火星表面环境模拟技术

顾苗

(北京卫星环境工程研究所,北京 100094)

摘要: 叙述了火星表面影响航天器工作的相关环境,主要包括低气压、大温区、CO₂大气、高风速、尘暴等。 首先叙述了低气压环境的真空舱抽放气模拟法(低气压调节范围 150~1500 Pa)、CO₂环境换气模拟方法(CO₂ 体积分数约 95%)、大温区环境气氮调温模拟法(调节温度范围为-150~150 ℃)、尘暴环境的真空引流模拟 法和低气压风洞模拟法(火星尘埃直径为 0~100 μm)、地形地貌的场景模拟法(粗砂和中砂地貌)、辐照环 境的太阳模拟器模拟法、大气环境中灯阵模拟法(辐照度能够达到 1760 W/m²)以及低重力环境的配重模拟 法(重力加速度为 3.72 m/s²)。其次叙述了当前国内外火星综合环境的常见模拟方法,包括火星低气压热环 境试验、火星低气压风洞试验。

关键词:火星环境;环境模拟;压力;温度 中图分类号:V416 文献标识码:A DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2021.09.006

文章编号: 1672-9242(2021)09-0035-08

Mars Environment Simulation Technology

GU Miao

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

ABSTRACT: The paper mainly introduces environment factors on Mars, which affects the spacecraft work. These environment factors include low atmospheric pressure, large temperature change, CO₂ atmospheric, high wind speed, dust storm, etc. Firstly, these environment simulation methods are set forth, including pumping and charging gas method for the low pressure environment simulation (the low pressure range is $150 \sim 1500$ Pa), gas exchange method for the CO₂ environment simulation (the volume fraction of CO₂ is 95%), gas nitrogen temperature adjustment method for the large temperature environment simulation (the temperature range is $-150 \sim 150$ °C), vacuum diversion simulation method and low-pressure wind tunnel simulation method for dust storm environment ($0 \sim 100 \mu$ m diameter of Martian dust), scenario simulation method for topographic landscape (coarse and medium sandy landscape), solar simulator simulation method for irradiated environment, and the lamp array method for the radiation environment simulation (the highest radiance is 1760 W/m^2), counter weights method for the low gravity simulation (the gravity is 3.72 m/s^2). Secondly, two types of integrated environment factors simulation methods are set forth, including Mars low pressure and thermal test, Mars wind tunnel.

KEY WORDS: environment on Mars; simulation; pressure; temperature

收稿日期: 2021-04-04;修订日期: 2021-05-04

Received: 2021-04-04; Revised: 2021-05-04

作者简介:顾苗(1982—),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为空间环境模拟技术。

Biography: GU Miao (1982-), Female, Senior engineer, Research focus: space environment simulation area.

引文格式:顾苗.火星表面环境模拟技术[J].装备环境工程,2021,18(9):035-042.

GU Miao. Mars environment simulation technology[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(9): 035-042.

火星是太阳系的八大行星之一。火星与地球有着 类似的四季交替和几乎等长的日落日出。每隔 26 年 就会出现一次火星探测的研究高峰。从20世纪60年 代起,人类就开始使用空间探测器对火星进行研究。 火星探测器的任务分为火星掠飞、环绕、着陆和巡查 等类型。人类总计启动了 42 次的火星探测任务,美 国 20 次,苏联/俄罗斯 19 次,日本 1 次,欧洲 1 次, 印度1次,失败和成功参半^[1]。火星任务失败的主要 因素可归结为3个方面:火星环境适应性问题;关键 系统故障;轨道控制问题。因此,火星探测任务成功 与否和火星的特殊环境密切相关^[2]。如 1971 年,前 苏联的火星二号和火星三号由于火星沙暴导致失效。 2004 年,美国勇气号火星车由于车轮陷于土壤内失 去行动能力。2007年,美国的凤凰号探测器由于进 入严冬电量过低导致失联^[2-3]。当前随着火星探测热 潮的出现,掠飞探测和硬着陆探测的价值远低于软着 陆和巡查探测。因此对火星表面环境的研究,以及利 用已知火星地表自然环境知识,建立相应的地面效应 模拟,具有重大科研价值。

