火星土壤物理力学特性分析

党兆龙,陈百超

(北京空间飞行器总体设计部,北京100094)

摘 要: 火星土壤既是火星表面探测活动的主要探测对象,也是表面探测器设计中需考虑的重要因素之一。火壤的物理力学特性将直接影响着陆器着陆缓冲系统、火星车移动系统等的设计。此外,在着陆器和火星车等表面探测器的地面研制过程中,需要研制模拟火壤,形成模拟的火星表面环境,开展相关的着陆器着陆缓冲性能、火星车移动性能等验证试验。迄今为止,人类已经有多个探测器登陆火星,获取了大量的有关火壤的信息,也研制了多种模拟火壤。通过对已有火壤和模拟火壤的物理力学特性分析,梳理出火壤物理力学特性的参数范围,可为我国火星探测器的研制提供参考。

关键词:火星土壤;物理特性;力学特性;模拟火壤

中图分类号: V476.3 文献标识码: A 文章编号: 2095-7777(2016)02-0129-06 **DOI:** 10.15982/j.issn.2095-7777.2016.02.005

引用格式: 党兆龙, 陈百超. 火星土壤物理力学特性分析[J]. 深空探测学报, 2016, 3(2): 129-133, 144.

Reference format: Dang Z L, Chen B C. Analysis on physical and mechanical properties of Martian soil [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3 (2) : 129-133, 144.

0 引 言

火星土壤(简称火壤)是火星表面环境的重要组成部分,在火星表面探测器的研制过程中,需对其物理力学特性进行模拟,以实现探测器性能的地面试验验证。在着陆器着陆腿和巡视器车轮等设计中,就需要充分考虑火壤的承压特性和剪切特性。迄今为止,已经有3个火星着陆器("海盗1号""海盗2号"^[1]"凤凰号"^[2])和4辆火星车("旅居者"^[3]"勇气号"^[4]"机遇号"^[5]和"好奇号"^[6])成功登陆或巡视火星,获得了火星土壤特性的大量探测成果。此外,欧洲和中国也都开展火星探测的计划。在这些火星表面探测器的研制过程中,研制了多种模拟火壤,取得丰富的研究成果。

本文通过分析已有的火壤物理力学特性的探测成 果以及多家机构已研制的模拟火壤特性,梳理出了火 壤物理力学特性的参数及其取值范围,这可为未来我 国火星探测器的研制提供火壤的相关参考,促进模拟 火壤的研制。

1 火星土壤实地探测结果

火星表面覆盖有一层由风化作用产生的碎裂物形成的风化层,称为火壤。火壤特性的探测一直是火星 探测的重要内容之一,先后经历了观测结果预测、火 星轨道遥感探测以及火星表面就位探测等阶段。由于 目前还没有实现火壤样品的采样返回,对于火星表面 土壤特性的探测成果主要通过着陆器和火星车工程数 据及其携带的探测仪器获得。

目前成功着陆火星表面的着陆器为"海盗1号""海 盗2号"和"凤凰号"。"海盗1号"和"海盗2号"分别于 1975年8月20日和1975年9月9日发射,任务目标是在火 星着陆并搜寻生命存在的证据(图1)。"海盗1号"着 陆器在克利斯(Chryse)平原区域着陆;"海盗2号"着 陆器在乌托邦(Utopia)平原区域着陆。"凤凰号"探 测器(图2)于2007年8月4日发射,任务目标是在火星 表面进行为期90 d的探测任务,并利用机械臂挖掘着 陆点周围的土壤、岩石和水冰等样品进行就位分析, 判断样品是否含有有机物或其他生物痕迹。"凤凰号" 探测器于2008年5月25日在火星北半球高纬度的绿谷

(Green Vally)区域着陆。探测器通过挖掘、烘烤和 分析火星表面样品,证实了火星表面下有水冰存在。

目前成功在火星表面移动的火星车有4辆(图 3),分别为"旅居者号""勇气号""机遇号"和"好奇 号",其中"勇气号"和"机遇号"是属于同一个探测任 务,几乎完全一样。"旅居者号"火星车是首个在火星 表面行进的巡视器,用车轮开展了轮壤剪切试验,获 得火壤深度、内聚力和内摩擦角等特性数值。"勇气



