

# MAVEN 火星之旅

李丹<sup>1,2</sup> 徐秋予<sup>1,2</sup> 王天才<sup>1,2</sup> 魏勇<sup>1,3</sup> 王誉棋<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院大学 101408; 2. 中国科学院国家空间科学中心 100190;  
3. 中国科学院地质与地球物理研究所 100029)

每当我们仰望星空,总是会有无尽的遐想与揣测,我们在宇宙中是否孤独?人们心系答案,开展深空探测,以精细尖端的技术构筑庞大浩繁的工程,将人类的感知延伸到太阳系的行星、卫星、矮行星、小行星、彗星等天体。而奔赴火星,正是人类展开深空探索的关键一步。

自古以来人类就对火星情有独钟。火星在西方被冠以“战神马尔斯”的名称,是象征着战争的行星。而在我国古代,由于火星荧荧似火,行踪捉摸不定,因此被称为“荧惑”,并且古人将“荧惑守心”视为不祥之兆。时至今日,火星仍然令无数人好奇与着迷,火星探测也成为我国当前深空探测的关键领域。2021年,建党100周年之际,“天问一号”探测器的成功入轨与着陆,不仅标志着中国首次自主火星探测任务取得阶段性成功,也点燃了科学家与民众对于火星探索的热情。

自1962年前苏联发射“火星一号”探测器以来,人类对火星已经开展了数十次探测。其中,火星大气与挥发物演化探测器(MAVEN)于2013年11月由美国国家航天航空局发射,是一众火星探测任务中杰出的代表。本文将在简要回顾火星探测历史的基础上,就MAVEN探测器的有效载荷、科学目标以及科学成果进行简要介绍。

## 1. 火星探测历程

20世纪60年代以来,多个国家已进行火星探测活动共48次,成功及部分成功实施的发射任务仅28次。21世纪以来成功开展的火星探测任务如下(表1)。

目前成功登陆火星的探测器仅有9个,分别是:海盗一号、海盗二号、探路者、机遇号、勇气号、凤凰号、好奇号、洞察号、祝融号,除祝融号外,其余着陆器均为美国研制。仍在轨工作的轨道探测器仅有8个(表2)。

正是一次次的火星探测任务推动了关于火星的科学研究,也为我们逐步揭开了火星的神秘面纱。火星是一颗类地行星,很多学者认为火星曾经具备非常宜居的行星环境,也是太阳系内跟地球环境最相似的行星。但它的直径约是地球的一半,质量约是地球的十分之一。不论在外部空间环境,还是本身的磁场、电离层、中性大气成分和内部结构等,如今的火星都和地球有着巨大差异。

对于地球生命来说,大气是我们生存的重要条件,在温室效应、大气环流、水循环、阻挡太阳辐射以及减速陨石等方面发挥着重要作用。于是行星科学家们曾猜想火星上是否也存在大气,从而使火星也能够孕育生命。但随着探测的进一步展开,行星科学家发现火星的大气层相当稀薄,其主要成分是二氧化碳,氧气含量非常小,这样的条件下很难有类地生命存在。

火星的大气情况让科学家们产生了疑问:为何火星和地球同处于太阳系宜居带,地球有着厚厚的大气层,而火星的大气层却如此稀薄?是什么使火星大气层演变成今天这个样子?为了深入研究火星大气的演化情况,MAVEN探测器携带着科学使命出发了。

