

专题—空间环境与试验技术

临近空间环境及环境试验

童靖宇, 向树红

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 从热力学结构、大气成分特征、大气电磁特性等方面介绍了临近空间环境参数,按照临近空间飞行器的平均密度、飞行速度、飞行高度介绍了临近空间飞行器的分类及特点。阐述了临近空间环境试验的方法,并对临近空间环境试验技术的发展提出了初步建议。

关键词: 临近空间; 环境; 环境效应; 环境试验

中图分类号: V11 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)03-0001-04

Near Space Environment and Environment Tests

TONG Jing-yu, XIANG Shu-hong

(Beijing Institute of Spacecraft Environmental Engineering, Beijing 10094, China)

Abstract: The near space environmental parameters were introduced from the aspects of thermomechanics, composition, and electromagnet characteristic of the atmosphere. The types and features of near space vehicles were introduced according to their density, speeds, and altitude. Near space environmental test methods were described and some suggestions on development of near space environmental test technologies were put forward.

Key words: near space; environment; environmental effects; environmental test

随着空天一体化技术的发展,临近空间已成为世界大国关注和争夺的焦点。临近空间飞行器起着打通空天之间的断层的作用,与一般飞机和航天器相比,具有飞行高度适中、部署速度快、机动能力好、生存能力强、威胁作用大、载荷能力大、费效比高、可实现局部区域持久响应等特点,在国民经济建设和国防建设中具有广泛的应用范围。

临近空间特殊的环境特征使这一空域的开发利用难度极大,临近空间环境的特殊性和临近空间飞行器研制的高难度是临近空间至今尚未开发利用的

主要原因。研究临近空间环境的特殊性,开展临近空间环境效应及环境试验方法研究,对我国临近空间飞行器技术发展具有十分重要的意义。

1 临近空间环境

1.1 定义

通常航空飞机飞行的最高上限为 20 km, 20 km 以下称作航空空域;卫星等轨道飞行器的最低飞行

收稿日期: 2012-03-03

作者简介: 童靖宇(1950—),男,博士生导师,研究员,主要研究方向为空间环境工程。

高度为 100 km, 100 km 以上称作空间。国际宇航联定义的临近空间大致范围为 23~100 km, 根据我国纬度情况, 临近空间范围为 20~100 km。

1.2 地球大气分层

由于地球自转及不同高度的大气对太阳辐射吸收程度的差异, 大气在水平方向比较均匀, 在垂直方向呈明显的层状分布, 可以按照大气热力学性质、大气成分、电磁特性等特征分成若干层次。

1.2.1 按热力学结构分层

按照大气热力学性质和大气垂直减温率的变化, 把大气分为对流层、平流层、中间层和热层。

1) 对流层。对流层范围从地表到十几公里高度, 赤道及热带地区对流层顶高在 15~20 km 之间, 中纬度及极地地区对流层顶高在 8~14 km 之间。对流层的特点是: 大气温度随高度降低, 对流层顶处温度在 $-50 \sim -55$ °C 之间, 大气的垂直混合作用强, 气象要素水平分布不均匀。

2) 平流层。平流层范围从对流层顶向上到 50 km。平流层温度随高度升高, 在 50 km 左右平流层顶附近达到最大值 (-3 °C)。平流层内存在逆温, 使大气很稳定, 垂直运动很微弱, 多为大尺度平流运动。

3) 中间层。中间层范围从平流层顶到 85 km。中间层大气吸收的太阳辐射能量很少, 温度随高度增加而下降; 在 85 km 左右的中间层顶附近, 温度在 $-90 \sim -100$ °C 之间, 是地球大气中最冷的地方。

4) 热层。热层是中间层顶以上的大气层, 在热层内温度始终是增加的。热层顶高度随太阳活动而变化, 太阳活动高峰期, 热层顶高度在 500 km 左右, 温度可达 2 000 K; 太阳活动宁静期, 热层顶高度下降到 250 km 左右, 温度约 500 K。