图 1 "海盗号"着陆器 Fig. 1 Viking lander



图 2 "凤凰号"着陆器 Fig. 2 Phoenix lander

号"和"机遇号"探测器分别于2003年6月10日和7月8日 发射,任务目标是探测火星表面水的踪迹,寻找生命 存在的证据。"勇气号"火星车于2004年1月4日在火星 古雪夫(Gusev)撞击坑区域着陆;"机遇号"火星车于 2004年1月25日在火星南半球梅里迪尼(Meridiani)平 原区域着陆。"勇气号"行驶了7.7 km,而"机遇号"的 行驶距离已经超过了一个马拉松的长度。搭载"好奇 号"火星车的火星科学实验室于2011年11月26日发射, 是世界上首个采用"空中吊车"精准着陆方式进行软着 陆的探测器,于2012年8月6日在盖尔撞击坑着陆。"好 奇号"火星车的探测目标包括了挖掘火星土壤、钻取岩 石粉末,对岩石样品进行分析,探测火星过去或现在 是否具有微生物生存的环境,从而确定火星是否具有 可居住性。"好奇号"火星车行进距离已经超过10 km。



图 3 "旅居者号""勇气号"/"机遇号""好奇号"/火星车 Fig. 3 Sojourner, Spirit/Opportunity, Curiosity

这些着陆器和火星车均圆满完成了任务。通过对 其工程数据的分析,可以获得着陆或巡视区域的火壤 特性。通过对"海盗1号"和"海盗2号"着陆腿下陷量的 图像分析,可以估计出着陆腿处火壤的颗粒密度、内 聚力和内摩擦角。此外,通过对相机图像结果的分 析,可以估计火壤的形状和尺寸。"海盗号"任务获得 的火壤主要物理力学特性详见表1。

表1 "海盗号"任务获得的火星土壤物理力学特性

 Table 1
 Mechanical properties of Martian regolith by Viking and pathfinder mission

种类	颗粒密度/(kg·m ⁻³)	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)
砾石	850~1 150	0.4~2.8	15.6~20.4
土壤	$1\ 200{\sim}1\ 600$	0.3~1.9	29.8~39.2

由于火星车的移动性,使得可以获得巡视区域内 大面积的火壤特性。另外,利用火星车车轮的滚动进 行火壤的剪切性能测试。"旅居者号""勇气号""机遇 号"^[7]着陆点的土壤性质结果见表2。目前还未见有关 "好奇号"火星车巡视区域的土壤特性文献,但是根据 "好奇号"火星车的车轮尺寸选择的文献可知,"好奇 号"火星车移动系统设计时所考虑到的火壤物理力学特 性与"勇气号""机遇号"的相同。"好奇号"火星车的成 功运行也表明之前做过的火壤特性预估是正确的。

表 2 三辆火星车着陆点土壤机械特性 Table 2 Mechanical properties of Martian regolith at different

wars landing sites					
种类	颗粒密度 /(kg·m ⁻³)	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)		
旅居者-砾石	1 285~581	0~0.42	34.3		
旅居者-脆性土壤	1 422~1 636	0~0.35	34.4~39.6		
勇气号	$1200{\sim}500$	1~15	~ 20		
机遇号	\sim 300	1~5	~ 20		

2 模拟火壤特性

除了直接采用探测器对火壤特性进行探测之外, 地面也进行了多种模拟研究,以模拟真实的火壤。这 些模拟火壤根据研究目的可分为两类,一类是服务于 科学研究,主要关注模拟火壤的化学成分,通常数量 较少;另一类是服务于探测器工程应用,主要关注模 拟火壤的物理力学特性,通常数量较大,需满足试验 场或土槽的需求。本文关注工程应用的模拟火壤,研 究的国家主要是美国、欧洲(德国、英国和丹麦)以 及中国等。比较典型的模拟火壤有JSC Mars-1^[8-9]、 MMS (Majave Mars Simulant)^[10]、Salten Skov I^[11]、 ES-1/2/3^[12-13]和DLR-A/B^[13]。中国科学院地球化学研究 所、中国北方车辆研究所、北京空间飞行器总体设计 部、吉林大学[14-16]等也都开展了类似的研究工作。

