

空间暴露实验

——重要的空间科学实验方法

吴汉基 蒋远大 张志远 张宝明

(中国科学院空间科学与应用研究中心)

摘要 利用航天器进行的空间科学实验,基本上可分属加压(密封)舱内实验、非密封舱内实验和暴露(舱外)实验三大类。通常考虑到种种原因和要求,航天器中的大多数科学实验都属于前两类。随着空间科学研究的深入和载人航天、深空探测的需要,暴露实验引起了人们更多的关注和重视。摘要介绍暴露实验的特点、主要研究内容和国外开展的有关情况。

关键词 暴露实验 空间科学实验 空间探测 空间生命科学

利用航天器(卫星、飞船或航天飞机、空间站)进行的空间科学实验,基本上可分属三大类,即加(充)压(密封)舱内实验,非密封舱内实验和暴露(舱外)实验。通常,考虑到种种原因和要求,航天器中的大多数科学实验都属于前两类,而暴露实验考虑和安排的比较少。随着空间科学研究的深入和载人航天、深空探测的发展,暴露实验引起了人们更多的关注和重视。为此,本文将对暴露实验的特点、研究内容、国外几种典型的暴露实验情况,如 20 世纪 80 年代美国由航天飞机送入太空的长期暴露实验装置(LDEF),90 年代俄罗斯返回式卫星上的小型实验以及近年来国际空间站的实验作扼要的介绍,并在此基础上提出一些建议,供有关方面人员参考。

1 暴露实验的涵义与特点

暴露实验是指把实验装置或被试样品(材料、元部件或设备)放置于航天器的桁架或外表面,使之直接暴露于空间环境之中所进行的各种实验。与密封舱和非密封舱内两类实验相比,它有如下几个特点。

(1)实验样品直接处于空间的真实环境中(很少或没有任何屏蔽),这个真实的空间环境不仅与地球的大气环境不同,也有别于航天器加压舱的环境,它

包括了微重力,高真空,来自太阳及外太空的各种辐射,激烈的温度变化,电离层中大量的正、负离子和自由电子,原子氧,微流星,人造轨道垃圾,还具有广阔的视野等等;

(2)所有暴露实验至少进行上述环境因素中的一项或多项的影响实验;有时为了比较,同时在舱内和舱外进行同样的实验;

(3)实验样品大多需要回收,以便研究空间环境因素带来的影响。所以,实验通常在载人航天器或可回收的航天器中进行;

(4)航天器须提供一个安装暴露实验装置的平台,它可以是桁架、航天器的外表面或裸露舱段等;

(5)由于空间环境恶劣,而航天器的资源有限,早期的暴露实验多数是无源的;随着航天技术水平的提高、资源的增加和科学研究的需求,有源的暴露实验越来越多;

(6)实验的时间有长有短,取决于特定的航天器。返回式卫星及航天飞机一般为 1~2 周;“和平”号空间站的实验为 3 个月;尤里卡(EURECA)是 9 个月;而长期暴露实验装置约为 6 年。

2 暴露实验的主要研究内容

和舱内实验一样,暴露实验的研究内容也是很

广的,只不过是侧重点不同而已。简要地说,主要涉及下述几个方面:

(1)由于直接暴露于外空间环境,是探测与研究超高真空、微重力和各种辐射的最有效手段;也为开展空间物理学(日地环境、空间等离子体、磁场、高能粒子、原子氧、陨石)的研究提供了有利的条件;

(2)LDEF 是进行航天工程材料、元部件和系统性能研究最真实的模拟方法;

(3)暴露实验代表生物学研究的一个新工具。许多与空间有关的生物学问题(特别是辐射生物学、天体生物学和行星际生物的迁移等)可通过它进行直接研究。

上述这些方面的具体研究内容与方法,可以从下一节内容中获得进一步的了解。

3 国外几种典型的暴露实验

和舱内实验相比,虽然暴露实验数量较少,但它的出现也是很早的。早在 20 世纪 70 年代的“阿波罗”飞船上就已进行。之后,在前苏联的“联盟”号飞船、“和平”号空间站,生物卫星,美国的航天飞机,欧空局的“尤里卡”及现在正在构建的国际空间站等航天器上,都进行过大量的空间暴露实验,在这里选择几个典型实验作一介绍。

