[J]. *上海航天(中英文)*, 2021, 38(3): 109-118.
ZHANG C F, XU W Y, WANG Y. Development ideas of manned lunar surface exploration[J]. *Aerospace Shanghai*, 2021, 38(3): 109-118.

作者简介:

童玉奇(1996-), 女, 工程师, 主要研究方向: 月面活动体系论证、飞行器总体设计。

通信地址: 上海市闵行区元江路3888号805研究所(201109)

电话: 021 241-86190

E-mail: tongyuqi18@foxmail.com

许惟扬(1989-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 月面活动体系论证、飞行器总体设计。**本文通信作者**。

通信地址: 上海市闵行区元江路3888号805研究所(201109)

电话: 021 241-86118

E-mail: weiyang.xu@outlook.com

A Scheme Design for Lunar Lava Tube Exploration and Development

TONG Yuqi¹, CUI Yuxin^{2,3}, XU Weiyang¹, HAN Liangliang¹, FANG Mengsheng³,
ZHANG Chongfeng³, XIAO Long⁴, WANG Jiang⁴

(1. Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201109, China;

2. Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China;

4. Planetary Science Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper, founded on the synthesis of recent exploration achievements and prior research, supplemented by on-site investigations of diverse terrestrial lava tubes, delves into the value and challenges associated with lunar lava tube exploration and development. Employing lunar remote sensing data and focusing on lunar lava tubes in areas such as Mare Fecunditatis and Mare Tranquillitatis, the paper formulates a collaborative exploration blueprint comprising lunar landing platforms, rovers, and autonomous robots. Furthermore, in line with the objective of utilizing natural cavities within lava tubes for potential lunar base construction, the paper scrutinizes the prerequisites and complications linked to lava tube modification and construction. It presents conceptual solutions, encompassing cave interior floor construction, communication and power infrastructure deployment, as well as residential facility establishment, providing a fundamental reference for the construction of future lunar bases.

Keywords: lunar lava tube; lunar under surface exploration; manned lunar exploration; lunar base; lunar construction

Highlights:

- The developmental trend and exploration value of lunar lava tube exploration since the 1960s, alongside the characteristics and challenges of lunar lava tubes, are expounded.
- Taking lunar lava tubes in Mare Fecunditatis and Mare Tranquillitatis as examples, a proposed in-suit detection scheme based on lunar mobile robots is outlined.
- The requirements and challenges of developing and constructing the lunar lava tube base were analyzed, and the implementation methods and characteristics of each construction plan were elaborated.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]