

寻找火星远古水世界的潜在生命线索 ——耶泽罗探测记(下)

截至2021年10月8日,毅力号和它携带的“机智号”(Ingenuity)直升机已经在火星表面度过了225个火星日。在登陆火星后的日子里,毅力号表现如何,做了什么,要去往哪里?这篇文章将为你一一揭晓。

► 赵宇鹄

美国火星2020任务“毅力号”(Perseverance)火星车于2021年2月18日着陆点火星。截至2021年10月8日,毅力号和它携带的“机智号”(Ingenuity)直升机已经在火星表面度过了225个火星日。

毅力号火星车有什么特别?它与之前的火星车任务有什么不同之处?为什么要着陆在耶泽罗撞击坑?在登陆火星后的日子里,毅力号表现如何,做了什么,要去往哪里?这篇文章(上下两部分)将为你一一揭晓。

火星采样返回——一个漫长的期待

将火星样品送回地球一直是国际火星学界的头号期盼,但碍于技术和成本原因一再推迟。为应对高昂的探测成本,美国宇航局最终与欧空局于2018年签署了联合火星采样返回合作协议,提出了“三步走”采样返回计划概念(图1)。整个计划历经约10年,先后包括三次独立的发射任务。

毅力号火星车是整个计划的第一步。毅力号负责采集样品并将封好的样品管留在地面上。2026年7月第二次发射,将一辆“样品取回火星车”

(ESA研发)和一个搭载有上升火箭的“样品返回着陆器”(NASA研发)降落在毅力号附近。着陆器预计2028年8月着陆火星,新抵达的火星车会把毅力号封装好的样品管收集起来送回上升火箭。如果届时毅力号仍在运行,也将帮助运送样品。2026年9月的另一次发射还将发送一个“样品返回轨道器”(ESA研发)。轨道器搭载着NASA提供的样品捕获装置,可捕获上升火箭送至环火轨道的火星样品罐,并将其转至地球返回舱中。如果一切顺利,返回舱将于2031年9月在美国犹他州着陆。一个题外话是中国的“天问”系列任务也计划于2030年左右从火星表面采集样品,这

将是继“天问一号”之后中国的第二个火星探测任务。

此次NASA/ESA联合火星采样返回任务造价高昂。三次发射的整体造价保守估计约70-80亿美元——这还不包括样品返回后的储存设施建设。对于火星返回的样品,需要在样品的储存和处理过程中执行最严格的行星保护策略——即假设火星样品中真的存在地外生命,并且这些生命对地球生命而言非常危险。为了有效保护地球的生态系统不受潜在的外来生命的侵害,对火星样品的储存和处理等设施的要求非常高。

那以这样高昂的代价去取回火星样品,值得吗?非常值得!火星采样返回将前所未有地推进和深化对火星和



图1 NASA/ESA联合火星采样返回“三步走”概念图。整个采样计划由两辆火星车,一个着陆器和一个轨道器组成(NASA/ESA/JPL-Caltech)

太阳系的研究和理解。通过火星样品，科学家团队可以建立火星的绝对地质年代，对火星是否存在（过）生命或前生命给出明确结论，理解火星的地质和气候的演化等等。采样返回也是载人探火的必经之路，返回的样品将帮助科学和工程团队评估火星表面环境对宇航员的潜在危害和未来登火可以就位利用的资源，从而制定切实可行的载人探火任务。

毅力号的采样缓存系统

毅力号计划采集 35 个岩石土壤样品。毅力号的采样缓存系统由三个部分组成：一条长达 2.1 米的机械臂（5 个自由度），机械臂末端的工具组件（SHERLOC 和 WATSON, PIXL, 气体吹扫工具，接触感应器和采样钻头），以及车身上的采样缓存系统。采样缓存系统是毅力号火星车上的第二套机器人系统，用于完成复杂的采样和缓存操作，也是整个采样系统的控制核心（图 2）。采样管的结构如图 3 所示。

火星车的采样缓存过程大约可分为五步：选择目标、钻取样品、采样封装、暂存样品管，直到最后把（部分或全部）样品管（及质量控制对照管）从车身释放，放置在取回点。由于采样量非常有限，采样团队需要尽量采集具有代表性和地质多样性的样品，使得地球上的科学家们有机会全面深入的认识火星。在采样之前，火星车利用所携带的多种科学载荷对所采目标旁边的类似物进行综合就位分析。综合分析包括先用研磨钻头刮掉表层的尘土和风化层，再用