2.1 美国模拟火星土壤特性

美国JPL实验室研制了不少于5种模拟火壤^[17]。对 5种模拟火壤的特性进行了比较分析,样本分别为: 2份来自实验室NO.82和实验室NO.107的室内土槽; 1份来自建筑物NO.317的MER试验设备:1份来自室外 的火星模拟场地:还有1份来自JSC的JSC Mars-1。JSC Mars-1 模拟火星土壤是由JSC中心研制。原料取自夏 威夷的火山灰,光谱分析表面该火山灰的光谱特性与 火星物质比较接近。这5种模拟火壤除了JSC Mars-1是 针对科学目的研制的之外,其余4种都是服务干探测器 的研制目的。

5种模拟火星土壤的颗粒分布情况如图4所示。表 3给出了2种不同紧实程度下的物理和剪切特性测量数 值。美国"凤凰号"和"好奇号"任务研制中还采用了 MMS模拟火壤,具体特性见图5和表4。





表 3 美国模拟火星土壤两种不同紧实程度下的特性

Table 3 Characteristics in compaction states of simulated Martian soil from USA

(a)松软状态						
样本	密度 /(kg·m ⁻³)	相对 密度/%	孔隙/ %	内聚力 /(N·cm ⁻²)	内摩擦角 /(°)	
Lab 107	1.47	26	0.41	0.067	33.30	
Lab82	2.44	64	0.38	0.069	33.70	
MER Yard 317	1.48	14	0.40	0.149	47.90	
Mars Yard	1.62	45	0.32	0.093	35.10	
JSC-1	0.90	0	0.53	0.085	40.80	

(b) 紧实状态					
样本	密度 / (kg·m ⁻³)	相对密 度/%	孔隙/%	内聚力 / (N·cm ⁻²)	内摩擦角 /(°)
Lab 107	1.67	100	0.33	0.141	33.70
Lab82	2.56	95	0.35	0.099	38.30
MER Yard 317	1.69	74	0.31	0.149	53.30
Mars Yard	1.79	103	0.25	0.099	37.20
JSC-1	1.15	96	0.40	0.061	41.40



图 5 JSC Mars-1与MMS粒径级配比较

Fig. 5 Particle size distribution for JSC Mars-1 and Majave soil simulant

表 4 MMS模拟火星土壤机械特性

Table 4 Mechanical properties of Majave soil simulant

样本	体密度/(kg·m ⁻³)	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)
MMS-沙土	1 341~1 384	0.81~1.96	38~39
MMS-灰尘	911~1 078	0.38~0.53	30~31

2.2 欧洲模拟火星土壤特性

欧洲国家研制了多种模拟火壤,主要是英国 Surrev大学研制的ES-1、ES-2和ES-3以及德国DLR研制 的DLR-A和DLR-B。这些模拟火壤先后应用于火星车 的研制,尤其是车轮的土槽试验。

Surrey大学参与研制的模拟火星土壤分别称为ES-1、 ES-2和ES-3(图6), 粒径的分布曲线如图7所示, 物 理特性见表5。

对于ES-1模拟火壤,采用贝克方法进行了承压特 性测量,测量结果分别见表6。在ES-1承压特性测试结 果中,边界效应对测试结果有着明显的影响。



(a) ES-1

图 6 ExoMars 2018任务中模拟火星土壤 Fig. 6 Martian soil simulants for ExoMars 2018 mission





Fig. 7 Particle size distribution for Martian soil simulants ES-1, ES-2 and ES-3

表 5 ExoMars 2018任务中的模拟火壤参数

 Table 5
 Parameters of Martian soil simulants for ExoMars

 2018
 2018

		-	2010	-	-		
米刊	密度/	中值粒径	最大粒	最小粒	内聚力	内摩擦	
尖望	$(kg \cdot m^{-3})$	/µm	径/µm	径/µm	/kPa	角/(°)	
ES-1	1 300	$\sim \! 10$	\sim 32	<10	0.5~1.5	16~21	
ES-1	1 500	$\sim \! 10$	\sim 32	<10	0.5~2.0	18~24	
ES-2	1 450	-	$\sim \! 125$	>30	0~1.5	23~27	
ES-2	1 600	_	$\sim \! 125$	>30	0~1.5	29~34	
ES-3	1 550	400~600	$\sim \! 20000$	>30	0~0.3	30~40	
ES-3	1 800	400~600	${\sim}20~000$	>30	0~0.3	35~2	

