火星尘埃与探测

孙丽琳 秦国泰 朱光武

(中国科学院研究生院,北京 100049) (中国科学院空间科学与应用研究中心,北京 100190)

摘 要:火星表面尘埃与太阳辐射、热辐射的相互作用直接影响火星大气的结构、热平衡和动力学过程,并会产生改变火星表面反照率和火星地貌的长期效应.火星尘埃环境还对登陆于火星表面的着陆器能源系统和光学载荷等系统构成影响.为此需开展火星大气尘埃的直接就位探测.在介绍了火星的尘埃特性与主要探测方法基础上,提出了采用微质量计技术开展火星表面尘埃就位探测的综合探测器方案.探测器包含3种传感器.尘埃累积传感器通过设置其敏感晶体表面朝上,可以探测火星表面尘埃的沉积质量与速率;荷电尘埃传感器通过加置不同极性的偏置电压,可以探测荷正电尘埃和荷负电尘埃的累积特性;磁尘传感器通过在敏感晶体后加设小型永久磁铁,可以探测磁性尘埃的累积特性.传感器感测质量范围为 10^{-11} ~ 10^{-4} g.火星尘埃综合探测器可应用于未来的火星着陆探测计划.

关 键 词:火星;尘埃;就位探测;微质量计

中图分类号:V 447^{+}.1

文献标识码:A **文 章 编 号**:1001-5965(2012)01-0028-05

Characteristic and detection of Mars dust

Sun Lilin

(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Qin Guotai Zhu Guangwu

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Mars dust contributes to the Mars atmosphere dynamic and thermodynamic evolution process and the long-term modification of Mars albedo and surface geology. Mars dust environment is very crucial for the power system and optical sensors onboard Mars landers (or rovers). There is a need for Mars dust in situ measurement. The characteristics and main detecting solutions of Mars dust were discussed. Based upon Quartz Crystal Microbalance technology, the design of Mars dust characteristic integrated detecting system (MDCIDS) was proposed. MDCIDS includes 3 kinds of sensors. The dust accumulation sensor can measure the accumulation rate and mass of Mars dust with sensing crystal surface upward. The charging dust sensors can measure the accumulation rate of positive and negative charging dust through applying different bias voltages to crystals. And the magnetic dust sensors can measure the accumulation rate of magnetic dust with small permanent magnets behind sensing crystals. The accumulation mass range is 10^{-11} ~ 10^{-4} g. MDCIDS is expected to be applied to future Mars landing exploration mission.

Key words: Mars; dust; in situ measurement; quartz crystal microbalance

火星大气中含有显著的悬浮尘埃,据估算火星表面大气中本底尘埃密度约为 1.8×10^{-7} kg/m^3,这些尘埃与太阳辐射、热辐射的相互作用,关系到火星大气中相关的凝聚和蒸发过程,也影响到火星大气的结构、热平衡和动力学过程,被认为是火星低层大气环境变化的重要因素之一[1-3].

收稿日期:2010-07-20;**网络出版时间**:2012-01-06 15:10;**DOI**:CNKI:11-2625/V.20120106.1510.006

网络出版地址:www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120106.1510.006.html

作者简介:孙丽琳(1971 -),女,黑龙江哈尔滨人,现为中国科学院空间科学应用研究中心副研究员,sunll@nssc.ac.cn.

火星大气尘埃也会对火星表面地貌起着长期效应,尘埃剥蚀、尘埃颗粒迁移和沉积会逐渐改变火星地貌和火表反照率,并参与火星的气候演变. 不仅如此,火星大气尘埃环境对着陆在火星表面的登陆器或漫游器及其有效载荷有重大影响,当这些尘埃沉降在着陆器太阳电池阵和光学敏感器表面时,直接影响到能源系统的效率和寿命,影响到光学敏感器的光学特性和图像质量. 据美国火星探路者(MPF, Mars PathFinder)实时就地观测结果的报道[4],一次强尘暴后,该航天器的太阳电池能源系统的输出功率下降了约 1.5%. 因此在未来的火星探测任务中,对火星尘埃的特性研究就越显重要.