气体吹扫工具将表面吹干净，接着用 SHERLOC、WATSON 和 PIXL 获取目标的矿物化学组成和特征图像。之后 SuperCam 还将通过激光获取目标的光谱数据，桅杆主相机也将获取目标的高分辨图像。采样时，火星车机械臂将钻取岩芯或表土（土壤、尘埃、碎石等），每个样品约重 15 克（类似一支粉笔大小）。取样完成后，采样缓存系统将立刻对所采样品进行测量拍照，样品管加盖密封，并储存在

样品储存架里。采样过程中和采样后的综合就位分析和样品测量，不但可以帮助科学家们全面了解所采集样品性质特征，还为未来样品返回地球实验室后的数据分析，以及未来科学仪器的研发提供宝贵的数据资料。

毅力号现在在哪，未来要去哪里？

在 2021 年 6 月 1 日之前的调试阶段，毅力号顺利完成了各项检查，

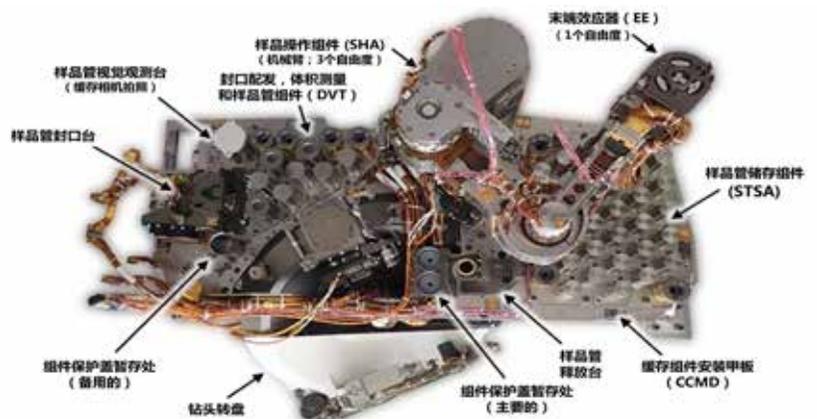


图 2 火星车“自适应缓存组件”（ACA）示意图，该组件是毅力号携带的第二套机器人系统。视角从火星车底向上看（Moeller et al., 2021）

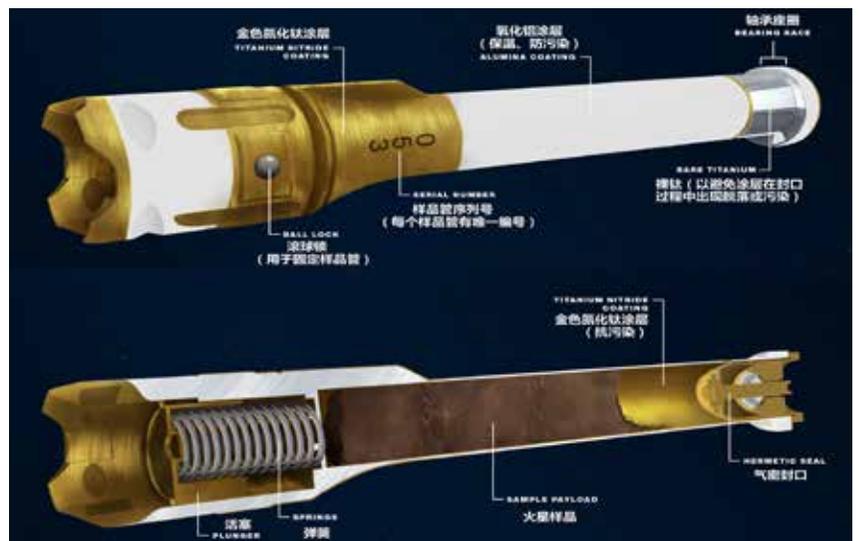


图 3 毅力号火星车携带的样品管外部和内部示意图。样品管轻质坚固且完全灭菌，避免地球物质对火星样品的污染（NASA/JPL）

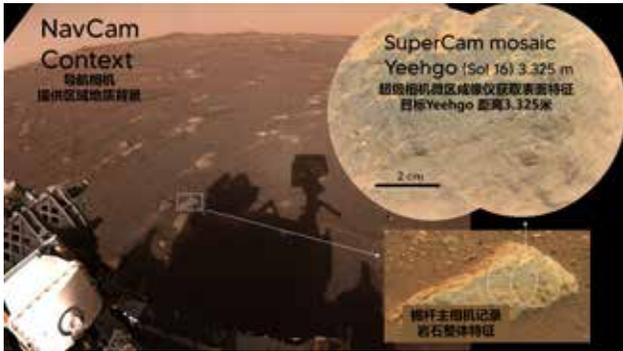


图4 毅力号调试阶段测量的第二块岩石目标 Yeehgo (图中展示了导航相机、桅杆主相机和超级相机如何相互配合, 提供同一个岩石目标的全面信息。超级相机之后还获取了岩石组成的光谱数据)