表 6 ES-1承压特性测试结果 Table 6 ES-1 pressure-sinkage test results

	-		
种类	沉陷指数	摩擦模量k _φ / (kPa·m ⁻⁽ⁿ⁺²⁾)	内聚力模量k _c / (kPa·m ^{- (n+1)})
低密度	0.67	67.28	0.68
中密度	0.71	61.96	1.30
高密度	0.75	142.36	1.66

德国DLR在ExoMars项目研制过程中,为了开展车轮与火壤的相互作用试验,研制了两种模拟火壤(DLR-A和DLR-B),其力学特性见表7。

表 7 DLR模拟火壤力学特性

 Table 7
 Mechanical parameters for DLR Martian soil simulants

模拟火 星土壤	内聚力 /kPa	内摩擦角 / (°)	沉陷 指数	摩擦模量/ N/m ⁿ⁺² (×10 ³)	内聚力模量/ (N·m ^{- (n+1)})
DLR-A	0.19	24.8	0.63	60.3	2 370
DLR-B	0.41	17.8	1.1	763.6	18 773

3 火壤物理力学特性分析

1) 火壤特性具有普遍适用性

由于目前还没有实现火壤的采样返回,致使对于

火壤特性的分析主要是通过探测器工程数据或专门的 探测仪器获得的。其中,着陆器着陆腿下陷量、火星 车车轮下陷量及移动能力是主要的工程手段。通过对 "海盗号"着陆腿下陷量分析,获得了着陆处的火壤承 压特性,并成功地应用于"凤凰号"的着陆腿设计中。 另外,"勇气号"和"机遇号"的车轮设计时考虑的火壤 承压特性数值范围就继续在"好奇号"火星车车轮设计 中得到了应用。由此可见,虽然火星表面探测器的着 陆区域存在差异,但是有关火壤物理力学特性的分析 具有广泛的适用性,可以借鉴已有的火壤探测成果。

对于火壤实地探测结果,主要是颗粒密度和剪切 特性参数的估计值,而对于承压特性缺少估计值,这 主要是由于已有的探测器没有携带专门的承压特性探 测仪器,但着陆器着陆腿和火星车车轮可作为间接的 探测仪器,需要预估其承压特性。

2) 工程用模拟火壤强调力学特性

服务于火星探测工程应用的模拟火壤主要关注的 是火壤的物理力学特性,除了性能覆盖已有火壤特性 外,在数量供应方面还需要满足工程的使用需求。在 具体操作过程中,就需要淡化科学使用的化学成分等 需求,而需要强调在力学特性方面的需求。同时,对 于含水率等地面环境带来的因素就需要严格控制,通 常不超过5%。

对于某一个具体的模拟火壤,其力学特性不仅与 其物理特性密切相关,而且与其实际的状态如紧实程 度、含水率等相关。这使得在描述模拟火壤特性时, 既需要测量其物理特性,也需要测量其力学特性,从 而达到全面描述模拟火壤特性的目的。

对于火壤的物理特性,主要关注其粒径级配、颗 粒比重、体密度和孔隙率等。而力学特性主要基于服 务于探测器研制的力学特性,即承压特性和剪切特 性。承压特性采用地面车辆力学理论中的贝克公式加 以描述,而剪切特性采用内聚力和内摩擦角表示。

由于模拟火壤物理特性和力学特性描述的是不同 的性质,致使在模拟火壤研制过程,需要分不同的阶 段:制备过程和整备过程。在制备过程主要关注原料 的颗粒密度、孔隙率等物理特性,在整备过程中关注 其力学特性。