研究火星自然环境因素对其表面巡视航天器的 影响,火星自然环境的地面模拟方法分析,以及综合 多个环境因素联合模拟,对于火星地表探测具有深远 的影响。文中阐述了火星表面各个主要环境因素,环 境因素对其表面巡视航天器的作用及其模拟方法。指 出了当前火星环境适应性试验过程中,哪几个环境因 素适合执行综合模拟。

1 火星环境及其效应

火星环境在大气、气压、温度、表面风速、灰尘、 地形地貌、光照、引力等方面,与地球环境迥异。火 星与地球环境的区别见表 1。这些环境因素之间相互 影响,相互作用,对飞行器或探测器等造成影响。这 些火星表面的基本参数来源于美国 1975 年发射的两 个火星探测器"海盗号"。

1.1 火星大气环境以及效应

火星表面的大气压力约在 750 Pa 左右,约为地

球的 0.75%。主要成分为 95%的二氧化碳、3%氮气、 1.6%氢气,很少量的氧气、水汽、一氧化碳、氖气、 氪气和氙气。大气气压在全年内略有变化,变化范围 为 150~1350 Pa。低气压环境会对航天器造成低气压 放电的影响。根据帕邢定律,CO2气体与空气放电规 律略有不同,同等间隙与压力状态下,CO2气体的击 穿电压略微高于空气。但是火星表面的气压范围仍旧 能够造成航天器用电设备的低气压放电现象。

火星大气中, CO₂的体积分数会在1个火星年内 发生约26%的变化。这样以CO₂气体为主要成分的大 气环境,在低温的驱使之下,会凝结成干冰,附着在 航天器裸露的表面。首先会影响航天器的光学特性, 如太阳能电池板的透光率降低,影响输出性能,相机 镜头结霜影响图像质量。其次,运动关节的结霜会影 响运动机构的摩擦力特性。

火星表面的温度变化范围很大,由于大气层较 薄,热容较小,昼夜温度变化大。地表的夏季平均温 度为-60℃,冬季平均温度为-123℃。昼夜温差大, 变化范围为 50~100℃。在冬季,CO2会出现凝结现 象。在两极处,CO2冰层因为温度循环造成升华和凝 固,会影响气压变化,变化值达到 30%^[4]。火星表面 热环境的影响因素主要有 2 个来源,分别为火星表面 二氧化碳大气的温度辐射和太阳辐照引起的热变化。 火星表面的温度变化范围很大,会带来结构件的热胀 冷缩,给航天器运动结构带来有害应力。温度的大温 区变化考验表面巡视航天器的温度保持系统性能。

火星气压低,引力小,伴随着温度大幅度变化, 大气动能增加,尘埃被卷入空中,易于形成强烈尘暴。 常规火星夜间风速约为2m/s,白天约为6~8m/s,发 生尘暴时,可达到150m/s。由于火星的大气密度小, 不会产生较大的横风。每年火星尘暴发生频繁,每年 约发生100次局域尘暴,和1次以上大规模尘暴^[5]。 尘暴持续时间短则几天,长则数十天。这些尘暴可从 太空观测到褐色尘云或者大面积橘色尘雾。海盗1号 和海盗2号着陆器测得火星沙尘暴的起动一般需要 离火星表面2m高处的风速达到30m/s,这相当于地 球上的12级飓风。火星表面的尘暴会造成火星表面

	表 1	火星环境与地球环境类比
Tah 1	Mars e	environment and Farth environme

Tab. I Mars environment and Earth environment					
环境名称	地球环境	火星环境	效应		
平均气压	101.3 kPa	0.75 kPa	低气压放电		
大气主要成分	氮气 78.1%, 氧气 20.9%	二氧化碳 95%	暴露光学设备结干冰		
平均表面温度	−40~60 °C	−130~20 °C	有害应力		
极限风速	100 m/s	150 m/s	尘暴, 电池帆板蒙尘		
主要地表地形	地形多样	风蚀沙漠地貌	车轮陷落		
平均辐照度	1368 W/m^2	589 W/m ²	太阳能供给减少		
重力加速度	9.8 m/s^2	3.72 m/s^2	减少车轮接触摩擦力,以及钻探机构力学特性改变		