3.1 80 年代美国的大型长期暴露实验装置(LDEF)

20 世纪 80 年代,NASA 的长期暴露实验装置(Long Duration Exposure Facility-LDEF)及其飞行是目前为止规模最大、持续时间最长的暴露实验^[1]。经过约 10 年的准备、设计、研制和各种试验,LDEF 于 1984 年 4 月 7 日由挑战者号航天飞机(STS-41C)送

入高 400km、倾角为 28.4° 的近圆地球轨道,由于采用重力梯度维持在轨的三轴稳定,在轨的运行期间不存在因发动机工作产生的加速力和射流污染的影响。LDEF 飞行任务的目的是提供关于空间环境及其对空间系统、元部件和材料效应的长期数据。

LDEF 的结构呈棱柱形(见图 1),它的横切面是正十二边形,整体宽 4.27m,长 9.14m,暴露表面积 130m^2 ,起飞重量为 9724kg。在其周向的 12 个平表面(72 个)和两个端面(14 个)分布着 86 个实验盒,共进行 57 项实验。这些实验来自 33 个私人公司,21 个大学,7 个 NASA 所属研究中心,9 个国防部实验室和 8 个其它国家,首席研究科学家达 200 多人。实验内容涵盖:

- 在空间环境下材料性质随时间的变化实验。未来航天用的光学、热、机械、电及其它材料试验样品达 10000 多种,涉及金属、聚合物、复合材料、陶瓷/玻璃、镀银太氟隆、热控材料、粘结材料、密封和润滑材料等;

- 航天系统(机械、热、电和光学系统)的性能试验(20 项);

- 航天器能源系统元器件的评价实验;

- 空间辐射及辐射剂量学实验(电离辐射实验 13 项);

- 空间生物学,辐射生物学实验;

- 空间物理及有关领域的科学研究等。

LDEF 原计划于 1985 年通过 STS-51D 飞行实施回收,后因故延期。1986 年“挑战者”号航天飞机发射时爆炸,至使回收一再推迟。直到 1990 年 1 月 11 日才由“哥伦比亚”号航天飞机(STS-32)回收(其时轨



a. LDEF 的整体照片



b. LDEF 的端面载荷分布

图 1 NASA 的 LDEF

道已降至 286km),在轨停留了 5.7 年(69 个月),经历了半个太阳活动周期(入轨时处于太阳活动最小,回收时位于太阳活动最大),绕地球 32422 圈。

LDEF 返地后,对星体外表面及各种实验盒进行了仔细的观测、检查和照相,各种实验装置送到相应实验室进行解体、检查和研究。从 1991~1993 年,先后举行了三次学术讨论会。经数百名科学家的研究、分析获得的数据、结果和资料,构成了 LDEF 的专用数据库。这次飞行实验获得的结果,直到现在,依然是航天器设计的重要参考资料。

3.2 90 年代俄罗斯返回卫星上的短期暴露实验

早在 1975 年,法国科学家就利用前苏联生物卫星(BION)的 KNA 暴露装置进行空间辐射对活体生物的影响研究。在 1987~1992 年间,德国与俄罗斯医学问题研究所合作,也用该装置进行了三次空间暴露试验(10~15 天)。后来,生物卫星改为光子(Foton)卫星,KNA 容器被多功能暴露实验平台“生物盘”所取代。

光子卫星(Foton 见图 2)是一种带有返回舱的卫星,重 6200kg(14000lb),长 6.2m,最大直径 2.5m。它分为服务/制动舱,返回舱(有效载荷舱)和电池舱三个主要部分。返回舱外表面有一个安装暴露实验装置的平台。2.3m 直径的返回舱,可装 700kg 有效载荷,电源全部由蓄电池供给,每天平均允许给有效载

荷 400W 的功率。光子卫星每次飞行 13~16 天。为了减小干扰力,达到最好的微重力条件($10^{-5}g$),光子卫星的轨道为倾角 62.8° 的稍为偏心的轨道(初始轨道在 $220 \times 360km$)而且飞行时没有操作控制。