3) 火壤物理力学特性范围

通过对国外火壤就位测试结果及模拟火壤的测试 结果,可以获得目前有关火壤的取值范围,见表8和表 9。这些特性的取值范围可为未来我国模拟火壤的研制 提供数值参考。

	表 8	火星土壤物理特性范围	
Table 8	Physical	parameters of martian soil	simulants
颗粒密度/	$(kg \cdot m^{-3})$	密度/(kg·m ⁻³)	孔隙率/%
1 920~	~3 940	900~2 580	33~53

表9 火星土壤力学特性范围

Table 9	Mechanical parameters of martian soil simulants
---------	---

内聚力	内摩擦	沉陷指数	摩擦模量	内聚力模量
/kPa	角/(°)		/ $(kPa \cdot m^{-(n+2)})$	/ $(kPa \cdot m^{-(n+1)})$
0~3	16~53.3	0.6~1.2	60~2 320	$-30 \sim 30$

4 结论及展望

火壤作为火星表面环境的重要组成部分,在火星 探测器的研制过程中具有重要的地位。对于火星表面 探测器研制而言,需要对火壤的力学特性进行充分的 模拟,并将着陆器着陆腿、火星车车轮等与模拟火壤 进行相互作用试验,以验证着陆腿和车轮设计的合理 性。

由于火壤本身的颗粒性质,致使无法实现直接的 力学特性模拟,需要在对物理特性模拟的基础上通过 整备实现力学特性的模拟,因此模拟火壤的研制是一 个系统的工作,需要从原料选取、颗粒制备、试验场 整备等各个环节进行质量控制,从而使最终的模拟火 壤满足性能要求。

对于我国而言,可以借鉴"嫦娥3号"探测器用模拟 月壤的成功研制经验,基于火壤的物理力学特性范 围,制定出我国模拟火壤的研制方案,服务于我国的 火星探测任务。

参考文献

- Moore H J, Jakosky B M. Viking landing sites, remote-sensing observations, and physical properties of Martian surface materials[J]. Icarus, 1989 (81): 164-184
- [2] Shaw A, Arvidson R E, Bonitz R, et al. Phoenix soil physical properties investigation[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114 (E1): 1-19.
- [3] Moore H J, Bickler D B, Crisp J A, et al. Soil-like deposits observed by Sojourner, the Pathfinder Rover[J]. Journal of Geophysical Research Planets, 1989, 104 (E4) : 8729-8746.
- [4] Arvidson R E, Anderson R C, Bartlett P, et al. Localization and physical properties experiments conducted by Spirit at Gusev Crater[J]. Science, 2004, 305 (5685) : 821-824.
- [5] Arvidson R E, Anderson R C, Bartlett P, et al. Localization and physical property experiments conducted by opportunity at Meridiani Planum[J]. Science, 2004, 306 (5702) : 1730-1733.
- [6] Grotzinger J P, Crisp J, Ashwin R, et al. Mars science laboratory mission and science investigation[J]. Space Science Review, 2012, 170 (1): 5-56.