探测器的表面磨损,影响暴露在外光学镜头的性能, 改变水升华器等散热器的特性,降低探测器用太阳帆 板性能等。火星尘暴具有剥蚀、遮蔽、阻滞、摩擦放 电等多种环境效应^[6]。在人类探测火星的 30 年中, 除了目前正在工作的 3 个火星车外,其余登陆火星的 探测器几乎均被火星的尘暴所毁坏。例如火星尘暴影 响"探路者号"的太阳帆板性能,"勇气号"和"机 遇号"也应为火星尘暴的影响出现故障。

1.2 火星地形地貌以及效应

火星表面拥有多样的地形地貌,有高山、平原、 峡谷。由于风速和尘暴的原因,火星表面呈现类似风 蚀沙漠地貌。南半球多为充满陨石坑的高地,北半球 多为熔岩填平的低平原。两级为干冰或水冰形成的极 冠。局部探测器能够接触到的火星表面,大多以沙石 为主,表面覆盖风化的尘埃。这些尘埃主要由极小的 硅酸盐颗粒物构成,也存在高氯酸盐物质成分(2008 年美国宇航员凤凰号探测器发现),或者石膏粉尘。 这些粉尘对航天器和探测器均存在危害,其中高氯酸 盐物质和石膏粉尘物质也会对人体产生危害。这些尘 埃的直径为 50~100 μm 的颗粒物。

1.3 火星光照环境以及效应

火星表面的光照环境在远日点和近日点略有差别,远日点的太阳辐照常数为 493 W/m²,近日点为717 W/m²,平均辐照度为 589 W/m²。透过火星大气 衰减为 0.607 倍,平均太阳常数约为 357 W/m²。反照 率为 0.2~0.5,极地最大,赤道最小。太阳辐照角度 为 65°~90°^[7]。当探测器使用太阳能作为其主要能源 供给,到达火星表面时,其太阳能帆板的功率会发生 衰减,大约为地球附近的 1/2 或者更少。这将会影响 以太阳能为能量来源的航天器。

1.4 火星表面其他环境以及效应

除上述环境之外,火星表面还存在着低重力(约 为地球重力的1/3)、等离子体环境^[8-10]。这些火星环 境因素会对火星探测器或火星航天器存在着较大的 影响。例如低重力会影响巡视器车轮与地面的接触的 摩擦力,以及钻探机构的力学特性。有必要在地面模 拟出这样的环境,以考验这些环境因素对航天器带来 的影响^[11]。

2 火星表面环境的模拟

2.1 火星低气压环境模拟

低气压环境模拟一般在真空舱中进行。依据当前 火星相关航天器尺寸,建议整星级别模拟舱体选择有 效直径 5 m 左右,部件级别的舱体选择有效直径 1 m 左右^[12]。放电测试用低气压环境的模拟系统一般由气 瓶、质量流量计、可控开度调节阀门、真空泵、手动



Fig.1 The simulation method for low pressure environment

低气压控制系统,通过气瓶向真空舱内放气,同 时通过质量流量计控制放气量。该系统通过真空泵 (建议为干泵,不会出现返油污染)抽除真空舱内气 体,形成低气压环境。控制系统通过控制质量流量计 的进气量和调节阀门的开度,达到指定的压力值。

我国的火星车低气压试验在 KM6F 空间环境模 拟器内执行,压力调节范围为 150~1500 Pa,调节精 度为±10 Pa。KM6F 采用如图 1 所示低气压充压和泄 压方式实现舱体内的压力平衡^[13],具体压控流程如图 2 所示。





2.2 火星大气成分模拟

大气成分环境模拟在真空舱内进行,一般与低气压 环境同时实施。在低气压环境充气时,充入的气体采用 CO2气体即可。在大气成分模拟过程中,一般不精确模 拟火星大气中的其他成分。大气的成分可用四极质谱计 测量,得到精确的模拟舱内 CO2气体的体积分数。

