

模拟月尘颗粒真空辐射条件下粘附力 测试技术研究

王志浩, 白羽, 田东波, 李蔓
(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: **目的** 研究适合于真空辐射条件下颗粒粘附力的测试技术。**方法** 采用调研、分析和计算的方法建立颗粒物粘附力测试方法。首先调研分析大气条件下颗粒粘附力的测试方法,对比分析原子力显微镜测试方法、离心测试方法、静电测试方法、振动分离测试方法以及激光测试方法的适用性。**结果** 现有测试方法并不适用于真空辐射条件下颗粒物粘附力的测试。针对该问题建立了基于颗粒运动的粘附力分析测试方法,通过该方法可获取颗粒带电量 and 粘附力,给出了基于该方法的试验系统和试验装置的初步设计。**结论** 该测试方法可行,能够满足模拟月尘颗粒粘附力测试的要求。

关键词: 月尘; 颗粒; 粘附力; 测试

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.03.014

中图分类号: TJ86; V41 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)03-0075-05

Research on Adhesion Force Test Technology of Simulant Lunar Dust Grain under Vacuum and Radiation Conditions

WANG Zhi-hao, BAI Yu, TIAN Dong-bo, LI Man
(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

ABSTRACT: **Objective** To study grain adhesion force test technology suitable for vacuum and radiation environment. **Methods** Grain adhesion force test technology was established by investigation, analysis and calculation. First of all, the grain adhesion force test technology under atmospheric conditions was investigated, and the applicability of atomic force microscopy testing method, centrifugal test method, electrostatic test method, vibration detachment test method and laser test method was comparatively analyzed. **Results** All the existing test methods were not suitable for the grain adhesion test in vacuum and radiation conditions. Focusing on the need of the test, the paper established the adhesion force analyzing and testing method, which could give both the charge and the adhesion force based on grain movement. Based on this method, preliminary design of test system and test device was given. **Conclusion** This test method was feasible and could satisfy the demand of simulant lunar dust grain adhesion force test.

KEY WORDS: lunar dust; grain; adhesion force; test

收稿日期: 2015-01-30; 修订日期: 2015-02-17

Received: 2015-01-30; Revised: 2015-02-17

作者简介: 王志浩(1982—),男,硕士,工程师,主要研究方向为月尘环境效应分析与评价。

Biography: WANG Zhi-hao(1982—), Male, Master, Engineer, Research focus: lunar dust environment effect analysis and evaluation.

美国在1969—1972年间先后完成了6次载人探月任务,所有到达过月面的宇航员都发现月尘带来的麻烦远远超出了想象。其中最显著的问题是月尘颗粒具有超强的粘附性,附着并污染表面,造成热控系统故障、密封失效和机构卡死,磨损材料以及产生放电干扰。研究月尘粘附特性,确定月尘颗粒与材料间的粘附力,是研究月面月尘效应进而采取防护措施的基础性关键问题。

国外研究表明,月表的高真空度和辐射环境是导致月尘具有极强粘附性的重要原因。Adrienne Dove等^[1]分析了月尘颗粒受到的范德华力和静电力,认为表面能、粗糙度、力学和电学特性是影响颗粒粘附的主导因素。Otis R. Walton^[2]较详细地分析了月尘的粘附特性,从月尘物理特性入手分析了月面条件下作用于颗粒的基本力,认为表面能相关的粘附力(范德华力)以及静电力是构成颗粒粘附力最重要的基本力。Cynthia M. Katzan等^[3]详细分析了月面自然及人为活动条件下月尘输运及沉积的量,在此基础上分析了辐射器及太阳电池在月尘粘附条件下的遮蔽效应。Stephen Berkebile等^[4]研究了真空条件下火山玻璃与航天器材料之间的粘附力,认为粘附性主要是由于静电吸引和较高表面能作用引起。

月尘的粘附性一方面是由于月尘颗粒自身的物理特性(粒径、表面形貌和低电导性),另一方面是由于月表特殊的环境,主要是高真空和辐射环境,导致月尘累积并保持电荷而产生的。因此在地面测试模拟月尘颗粒需要考虑真空辐射环境,只有在真空辐射环境下测试颗粒粘附力,才能较为接近地反映月表月尘粘附的特性。