光子卫星于 1985 年进行首次发射。主要用作物理和材料科学实验,生物学和辐射剂量测定实验。从 1985~1992,每年发射一次,1992 年以后,改为每 2~3 年发射 1 次。

生物盘(Biopan,见图 3)是一种用作空间辐射生物学、辐射剂量学、地外生物学和材料科学研究的多用户暴露实验装置^[2]。它是一个带有可展开盖的圆盘状实验容器,直径 38cm,高 23cm,重 27kg,装在光子号卫星的外表面上。每次飞行,最大实验总质量为 3.5kg。它的发展经历了从无源到有源的提高过程,现用的生物盘,为了检测暴露的空间环境条件,装有内置的太阳传感器,紫外传感器、辐射检测器和压力、温度传感器。生物盘是气密封的并为烧蚀热屏蔽材料所覆盖,临射前安装。当卫星发射、入轨和再入、着陆时,生物盘的盖是关闭的。当卫星进入到预定轨道,盖子打开达 180° ,使装在生物盘底部和盘盖上的实验样品暴露到外空间环境。生物盘盖的打开和关上都是由来自地面的遥控指令控制的。

生物盘于 1990~1991 年由德国 Kayser-Threde

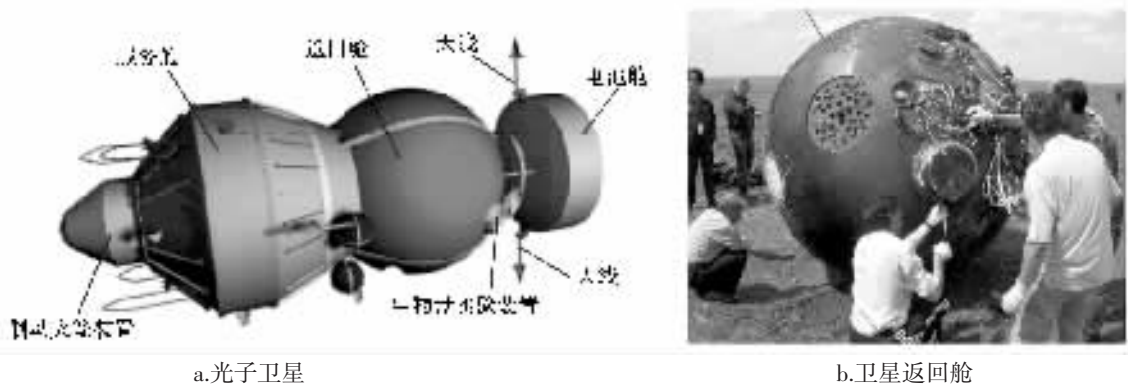


图 2 光子号返回式卫星



图 3 生物盘

公司根据欧空局的合同设计和生产;意大利的 Kayser 分公司作为电子学及软件子合同的承包商;俄罗斯的 TsSKB-Progress 公司提供再入热屏蔽。从 1992 到 2007 年,进行了 7 次发射,在 5 次(1994,1997,1999,2005,2007)为期 2 周的成功飞行中,进行了数十项有关辐射生物学,辐射剂量学,天体生物学(ASTRobio Logy),化学进化和材料科学实验,获得了有关微小动植物(包括植物种子、地衣,酵母细胞和小虾晶胚)和有机分子抗太阳紫外线和宇宙线,软、硬宇宙辐射对活体生物的影响以及低地球轨道在低屏蔽条件下空间辐射环境特性方面的新资料^[3]。

3.3 国际空间站上的暴露实验

国际空间站(ISS)是迄今为止最大的国际航天合作项目,也是继“和平”号之后,人类在太空进行各种新颖、复杂的科学研究、试验、观测、生产的载人空间平台。毫无疑问,它亦是开展暴露实验的最好场所。为此,负责舱段研制的俄、美、日和欧洲航天局等国都安排了暴露实验装置并积极开展各种暴露实验。其中,俄、欧、日的暴露实验装置挂在舱外,美国主要利用空间站上的桁架结构进行。