我国火星车的 CO_2 大气环境试验与低气压环境 试验同时执行,其控制流程参见图 2 中的 CO_2 快速充 气通路。我国火星探测航天器的部件同样执行 CO_2 环境的低气压试验^[14]。

2.3 火星大温区变化模拟

火星表面温度的大范围变化同样也在模拟舱内 执行。模拟舱内设置热沉,热沉为胀板(空心薄板) 结构或管板焊接结构,包覆舱体内表面。热沉内通可 调温介质,用于调节模拟舱内温度环境。火星表面温 度区间的模拟可以使用气氮调温热沉系统来实现。气 氮调温热沉调节的温度范围一般为-150~150℃,温 度调节速率为±2℃/min,可以用于火星表面温度的模 拟。气氮调温系统使用氮气作为调温工质。工作过程 中,将热沉出口的氮气经过气氮调温器的换热降低温 度,经过风机的驱动,进入电加热器,调节至目标温 度,氮气再次进入热沉腔内,从而形成密闭循环。气 氮调温法模拟温度环境原理如图 3 所示^[15-16]。





Fig.3 Gas nitrogen thermal regulator method for temperature environment

当前气氮调温系统已经成为空间环境模拟器的

主流配置之一。北京卫星环境工程研究所的气氮调温 设备,控温范围为-170~150℃,升降温速率可达 3.5℃/min,控温精度优于±1℃^[17-18]。

我国火星车的温区试验在 KM6F 空间环境模拟 器中执行,采用如图 3 所示气氮调温原理实现,具体 的流程如图 4 所示。该火星表面温区模拟范围为 – 170~60 ℃,均匀性为±5 ℃,温度速率为 0.5 ℃/min。



图 4 我国火星车温区控制流程 Fig.4 Temperature control flowchart for Chinese Mars rover

2.4 火星尘暴模拟

火星尘暴的模拟方法常见的有风洞^[19-20]和真空 引流^[21-22]两种。

风洞模拟方法使用成熟的火星风洞,在常压环境 中,配合火星尘埃和沙石发射装置,可模拟常压环境 中火星表面航天器的抗沙尘特性。通常用来模拟尘土 颗粒物直径为 0~100 μm 的火星尘埃^[23]。

真空引流法在低真空环境中采用二氧化碳来模 拟火星大气、二氧化硅颗粒模拟火星沙尘。高压气罐 内存储液态二氧化碳,储沙罐内存储二氧化硅颗粒。 调配成为含尘气体,由管道输送到试验容器。风管道 直接与尘暴发生装置相连,由于内外压差以及尘暴发 生装置的气动加速,可在尘暴发生装置内形成高速尘 暴流场。风管道出风口设置于尘暴发生装置外侧,在试 验容器内部形成引射环流,可获得稳定的尘暴流场^[24], 如图 5 所示。



图 5 火星车尘暴环境模拟原理 Fig.5 Dust storm environment simulation method

这两种方法中,风洞法较易于实现,但是不能同时 模拟火星表面的稀薄气体流。真空引射流法能够同时模 拟稀薄二氧化碳大气和尘暴,更加贴近于实际环境。

2.5 火星地形地貌模拟

火星环境中的地形地貌多样,有高山、平原和峡谷。从以往的观测来看,火星表面基本上是沙漠行星地表的沙丘和硕石遍布,主要为风积和风蚀地貌同时存在。由于表面的低重力因素,导致地形南北半球有较大差异,北方以平原为主,南方以高地为主,中间以斜坡分割,之间穿插众多火山和陨石坑。沙硕由平均颗粒直径为 430 mm 的玄武岩粗砂和不小于120 mm 的中沙组成。火星表面的土壤和尘埃也有其特别的属性,例如带有静电等^[24]。

这些石块、坑洞、松散的沉积物以及坡度的不确 定性会影响探测器能否成功着陆。这些地形因素会考 验巡视航天器的躲避障碍能力。航天器可根据即将着 陆的地区,从地球上寻找类似风沙地貌的地形,或者 根据火星表面土壤砂石的特性、地貌坡度,模拟测试 场景,如图6所示^[8]。在地形模拟过程中,尤其需要 关注疏松的沉积尘土对航天器的影响。