- [7] Sulliva R, Anderson R, Biesiadecki J, et al. Cohesions and friction angles of Martian regolith from MER wheel trenches and wheel scuffs[J]. Journal of Geophysical Research Planets, 2011, 116 (E2) : 364-371.
- [8] Gross F B, Grek S B, Calle C I, et al. JSC Mars-1 Martian regolith simulant particle charging experiments in a low pressure environment[J]. Journal of Electrostatics, 2001, 53 (4) : 257-266.
- [9] Frank B. G. JSC Mars-1 Martian regolith simulant particle-charging experiments in the presence of AC and DC corona fields[J]. Journal of Electrostatics. 2003, 58 (s1-2) : 147-156.
- Peters G H, Abbey W, Bearman G H, et al. Mojave Mars stimulantcharacterization of a new geologic Mars analog[J]. Icarus, 2008, 197 (2): 470-479.
- [11] Nørnberg P, Gunnlaugsson H P, Merrison J P, et al. Salten Skov
 I: a Martian magnetic dust analogue[J]. Planet Space Science, 2009, 57 (5-6): 628-631.
- Gouache T P, Patel N, Brunskill C, et al. Soil simulant sourcing for the ExoMars rover testbed[J]. Planetary and Space Science, 2011, 59 (8), 779-787.
- [13] Brunskill C, Patel N, Gouache T P. et al. Characterisation of Martian soil simulants for the ExoMars rover testbed[J]. Journal of Terramechanics, 2011, 46 (6): 419-438.
- [14] Patel N, Slade R, Clemmet J. The ExoMars rover locomotive subsystem[J]. Journal of Terramechanics, 2010, 47 (4) : 227-242.
- [15] Zeng X J, Li X Y, Wang S J, et al. JMSS-1: a new Martian soil simulant[J]. Earth, Planets and Space, 2015, 67 (1): 1-10.
- [16] 刘兴杰,苏波,江磊,等.月球及火星表面土壤力学性能参数研究
 [C]//中国农业机械学会地面机器系统分会2015学术年会.洛阳:中国农业机械学会,2015,02-04.
 Liu X J, Su B, Jiang L, et al. Moon and Mars surface soil mechanics performance parameters[C]//China Agricultural Machinery Institute of Machine Ground Systems Society Annual Conference 2015.
 Luo Yang: Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 02-04.
- [17] Perko H A, Nelson J D, Green J R. Mars soil mechanical properties and suitability of Mars soil simulants[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2006, 19 (3) : 169-176.
- [18] Seiferlin K, Ehrenfreund P, Garry J, et al. Simulating martian regolith in the laboratory[J]. Planetary and Space Science, 2008, 56 (15) : 2009-2025.
- [19] Scott G P, Saaj M C. Measuring and simulating the effect of variations in soil properties on microrover trafficability[C]//AIAA SPACE 2009 Conference & Exposition. Pasadena, California: AIAA, 2009, 1-10.
- [20] 贾巍, 倪家伟,黄三玻,等. 火星尘埃对太阳电池阵的影响与电帘 除尘研究[J]. 深空探测学报, 2014, 1 (4), 303-307. Jia W, Ni J W, Huang S B, et al. Experimental study on triple junction solar cells performance and dust removal efficiency with Mars dust[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1 (4): 303-307. 作者简介:

党兆龙(1976-),男,博士,主要研究方向:深空探测器总体工作。

通信地址:北京5142信箱337分箱(100094)

电话: (010) 68745777

E-mail: dangzhaolong@126.com

Selection of Absolute Positioning Methods for Mars Rover

PENG Song, JIA Yang, CHEN Baichao

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

Abstract: According to Mars moving detection mission, three absolute positioning methods for Mars rover are proposed: wireless TT&C, image matching, position circling. For the wireless TT&C positioning, the orbit determination is first done, then the rover position relative to the orbit is determined by wireless communicating between two detectors, at last the absolute position of the rover is calculated. For the image matching positioning, the absolute position of the rover is calculated by matching the images during the landing process to the map of the landing zone with geographic information. For the position circling, the orientation of the sun and Mars gravity is measured by sensors at discrete moments, then with these measured results and ephemeris the absolute position of the rover is calculated. The three methods are analyzed and compared, and using advice is given according to factors such as precision, constraints, etc. To get the rover absolute position rapidly and accurately, position circling acts as the primary method to get the position, wireless TT&C method verifies the position, and image matching method revises the position.

Key words: Mars rover; absolute positioning; wireless TT&C; image matching; position circling

[责任编辑:杨晓燕]

(上接第133页)

Analysis on Physical and Mechanical Properties of Martian Soil

DANG Zhaolong, CHEN Baichao

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

Abstract: Martian soil is one of the major factors in the Mars surface exploration which have to be considered during the development of Martian probes. The physical and mechanical properties of Martian soil influence directly the design of landing-pad of Martian lander and the wheels of Martian rover. During the field tests of Martian probes, the proving ground for Martian surface environments must be simulated. The exploration results about the Martian soil and its simulant are analyzed in this paper. The ranges of parameters for physical and mechanical properties of Martian soil are summarized. The results can be used for the development of China's Martian probes.

Key words: Martian soil; physical properties; mechanical properties; Martian soil simulant

[责任编辑: 宋宏]