

空间站原子氧环境仿真研究

翟睿琼¹, 姜海富¹, 田东波¹, 姜利祥¹, 杨东升¹, 安晶²

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094; 2. 北京空间技术研制试验中心, 北京 100094)

摘要: 目的 预估空间站在轨期间遭受的原子氧撞击通量。方法 通过对空间站构型进行建模, 轨道、姿态参数设定, 应用 Kepler 计算方法对空间站在轨 20 年的原子氧积分通量进行初步的仿真计算和分析。结果 得到了航天器各个微元表面的原子氧积分通量数据。结论 通过数据分析可知, 迎风方向上经受的最大原子氧通量达到 5.79×10^{22} atoms/cm², 综合空间站各个不同位置表面的积分通量数据, 可为航天器结构与材料选择提供技术支持。

关键词: 空间站; 原子氧; 环境分析; 通量密度; 积分通量

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2014.03.008

中图分类号: V416.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)03-0035-05

Simulation of Atomic Oxygen Interaction with Space Station

ZHAI Rui-qiong¹, JIANG Hai-fu¹, TIAN Dong-bo¹, JIANG Li-xiang¹, YANG Dong-sheng¹, AN Jing²

(1. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China;

2. Beijing Research and Test Center for Space Technology, Beijing 100094, China)

ABSTRACT: **Objective** To predict the AO ram flux of the space station on the orbit. **Methods** Through modeling of space station configuration and setting of orbit/attitude parameters, preliminary simulation calculation and analysis were performed for the AO ram flux of the space station on the orbit for 20 years using the Kepler calculation method. **Results** AO ram flux data all over the spacecraft was obtained. **Conclusion** Through data analysis, it was revealed that the maximum AO ram flux reached up to 5.79×10^{22} atoms/cm². The ram flux data at the surface of different positions of the ISS could provide technical support for the configuration design and material selection of the spacecraft.

KEY WORDS: space station; atomic oxygen; environment analysis; flux density; ram flux

航天技术的发展日新月异, 空间站等大型长寿命低轨道航天器的研制对国防建设及国家科技水平的提升都具有重要意义。低轨道航天器在轨期间可能遭受原子氧、热循环、紫外辐照、带电粒子辐射等

空间环境的作用^[1-5]。

原子氧是低地球轨道大气的主要成分, 其含量大约占中性大气的 80%^[6]。原子氧由太阳紫外线分解氧分子而产生, 随着轨道高度、轨道倾角、太阳

收稿日期: 2014-01-20; 修订日期: 2014-02-24

Received: 2014-01-20; Revised: 2014-02-24

作者简介: 翟睿琼(1986—), 女, 西安人, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为空间环境效应。

Biography: ZHAI Rui-qiong (1986—), Female, from Xi'an, Master graduate student, Engineer, Research focus: space environment effects.

活动周期与季节等的不同而异。原子氧自身在低地球轨道环境中的密度并不高,静态环境下其影响是可以忽略的,但当航天器以 8 km/s 左右的速度沿轨道飞行时,原子氧撞击的束流密度可达 $10^{13} \sim 10^{15}$ atoms/(s · cm²)。在如此高的撞击速度下,原子氧的平均撞击能约为 5 eV^[7],这一能量足以使许多材料的化学键断裂并发生氧化。同时,由于原子氧自身具有极强的氧化性,它会造成材料表面的氧化剥蚀,使材料产生质量损失,进而引起性能退化。原子氧对有机材料的腐蚀作用还会生成可燃性气体挥发物,进而污染卫星上的光学仪器及其他设备^[8—10]。

