

## 环境及其效应

## 宇宙尘星载原位探测技术研究

焦子龙<sup>1,2</sup>, 姜利祥<sup>1,2</sup>, 李涛<sup>1,2</sup>, 孙继鹏<sup>1,2</sup>, 黄建国<sup>1,2</sup>, 朱云飞<sup>1,2</sup>

(1.可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100094; 2.北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 对宇宙尘探测的历史及主要探测技术进行了调研分析总结, 介绍了电离型、压电型、电容型、电阻型、半导体型、质谱型等探测方法以及探测技术的发展, 包括复合探测技术及大面积探测方法。基于我国宇宙尘探测技术所开展的研究工作还较少的现状, 提出应在深空探测任务规划的基础上加快开展相关宇宙尘星载原位探测技术的研究储备, 针对复合式探测技术及大面积探测方法等方面开展研究的建议。

**关键词:** 宇宙尘; 撞击效应; 等离子体

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2018.05.015

**中图分类号:** TJ01                      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2018)05-0072-07

## Spaceborne In-situ Detection Technologies of Cosmic Dust

JIAO Zi-long<sup>1,2</sup>, JIANG Li-xiang<sup>1,2</sup>, LI Tao<sup>1,2</sup>, SUN Ji-peng<sup>1,2</sup>, HUANG Jian-guo<sup>1,2</sup>, ZHU Yun-fei<sup>1,2</sup>  
(1.Key Laboratory of Reliability and Environmental Engineering Technology, Beijing 100094, China;  
2.Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

**ABSTRACT:** In this paper, the history of exploration for cosmic dust and its main techniques were reviewed. The detectors based on various phenomena such as ionization, piezoelectricity, capacitance change, resistance change, conductance change and mass-spectrometer were introduced; and the development progress on composite detectors and large-area detectors were also introduced. Based on the current condition that few researches were carried out for stardust detection technology in our country, it was proposed to accelerate researching stocks on spaceborne in-situ detection technologies of cosmic dust and carry out researches in allusion to composite detection technology and large area detection method, etc.

**KEY WORDS:** cosmic dust; impact effect; plasma

宇宙尘 (Cosmic Dust) 是指宇宙空间广泛存在的固态颗粒<sup>[1-2]</sup>。按照宇宙尘埃存在的位置不同, 可将其分为行星际尘埃、星际尘埃、银河系内尘埃、河外星系尘埃等。近地空间的行星际尘埃一般也称为微流星体, 主要来源于小行星带和彗星。宇宙尘埃是自然形成的, 与人类空间活动造成的微小空间碎片在成分、运动速度、密度等物理化学特性方面有显著区别。

宇宙尘是宇宙的重要组成部分, 在宇宙演化中起着极重要的作用。研究宇宙尘对了解地球和月球的形成及演化历史、恒星及太阳系的起源、陨石的消融过

程、彗星的瓦解、黄道光起因、星际空间航行、地球上各地质事件的发生与天体的关系研究等有重大意义<sup>[3-4]</sup>。此外, 彗星、流星体及星际尘埃等极有可能是地球水、有机物的重要来源, 因此, 对上述天体所含有机成分的研究对地球生命起源研究具有重要意义<sup>[5]</sup>。

此外, 宇宙尘埃颗粒长期与航天器碰撞产生累积效应, 特别是造成光学表面的剥蚀、断裂、污染, 太阳能电池阵被破坏, 热控系统性能退化等。因此, 对宇宙尘的研究将直接服务于航天器设计及在轨安全运行<sup>[6]</sup>。

收稿日期: 2018-02-03; 修订日期: 2018-03-03

基金项目: 国家国际科技合作专项资金 (2015DFR80190)

作者简介: 焦子龙 (1979—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为空间特殊环境及效应的实验和评价技术。

文中在总结宇宙尘星载原位探测任务发展历史的基础上,对宇宙尘超高速撞击现象及典型探测技术进行了系统总结阐述,介绍了撞击电离型、压电型、电容型、电阻型、半导体型、质谱型等探测技术。同时介绍了最近开展的复合探测技术及大面积探测方法等相关研究,最后对探测技术进行了总结,并提出了我国相关技术发展的建议。