欧洲航天局在国际空间站上的第一个暴露实验载荷是一个名为“MATROSHKA”的多用户暴露实验装置^[4],它是用来测定当航天员进行舱外活

动时,身体各部分器官感受到的、准确的辐射剂量,这是评估航天员辐射危害风险的先决条件。MATROSHKA 装置是在空间辐射剂量测量方面最重要的一个国际(16 个不同国家、单位参加)合作项目,主要由德国、意大利和俄罗斯研制而成。该装置包括基座、容器和“半身假人(human phantom)”三个主要部件(见图 4)。基座(装有各种电子设备和机、电接口单元)和容器为假人构成一个密闭的,充有 1.05atm 的空间;作为关键部件的假人固定在容器内,假人身上各个器官和不同层面上装有大量主动和被动的辐射检测器。整个装置为直径 600mm,高 1100mm 的圆柱形,重 68kg。它固定在俄罗斯星辰号服务舱的外表面,并于 2004 年 4 月开始工作,持续暴露实验 1.5 年,后由航天员回收,返地后进行研究分析,已取得大量数据和结果。

欧洲航天局的哥伦布舱几经延期后,于 2008 年 2 月 7 日由亚特兰大号航天飞机送上天,并装到国际空间站上。该舱除了舱内有 10 个实验柜外,舱外还有 4 个安装支架,用来安装进行暴露实验的有效载荷(见图 5)。由于对地观察的视野广阔、空间巨大,外部实验可以进行从细菌的微观世界到宇宙空间尺度的研究。其中,一项名为“EXPOSE”的多用户暴露实验设备(图 5c),包含 9 项天体生物学与辐射防护的

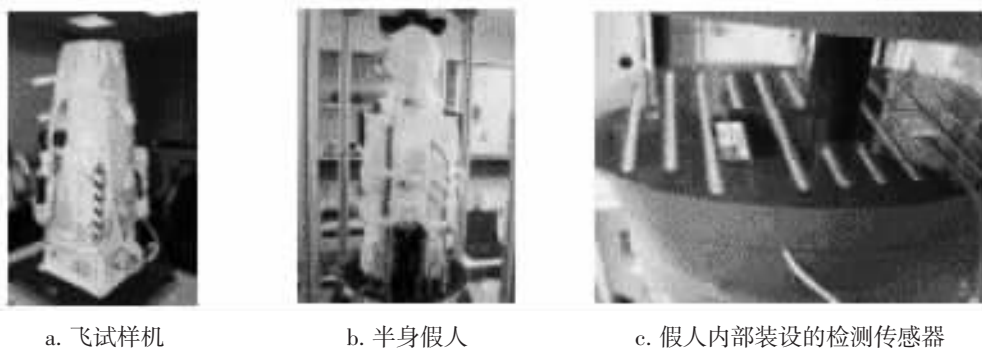


图 4 MATROSHKA 暴露实验装置



图 5 哥伦布舱及其“EXPOSE”装置

研究内容,设备内装有 12 个样品盒,被试样品可达数百个;还备有温控、辐射检测传感器等装置。“EX-POSE”设备除装于哥伦布舱外,它的另一台样机将装在俄罗斯的外部载荷平台上进行试验。这些实验中的样品至少暴露到空间 1.5~3 年以上。

日本实验舱“希望”(KIBO)号(2008 年 5 月入轨),包括加压舱和暴露装置两部分(图 6)。加压舱(直径 4.4m,长 11.2m)内部环境(气体成分和压力)与地球表面环境类似。暴露装置是一种为在空间环境进行长期实验和天文观测的集结地。它可容纳 10 个有效载荷,载荷总重可高达 500kg。有效载荷通过 H-II 运载火箭或航天飞机运输,用机械手安装或拆换。与俄、美、欧洲航天局的暴露装置相比,日本暴露装置可提供较大的功率和较多的通讯容量。暴露实验的有效载荷有:

- 对银河进行观测,获取银河天体精细分布图的世界最大广角 X 射线相机;
- 观测臭氧层的变化,研究臭氧层变薄和地球变暖环境问题的超导亚毫米波声纳;
- 开展激光通信验证实验;
- 空间环境检测。