火星上存在着尘暴早已由对火星的地基和天基观测所发现,尘暴发生期间也会出现与地球类似的沙尘云,它通过扩散、膨胀和环流活动影响到火星全球. 1997 年进入火星轨道的火星全球勘测者(MGS, Mars Global Surveyor)曾观测到了发生在 2001 年 6 ~ 7 月间火星强尘暴事件的全过程[5]其后果不仅引起了火星气象的显著变化(如尘暴、尘旋风、尘云、极帽后退以及区域反照率和温度变化等),而且使火星表面重新布上了厚 0.1 ~ 11.1 μm 的薄尘层. 为此,通过对火星表面尘埃累积速率和尘埃特性进行就位监测,不仅可为研究火星尘埃输运机制、火星表面与大气的相互作用提供科学数据,同时还可对着陆器能源系统效率与寿命评估、载荷性能诊断等提供工程数据.

1　火星尘埃特性

目前有关火星尘埃的物理特性尚不十分清楚,而对开展火星尘埃的监测而言,无论是方法还是技术手段,均需要对尘埃的基本特性有初步的认识,以作为开展监测的依据. 国外通过初步探测结果和风洞试验仿真计算,涉及到如下火星尘埃的特性讨论和研究.

1.1　尘埃带电

运动的尘埃是否带电,这对监测火星登陆器(或漫游器)表面的尘埃累积是十分重要的. 不少学者已经提出运动的尘埃和沙粒会产生带电现象[6-8],这主要是由于在风场或流场作用下尘埃颗粒之间的相互碰撞,以摩擦起电或接触带电的方式来形成尘埃荷电. 此外,紫外辐射离解也极有可能使尘埃带电[9]. 带电尘埃与火星表面相互作用后,会产生粘着效应、聚集效应和电输运等现象. 文献[10]用所研制的火星尘埃累积试验样机(LAMDA, Laser Anemometer and Martian Dust Accumulator),在地面风洞中进行了尘埃带电特性模拟试验,试验结果表明,在风的作用下,尘埃有荷电特性. 试验结果还估算出尘埃中约 93% 以上的颗粒荷电,而且荷正电颗粒多于荷负电颗粒.

1.2　磁性尘埃

火星上存在磁异常区域,这种磁异常表明火星壳层的岩石中含有磁性物质[11]. 已有的探测结果也表明火星土壤和尘埃中呈现出较强的磁性元份,虽然平均磁化强度相对较低[12-13]. 火星尘埃的这种特性,将有可能开发用以测量在永久磁体上磁性尘埃的累积和迁移[14],这种磁性尘埃和土壤的响应变化关系对于探测磁矿物的分布无疑是十分重要的.

1.3　火星尘埃的基本参量

表 1 为根据初步探测结果[15-21]获得的火星尘埃的基本物理参量.

表 1　火星尘埃的基本物理参量

参量名称		参量估值
火星大气尘埃颗粒尺度		<60 μm,平均直径约 3 μm,最小颗粒尺度 0.2 μm
火星表面大气尘埃密度	无尘暴时	约 1.8×10^{-7} kg/m^3
	有尘暴时	约 7×10^{-5} kg/m^3
火星表面不同高度上大气尘埃浓度	表面附近	1 ~ 2/cm^3
	15 ~ 20 km 处	0.2 ~ 1/cm^3
火星大气尘埃光学厚度(可见光 ~ 近红外波段)	无尘暴时	0.1 ~ 0.2(前苏联 Phobos 2 结果) 0.05 ~ 1.5(火星全球观测者结果)
	有尘暴时	>3(火星全球观测者结果)

2　火星尘埃探测技术

当前用于火星尘埃的探测方法大致分为 3 类,即光学探测、碰撞探测和质量沉积探测,它们分别针对尘埃的不同特性进行探测.