## 1 宇宙尘星载原位探测任务

宇宙尘探测方法包括地基探测和星载探测。地基探测有多种方法,例如对轨道与地球相交的毫米以上的流星进行观测。通过收集平流层的行星际尘埃,对其成分和形态进行分析。通过月球表面微陨石坑的研究,对亚微米至毫米级颗粒的尺寸分布进行研究。通过对星际尘埃散射的太阳光及其热辐射产生的黄道光观测,对  $10\ \mu\text{m}\sim 1\ \text{mm}$  大小颗粒的空间分布进行分析<sup>[7]</sup>。星载探测方法包括星载光学探测,即通过光学观测得到宇宙尘参数;星载捕集返回,即通过装置采集轨道宇宙尘颗粒,返回地球后进行分析;星载原位探测,即通过对宇宙尘撞击所产生的物理现象进行测量,得到宇宙尘特性参数。星载原位探测是宇宙尘探测的重要手段,在近地空间尘埃探测、行星尘埃环探测、彗星尘埃探测等方面发挥了重要作用。

### 1.1 近地空间尘埃探测

航天事业发展初期即进行了宇宙尘探测。例如美国 1958 年 2 月发射的第一颗人造地球卫星探险者 1 号即搭载了石英晶体作为撞击传感器,能够探测到平均撞击速度  $30\ \text{km/s}$ 、质量大于  $8\times 10^{-10}\ \text{g}$  的颗粒<sup>[8]</sup>。

1965 年 2—7 月间,美国发射了三颗飞马座卫星。飞马座卫星太阳能电池板单侧长  $29\ \text{m}$ ,宽  $4.1\ \text{m}$ ,两侧电池板总面积达  $210\ \text{m}^2$ ,专门用于探测宇宙尘,以服务于载人登月项目。探测器为电容式,电极分别为铝和铜,绝缘体为三层聚酯<sup>[9]</sup>。

1967 年 12 月美国发射的先驱者 8 号卫星,轨道为日心轨道,近地点和远地点分别为  $0.99, 1.088\ \text{AU}$ ,自旋稳定。卫星携带有宇宙尘探测器,用于探测太阳系中的宇宙尘通量密度、流星雨中颗粒的通量密度和速度,对新型麦克风宇宙尘探测器进行验证<sup>[10-11]</sup>。

此外,长期暴露试验设施<sup>[12]</sup>、欧洲可回收载荷<sup>[13-14]</sup>、哈勃太空望远镜太阳能电池板<sup>[15-16]</sup>在回收后通过分析也获得了微流星体碰撞数据,但其仅能提供飞行轨道上微流星体信息,且无法记录微流星体撞击时间信息。

### 1.2 行星尘埃环环境探测

20 世纪 90 年代,美国发射卡西尼号对木星环和

土星环、行星际空间微流星的物理、化学及动力学参数进行了探测<sup>[17-18]</sup>。尤利西斯号对木星周围的尘埃进行了探测分析<sup>[19]</sup>。卡西尼号卫星上搭载了宇宙尘分析仪(Cosmic Dust Analyzer),可测量单个尘埃颗粒的质量、成分、电荷、速度、飞行方向等参数。仪器的外形如图 1 所示。



图 1 卡西尼号宇宙尘分析仪

宇宙尘分析仪包含两台探测仪器,分别是尘埃析器(Dust Analyzer)和高速率探测器(High Rate Detector)。尘埃析器 DA 由三部分组成,包括电荷测量单元、碰撞电离探测单元和化学成分分析单元。它可测量颗粒的电荷、速度、质量和化学成分。高速率探测器 HRD 采用 PVDF 薄膜探测颗粒撞击次数,主要在土星尘埃环中对尘埃流的通量和质量分布进行高速探测。

### 1.3 彗星尘埃探测

20 世纪 80 年代,为探测哈雷彗星,国际上发射了多颗卫星对其进行探测。哈雷彗星的尘埃探测是重要的科学探测任务之一,代表性的探测器为欧空局于 1985 年 7 月发射的乔托(Giotto)号,它是人类第一个专门用于探测彗星的探测器。Giotto 号外形为圆柱体,直径为  $1.8\ \text{m}$ ,高为  $3\ \text{m}$ ,质量为  $950\ \text{kg}$ ,于 1986 年 3 月 14 日飞抵距离彗核只有约  $600\ \text{km}$ 。乔托号携带有压电探测器、撞击等离子体探测器、薄膜电容式探测器、飞行时间质谱计等尘埃探测器。探测器颗粒质量探测范围覆盖  $10^{-20}\sim 10^{-8}\ \text{kg}$ ,飞行时间质谱计的靶标采用  $10\ \mu\text{m}$  厚的铂金薄膜,其中掺杂 10% 的铝。通过探测数据分析,发现彗发中尘埃颗粒直径处于  $0.01\sim 100\ \mu\text{m}$  范围,密度仅有约  $0.1\ \text{g/cm}^3$ 。根据颗粒成分可将其分为两类,一类是挥发性有机物,主要成

分是 CHON；另一类是难溶硅酸盐，主要成分是钠、镁、硅、铁和钙等。碳氢氧的相对丰度与太阳观测结果相近，说明彗星主要由太阳系的初始物质构成<sup>[20]</sup>。