1 颗粒粘附力测试技术对比分析

为研究适用于模拟月尘颗粒粘附力测试方法,分析调研了大气条件下颗粒物粘附力的测试方法,包括原子力显微镜(AFM)测试方法、离心测试方法、静电测试方法、振动分离测试方法、激光测试方法。在此基础上分析确定上述测试方法是否适用于真空辐射环境。

1) AFM测试方法。基本的测试原理是将颗粒固定在AFM的探针上,精确控制颗粒与平板材料之间的距离,受粘附力的作用,探针悬臂会发生形变,利用激光测试的方式可以测量探针悬臂的偏移量。AFM测试获得力与位移的变化曲线如图1所示^[5]。文献[6]利用AFM测试方法测试了飞灰颗粒与石墨表面间粘附

力的变化规律,为此特意对探针进行了处理:利用一根玻璃微针将环氧树脂胶粘到AFM原有金字塔针尖靠内的一侧,然后用另一根微针粘取事先分散好的飞灰颗粒,将其放置到胶上。

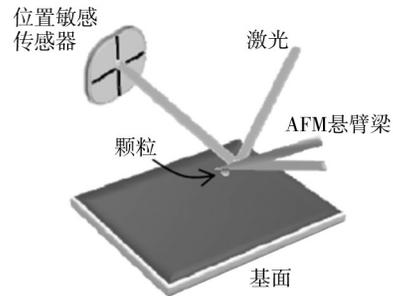


图1 使用AFM颗粒附着测量示意

Fig.1 Schematic view of grain adhesion force test using AFM

2) 离心测试方法。基本原理是使颗粒及所粘附的平面材料一起旋转,在旋转过程中,材料表面粘附的颗粒会受到离心力的作用。随着转速的逐渐增大,离心力也随之增大,当离心力能够满足克服粘附力脱离时,粘附颗粒会脱离甩出,根据此时的转速可近似计算得到颗粒粘附力。文献[7]给出了一种离心法测试颗粒粘附力的测试装置,如图2所示。该试验装置包括连接筒(A)、基底材料(B,表面粘附颗粒物质)和分离颗粒限位筒。试验时,逐渐提高转速,到达临界值时,基底材料上的颗粒会脱离并掉落进入分离颗粒限位筒中。

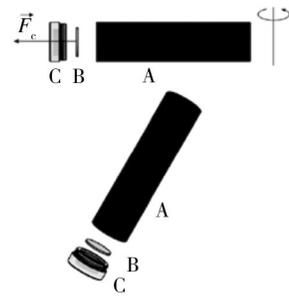


图2 离心测试装置

Fig.2 Device of centrifuge test

3) 静电测试方法。基本原理是将带电颗粒置于均匀电场中,根据颗粒带电极性合理设置电场极性,使颗粒受到垂直向上的电场力。逐渐增大电场强度到一定值,使颗粒所受电场力能够克服重力和粘附力,此时颗粒垂直向上运动。文献[8]给出了一种静电法测试颗粒粘附力的测试装置,如图3所示。平行电极板提供均匀电场,表面粘附颗粒的材料水平放置于下电极上,逐渐增加两极板间电压到临界值时,颗粒