2.1　光学探测技术

光散射探测技术是一种非侵袭(non-invasive)技术,它对尘埃颗粒的尺寸分布和密度没有偏置效应,不改变颗粒的动态和物理特征. 它的工作原理是通过对自带光源(通常用激光器)发出的光通过尘埃颗粒时的散射信号进行检测,得出尘埃颗粒的尺寸、形状、分布,获得尘埃的光学特性和速度等基本物理参数. 欧空局在罗赛塔(Rosetta)任务中设置了这一类型的光学探测器,名为颗粒探测系统(GDS, Grain Detection System),用于探测彗星尘埃的颗粒尺度和速度分布,探测器的颗粒尺寸检测灵敏度在颗粒密度约 1 颗粒/cm^3、速度小于 10 m/s 时可达 5 μm(最高至 1 μm).

2.2 碰撞探测技术

碰撞探测器(IS, Impact Sensor)主要用于探测尘埃的动态特性,最先在欧空局 Giotto 任务中进行彗星彗核特性的就位探测. 欧空局在罗赛塔(Rosetta)任务中也采用了这种探测器来探测彗星 46P/Wirtanen 的尘埃颗粒动态特性[22]. 碰撞探测器的传感器是一种压电传感器,由酰酸盐、钛酸盐、陶瓷材料构成一个厚 0.5 mm、敏感面积为 100 mm × 100 mm 的膜片,谐振频率 $F = 200$ Hz. 探测器的工作原理是当尘埃颗粒以一定速度碰撞传感器表面时,会产生一个声波并沿平面传播,当声波到达传感器时,使传感器膜片以谐振频率开始振动,同时获得一个与动量相关的电压,经过窄带滤波器和放大后,从基准波的最大峰值获得尘埃颗粒的动量. IS 的探测动量范围为 $3 \times 10^{-11} \sim 3 \times 10^{-5}$(N · s),对应于尘埃颗粒质量为 $10^{-9} \sim 10^{-3}$ g,碰撞颗粒速度约为 1 ~ 100 m/s.

2.3 质量沉积探测技术

作为质量沉积就位探测的主要方式,石英晶体微量天平(QCM, Quartz Crystal Micro-balance)(又称为微质量计)目前已广泛应用于近地尘埃(如火山灰)浓度检测、航天器表面污染气体监测和深空探测中的火星/彗星尘埃探测[23]. 目前已开发出谐振频率达到 50 MHz 的 QCM,其最低可检测质量达到 10^{-11} g. 因此 QCM 可以用于不同环境下可挥发物的质量沉积探测或尘埃的累积质量监测.

表 2 列举了上述 3 种火星尘埃探测技术的主要特性.

表 2 火星尘埃探测技术的比较

探测器名称	探测技术	探测参数	探测下限估值[24]
GDS	光学散射技术	尘埃颗粒尺度/速度分布	1 μm
IS	压电探测技术(压电陶瓷)	尘埃动量	3×10^{-11}(N · s)
QCM	压电探测技术(石英晶体)	尘埃沉积质量	10^{-11} g

由表 2 可知,基于光学散射技术的尘埃颗粒探测器可以对尘埃颗粒的尺度及速度进行探测,碰撞探测器主要针对尘埃颗粒的动量(速度)进行探测,但这两种方法均难以探测尘埃颗粒的长期累积效应. 微质量计能探测到更低质量的尘埃颗粒,同时可以就位监测尘埃随时间的累积质量变化,使科学家在研究尘埃参与火星表面与大气交换机制的同时,更有利于了解和评估火星尘埃对火表着陆器性能的影响,是目前火星着陆探测的优选载荷之一.