1999年2月星尘号发射，2004年与 Wild 2 号彗星相遇，穿过彗尾的过程中采集尘埃及气体样本，于2006年返回地球。星尘号带有一个以氧化硅为基底的网球拍海绵状气溶胶，用于俘获直径为 1~100 μm 高速运动的彗发尘埃颗粒，然后折叠收入返回舱，贮存于气溶胶尘埃收集器中。同时，尘埃质谱分析仪还可对尘埃成分进行探测，其原型为 Giotto 号的尘埃撞击分析仪<sup>[21]</sup>。星尘号在轨部分继续工作，被命名为 Stardust-NexT 任务，与 2011年2月15日对 Tempel 1 号彗星进行探测<sup>[22]</sup>。

2004年发射 Rosetta 号探测器，对楚留莫夫-格拉希门科彗星进行探测。同时，向彗星表面发射菲莱探测器。Rosetta 轨道器上携带有多种仪器测量彗星尘

埃动力学特性、成分、结构等特性参数<sup>[23]</sup>。

## 2 宇宙尘探测技术

### 2.1 尘埃颗粒超高速撞击现象及测量方法

相对运动速度高于 1 km/s 的微米级尘埃颗粒高速撞击下，产生多种物理现象，包括被撞击表面形成凹坑或被击穿；被撞击表面被压缩；被撞击表面部分材料及部分颗粒被电离，形成等离子体等。这些现象与撞击颗粒的质量、速度等参数有关。根据这些现象，提出了多种测量方法。表 1 对典型撞击现象、测量方法和典型载荷结构进行了总结<sup>[24]</sup>。由表 1 可知，典型宇宙尘原位探测传感器包括撞击电离型、压电型、电容型、电阻型、半导体型、质谱型等。下面对其原理等进行简要介绍。

表 1 微米级尘埃颗粒高速撞击物理现象、测量方法及典型传感器

物理现象	测量方法	典型传感器
高速撞击下产生等离子体	物理参数测量方法	电离型传感器，包括平面或半球形靶标，微通道板或栅网型离子接收器
	化学成分测量方法	质谱型传感器，包括孔板靶标、静电反射镜、抛物面反射镜、微通道板形式的离子接收器
高速撞击时的光电效应	物理参数测量方法	光电传感器，包括平面或曲面靶标、光电倍增器
	闪光的光谱分析	单色仪
高速撞击下产生撞击坑	靶标导电带断裂	电阻网络型 薄膜电容器型
	靶标在轨暴露，回收后实验室分析	抛光金属靶标
高速撞击下产生击穿	击穿孔光学测量	薄板型传感器，背面安装光电二极管或光电倍增器，或者抛物面反光镜
	击穿孔压力测量	薄壁型充气薄膜阵列，接入压力测量回路
	击穿电学参数测量	薄膜型金属-介质-金属（MDM）结构
高速撞击下发光体闪光	发光体闪光测量方法	传感器包括靶标及与其一定距离的光电倍增器。靶标为涂覆在玻璃基底上的发光体
	靶标空间暴露，回收后实验室分析	扫描电子显微镜等
高速撞击下靶标物质被加热	介电材料的导电性被改变	MDM 结构
介电材料在冲击压缩时稳定发光	介电材料击穿 测量光强度及 MDM 结构的导电率	
高速撞击时压电效应	—	压电型传感器
静电感应	带电粒子飞过电极组时产生的感生电流	单个或多个栅极，或者圆柱电极阵列结构的传感器

## 2.2 典型宇宙尘原位探测传感器

### 2.2.1 撞击电离型

宇宙尘高速颗粒撞击后，颗粒及部分靶材料气化，被加热至 10<sup>5</sup> K 的高温，电离形成等离子体云，其离子或电子电荷电量  $Q$  与微流星的质量  $m$  和撞击

速度  $v$  有关，电荷脉冲上升时间  $t$  与撞击速度  $v$  有关：

$$Q = km^\alpha V^\beta, t = V^\gamma$$

式中： $\alpha$ ， $\beta$ ， $\gamma$  均为试验标定常数。

Planet-B 卫星搭载的火星尘埃探测器 Mars dust counter<sup>[25]</sup> 结构如图 2 所示。颗粒撞击电离探测器靶标，产生的等离子体电子和离子分别被处于正负偏压

(240 V) 的电荷收集板收集分析。此外，靶标接地，颗粒撞击时也得到一路信号，可用于鉴别伪撞击信号。为增加灵敏度，增强撞击等离子体效应，靶材料可以选用铜、钼、钽等材料。