克服粘附作用,材料向上极板运动。众多颗粒运动产生的电流的流动情况可以通过电流计测量,微弱的电流信号可通过放大调理电路最终得到颗粒黏附力。

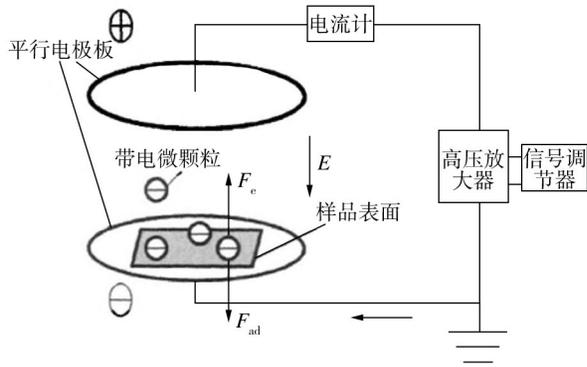


图3 静电测试装置

Fig.3 Device of electrostatic test

4) 振动分离测试方法。基本原理是控制颗粒及所粘附的平面材料一起做加速运动,当加速度达到某一临界值时,颗粒会由于惯性脱离平板材料,根据此时的加速情况可间接衡量颗粒平板间的粘附力。文献[9]给出了一种振动分离法测试颗粒粘附力的测试系统,如图4所示。该试验系统包括测试试样(表面粘附有颗粒的平板材料)、振动台、加速度测试装置、摄录装置及其他辅助设备。试验时通过计算机控制振动台做加速运动,同时利用摄录装置记录颗粒的运动情况。试验完成后,分析处理图像资料获得颗粒脱离基底的准确时间,再查找确认该时刻振台的加速度即可计算得到颗粒粘附力。

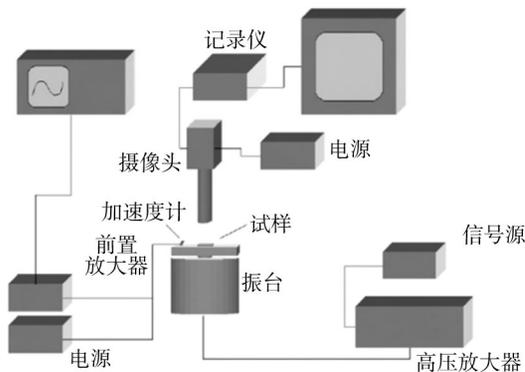


图4 振动分离测试系统

Fig.4 Schematic view of vibration detachment system

5) 激光测试方法。基本原理是使用脉冲激光照射颗粒,颗粒受到瞬时的光压力。当光压力能够克服颗粒粘附力时,颗粒会发生运动,可根据颗粒运动时刻的脉冲激光光压来间接衡量颗粒粘附力。文献[10]给出了一种激光测试颗粒粘附力的测试系统,如图5所示。

试验系统包括激光器、样品盒(内有玻璃材质的球形颗粒)、摄录显微系统、激光能量计及辅助设备组成。试验时从激光器出来的脉冲光入射到样品上,产生的强大光压可以克服样品和底面的粘附力,光路中的石英玻璃片分出一束光,用来监测脉冲光的能量。在样品盒上方用一物镜配合 CCD 组成一套显微系统,并连接到计算机以监测衬底表面样品的分布情况。

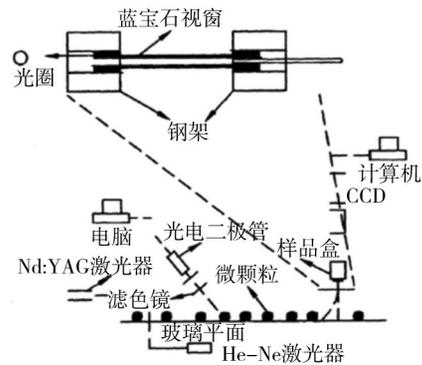


图5 激光测试系统

Fig.5 Schematic view of laser test system

对上述测试方法是否适用于真空辐射环境进行总结分析,其中 AFM 测试法需在悬臂梁尖端固定颗粒,工艺要求高,颗粒与平面材料间的距离为设定值,不能反映颗粒与材料接触的真实情况;另外 AFM 为成品仪器设备,很难在测试的同时提供真空辐射环境。离心法在高速旋转的条件下记录和判断颗粒的脱离较困难,所需处理数据量大,对于粒径太小的颗粒,离心力可能不足以克服粘附力作用,另外离心法所用设备存在旋转机构,在真空条件下无法提供全向辐射。采用静电法测试粘附力时,被测颗粒必须带电,文献[8]的测试系统中的电流计仅能测量运动电荷携带的部分电荷,且颗粒带电量未知,无法仅根据电压值解算粘附力。振动分离法对于粒径太小的颗粒,加速惯性可能不足以克服粘附力作用,也很难在真空辐射条件下实施。激光测试法对光路调节要求较高,同样难以在真空辐射条件下实施。

通过对上述测试方法的分析,发现已有测试手段并不适用于真空辐射条件下的颗粒粘附力测试,因此需有针对性地开展研究工作。

2 基于静电场下颗粒运动的粘附力测试方法

2.1 测试原理

鉴于静电法测试颗粒粘附力的主要难点是无法

确定颗粒带电量 Q , 因此需要通过必要的方法, 联立求解粘附力 F_a 和 Q 。文献[11]给出了一种基于静电条件下颗粒运动的粘附力求解方法, 基本原理如图6所示。