3 基于微质量计的火星尘埃综合探测器方案

通过以上介绍可以看出,火星尘埃不仅具有颗粒小、分布广泛的特点,而且还具备荷电和弱磁性的特性. 火星尘埃不仅参与大气的结构变化和热动力学过程,还影响到火星的地貌和表面反照率. 此外,火星尘埃环境对火表着陆器及其载荷的效率和寿命也有重要影响,尤其是尘埃的长期质量累积效应. 因此,开展火星表面尘埃累积速率和尘埃特性的综合监测十分必要.

图 1 表示了火星尘埃综合探测器方案的基本布局图.

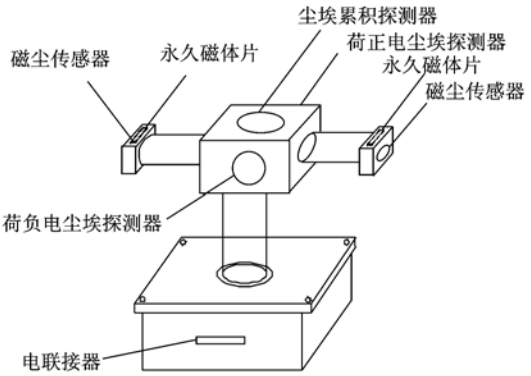


图 1 火星尘埃综合探测器基本布局图

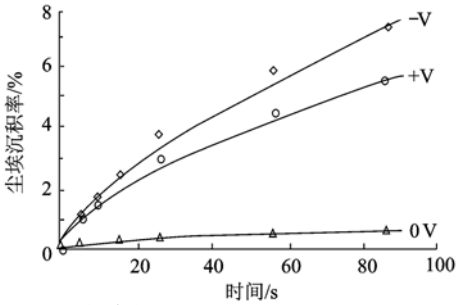
由图 1 可知,方案中包含 3 种不同功能的感测传感器:

1) 尘埃累积传感器. 尘埃累积传感器以石英晶体作为敏感器,主要用于探测火星表面的尘埃累积质量和累积速率. 它是利用石英晶体的压电特性,当有物质质量沉积在石英晶体的敏感表面上时,就会引起晶体的谐振频率变化,通常用一个基准晶体与敏感晶体相匹配,组合而成微质量传感器,并测量两者之间的拍频变化,来获得敏感晶体上沉积质量的变化. 当选用的石英晶体频率不同时,其质量灵敏度也会发生相应改变,对应于谐振频率为 15 MHz 的石英晶体传感器来说,其 20 ℃时的质量灵敏度约为 2×10^{-9}(g/cm^2 · Hz),对于谐振频率为 25 MHz 的石英晶体传感器来说,其 20℃时的质量灵敏度约为 7.1×10^{-10}(g/cm^2 · Hz). 初步设计尘埃累积传感器的最小感测质量为10^{-11} g,最大可测尘埃累积量为 10^{-4} g,用来对火星尘埃和火星尘暴进行实时就位监测,分析尘埃和尘暴对火星表面航天器的效应和沙尘变化对火星气候、地貌等长期演变的影响.

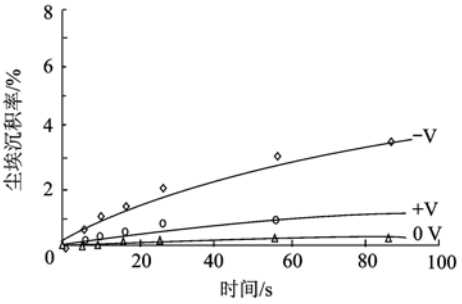
2) 荷电尘埃传感器. 荷电尘埃传感器主要用于探测火星表面的带电尘埃,包括带正电尘埃和

带负电尘埃.