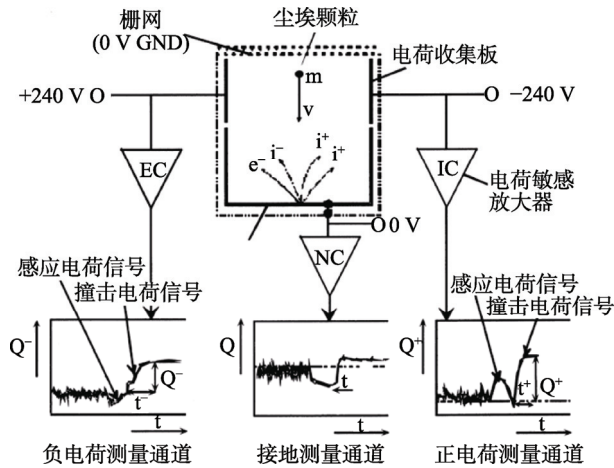


图 2 撞击电离法探测器

### 2.2.2 压电型

如图 3 所示，当高速颗粒撞击极化压电材料时，由于去极化效应产生电荷变化信号。理论推导及试验结果证明，电荷变化量  $Q$  与质量  $m$  和速度  $v$  有关：

$$Q = km^\alpha v^\beta$$

例如，对于 28  $\mu\text{m}$  厚的 PVDF， $\alpha=1.3\pm 0.1$ ， $\beta=3.0\pm 0.1$ 。通过电路检测电荷变化，如果大于设定的阈值，可记录得到一次撞击事件。

聚偏二氟乙烯 (PVDF) 具有非常好的压电性能，压电指数是普通压电陶瓷的 4 倍，而且它还具有非常好的高温稳定性和抗辐照能力。其空间应用由 Simpson 和 Tuzzolino 首先完成<sup>[28-31]</sup>，主要包括 VeGa 1 和 VeGa 2 卫星上的尘埃计数和质量分析器 (Dust Counter and Mass Analyzer(DUCMA))、ARGOS 卫星上的空间尘埃探测器 (SPAcE DUSSt(SPADUS))、

Cassini 号卫星上的高速率尘埃探测器 (High Rate Detector(HRD))、Stardust 卫星上的尘埃通量监测仪 (Dust Flux Monitor Instrument (DFMI)) 等。

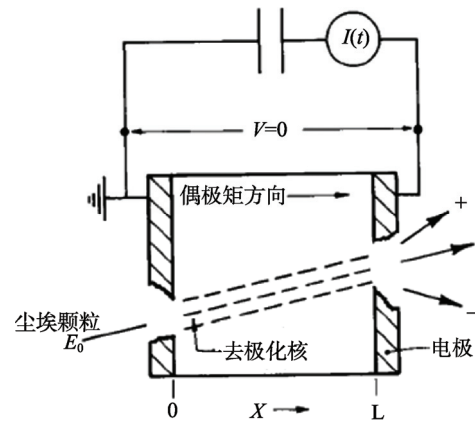


图 3 压电型传感器工作原理

### 2.2.3 电容型

电容型撞击传感器结构上类似平行平板电容，例如上半部分为铝箔，下半部分为镀铝 Kapton 薄膜。一定尺寸的高速颗粒击穿上层铝箔，使得电容放电，通过电路监测电容电压变化即可记录撞击事件。电容型传感器结构简单，探测面积大，电路简单、可靠，一次撞击后仍能正常工作，但仅能对撞击事件进行计数，无法得到高速颗粒的质量、速度等信息<sup>[31]</sup>。

### 2.2.4 电阻型

高速颗粒电阻型传感器的探测单元是靶平面的一组电阻丝。颗粒撞击下电阻丝断开，通过电路检测可记录一次撞击事件。电阻型探测器结构简单、质量轻、功耗低。日本九州工学院研制的低成本的空间微小碎片传感器如图 4 所示<sup>[32]</sup>。传感器为 PCB 板结构，边长 90 mm，上有 128 条铜线。功耗为 0.01 W，质量为 30 g，可探测碎片直径范围为 100~600  $\mu\text{m}$ 。