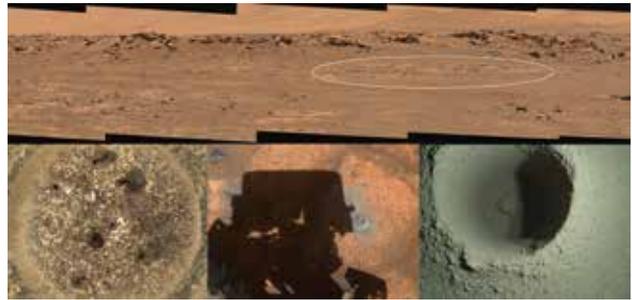


图5 毅力号的第一次采样尝试, 目标样品是位于“撞击坑底破碎粗糙”地质单元的基岩“Roubion”。上: 采样基岩出露区和周边环境; 下左: WASTON 相机拍摄的经打磨工具剥蚀掉表面风化层后的基岩特征; 下中: 第一个采样钻孔和先前打磨过岩石区域的对照; 下右: WASTON 相机拍摄钻孔内部特征(钻孔直径2.7厘米)

完成了机智号直升机的试飞和就位制氧实验, 还传回了 75000 幅影像和麦克风记录的火星表面声音(图4)。6月1日, 毅力号正式进入科学探测阶段。从 Octavia E. Butler 着陆点, 毅力号陆续向南行进了约 1.5 千米, 抵达了一个昵称为“坑底破碎粗糙”(Cratered Floor Fractured Rough)的地质单元(约 4 平方千米范围)。为什么要来这里而不是直接向着着陆点西北的三角洲挺进呢? 因为这里保存着耶泽罗撞击坑中最古老的地质单元(早~中诺亚纪)。这里比邻近的塞塔(Seitah)地质单元(中诺亚纪)更古老, 比三角洲单元(早西方纪)可能老上几亿年。这也将是迄今为止所有巡视任务在火星表面探查过的最古老地质体。如果能够将这些珍贵的古老样品送回地球实验室, 将令整个火星学界欣喜若狂。相邻的塞塔地质单元也值得探查, 这里存在着基岩、山脊、层状岩石和大量沙丘。如果让毅力号穿越这个区域会非常危险, 因此这里主要由机智号从空中探查。

2021年8月, 毅力号进行了首次采样尝试。采样目标是位于“撞

击坑底破碎粗糙”地质单元的基岩“Roubion”(图5)。在采样正式开始之前, 毅力号对采样目标进行全方位的综合测量。这块看起来较亮的岩石表层被打磨工具磨开后, 微区相机记录下岩石表层较红的物质和指示着水作用的内部结构。钻取后的岩石粉末呈现灰色, 指示着还原的环境特征。钻取结束后, 毅力号再次拍摄了钻孔内的情况, 以便为样品分析提供钻取深度等基础数据。但是, 令人意外的是, 样品缓存相机在对样品管拍照时发现管内空空如也, 样品并没有装进管中。采样团队仔细评估了所有传回的数据,

认为取芯器本身没有任何异常, 在取芯器经过的工作区域也没有发现掉落的岩芯或岩芯碎片; 通过对钻孔内的图像分析, 采样团队认为应该是岩石本身不够坚固, 钻样过程中仅产生了岩石粉末和小碎片, 没有产生岩芯。虽然这次采样遇到了意想不到的情况, 但采样团队毫不气馁, 决定继续前往南塞塔区域, 开展第二次采样尝试。此外, 虽然没有采集到岩芯样品, 但封装在样品管中实际装入了火星大气。火星大气样品也是珍贵的火星样品, 一旦返回地球, 它将帮助科学家们深入理解火星的大气变化和气候演化。