图 2 表示了参考文献[10]在风洞中进行的对尘埃带电特性模拟试验的结果,展示了敏感石英晶体片表面在加设不同极性偏置电位时对荷电尘埃的累积特性. 其中图 2a 为敏感表面朝上、即 $+g$ 状态下的测试结果,图 2*b* 则为敏感表面朝下、即 $-g$ 状态下的测试结果.



a　敏感表面朝上($+g$)状态下的试验结果



a　敏感表面朝下($-g$)状态下的试验结果

图 2　火星尘埃累积试验样机(*LAMDA*)在地面风洞进行的尘埃带电特性模拟试验结果

从试验结果可以看出:①在没有加偏置电压情况下,即仅存在因重力因素而导致敏感表面尘埃累积量不同,此时,面朝上的敏感表面明显比面朝下的敏感表面尘埃累积量大;②加 ± V 偏置情况下(即在表面加设电场情况下),敏感表面的尘埃累积量显著增强,而面朝上敏感表面的尘埃累积量大于面朝下状态的,并随着偏置电位增高,两者敏感表面的尘埃累积量均增大;③无论是面朝上或面朝下状态, - V 偏置情况下的尘埃累积量均明显大于 + V 偏置情况,说明在风场作用下荷正电尘埃量要大于荷负电尘埃量.

根据以上试验结果,在本方案中荷电尘埃的测量将采用使敏感晶片表面处于“ $-g$”状态(即敏感表面朝下或侧立),分别加置正、负电位的方式,组成感测荷正、负电尘埃传感器,用来监测火星尘埃的荷电特性及其变化.

3) 磁尘传感器. 火星上可能存在含有磁性物质的岩石,在火星表面恶劣气候的长期侵蚀下,岩石风化面在碎裂的过程中使火星土壤和尘埃中含有磁性土壤和磁性尘埃. 磁尘传感器主要用于探测火星表面的磁性尘埃. 在本方案中,采用在敏感石英晶片背后设置小的永久磁体,同时敏感石英晶片置于表面朝下(或侧立)和零偏置电位状态. 通过感测磁性敏感石英晶片上尘埃的累积质量及其变化,来测量火星表面的磁性尘埃及其迁移变化,进而为研究推估火星表面磁矿物的分布提供线索.

综上所述,当火星尘埃综合探测器装备于火表登陆器或漫游器上时,通过位于正上方的尘埃累积传感器将获得火星表面的尘埃累积质量及其随时间的变化;通过位于前/后方、敏感表面朝下或侧立的荷电尘埃传感器将获得火星表面的荷正电与荷负电尘埃的累积特性及其随电场变化特性;通过位于两侧、敏感表面朝下或侧立的磁性尘埃探测器将探测不同磁场强度下的尘埃累积特性. 通过对火星尘埃特性的综合监测,将为获得火星表面较为精确的尘埃背景、理解尘埃与大气相互作用以及为火星表面能源系统和载荷功能的评估提供重要的科学数据和工程依据.

4　结　论

开展对火星尘埃特性的探测研究和尘埃在表面上的沉积和积累率监测,不仅对人类探索和开发火星所需了解的火星环境、大气、气候和地貌等科学问题有着重大意义,而且对着陆火星表面的航天器设计、运行、工作寿命以及保障探测目标质量等重大工程问题有着重要的应用价值. 在已开发的近地空间航天器表面污染监测微质量计的基础上,开发用于火星尘埃累积速率和尘埃特性综合监测的火星尘埃探测器并开展相关科学与技术问题研究,具有重要的科学意义和实际的工程应用意义,并将为我国深空探测事业的快速发展奠定良好的基础.

参考文献(References)

[1] Metzger S M, Carr J R, Johnson J R, et al. Dust devil vortices seen by the Mars pathfinder camera[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26: 2781 - 2784

[2] Whelley P L, Greeley R. The distribution of dust devil activity on Mars [J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113: E07002

[3] Towner M C. Characteristics of large Martian dust devils using Mars odyssey thermal emission imaging system visual and infrared images [J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114: E02010

[4] Landis G A. Dust obscuration of Mars solar arrays [J]. Acta Astronautica, 1996, 38: 885 - 891

[5] Cantor B A. MOC observations of the 2001 Mars planet-encircling dust storm [J]. Icarus, 2007, 186(1): 60 – 96