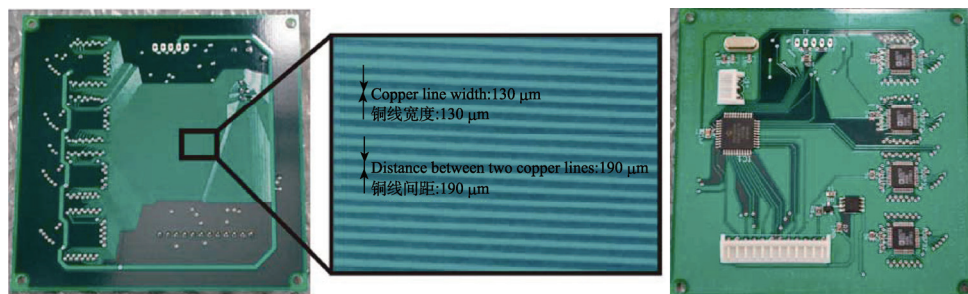


图 4 电阻型传感器

### 2.2.5 半导体型

半导体型探测器的工作原理是在高纯度硅晶片上氧化出一层很薄的二氧化硅，再在二氧化硅膜上镀一层铝膜，硅、二氧化硅膜和铝膜形成一个平板电容

器，常称为 MOS 半导体传感器。当探测器工作时，由外部电路给电容器提供偏置电压。当尘埃颗粒与传感器发生碰撞，穿过铝膜和二氧化硅膜时，电容就会放电产生电流，在外部电路中产生一个电信号，通过

对该信号的分析可得到微小空间碎片或微流星体的信息。半导体型探测器构造相对比较简单,由相互独立的多个探头和一个电子箱组成,探测面积较大,并且可以探测卫星各个方向上空间粉尘的通量信息,曾经在多个卫星上获得应用,并获取了大量的空间实测数据。由于半导体传感器的抗辐照能力不高,从而导致半导体型探测器的在轨服役寿命有限。

### 2.2.6 质谱型

对高速撞击电离产生的等离子体中的离子进行质谱分析,可获得撞击颗粒的成分信息。因此,质谱型载荷多次应用于宇宙尘探测任务等。飞行时间质谱计响应速度最快。质量数在 100~200 amu 范围时,扫描时间在 100~200  $\mu$ s。因此,为分析随机性的颗粒碰撞过程,采用飞行时间质谱计较为合理。高速撞击电离产生的离子初始能量散布可达数十甚至数百 eV,因此,大多数尘埃撞击飞行时间质谱计带有反射式静电场,用于补偿能量散布<sup>[33-36]</sup>。一种典型尘埃撞击飞行时间质谱计的结构如图 5 所示<sup>[33]</sup>。高速尘埃颗粒撞击靶标电离产生等离子体,由于靶标电势为 4800 V,加速栅网接地,其正离子在靶标和加速栅网之间加速,然后进入静电反射区域。静电反射区域由五个环状电极组成,其电势分别为 5000, 3710, 2950, 2160, 930 V,用于补偿离子的初始能量散布,并对离子进

行聚焦。离子通过静电反射区,进入漂移管。漂移管偏压为 3000 V,目的是促进离子分离,缩短漂移管尺寸,而后离子进入离子检测器(微通道板)。最后系统进行信号放大处理,得到质谱图。

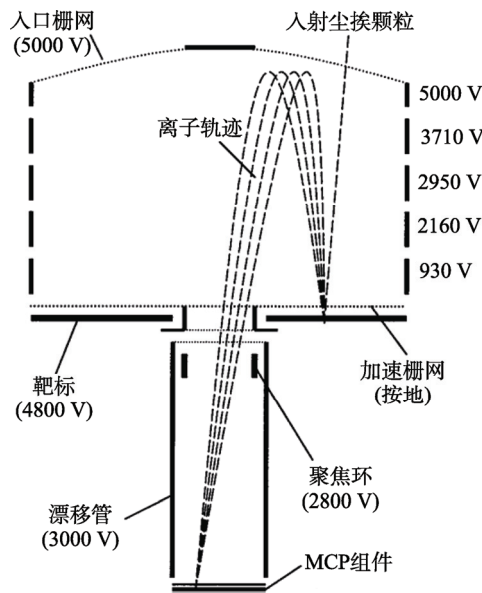


图5 尘埃撞击飞行时间质谱计结构

典型传感器的质量、功耗、探测面积及探测尘埃质量范围总结见表 2<sup>[37]</sup>。

表2 典型传感器的质量、功耗、探测面积及探测尘埃质量范围

航天器	传感器类型	质量/kg	功耗/W	敏感表面面积/m <sup>2</sup>	探测质量范围/g	
HEOS 2	电离型	—	—	0.01	1E-17	1.4E-14
VeGa 1/2	质谱型	10.3	13.5	0.0005	3E-16	5E-10
LDEF	电容型	—	—	1.0	—	—
Giotto	电离型	2.30	1.90	—	1E-16	1E-02
Galileo	电离型	4.20	5.40	0.10	1E-16	1E-06
Ulysses	电离型	3.75	2.0	0.10	1E-16	1E-06
Cassini	质谱型	17.15	17.00	0.1	1.3E-16	1.2E-04
Stardust	压电型	1.76	1.80	0.022	1E-11	1E-04
ARGOS	压电型	23.60	6.30	0.058	5E-11	1E-05
EuTEF/ISS	复合型	2.94	4	0.03	1E-14	1E-07