MAVEN探测器于2013年11月搭乘宇宙神五型火箭发射,踏上了十个月的飞往火星之旅,大约

表1 2000年至2021年发射的火星探测器

发射日期	任务	科学目标
2001-4-7	“奥德赛”轨道器	标志着美国火星探测计划重新启动。2002年,“奥德赛”发现火星表面和近地表层中可能有丰富的冰冻水。
2003-6-2	“火星快车”	欧洲航天局研制的第一个火星探测器,搭载的可见光与红外线矿物光谱仪 OMEGA 在火星表面多处检测出了粘土(也就是水合层状硅酸盐)等水合矿物,表明火星在很久以前很可能有大量液态水流过。
2003-6-10	“勇气号”火星车	美国“火星探测流浪者”号探测器发射升空,2004年1月3日在火星表面成功着陆。
2003-7-8	“机遇号”火星车	显示了 Eagle 和 Endurance 撞击坑为干盐湖的证据,对沉积岩石类型展开研究,揭示了火星演化历史的新证据。
2005-8-12	“火星勘测”轨道飞行器	携带的高分辨率相机(HiRISE),提供了火星局部最高可达 0.3 米/像素的照片,提供了火星大气结构构成相关资料和火星气候变化情况。
2007-8-4	“凤凰号”火星着陆器	它在火星北极区域登陆后收集了冰样,而且还发现火星表面土壤的化学成分与海水非常类似。11月10日后“凤凰号”与地面失去联系。
2011-11-8	“萤火一号”火星探测器	与俄罗斯“福布斯土壤号”一起发射升空。11月9日,俄方宣布火箭变轨失败,没能飞出地球轨道。
2011-11-26	“好奇号”火星车	2012年8月6日成功在火星表面完成软着陆,对火星气候、水、地质以及盖尔撞击坑展开探测,研究日后人类探索的可行性。
2013-11-5	“曼加里安”探测器	分析火星的形态、矿物和大气并且希望探测到火星大气中甲烷存在的痕迹。
2013-11-18	“火星大气与挥发物”轨道探测器	穿越火星大气层对其展开探测,希望了解火星大气的影响因素与演变进程,从而进一步研究火星气候历史。
2016-3-14	“火星生物”探测器	对火星大气中甲烷等微量气体进行研究与监测。
2018-5-5	“洞察号”火星车	主要探测火星内部地震活动、地理分布以及陨石撞击火星表面的频率,对火星内部、火星地幔、火星地壳以及地核展开研究。
2020-7-20	“希望号”火星探测器	阿拉伯联合酋长国首个火星探测器,主要目的是研究火星的天气和大气层变化,补充对火星气候的研究。
2020-7-23	“天问一号”火星轨道器	中国自主研发的首个火星探测器,旨在进行对火星的表面形貌、土壤特性、物质成分、水冰、大气、电离层、磁场等科学探测,实现中国在深空探测领域的技术跨越。
2020-7-30	“毅力号”火星车	携带着机智号直升机,主要为了探索直径45公里的杰泽罗陨坑,负责搜寻火星远古生命的迹象,研究陨坑地质结构。
2021-5-22	“祝融号”火星车	进行火星巡视区形貌和地质构造探测、土壤结构(剖面)探测、表面元素及矿物及岩石类型探查以及火星巡视区大气物理特征与表面环境探测。

表2 火星在轨探测器

国家	在轨探测器
美国	“奥德赛轨道探测器”“火星勘测轨道器”“火星大气与挥发物演变”
欧洲	“火星快车”“微量气体轨道器”
印度	“曼加里安”轨道探测器
中国	“天问一号”火星探测器
阿联酋	“希望号”火星探测器

一年后进入火星大气层。科学家们希望能利用 MAVEN 所收集到的数据来分析火星大气的逃逸过程,并进一步研究火星的气候变化和可居住性等科学问题。

MAVEN 的科学目标有以下四项:

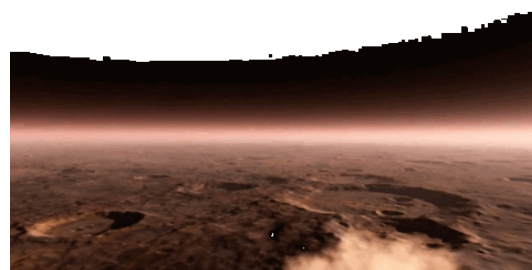


图1 火星地表模拟图

1) 了解从大气逃逸至太空的挥发物在大气演化中的作用,进而了解火星大气、气候、液态水和行星适居性的历史。

2) 了解火星上层大气与电离层的状态,还有与太阳风的相互作用。

3) 了解火星中性粒子与离子从大气逃逸的状况与相关机制。

4) 测得大气中稳定同位素的比例,以了解大气随时间流失的情况。

## 2. MAVEN 探测器载荷

MAVEN 探测器卫星平台如图 2 所示。该探测器发射质量为 2454 kg,干质量 809 kg,采用  $2.29\text{ m} \times 2.29\text{ m} \times 3.47\text{ m}$  的长方体构型,太阳能电池翼翼展为 11.43 m,总功率为 1150~1700 W。使用 2 个  $55\text{ A} \cdot \text{h}$  的锂离子电池组供电,姿态控制方式为三轴稳定,采用 N2H4 单组元推进系统,燃料箱可装载 1640 kg



图 2 MAVEN 卫星

燃料。其高增益天线直径为 2 m,每周 2 次指向地球进行 X 频段通信。除了完成自身的在轨探测任务之外,还可为在火星表面执行探测任务的机遇号和好奇号火星车提供数据中继服务。

MAVEN 探测器携带 3 个有效载荷包,包括粒子与场测量包、遥感包和中性气体和离子质谱仪,共 8 种有效载荷(表 3),每种载荷承担着不同的功能,载荷见图 3。

通过以上介绍,可发现 MAVEN 有效载荷的探测目标与整个任务的科学目标紧密结合,主要针对火星大气的结构与演化展开探测。与 MAVEN 不同,我国的天问一号探测内容更加广泛,从地下水冰到高空粒子,旨在从全方位了解火星环境,这从天问一号的载荷装置中可见一斑。天问一号轨道环绕器共搭载 7 台有效载荷,探测内容主要包含以下五个方面:火星大气电离层分析及行星际环境探测、火星表面和地下水冰的探测、火星土壤类型分布和结构探测、火星地形地貌特征及其变化探测、火星表面物质成分的调查和分析。除此之外,天问一号携带的“祝融号”火星车的移动功能强大,并且也携带了 6 台有效载荷(表 4),与轨道器载荷相呼应,共同承担了相应的探测任务。

表 3 MAVEN 探测器有效载荷简要介绍

	有效载荷	作用	研制单位
粒子与场测量包	太阳风电子分析仪(SWEA)	测量太阳风和电离层电子	加利福尼亚大学伯克利分校 航天科学实验室(SSL)
	太阳风离子分析仪(SWIA)	测量太阳风和磁鞘离子的密度和速度	
	超热与热粒子成分探测仪(SIAIIC)	测量热离子与中等能量的逃逸离子	
	太阳高能粒子探测仪(SEP)	研究太阳高能粒子对火星上层大气的撞击情况	
	朗缪尔探针与波探测仪(LPW)	研究电离层属性和逃逸粒子的热量,及太阳极紫外线(EUV)对火星大气的照射情况;测量火星上层大气的电子温度、数量及密度;测量低频率电磁波功率	科罗拉多大学大气与空间物理实验室(LASP)
	磁强计(MAC)	包括两个传感器,用于测量行星际太阳风和电离层磁场	戈达德航天飞行中心(CSPC)
遥感包	成像紫外光谱仪(IUVS)	测量火星上层大气和电离层的特性	科罗拉多大学大气与空间物理实验室(LASP)
中性气体和粒子质谱仪包	中性气体和粒子质谱仪(NGIMS)	研究火星上层中性大气的基本结构和成分;测量火星大气元素同位素比例;测量热离子和超热离子	戈达德航天飞行中心(CSPC)