图 6 好奇号地形地貌测试场景 Fig.6 Curiosity terrain test

2.6 火星辐射光照模拟

太阳能辐射光照试验可在模拟舱内执行,当前主 要实现的方式为太阳模拟器。当前北京卫星环境工程 研究所研制的空间环境模拟器采用的太阳模拟器, 辐照面积直径能够达到 5m, 辐照度能够达到 1760 W/m²,不均匀度达到±4%^[25-26]。该种太阳模拟器能够模拟火星表面的太阳辐照环境。太阳模拟器主要由光学系统、机械结构、冷却系统、电源及测控系统组成,如图 7 所示。



图 7 太阳模拟器模拟光照环境原理图 Fig.7 Solar simulator method for radiation environment

北京卫星环境工程研究所大型太阳模拟器外观 如图 8 所示。

火星的辐射光照环境试验也可在大气环境中执行。例如我国辐射光照试验,如图9所示。

2.7 火星低重力模拟

火星表面的重力加速度较低,为3.72 m/s²,只有 地球的 1/3。低重力会影响巡视器车轮与地面接触的 摩擦力,以及钻探机构的力学特性。一般采用自由落 体直接模拟法、抛物线飞行法、气浮平台法、水浮试 验法、吊丝配重法来模拟火星表面的低重力环境。实 际试验中,使用较多的是吊丝配重法。这些测试方法 已经成功用于中国登月航天器、失重航天器的微重力 模拟。火星表面的低重力模拟方法与月球表面的低重 力模拟方法类似。如美国研制的三自由度低重力补偿 系统,用于高精度的是重力模拟,如图 10 所示^[27]。



图 8 太阳模拟器外观 Fig.8 Outer appearance of the solar simulator



图 9 辐射光照试验场景 Fig.9 Solar radiation test



图 10 美国 CSA 三自由度重力补偿系统 Fig.10 3 DOF gravity compensation system from CSA in America

2.8 其他环境因素模拟

火星的其他环境,包括火星表面磁场、等离子体 环境等,可根据整个航天器的相关环境适应性测试, 或者在航天器材料选取时,执行材料级的模拟试验。

3 综合环境模拟

实际在火星表面环境模拟的试验中,考虑到可行 性、经济性和模拟效果等方面的因素,多个因素可以 进行综合模拟。

3.1 火星低气压热环境试验(低气压、温度、 CO₂大气环境)

通常火星表面的低气压、温度、大气成分会互相 产生影响。CO₂大气在低气压环境下凝华的温度会发 生变化。同时,模拟舱内低气压环境,可用 CO₂气体 充气。从可行性和原理上而言,这3个因素一起模拟 能够达到所需的模拟效果。

目前火星探测器的低气压、CO2大气环境模拟试验主要在卧式热真空容器(北京卫星环境工程研究所研制)上进行,容器直径为4200mm,长度为

5000 mm。先将真空容器抽至真空度约 6.5×10⁻³Pa 量级,通过充气口向其内部通入高纯 CO₂气体,同时通过真空泵抽除真空腔室内部的气体。通过真空计的读数、干泵连接的可控制开度的蝶阀、以及充气管道上的流量控制器形成负反馈自动控制,用于稳定模拟的压力环境约为 725~775 Pa^[28]。这种方式能够模拟稳定的 CO₂氛围和低气压环境。

国外通常把火星表面的热环境、压力环境、大气 环境和风速环境放在一起模拟,用来测试火星表面航 天器的性能。如英国卢瑟福-阿尔普顿实验室的 STC 空间环境模拟器,直径为 3 m,长度约 5.5 m,其外 观如图 11 所示^[29]。该空间环境模拟器配置卧式容器、 气氮调温系统热沉、压控系统、太阳模拟器系统和鼓 风系统。热沉温度为-110~150 ℃,压控系统可将压 力维持在 700 Pa,鼓风系统可控制二氧化碳气流的流 速在 10 m/s 左右。该设备曾经用于猎犬 2 号火星着 陆器的试验。