## 3 探测技术发展

随着空间科学研究的不断深入,对探测技术提出了更高的要求。一方面要求获得宇宙尘的综合信息,包括质量、速度(大小和方向)、密度、尺寸、化学成分等,从而能够对宇宙尘的来源及其演化状态进行研究;另一方面要求获得尽可能多的撞击事件,提高任务效费比。

### 3.1 复合探测技术

高速颗粒撞击时同时产生多种物理现象,因此可采用复合探测技术同时获得颗粒的多种参数。ESA 资

助芬兰 Patria Finavitec 和英国 UniSpace Kent 共同研制了 DEBIE (Debris-In-Orbit-Evaluator) 探测器<sup>[38]</sup>。DEBIE 是一种复合式探测器,由电离型传感器和撞击动量传感器组成。电离型传感器下部为铝箔,上部为叉指型电荷收集器。铝箔下有压电单元,用于探测碎片撞击动量。综合处理撞击信号,可精确得到高速颗粒的质量和速度。德国 OHB 公司开发了一种高速撞击探测器<sup>[38]</sup>。探测器可同时使用声发射、闪光、电磁发射检测三种探测技术。

### 3.2 大面积探测方法

高速颗粒撞击次数正比于传感器敏感表面面积。为增大敏感表面,可利用太阳能电池板或采用可展开式

结构安装传感器,因此需要传感器结构简单,一般采用较多的是电阻型、电离型传感器。例如,Kitazawa 等人<sup>[40]</sup>提出将电阻带安装于可展开结构或卫星外表覆盖的多层上,用于碎片探测。Bauer 等人<sup>[37]</sup>提出在太阳能电池下的 Kapton 绝缘层下增加一层用于高速颗粒撞击探测,如图 6 所示。该层含有电阻丝组成的网格,由检测电路确定撞击位置。Semkin 等人<sup>[41]</sup>提出将太阳能电池阵辅以可展开式薄膜作为高速颗粒撞击靶标,在卫星本体上安装离子接收器,由此卫星整体成为电离式传感器,如图 7 所示。

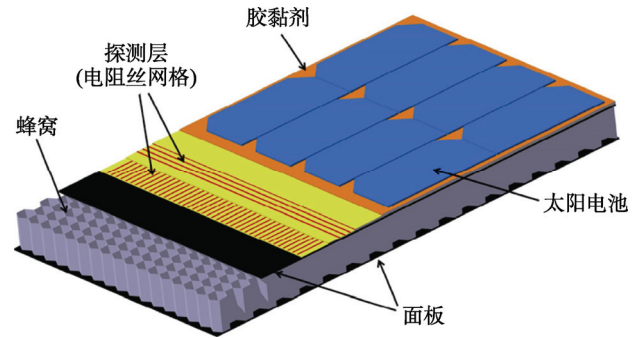


图 6 基于太阳能电池板的大面积探测器结构

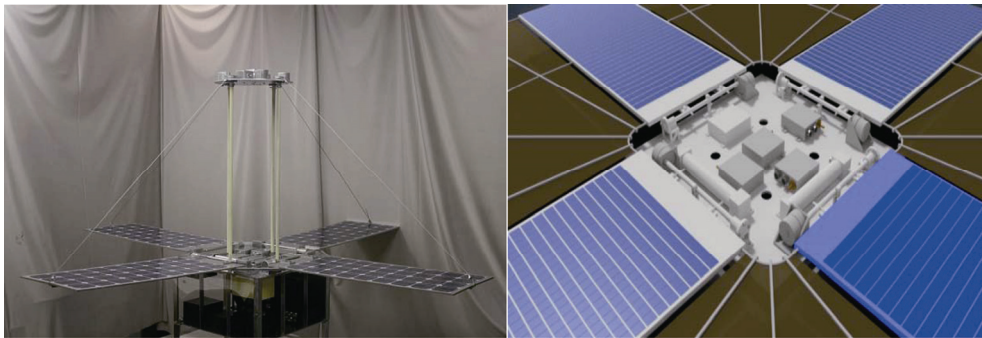


图 7 整星式大面积电离探测器结构

## 4 总结

宇宙尘是宇宙空间固态颗粒。研究宇宙尘对于探索太阳系和宇宙及生命的起源和演化具有重要意义。此外,宇宙尘的撞击累积效应还可能造成航天器性能退化,因此对宇宙尘星载原位探测技术的研究具有重要意义。