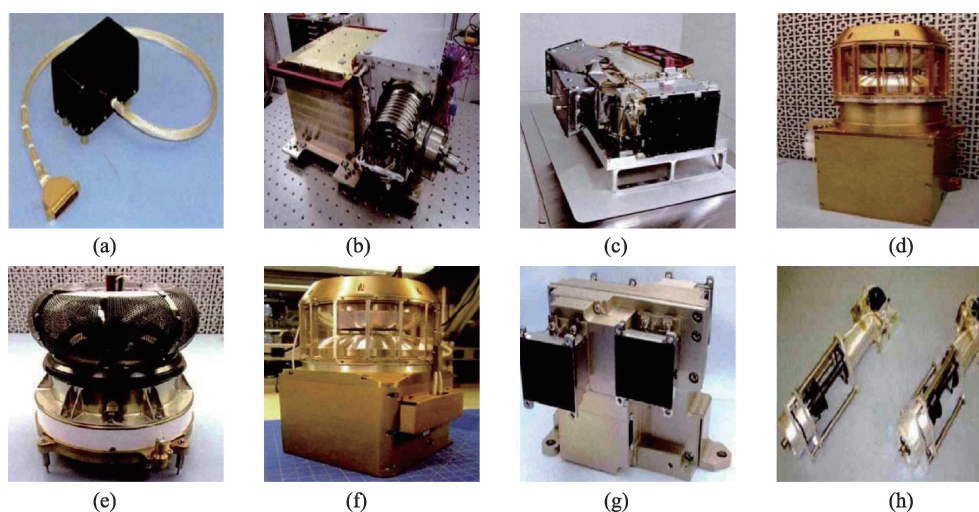


图3 MAVEN载荷(a)磁强计(MAG);(b)中性气体和离子质谱仪(NGIMS);(c)紫外成像光谱仪(IUVS);(d)超热和热离子组分析仪(STATIC);(e)太阳风电子分析仪(SWEA);(f)太阳风离子分析仪(SWIA);(g)太阳高能粒子仪(SEP);(h)朗缪尔探测器(LPW)

表4 “祝融号”火星车有效载荷简介

有效载荷	科学目标
火星表面成分探测仪	火星表面成分探测仪包括激光诱导击穿光谱仪(LIBS),短波红外光谱显微成像仪(SWIR)和微成像相机。LIBS(240~850 nm)用于元素组成分析;SWIR(850~2400 nm)用于矿物和岩石的分析和识别;微成像相机(900~1000 nm)可以获得探测目标的高空间分辨率图像。
多光谱相机	获取着陆点周围的地形、地貌和地质背景信息,进行空间分析,获得岩石、土壤等可见近红外光谱数据;采集各种白天和黑夜的天空图像,以进行特定的大气、气象和天文研究。
导航地形相机	拍摄广角图片,指导火星车的移动并寻找感兴趣的目标(岩石/土壤等);结合环绕器上搭载的高分辨率相机,将它们拍摄到的地面图像进行比对,可以校准火星表面的真实情况;为其他科学载荷寻找感兴趣的探测目标或区域。
火星车次表层探测雷达	次表层探测雷达可以探测火星土壤的地下分层和厚度。次表层探测雷达可以随火星车移动,持续收集地下雷达信号,探测地下物质的大小和分布特征,并在垂直和水平方向上约束地下分层结构,制约地下水冰和挥发物(如,水合矿物质等)的分布。
火星表面磁场探测仪	检测火星表面磁场,火星磁场指数以及电离层中的电流。其主要优点是随火星车移动;与环绕器上搭载的磁强计协同观测,将对理解火星内部的演变具有极其重要的意义。
火星气象测量仪	用于监测火星表面温度、压力、风场和声音等时间和空间变化。在着陆前,还可以在环火轨道上收集温度和声音数据。

### 3. MAVEN 探测的重要发现

MAVEN 探测任务为了解火星大气和气候的演化做出了重要贡献,科学家们对 MAVEN 传回的数据和照片进行了分析,获得了许多重大的科学成果,以下是 NASA 对 MAVEN 探测器十大科学发现的总结:

(1) 火星大气层持续受到太阳和太阳风的剥离,使火星环境从过去的较为温暖湿润转变为现在的寒冷干燥。

(2) 探测了当前太阳和太阳风剥离火星大气层

顶的速率及其过程,发现曾有大量火星大气随着时间而逐渐逃逸。

(3) 通过测量高层大气中的同位素,确定火星至少已失去了 2/3 的大气。

(4) 发现高层大气中的氢含量存在季节性变化,一年中相差可达 10 倍。高层大气中的氢来自于低层大气的水,在光照下分解成氢和氧。

(5) 太阳风与火星之间相互作用的复杂程度超出预期。火星没有内禀磁场,但磁性地壳区域在局部尺度上影响太阳风,因此造成火星的磁层经常变化且分布不均。

(6) 火星极光是太阳喷射的各类太阳风暴中的粒子流引起的。当这些粒子轰击火星大气层时,将火星大气的逃逸速度提高10倍以上。

(7) 发现了两种新型极光,即扩散型极光和质子型极光。与地球上的极光不同,这两种极光与火星磁场无关。

(8) 首次直接探测到火星电离层中存在星际尘埃轰击火星大气层形成的金属离子层。该金属层长期存在,并在2014年10月赛丁泉彗星近距离飞越火星时急剧增强。

(9) 部分太阳风粒子穿透深入高层大气,不受火星电离层的偏转。其原因是太阳风中的带电粒子在电离层中发生化学反应,转变为能穿透深入大气的中性原子。

(10) 火星大气中的气态一氧化氮和臭氧分布成像十分复杂。这表明高层大气与低层大气之间存在气体交换,但其动力学过程尚不清楚。

### 4. 奔赴火星的意义

MAVEN探测器发回的照片证实了科学家之前的一些预测。行星科学家在此前预言过,火星上会发生一氧化氮夜辉现象。MAVEN首次拍摄到这一现象的照片,证实了这一预言,这让行星科学家极受鼓舞。另外,MAVEN的观测结果还展现出了在火星的四个巨大的火山,午后会有云的形成。就像地球的山脉附近会形成云层一样,这也进一步促进了对火星地质地貌的研究与探索。

结合MAVEN所探测到的数据,科学家们进行分析后认为,火星的大气层曾经也很厚,为火星的表面提供了微暖湿润的大气。那时,火星的表面拥有丰富而活跃的水,有海洋、河流、降雨等等。在这种情况下,我们不难想象火星当时是宜居的,甚至有可能有生命的存在与繁衍。但是,在火星形成后不到十亿年的某个时间点,它的全球磁场不复存

在,保护星球不受太阳风侵害的主要力量消失,随后它的大气逐步被太阳风剥蚀殆尽,其表面也就变成了荒凉、贫瘠的荒漠,不再适合生命存在。MAVEN探测的数据展现了火星形成以来的大致气候演变以及火星的宜居性。由于火星与地球的相似性,这些科学成果又反过来帮助科学家们了解地球,让人们更加深刻地理解了地球磁场对地球大气、地球生命的保护作用,对人类了解地球环境的未来演化有着重要的参考价值。

火星探测与行星科学相辅相成。我国作为深空探测大国,在深空探测领域存在“起步晚,起点高”的情况,迈出火星探测第一步并取得圆满成功之后,如何更快更稳地持续推进火星探测计划,如何利用探测数据开展全面的科学研究已成为当下的重点问题。就MAVEN探测器而言,它上面的多种有效载荷依然是我们国家深空探测发展的难关,中国需要不断培养新的行星科学人才,加大仪器研发投入,鼓励和促进深空探测任务总体、仪器研制团队与行星科学团队相互融合交流,才能实现工程、技术与科学的相互促进,和谐发展。

### 5. 结语

基于MAVEN轨道探测器传回的数据,科学家们产出了许多意义重大的科学成果,揭示了火星大气的科学奥秘,加深了人们对火星的了解。MAVEN探测任务的成功,也为其他深空探测任务提供了宝贵经验,对行星科学的发展做出了贡献。截至2021年7月,MAVEN轨道探测器仍然在轨工作,持续研究火星高空大气的结构和组成,并且能与火星表面其他火星车相联系,传回更多的火星探测数据。同时,期待我国的“天问一号”轨道器与“祝融号”火星车能够带来更多的新发现,揭开火星的神秘面纱,为回答我们在宇宙中是否孤独的问题交上一份全新的答卷。