1.2.2 按大气成分特性分层

按照大气成分垂直分布的特点, 大气分为均质层和非均质层。

1) 均质层。从地表到 86 km 高度, 包括对流层、平流层和中间层。对流和湍流扩散作用使大气成分均匀混合。除臭氧等可变成成分外, 大气中各种成分比例在垂直方向和水平方向保持不变。

2) 非均质层。非均质层范围从 86 km 高度直至外空间。受重力作用及光化学作用, 大气中的成分随高度而变化, 出现质量分层现象。

1.2.3 按照大气的电磁特性分层

按照大气电磁特性可分为中性层、电离层。

1) 中性层。中性层范围从地表到 60 km 高度, 由均质中性大气分子组成。

2) 电离层。电离层范围在 60~1 000 km 高度之间, 也有资料认为将延伸到 2 000~3 000 km 与磁层融合。电离层等离子体由电子、离子和中性粒子构成能量很低的准中性等离子体区域, 粒子温度一般在 180~3 000 K 之间。

2 临近空间环境及其对飞行器的影响

2.1 临近空间飞行器

2.1.1 按照飞行器平均密度划分

按照飞行器平均密度可分为浮力型、升力型及浮升一体型。

1) 浮力型飞行器平均密度小于所在高度的大气密度, 利用阿基米德定律产生浮力, 包括平流层飞艇、浮空气球等。

2) 升力型飞行器平均密度大于大气密度, 通过航空动力、火箭推力等产生飞行器升力, 包括各类空天飞机、火箭等。

3) 升浮一体型飞行器介于浮力型和升力型飞行器之间。高度较低、大气密度较高时, 可以凭借自身浮力上升浮空; 高度升高、大气密度较低时, 采用航空动力产生升力, 包括飞艇、飞机等。

2.1.2 按照飞行速度划分

通常按照速度将飞行器划分为 4 类: 低速 ($0 \sim 0.3$ 马赫)、亚声速 ($0.3 \sim 1$ 马赫)、超声速 ($1 \sim 5$ 马赫)、高超声速 (大于 5 马赫)。

2.1.3 按工作高度分类

18~30 km 通常为平流层飞艇、浮空气球、平流层浮空器、高空长航时无人机等, 30~60 km 通常有高超声速巡航飞行器等, 60~100 km 通常有亚轨道飞行器等。

2.2 临近空间环境及其对飞行器影响

临近空间跨越多个大气分层, 自然环境多变, 环境因素复杂多变、非常严酷, 临近空间飞行器种类多, 原理结构相差大, 工作高度跨度大。因此, 临近

空间环境对不同飞行器的影响具有复杂性、多变性。文中从共性角度介绍真空、温度、臭氧、太阳紫外辐射、粒子辐射、电离层、气动热与再入等离子体环境及其对临近空间飞行器的影响。

2.2.1 真空

临近空间大气压力随高度增加呈指数衰减,跨越了低真空、中真空和高真空。20 km处真空度为 5.5×10^3 Pa,30 km处真空度为 1.2×10^3 Pa,50 km处真空度为 8×10^2 Pa,100 km处真空度为 2.64×10^2 Pa,真空效应主要有:压力差效应、电子/电工部组件的低气压放电效应、真空出气与污染效应、真空泄漏等。

2.2.2 温度

临近空间范围的温度变化很复杂。平流层底部20 km处温度约 -50 °C,温度随高度上升增加;平流层顶50 km附近达到 -3 °C;从50 km高度进入中间层,温度随高度升高而下降;到中间层顶85 km附近降到 $-90 \sim -100$ °C之间;从85 km高度向上进入热层,温度很快上升到数百度,然后升温趋势变缓升至1 000~2 000 K之间。温度效应主要有:对电子/电工设备仪器性能影响、材料温度疲劳损伤、结构与机构温度变形等。