日本人对空间暴露实验相当重视,他们早在 2001 年就开展了国际空间站轨道的空间环境对各种材料的影响研究。例如,日本国家材料科学研究所 M.Tosa 等人^[5],利用国际空间站俄罗斯服务舱的空间环境暴露装置进行了一年多的固体润滑镀层(运动元件材料表面)的暴露实验。研究了空间环境对商用不锈钢基底上镀 TiN、MoS₂、Cu/BN 和 Cu 镀层性能(成分、摩擦系数、表面粗糙度)的影响。而日本东京技术研究院核工程部的 T.Tobitsuka 等人^[6],则用该装置进行了 3 年多的碳化硅陶瓷材料的暴露实验,研究空间环境对其表面氧化的影响。

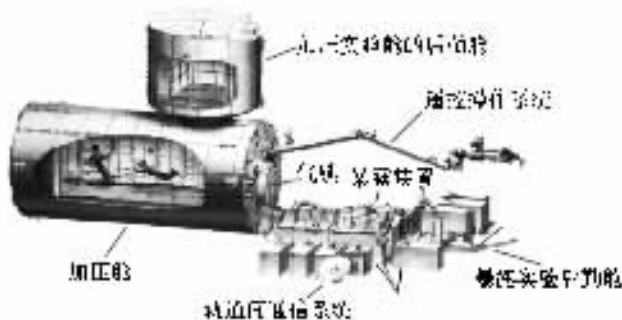


图 6 日本希望号实验舱

自 2001 年 8 月以来,美国在国际空间上进行了一系列材料暴露实验(MISSE-1,2,3,4,5)^[7],而且还将继续进行下去。其目的是研究空间环境中的原子氧、紫外线、辐射、真空、热循环和微流星对各种材料性能的影响。被试的材料包括通信和国防卫星用的材料,宇宙服、新型太阳帆板电池、真空密封材料和各种镀层材料等,实验时间一般为 1 年,然后回收,返地进行研究分析。图 7 是 2001 年,航天员装到空间站外的一个材料试验装置照片^[8],该装置可进行 850 余种材料样品的长期暴露实验,以获取材料性能变化的数据。

4 结束语

暴露实验是空间科学实验研究和空间探测的重要组成部分。无论过去还是现在,世界许多国家对此都很重视,他们利用搭载各种航天器开展了多方面的大量研究。

中国有返回式卫星、神舟号载人飞船,空间实验室和空间站建造已列入发展规划。众所周知,开展空间科学实验费用高、机会少,可用资源又很有限,因此利用一切可能增加实验的机会和内容,以求获得更多的实验数据和研究结果是中国科学家追求的目标。

空间探测和空间科学实验除进行舱内实验外,更有旺盛的暴露实验项目需求。我国航天器的种类和平台支持条件已有能力满足暴露实验的需求,中国载人航天工程将为促进我国的空间科学研究做出更大贡献。◇

参 考 文 献

[1] LDEF:<http://setas-www.larc.nasa.gov/LDEF/index.html>
 [2] Wolfgang Schulte, René Demets, et. al. BIOPAN and EXPOSE: Space Exposure Platforms for Exo/Astro-biological Research in Earth



图 7 材料暴露实验装置

- Orbit with Relevance for Mars Exploration. EGU General Assembly 2006-EGU06-A-06643 Vienna, Austria, 02-07 April 2006
- [3] Wolfgang Schulte, Pietro Baglioni, et. al. The Space Exposure Platforms BIOPAN and EXPOSE to Study Living Organisms in Space. COSPAR2006-A-02930-2, Beijing, 2006.7
- [4] J. Dettmann, G Reitzand, G Gianfiglio. MATROSHKA—The first ESA external payload on the International Space Station. Acta Astronautica Vol.60, No.1, p17-23, 2007
- [5] Masahiro TOSA, Akira KASAHARA, et.al. Effect of Exposure Test on Solid Lubricative Coating in Space Orbit. C10 -4, Third