[6] Sickafoose A A, Colwell J E, Horányi M, et al. Experimental investigation of photoelectric and triboelectric charging of dust [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106: 8343 – 8356

[7] Krauss C E, Horányi M, Robertson S, et al. Experimental evidence for electrostatic discharging of dust near the surface of Mars [J]. New Journal of Physics, 2003, 5: 70.1 – 70.9

[8] Calle C I, Mantovani J G, Buhler C R, et al. Embedded electrostatic sensors for Mars exploration missions [J]. Journal of Electrostatics, 2004, 61: 245 – 257

[9] Mazumder M K, Saini D, Biris A S, et al. Mars dust: characterization of particle size and electrostatic charge distributions [C] // 35th Lunar and Planetary Science Conference, League City, Texas: [s. n.], 2004

[10] Merrison J P, Gunnlaugsson H P, Kinch K, et al. An integrated laser anemometer and dust accumulator for studying wind – induced dust transport on Mars [J]. Planetary and Space Science, 2006, 54: 1065 – 1072

[11] Acuna M H, Connerney J E, Ness N F, et al. Global distribution of crustal magnetization discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER experiment [J]. Science, 1999, 284: 790 – 793

[12] Gunnlaugsson H P. Analysis of the magnetic properties Experiment data on Mars: results from Mars pathfinder [J]. Planetary and Space Science, 2000, 48: 1391 – 1404

[13] Hviid S F, Madsen M B, Gunnlaugsson H P, et al. Magnetic properties experiments on the Mars Pathfinder Lander: preliminary results [J]. Science, 1997, 278: 1768 – 1770

[14] Gunnlaugsson H P, Kinch K M, Madsen M B, et al. Device for measuring surface accumulation of dust: applications for future magnetic properties experiments on Mars [J]. Planetary and Space Science, 2004, 54: 693 – 698

[15] Tomasko M G, Doose L R, Lemmon M, et al. Properties of dust in the Martian atmosphere from the imager on Mars Pathfinder [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104: 8987 – 9007

[16] Greeley R, Arvidson R E, Barlett P W, et al. Gusev crater: wind-related features and processes observed by the Mars Exploration Rover Spirit [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111: E02S09

[17] Moroz V I, Petrova E V, Ksanfomality L V, et al. Spectrophotometry of Mars in the KRFM experiment of the Phobos mission: some properties of the particles of atmospheric aerosols and the surface [J]. Planetary and Space Science, 1993, 41: 569 – 585

[18] Drosssart P, Rosenqvist J, Combes M, et al. Martian aerosol properties from the Phobos/ISM experiment [J]. Annales Geophysicae, 1991, 9: 754 – 760

[19] Moroz V I, Gektin Y M, Naraeva M K, et al. Aerosol vertical profile on Mars from the measurements of thermal radiation near the limb [J]. Planetary and Space Science, 1994, 42: 831 – 845

[20] Christensen P R, Anderson D L, Chase S C, et al. Results from the Mars global surveyor thermal emission spectrometer [J]. Science, 1998, 279: 1692 – 1698

[21] Smith M D, Pearl J C, Conrath B J, et al. Mars global surveyor thermal emission spectrometer (TES) observations of dust opacity during aerobraking and science phasing [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105: 9539 – 9552

[22] Esposito F, Colangeli L, Corte V D, et al. Physical aspect of an "Impact Sensor" for the detection of cometary dust momentum onboard the "ROSETTA" space mission [J]. Advances in Space Research, 2002, 29: 1159 – 1163

[23] Battaglia R, Palomba E, Palumbo P, et al. Development of a micro-balance system for dust and water vapour detection in the Mars atmosphere [J]. Advances in Space Research, 2004, 33: 2258 – 2262

[24] Palumbo P, Battaglia R, Brucato J R, et al. The MAGO experiment for dust environment monitoring on the Martian surface [J]. Advances in Space Research, 2004, 33: 2252 – 2257

(编 辑:张 嵘)