2.2.3 臭氧

臭氧是波长小于242 nm的太阳紫外线与高层大气相互作用的结果。太阳紫外光解离大气氧分子产生氧原子,氧原子与氧分子反应生成臭氧。

臭氧从海拔数千米处开始存在,在10~35 km之间密度较高,达到 10^{12} 个/cm³,在20 km左右最高为 4.77×10^{12} 个/cm³。之后,随着高度增加密度逐渐下降。

臭氧具有很强的腐蚀性。臭氧的腐蚀性来自于很强的氧化性。除了金、铂外,臭氧几乎对所有金属都有腐蚀作用。臭氧对非金属也有很强的腐蚀作用。臭氧对聚合物材料会产生强烈的氧化腐蚀作用。

2.2.4 太阳紫外辐射

临近空间的太阳紫外辐射非常强烈,特别是20~30 km区域,几乎与外太空环境一样。

紫外辐射会使光学玻璃、太阳能电池盖片玻璃和甲基丙烯酸窗口等改变颜色,影响光谱的透过率;同时也会改变介质材料的介电性质,破坏聚合物分子的化学键,造成材料分解、裂析、变色、弹力和抗张力降低等。受紫外辐射影响最大的是聚乙烯、涤纶等高分子薄膜。紫外辐射和臭氧会影响橡胶、环氧树

脂粘合剂和甲基丙烯酸气动密封剂性能的稳定性。

2.2.5 能量粒子辐射

临近空间粒子辐照环境主要来自太阳宇宙射线、银河宇宙射线、中子等。大气中子是临近空间需要重视的能量粒子辐射环境。太阳宇宙射线、银河宇宙射线与残余大气中的氮、氧原子发生核反应,产生次级中子,称作大气中子。由于地磁场捕获和残余大气衰减作用,进入临近空间的能量粒子数量很少,没有总剂量效应,主要是单粒子效应。

1) 单粒子翻转。高能重离子、质子、中子使微电子器件芯片敏感区电离或核反应引起双稳态元件的状态变化。

2) 单粒子锁定。体CMOS器件包含寄生的双极p-n-p和n-p-n晶体管,这些寄生晶体管可形成p-n-p-n可控硅或SCR结构。发生单粒子事件时,少数载流子在寄生晶体管基区产生,在p-n-p-n环中的正反馈使SCR导通,使其呈低阻抗状态,这种典型的SCR行为称作单粒子锁定效应。

2.2.6 电离层

临近空间在60~100 km范围进入电离层,等离子体密度为 $10^3 \sim 10^4$ 个/cm³。电离层对无线电波存在严重的影响,出现电波时延、信号衰落,通信质量下降。等离子体鞘套会改变飞行器上天线的阻抗特性,可能产生噪声。对于采用100 V以上高压电源的飞行器,可能造成静电放电、电流泄漏、电磁干扰、污染吸附、离子溅射等效应。

2.2.7 气动热与再入等离子体

对于在临近空间高超声速飞行的飞行器,会产生气动热环境。飞行器头部激波对气流会产生强烈压缩,气流与飞行器壁面会发生剧烈摩擦,使飞行器及周围流场温度迅速增高。高动态飞行器需要再入大气时,将会诱导再入等离子体环境。通常,再入等离子体鞘套的电子密度为 $10^{19} \sim 10^{20}$ 个/cm³,厚度为0.25 m。飞行器的通信信号被稠密等离子体鞘层反射和吸收,严重干扰了通信信号的传送,甚至完全造成通信中断,这种现象称为“黑障”。

3 临近空间飞行器环境试验设计

临近空间飞行器环境试验设计应在分析产品全寿命剖面所经历环境效应影响的基础上,制定试验

计划和试验大纲。

确定试验基线时,必须在考虑产品特性和计划特性的基础上设计每个试验项目。试验项目按照产品的不同阶段设计,例如研制试验、鉴定试验、验收试验。

1) 真空及温度试验。根据飞行器工作高度,选择低气压/温度综合试验箱或热真空试验设备。考核的内容主要有:飞行器热设计模型的正确性及热控系统的能力,低气压($10^3 \sim 1$ Pa)放电,温度应力下的设计、制造、工艺缺陷,真空泄漏。如果仅考核温度应力效应,可以采用温度试验箱、高低温冲击箱等。