图 11 英国 STC 空间环境模拟器 Fig.11 STC space simulator in Britain

美国的 JPL10-foot 空间环境模拟器,曾用于"漫步者者号"、"勇气号"和"机遇号"火星探测器的测试。空间环境模拟器配置控温冷板,用于模拟空间温度,风机用于模拟火星表面的风速。主要指标为大气温度范围为-130~20℃,氮气气体压力为 100~1300 Pa,风速为6m/s和12m/s。后续的"好奇号"火星车在 25ft 空间环境模拟器中执行热测试,其外部 直径为 7.5 m,高 21 m,内部试验空间直径为6 m,高 7.5 m,热沉温度为-180~100℃,太阳模拟器使用 37 盏 20 kW 氙灯,可达 2 太阳常数,光斑为 5.6 m, 光路从顶及下,如图 12 所示^[30-31]。



图 12 美国 25ft 空间环境模拟器 Fig.12 25ft space simulator in America

122-129.

火星表面的尘暴环境与低气压和高风速密不可 分,这三种因素综合模拟可以很好地验证表面巡视器 抗风沙能力。火星风洞为目前常用的低气压、风速和 尘暴环境综合模拟装置。

例 如 美 国 NASA 的 埃 姆 斯 科 研 中 心 的 MARSWIT 风洞,火星风洞在一个体积为 4000 m³ 的 低气压腔室内,试验气体和二氧化碳的体积分数可 调。风动有效试验段尺寸:直径约 1.2 m,长约 0.9 m。日本东北大学的 MWT 火星风洞,放置在压力和温度 可调的真空罐中,真空罐体直径约 1.5 m,长度约 5 m。风洞有效试验段尺寸:直径约 100 mm,长约 400 mm, 如图 13 所示^[32-33]。



图 13 日本东北大学火星风洞 MWT Fig.13 Mars wind tunnel form Tohoku University

4 结语

火星表面的环境是导致表面巡视航天器失效的 主要因素,对火星表面压力环境、风速环境、热环境、 尘暴环境的模拟,能够对火星表面巡视器等航天器进 行性能测试。尤其是这些环境因素的耦合作用,是否 会对航天器造成影响,可以在模拟的环境中进行评估。

对于火星表面环境模拟的研究,仍然存在众多有 待解决的难题:

1)对于系统级多种特殊环境综合模拟,仍旧需要大量深入研究,如同时模拟光照、沙壤土地形、低重力环境特性的设备。

2)系统级低气压、CO₂、尘暴风洞模拟设备的 研究尚不成熟。

3)火星表面各类环境模拟试验数量仍然不多, 所以对各类效应定量化规律研究较少,均是针对个体 效应的模拟。

4)缺少针对航天器在火星表面环境长期耐受特 性模拟设备的研究。

参考文献:

[1] 贾阳,李晔,吉龙,等.火星探测任务对环境模拟技术

的需求展望[J]. 航天器环境工程, 2015, 32(5): 464-468. JIA Yang, LI Ye, JI Long, et al. Demands of Mars exploration missions on environmental simulation technologies[J]. Spacecraft environment engineering, 2015, 32(5): 464-468.

- [2] 董捷, 饶炜, 王闯, 等. 国外火星探测典型失败案例分析与应对策略研究[J]. 航天器工程, 2019, 28(5): 122-129.
 DONG Jie, RAO Wei, WANG Chuang, et al. Research on the typical failure cases and coping strategy of foreign Mars exploration[J]. Spacecraft engineering, 2019, 28(5):
- [3] 王赤,张贤国,徐欣锋,等.中国月球及深空空间环境 探测[J]. 深空探测学报, 2019, 6(2): 105-118.
 WANG Chi, ZHANG Xian-guo, XU Xin-feng, et al. The lunar and deep space environment exploration in China[J]. Journal of deep space exploration, 2019, 6(2): 105-118.
- [4] 欧阳自远,肖福根.火星及其环境[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(6): 591-601.
 OUYANG Zi-yuan, XIAO Fu-gen. The Mars and its environment[J]. Spacecraft environment engineering, 2012, 29(6): 591-601.
- [5] BARLOW N. Mars: an introduction to its interior, surface and atmosphere[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [6] 蔡黄兵.火星沙尘暴的起动临界风速[D]. 合肥:中国 科学技术大学, 2011.
 CAI Huang-bing. The threshold wind speed for dust storms on Mars[D]. Hefei: University of Science and Technology

of China, 2011. [7] 张磊, 刘波涛, 许杰. 火星探测器热环境模拟与试验技 术探讨[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(3): 272-276. ZHANG Lei, LIU Bo-tao, XU Jie. The thermal environment simulation and test technology for Mars probe[J]. Spacecraft environment engineering, 2014, 31(3): 272-276.