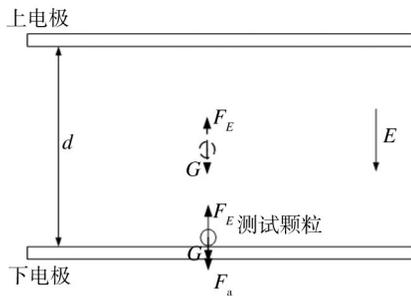


图6 测试原理

Fig.6 Principle of the test

如图6所示, 将一个带电量为 q 的颗粒置于一对平行板电极的下电极上, 在上下电极之间加载电压产生均匀电场 E , 则颗粒受到垂直向上的电场力 F_E , 此外颗粒还受到重力 G 和粘附力 F_a 的作用, 受力情况如图6中实线颗粒所示。缓慢提升加载电场, 则必然存在某个时刻 t_0 , 此时电场力 F_E 等于粘附力 F_a 与颗粒重力 G 之和。 t_0 时刻之后, 由于电场力大于粘附力, 颗粒向上运动。随着颗粒与平板材料的脱离, 粘附力急剧减小, 可以认为此时颗粒仅受重力 G 和电场力 F_E 的作用, 做恒定加速度运动, 受力情况如图6中虚线颗粒所示。假设在 t_0+t_1 时刻, 颗粒运动至上极板位置, 由于两个极板之间的距离 d 恒定, 根据经典力学定律可计算出颗粒带电量 q 和粘附力 F_a , 如式(1), (2)所示。

$$q = \frac{2md^2}{t_1^2 U} + \frac{Gd}{U} \quad (1)$$

$$F_a = \frac{2md}{t_1^2} \quad (2)$$

式中: m 为颗粒质量; U 为 t_0 时刻的外加电压。

由式(1)和式(2)可知, m, d, G 值很容易获得, U 为外加电压值, 可直接读取, 因此测试的关键就变成了对颗粒运动时间 t_1 的测量。拟通过高速摄像机记录颗粒的运动过程, 从中提取并计算颗粒的运动时间 t_1 。

2.2 测试技术方案

利用北京卫星环境工程研究所的月尘沉积与吸附试验系统, 配合真空内颗粒粘附力测试装置进行测试, 试验系统如图8所示。试验系统由真空容器、真空测量装置、高压电源、高速摄录系统、辐射源及配套电源、样品台及测试装置组成。试验时将测试装置放置

在真空容器内的样品台上, 使用辐射源辐照测试装置内的模拟月尘颗粒, 逐渐调高测试装置电压, 利用观察窗外的高速摄录系统拍摄颗粒的运动情况。

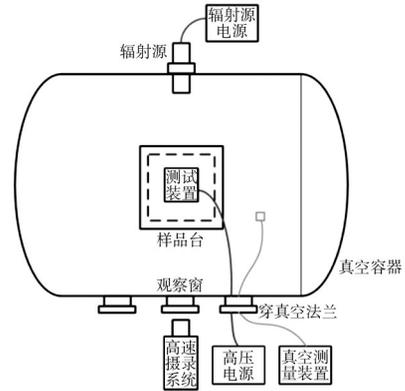


图7 测试系统

Fig.7 Schematic view of the test system

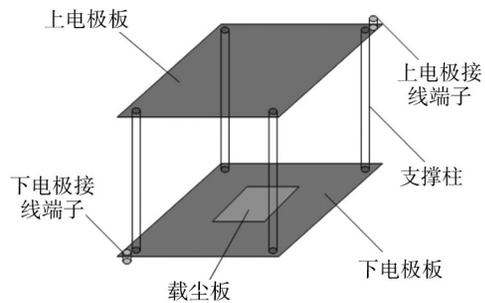


图8 真空辐射条件下颗粒粘附力测试装置

Fig.8 Device schematic of grain adhesion force test in vacuum and radiation conditions