文中对宇宙尘卫星探测研究历史进行了回顾总结,对典型探测技术原理进行了分析。宇宙尘的质量、速度、成分、通量等分布差别较大,难以设计实现通用的尘埃传感器,必须根据探测任务目标研制专用传感器,表 1 和表 2 可供选择传感器技术路线。

我国宇宙尘探测技术所开展的研究工作还较少,应在深空探测任务规划的基础上加快开展相关宇宙尘星载原位探测技术的研究储备,针对复合式探测技术及大面积探测方法等方面开展研究。通过现有任务或卫星平台实现飞行验证,以期尽早在月球探测、火星探测、小行星探测等深空探测任务中实现飞行搭载。

### 参考文献:

- [1] SWAMY K S K. Dust in the Universe: Similarities and Differences[M]. World Scientific: Singapore, 2010.
- [2] HENNING T. Notes Physics 815[M]. Springer-Verlag: Berlin, 2010.
- [3] 刘佳明,姜碧涛. 演化晚期恒星中的结晶硅酸盐尘埃

[J]. 天文学进展, 2014, 32(2):148-166.

- [4] 李墨萍,赵刚,李爱根. 星际尘埃研究现状与进展[J]. 天文学进展, 2006, 24(3): 260-276.
- [5] 霍内克,庄逢源. 宇宙生物学[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010.
- [6] BELK C A, ROBINSON J H, ALEXANDER M B, et al. Meteoroids and Orbital Debris Effects on Spacecraft[R]. NASA-RP-1408, 1997.
- [7] LOVE S G, BROWNLEE D E. A Direct Measurement of the Terrestrial Mass Accretion Rate of Cosmic Dust[J]. Science, 1993, 262(5133): 550-553.
- [8] DUBIN M, ALEXANDER W M, BERG O E. Direct Measurements of Cosmic Dust Showers[R]. NASA TN D-1544, 1961.
- [9] NAUMANN R J. Pegasus Satellite Measurements of Meteoroid Penetration[R]. NASA TM X-1192, 1965.
- [10] BERG O E, RICHARDSON F F. The Pioneer 8 Cosmic Dust Experiment[J]. Review of Scientific Instruments, 1969,40: 1333.
- [11] RHEE J W, BERG O E, RICHARDSON F F, et al. Origin of Fifteen Cosmic Dust Particles Intercepted by Pioneer 8 and 9[J]. Nature, 1975, 252(5484): 555.
- [12] SINGER S F, MULHOLLAND J D, OLIVER J P, et al. LDEF Interplanetary Dust Experiment: Techniques for the Identification and Study of Long-lived Orbital Debris Clouds[C]// 42<sup>nd</sup> International Astronautical Federation Congress. Montreal, Canada, 1991.
- [13] ACETI R, DROLSHAGEN G. Eureka Post Flight Technology Investigation Achievements[C]// 45<sup>th</sup> Congress of the International Astronautical Federation. Jerusalem, Is-