- International Symposium on Physical Sciences in Space, Nara, Japan, Oct. 22-26, 2007
- [6] Toshihide TOBITSUKA, Eiji MIYAZAKI, et.al. Surface Oxidation of the Silicon Carbide Ceramics during Space Environment Exposure up to Three Years. C9-3, Third International Symposium on Physical Sciences in Space, Nara, Japan, Oct. 22-26, 2007
- [7] Julie A. Robinson, Tracy L. Thumm and Donald A. Thomas. NASA utilization of the International Space Station and the Vision for Space Exploration. Acta Astronautica Vol.61, No.1-6, P176-184, 2007
- [8] 尹怀勤.漫话国际空间站.太空探索.2008, No.3, P4-9

(上接第 38 页)

SAFER 作为营救装置与作为检测工具是显著不同的: ①营救飞行仅持续 13min, 而检测飞行长达 45min。②对营救飞行, 航天员使用双手操作手控器, 一只手操纵控制柄, 另一只手须稳定 HCM; 对检测飞行, 航天员在操作手控器时须使用数字相机, 这就要求 HCM 应严格稳固在航天员前面以便可单手操作。③从安全性考虑, 作为营救装置, SAFER 可在双重安全系绳 2 次故障情况下使用; 但检测飞行要在 EVA 硬件不存在任何故障情况下执行。④为满足探测距离的需要, 安全系绳须由现在的 16.764m(55ft) 增长为 25.908m(85ft)。

目前, EVA TPS 检测技术已取得重要突破。应用摄影测绘图像分析技术, 仅用数字相机即可获得 3D 深度测量。因此, 在检测飞行期间, 航天员无需接触航天器表面且可与航天器表面保持 1.524m(5ft) 外的距离, 这不仅免除了接触时的反作用力干扰, 也避开了碰损 TPS 材料的危险。因此, 应用数字相机的 SAFER 检测飞行有可能独立提供高品质的 3D 图像。

4.3 单人 EVA 飞行器

EVA 航天员装备(含航天服系统与机动装置)技术的另一个发展方向是单人 EVA 飞行器, 它是介于 EVA 航天员装备与大型多功能载人航天器之间的飞行器。单人 EVA 飞行器的基本结构是可容纳单人的刚性压力容器, 其内部气压要比一般 EVA 航天服的服压高得多(达到大型航天器的周围压力), 因此无需使用纯氧气体, 这既省却了预呼吸时间, 也提高了安全性。

单人 EVA 飞行器具有大型载人航天器的大多

数分系统, 如推进、导航、热控、通信、电源分系统, 并应用便携式生保系统的先进技术; 此外, 还有遥控自动装置, 应用小型机械臂与末端操纵器(或灵巧机械手)代替 EVA 航天员戴舱外手套的双手, 从事 EVA 作业。目前, 单人 EVA 飞行器仍处于概念设计阶段, 虽有多种方案, 但刚性压力容器与几个小型机械臂

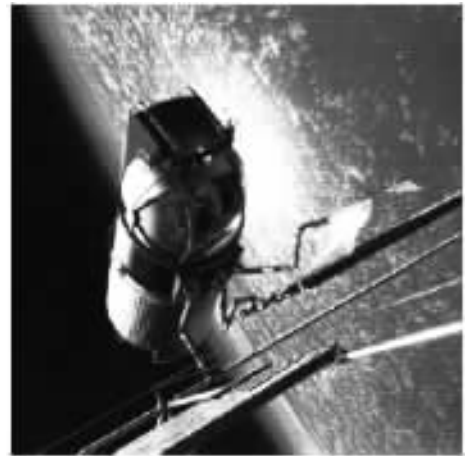


图 14 应用 3 个机械臂(1 个用于位置保持, 另 2 个用于操作)的单人 EVA 飞行器^[1]

仍是基本特征(参见图 14)。

参 考 文 献

- [1] Stephen J H. Advanced EVA Capabilities: a Study for NASA's Revolutionary Aerospace Systems Concept Program [M]. NASA/TP-2004-212068
- [2] ESA. EVA Support Information. 2007
- [3] David J S. Walking in Space[M], Springer, 2004
- [4] Neff M, Fowler W T. Extravehicular Activity, "http://www.shuttlepresskit.com/scom/211.pdf"
- [5] Zebulon C.Scovile, Sudhakar Rajula. SAFER Inspection of Space Shuttle Thermal Protection. AIAA 2005-6722