设计的真空内测试装置如图8所示, 试验装置由上电极板、下电极板、载尘板、支撑柱以及电极接线端子组成。支撑柱选用绝缘材料, 真空室外的高压电源通过穿真空法兰连接在上下电极接线端子上。需要说明的是, 如果要测试的平面材料为导体, 则使用该导体材料按照指定的工艺加工下电极。如果需要测试的平板材料为绝缘体, 则需要紧贴绝缘体放置板状导体电极, 此时计算电场大小时需考虑电介质厚度。

测试基本过程: 首先将颗粒试样放置在下电极上/载尘板上, 连接真空容器内外线缆之后关闭真空容器, 打开真空获取装置直到指定真空度; 调节紫辐射源以指定的方式使颗粒试样带电; 以非常缓慢的速度调高压电源, 同时开启高速摄录装置进行拍照或者摄像; 记录颗粒发生运动时刻的电压 U , 根据捕捉到的颗粒运动图像计算颗粒的运动加速度, 根据

式(1)和式(2)即可得颗粒平面材料间的粘附力以及颗粒荷电电量。

3 结语

针对真空辐射条件下测试颗粒粘附力的需求,分析调研了5种大气条件下颗粒物粘附力的测试方法,对其在真空辐射下条件下的适用性进行了讨论。分析结果表明,现有测试方法并不适用于模拟月尘颗粒的粘附力测试。文中设计了基于真空辐射条件下颗粒物运动的粘附力测试方法,能够较为简便地给出颗粒粘附力和带电量的数值。结合测试特点,设计了初步的测试方案,给出了试验系统和真空内测试装置的初步设计,后续将开展进一步的分析测试工作。

参考文献:

- [1] DOVE A, DEVAUD G, WANG X, et al. Mitigation of Lunar Dust Adhesion by Surface Modification[J]. *Planetary and Space Science*, 2011, 59: 1784—1790.
- [2] WALTON O R. Adhesion of Lunar Dust[R]. NASA/CR-2007-214685, 2007.
- [3] KATZAN C M, EDWARDS J L. Lunar Dust Transport and Potential Interactions With Power System Components[R]. NASA/CR-1991-25266, 1991.
- [4] BERKEBILE S, STREET K W, GAIER J R. et al. Adhesion Between Volcanic Glass and Spacecraft Materials in an Airless Body Environment[R]. NASA/TM-2012-217221, 2012.
- [5] B布尚. 摩擦学导论[M]. 葛世荣, 译. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [6] BHARAT Bhushan. Introduction to Tribology[M]. GE Shi-rong, translation. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [6] 柳冠青, 李水清, 姚强. 微米颗粒与固体表面相互作用的AFM测量[J]. *工程热物理学报*, 2009, 30(5): 803—806.
- [6] LIU Guan-qing, LI Shui-qing, YAO Qiang. AFM Measurement of the Interaction between a Micro-sized Fly Ash Particle and a Substrate[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, 30(5): 803—806.
- [7] NGUYENA T T, RAMBANAPASIA C, BOERA A H, et al. A Centrifuge Method to Measure Particle Cohesion Forces to Substrate Surfaces: The Use of a Force Distribution Concept for Data Interpretation[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2010, 393: 88—95.
- [8] HU B, FREIHAUT J D, BAHNNETH W P, et al. Measurements and Factorial Analysis of Micro-sized Particle Adhesion Force to Indoor Flooring Materials by Electrostatic Detachment Method[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2008, 42(7): 513—520.
- [9] AGUI J H. Lunar Dust Characterization for Exploration Life Support Systems[R]. AIAA 2007—1153.
- [10] 范建国, 夏宇兴. 微米颗粒粘附力的光学测量法[J]. *中国激光*, 2003, 30(11): 1023—1026.
- [10] FAN Jian-guo, XIA Yu-xing. An Optical Measurement Method for Adhesion of Micro-particles[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(11): 1023—1026.
- [11] 王志浩, 白羽, 田东波, 等. 真空条件下颗粒粘附力和带电量的测试系统及测试方法: 中国, 201410238965.4[P]. 2014-05-30.
- [11] WANG Zhi-hao, BAI Yu, Tian Dong-bo, et al. Particle Adhesion Force and Quantity of Electric Charge Test System and Method in Vacuum: China, 201410238965.4[P]. 2014-05-30.