- rael, 1994.
- [14] MAAG C R, TANNER W G, BORG J. Effects of Micrometeoroids and Space Debris on Materials Flown on the EURECA-1/TICCE-HVI Experiment a Preliminary Assessment[C]// 44<sup>th</sup> Congress of the International Astronautical Federation. Graz, Austria, 1993.
- [15] FLURY W, KLINKRAD H, JANIN G, et al. Measurements and Modeling of the Space Debris Environment[C]// 45<sup>th</sup> Congress of the International Astronautical Federation. Jerusalem, Israel, 1994.
- [16] GRAHAM G A, MCBRIDE N, KEARSLEY A T, et al. The Chemistry of Micrometeoroid and Space Debris Remnants Captured on Hubble Space Telescope Solar Cells[J]. Intern Journ of Impact Engineering, 2001, 26: 263-274.
- [17] BRADLEY J G, GRÜN E, SRAMA R. The Cosmic Dust Analyzer for Cassini[J]. SPIE, 1996, 2803: 108-117.
- [18] ALTOBELI N, POSTBERG F, FIEGE K, et al. Flux and Composition of Interstellar Dust at Saturn from Cassini's Cosmic Dust Analyzer[J]. Science, 2016, 352(6283): 312-318.
- [19] ZOOK H A, GRÜN E, BAGUHL M, et al. Solar Wind Magnetic Field Bending of Jovian Dust Trajectories[J]. Science, 1996, 274(5292): 1501-1503.
- [20] MCDONNELL J A M, ALEXANDER W M, BURTON W M, et al. Dust Density and Mass Distribution Near Comet Halley from Giotto Observations[J]. Nature, 1986, 321: 338-341.
- [21] TUZZOLINO A J, ECONOMOU T E, CLARK B C, et al. Dust Measurements in the Coma of Comet 81P/Wild 2 by the Dust Flux Monitor Instrument[J]. Science, 2004, 304(5678): 1776-1780.
- [22] ECONOMOU T E, GREEN S F, BROWNLEE D E, et al. Dust Flux Monitor Instrument Measurements during Stardust-NEXT Flyby of Comet 9P/Tempel 1[J]. Icarus, 2013, 222: 526-539.
- [23] ROTUNDI A, SIERKS H, CORTE V D, et al. Dust Measurements in the Coma of Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko Inbound to the Sun[J]. Science, 2015, 347(6220): 3905-1-6.
- [24] СЕМКИН Н Д, ВОРОНОВ К Е, НОВИКОВ Л С. Регистрация Пылевых и Газовых Частиц в Лабораторных и Космических Условиях[M]. Изд-во СГАУ: Самара, 2002.
- [25] FRIICHTENICHT J F, SLATTERY J C. Ionization Associated with Hypervelocity Impact[R]. National Aeronautics and Space Administration, 1963.
- [26] GRÜN E, FECHTIG H, HANNER M S. The Galileo Dust Detector[J]. Space Science Reviews, 1992, 60: 317-340.
- [27] IGENBERGS E, SASAKI S, MUNZENMAYER R, et al. Mars Dust Counter[J]. Earth Planets Space, 1998, 50: 241-245.
- [28] TUZZOLINO A J, MCKIBBEN R B, SIMPSON J A, et al. Final Results from the Space Dust (SPADUS) Instrument Flown Aboard the Earth-orbiting ARGOS Spacecraft[J]. Planetary and Space Science, 2005(53): 903-923.
- [29] TUZZOLINO A J. Applications of PVDF Dust Sensor Systems in Space[J]. Advances of Space Research, 1996, 17(12): 123-132.
- [30] SIMPSON J A, TUZZOLINO A J. Polarized Polymer Films as Electronic Pulse Detectors of Cosmic Dust Particles[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1985, 236(1): 187-202.
- [31] POPPE A, JACOBSMEYER B, JAMES D, et al. Simulation of Polyvinylidene Fluoride Detector Response to Hypervelocity Particle Impact[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2010, 622: 583-587.
- [32] PAULINE F, SHINGO M, HIROSHI N, et al. Space Dust Impacts Detector Development for the Evaluation of Ejecta, the 12th Hypervelocity Impact Symposium[J]. Procedia Engineering, 2013, 58:594-600.
- [33] AUSTIN D E, AHRENS T J, BEAUCHAMP J L. Dustbuster: A Compact Impact-ionization Time-of-flight Mass Spectrometer for in Situ Analysis of Cosmic Dust[J]. Review of scientific instruments, 2002, 73(1):185-189.
- [34] AUSTIN D E, MANNING H L K, BAILEY C L, et al. Hypervelocity Microparticle Impact Studies: Simulating Cosmic Dust Impacts on the Dustbuster[C]// Proceedings of "Lunar and Planetary Science Conference XXXIII". Houston, Texas, 2002.
- [35] AUSTIN D E, MANNING H L K, BAILEY C L, et al. Hypervelocity Microparticle Impact Studies Using a Novel Cosmic Dust Mass Spectrometer[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(E5): 11-24.
- [36] AUSTIN D E, MANNING H L K, BEAUCHAMP J L. A Miniature Mass Spectrometer for High-flux Cosmic Dust Analysis[C]// Proceedings of "Lunar and Planetary Science Conference XXXVIII". Houston, Texas, 2007.
- [37] BAUER W, ROMBERG O, WIEDEMANN C, et al. Development of In-situ Space Debris Detector[J]. Advances in Space Research, 2014, 54:1858-1869.
- [38] MENICUCCI A, DROLSHAGEN G, MOONEY C, et al. DEBIE (Debris-In-Orbit-Evaluator) on-board of ISS: Results from Impact Data and Post-flight Analysis[C]// 6th European Conference on Space Debris. Darmstadt, Germany, 2013.
- [39] SPENCER G, SCHAFER F, TANAKA M, et al. Design and Initial Calibration of Micrometeoroid Space Debris Detector (MDD)[Z]. Darmstadt, Germany: 2005
- [40] KITAZAWA Y, MATSUMOTO H, SAKURAI A, et al. Development of a New Type of Sensor for In-situ Space Debris Measurement[C]// Proc. 60th International Astronautical Congress. Daejeon, South Korea, 2009
- [41] SEMKIN N D, TELEGIN A M, VIDMANOV A S. Small Spacecraft for the Registration of Micrometeorites and Space Debris[J]. Vestnik of the Samara State Aerospace University, 2016, 15(1): 115-121.