[8] 吴国兴. 恶劣可怕的火星环境[J]. 太空探索, 2005(5): 18-20.

WU Guo-xing. Severe environment on Mars[J]. Space exploration, 2005(5): 18-20.

- [9] 赵静,魏世民,唐玲,等.火星车行驶环境研究综述[J]. 载人航天,2019,25(2):256-264.
 ZHAO Jing, WEI Shi-min, TANG Ling, et al. Review on driving environment of Mars rover[J]. Manned spaceflight, 2019, 25(2): 256-264.
- [10] 蔡震波,曲少杰.火星探测器全任务期空间环境特征 与防护要点[J]. 航天器环境工程, 2019, 36(6): 542-548. CAI Zhen-bo, QU Shao-jie. Space environment characteristics and key points in space environmental protection design for Mars probe mission[J]. Spacecraft environment engineering, 2019, 36(6): 542-548.
- [11] 赵志萍,赵阳东.火星表面环境分析[J]. 沈阳航空航天 大学学报, 2014, 31(2): 28-31.
 ZHAO Zhi-ping, ZHAO Yang-dong. Analysis on the Mars

- [12] 黄本诚, 马有礼. 航天器空间环境试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
 HUANG Ben-cheng, MA You-li. Space Environment Test Technology of Spacecraft[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
- [13] 李振伟,罗纪,韩放,等.火星车低气压无风热环境模 拟试验技术[J]. 航天器环境工程, 2018, 35(4): 382-387. LI Zhen-wei, LUO Ji, HAN Fang, et al. Low-pressure thermal environmental simulation test technology for Mars rover model under wind-free condition[J]. Spacecraft environment engineering, 2018, 35(4): 382-387.
- [14] 陈安然,张立海,臧建伯,等. 稳压 CO₂ 气体氛围火星 环境模拟试验系统设计[J]. 航天器环境工程, 2019, 36(4): 398-402.
 CHEN An-ran, ZHANG Li-hai, ZANG Jian-bo, et al. Design of Mars environmental simulation system with pressure-stable gaseous CO₂ atmosphere[J]. Spacecraft environment engineering, 2019, 36(4): 398-402.
- [15] 王宇辰,杜鹏,解峥.用气氮调温系统实现火星表面昼 夜温度模拟[J]. 航天器环境工程, 2018, 35(5): 457-461.
 WANG Yu-chen, DU Peng, XIE Zheng. Simulation of Mars thermal environment by GN₂ temperature adjustment system[J]. Spacecraft environment engineering, 2018, 35(5): 457-461.
- [16] 童华. 真空热试验中控温方法探讨[C]//第十一届全国 低温工程大会论文集. 北京, 2010.
 TONG Hua. The exploring about controlling temperature method of specimen in high vacuum thermal experiment[C]// The 11th cryogenic engineering conference.
 Beijing, 2010.
- [17] 李培印,于晨,洪辰伟,等. 气氮调温热沉系统设计[J]. 真空与低温, 2019, 25(4): 254-258.
 LI Pei-yin, YU Chen, HONG Chen-wei, et al. Heat sink temperature adjusting system design base on nitrogen[J].
 Vacuum and cryogenics, 2019, 25(4): 254-258.
- [18] 李继彦,董治宝.火星风沙地貌研究进展[J].中国沙漠, 2016, 36(4): 951-961.
 LI Ji-yan, DONG Zhi-bao. Research progress of aeolian landforms on Mars[J]. Journal of desert research, 2016, 36(4): 951-961.
- [19] 蒋增辉, 宋威, 鲁伟. 高速风洞模型自由飞试验技术
 [J]. 空气动力学学报, 2017, 35(5): 680-686, 692.
 JIANG Zeng-hui, SONG Wei, LU Wei. High-speed wind tunnel free-flight test technique[J]. Acta aerodynamica sinica, 2017, 35(5): 680-686, 692.
- [20] 战培国. 国外火星飞机及火星风洞研究[J]. 航空科学 技术, 2011, 22(3): 10-12.
 ZHAN Pei-guo. Review of Mars airplane and Mars wind tunnel[J]. Aeronautical science & technology, 2011, 22(3): 10-12.
- [21] 吕世增,张磊,韩潇. 基于真空引射驱动的火星尘暴发 生装置气动结构设计[J]. 真空科学与技术学报, 2017, 37(10): 963-967.
 LV Shi-zeng, ZHANG Lei, HAN Xiao. Aerodynamic