2) 臭氧。臭氧环境试验是平流层飞行器特有的试验内容,属于化学反应试验,主要进行材料试验。通常,臭氧环境模拟设备应由一个真空容器、臭氧源和相应测试仪器组成。紫外与臭氧对聚合物材料有协合作用,加剧了臭氧的腐蚀效应。为了研究这种协合作用,设备中需要增加紫外源。

3) 紫外辐射。紫外辐射主要产生光化学作用,通常主要进行材料和小组件试验。近紫外模拟通常采用短弧汞氙灯和高压汞灯。其中,短弧汞氙灯与太阳紫外光谱接近,模拟效果好。氙灯为常用的真空紫外光源,波长范围为115~400 nm,为连续光谱,具有体积小、使用方便、成本低的优点。

4) 粒子辐射。临近空间能量粒子辐射主要是对微电子器件的单粒子效应。单粒子效应地面模拟试验主要采用质子或重离子加速器、铯放射源或脉冲激光。中子模拟方法包括:散射中子源、中子加速器、裂变反应堆中子、放射性核素中子源、中子管等。单粒子效应试验主要内容是测量单粒子效应的LET_{th}阈值、单粒子效应等效截面或敏感性与LET值的变化曲线、单粒子翻转率、单粒子锁定率等参数。

5) 电离层。电离层等离子体环境试验用于在60 km高度以上飞行的飞行器。等离子体环境模拟设备主要由真空容器、真空获得系统、等离子体源、等离子体参数诊断装置组成。通常,使用100 V以上的高压飞行器才需要进行等离子体带电试验、电流泄漏试验。对需要研究电磁波与电离层相互作用的试验,试验容器需要设置透波窗口,试验设备应放在电磁吸波实验室内。

6) 气动热与再入等离子体。模拟气动热环境一般采用高功率红外灯阵、燃气炬等,模拟高温高压再

入等离子体通常采用电弧放电源。由于模拟环境试验区比较小,一般仅进行材料试验、小组件试验和缩比试验,采用理论分析、数值仿真和物理实验结合的方法评价气动热与再入等离子体效应。

4 结论

1) 目前,国内外对临近空间飞行器尚处于研究阶段,如何进行临近空间飞行器环境适应性评价需要做大量探索。临近空间的大部分环境因素与航空、航天环境相同,差异主要是环境参数及其时空分布的变化。研究临近空间环境,建立临近空间环境模型及数据库是开展临近空间环境试验的关键。

2) 临近空间跨越大气分层的3个区,环境复杂多变。临近空间飞行器的飞行高度、速度、升力原理各不相同,飞行器原理、结构、功能、性能变化很大,与环境的相互作用也各不一样。因此,应针对不同飞行器类型及工作高度,具体分析和工作环境的相互作用,研究不同环境因素的影响机理及损伤模式,在此基础上设计环境试验项目、环境应力量级及施加时间。

3) 临近空间飞行器的大部分环境试验项目与航空、航天产品环境试验项目类似,充分借鉴航空、航天产品环境试验标准规范,针对临近空间飞行器的特点及不同之处进行研究创新,探索出适合我国临近空间飞行器环境试验的评价方法。

参考文献:

- [1] MARCUS Young, STEPHANIE Keith, ANTHONY Pancotti. An Overview of Advanced Concepts for Near-space Systems, AIAA-2009-4805[R]. 2009.
- [2] WILLIAM Everette Symolon. High-altitude, Long-endurance UAVs vs. Satellites: Potential Benefits for US Army Applications, ADA523102[R]. (余不详)
- [3] 胡滨. 空天一体视角下的临近空间[J]. 南京政治学院学报, 2010, 26(3): 38—45.
- [4] 季艳. 国外临近空间飞行器技术发展概述[J]. 国际航空, 2006(9): 45—50.
- [5] 黄本诚, 童靖宇. 空间环境工程学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010.