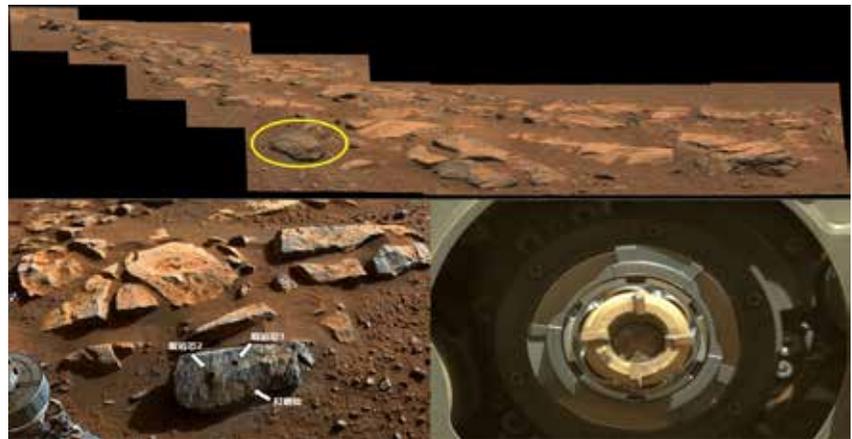


图6 毅力号第二次采样目标——昵称为“罗切特”的火山岩块(上图中黄圈圈出了“罗切特”; 左下图可见机械臂对“罗切特”打磨和钻取岩芯后留下的痕迹; 右下图可见岩芯进入了样品管中)

8月26日左右,毅力号在“Artuby”山脊附近的Citadelle区域物色到了第二个采样目标——一块昵称为“罗切特”(Rochette)的岩块。和上一次采样目标不同,这块岩石看起来棱角分明,表面有风沙留下的擦痕,说明这块岩石足够坚硬(图6)。当磨去“罗切特”表层仔细观察,可以初步判断这是一块玄武质的火山岩。这块岩石的表面曾经与水相互作用,岩石内部可见水蒸发后留下的少量硫酸盐(图7)。

在判定这块岩石足够坚硬之后,采样团队在这块岩石上采集了一对岩芯(“Montdenier”和“Montagnac”)。“罗切特”属于耶泽罗撞击坑中较为年轻的玄武岩,通过准确定年,可以帮助科学家们重建耶泽罗的地质历史时间线,特别是耶泽罗撞击坑的形成、古湖的出现和消失以及过去火星表面的气候变化等等。盐颗粒中还可能捕

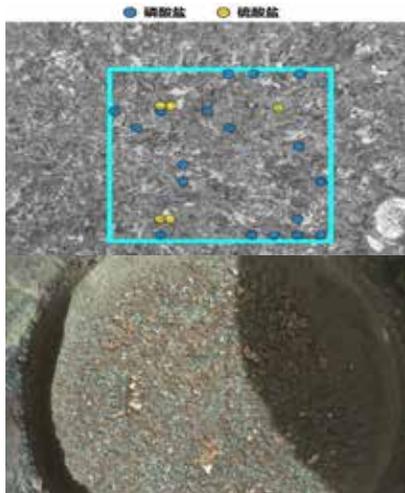


图7“罗切特”表面被打磨后露出了内部微区特征(左图为WASTSON相机拍摄的八张微区影像合成图,显示了打磨面的整体特征(直径5厘米);右图为SHERLOC对打磨面局部区域进行物质成分分析,蓝框约为6.5平方毫米;图上蓝点为磷酸盐,黄点为硫酸盐)



图8 毅力号火星车第210个火星日已抵达南塞塔区域



图9 毅力号第一次科学活动路线示意图(黄色和白色虚线)。毅力号目前已经位于塞塔南区。在完成考察和采样之后,毅力号将重新向北返回着陆点,再向西前往“三岔口”

获了古代火星水或保存有古代生命的迹象,可能为火星古代气候和宜居性提供重要线索。

携带着两个火山岩芯,毅力号继续前往下一个潜在的采样区“南塞塔”(图8)。南塞塔的地质年龄比Citadelle区域更加古老。10月初,由于日凌(地球和火星运行至太阳两侧且三者近乎处于一条直线上),所有的火星任务都进入了为期几周的休眠期。在这之后,毅力号将继续在南塞塔区域开展探测。

一旦完成对这两个古老地质单元的考察,毅力号将重新返回最初的着陆点,并从那里向西北的内雷特瓦(Neretva)三角洲挺进(图9)。“三

岔口”是毅力号第二次科学活动的起始点,从那里毅力号可以到达古三角洲底部,并沿着山谷向三角洲的上层爬升,直到穿过三角洲区域进入内雷特瓦河谷。这将是人类首次对火星的三角洲和古河道开展就位探测。如果状态良好,毅力号还有机会向着耶泽罗的坑缘前进,在这里可以探访到耶泽罗撞击坑最初形成时的物质。如果毅力号可以走出耶泽罗撞击坑,它还将有望进入更广阔的尼利高地,继续探访这片古老高地。■

(作者系中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心研究员)

(责编:倪伟波)