structure design of Mars dust storm generator based on vacuum ejector[J]. Chinese journal of vacuum science and technology, 2017, 37(10): 963-967.

- [22] 吕世增,张磊,韩潇. 火星低气压环境下的尘暴模拟研究[J]. 真空科学与技术学报, 2017, 37(7): 669-673.
 LV Shi-zeng, ZHANG Lei, HAN Xiao. Numerical and experimental simulations of Martian dust-storm in low pressure environment[J]. Chinese journal of vacuum science and technology, 2017, 37(7): 669-673.
- [23] COQUILLA R, WHITE B. Wind-tunnel measurements of Mars dust threshold in an unstable atmosphere[C]//43rd AIAA aerospace sciences meeting and exhibit. Virginia: AIAA, 2005.
- [24] 孙丽琳,秦国泰,朱光武. 火星尘埃与探测[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(1): 28-32.
 SUN Li-lin, QIN Guo-tai, ZHU Guang-wu. Characteristic and detection of Mars dust[J]. Journal of Beijing university of aeronautics and astronautics, 2012, 38(1): 28-32.
- [25] 杨林华. 大型太阳模拟器研制技术综述[J]. 航天器环 境工程, 2012, 29(2): 173-178.
 YANG Lin-hua. Large solar simulator development technologies[J]. Spacecraft environment engineering, 2012, 29(2): 173-178.
- [26] 吕涛,张景旭,付东辉,等.一种高准直的太阳模拟器 设计[J].太阳能学报,2014,35(6):1029-1033.
 LV Tao, ZHANG Jing-xu, FU Dong-hui, et al. Research on a high collimation solar simulator[J]. Acta energiae solaris sinica, 2014, 35(6): 1029-1033.
- [27] 曲健刚. 悬吊式低重力模拟系统控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
 QU Jian-gang. The control research of suspended low-gravity simulation system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [28] 高庆华,李鹏,刘佳彬,等. 火星车有风热平衡试验环 境模拟技术[J]. 航天器环境工程, 2019, 36(6): 594-600. GAO Qing-hua, LI Peng, LIU Jia-bin, et al. Thermal environment simulation technology of Mars rover wind thermal balance test[J]. Spacecraft environment engineering, 2019, 36(6): 594-600.
- [29] RANSOME T, PESKETT S, TOPLIS G. Thermal balance testing of the Beagle 2 Mars Lander[C]//4th international symposium on environmental testing for space programmes. Liege, Belgium, 2001.
- [30] VELZER P V. Convert ten foot environmental test chamber into an ion engine test chamber[R]. NASA 2007-0032831, 2007.
- [31] FISHER T C, MARNER W J. The use of environmental test facilities for purposes beyond their original design[C]//21th space simulation conference. Maryland, USA, 2000.
- [32] LI Ji-yan, DONG Zhi-bao. Research progress of aeolian landforms on Mars[J]. China deserts, 2016, 36(4): 951-961.
- [33] 李莎, 宁远明. 国外火星着陆探测任务失败的启示[J].
 中国航天, 2015(6): 25-28.
 LI Sha, NING Yuan-ming. Failure analyse of foreign Mars exploration[J]. Aerospace China, 2015(6): 25-28.