我国未来的空间站将在低地球轨道长期运行,因此,开展原子氧环境仿真研究具有重要的工程意义。

1 原子氧密度计算分析

1.1 原子氧环境分析

假定空间站轨道方案是倾角为 42°~43°,高度为 400 km 的近圆轨道。该轨道空间中中性大气中氧原子占主要成份,其含量约占 80% 左右,如图 1 所示。

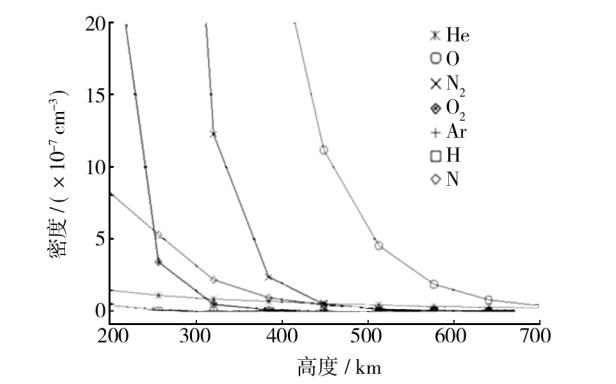


图 1 低轨道中性大气各组分密度分布
Fig.1 Density distribution of the neutral atmosphere components in LEO

影响地球高层大气中原子氧密度的因素众多,主要有轨道高度、太阳活动、地磁活动、地球公转与自转及经纬度等。

目前用于高层大气密度分析的主要模型有 MSISE 模型、MET 模型等,这些模型的主要输入参

数为时间、高度、经纬度、F10.7、Ap 等,计算结果有一定的偏差,但一般小于 10%。

本研究分析工作使用国际上常用的 MSISE 90 模型。

1.2 任务期间原子氧密度分析

目前,空间站暂定于 2020 年发射,在轨时间约 20 年。寿命期内原子氧平均密度计算结果见表 1。

表 1 寿命期内空间站任务环境原子氧密度计算结果
Table 1 AO density computation results of the ISS working environment

年份	原子氧密度/cm ⁻³	年份	原子氧密度/cm ⁻³
2020	1.79E+08	2030	7.53E+07
2021	2.54E+08	2031	1.79E+08
2022	2.50E+08	2032	2.54E+08
2023	1.85E+08	2033	2.50E+08
2024	1.10E+08	2034	1.85E+08
2025	6.03E+07	2035	1.10E+08
2026	3.48E+07	2036	6.03E+07
2027	3.38E+07	2037	3.48E+07
2028	3.38E+07	2038	3.38E+07
2029	3.39E+07	2039	3.38E+07
在轨 20 年		1.20E+08	

根据统计分析,若 2020 年发射,空间站 20 年寿命期内所经受的大气环境中原子氧的平均密度为 1.20×10^8 cm⁻³,各年份原子氧平均密度如图 2 所示。可以发现,2021 年、2022 年原子氧通量密度为 2.50×10^8 cm⁻³,处于高峰值;2026—2029 年原子氧通量密度相对较低,大致在 3×10^7 cm⁻³,空间原子氧

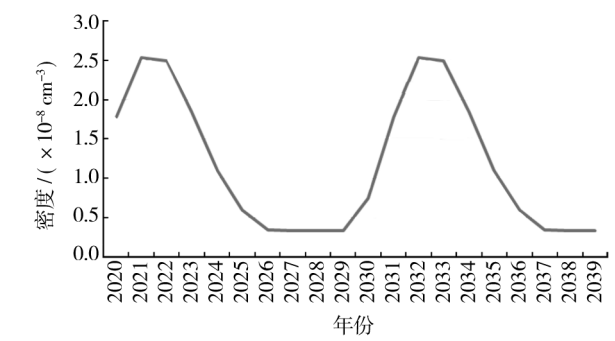


图 2 空间站在轨各年份原子氧平均密度
Fig.2 Average AO densities of the ISS orbit in each year

密度也显现出 11 年的周期性变化。

2 航天器表面原子氧积分通量分析

空间站不同的外表面与飞行方向有着不同的攻角,因此原子氧与之发生撞击的通量密度与积分通量也不尽相同。

根据定义,某一个面上的原子氧积分通量为通量密度在时间范围内的卷积分,通量密度由大气的数密度与原子氧撞击的平均速度计算获得。

应该注意的是,假设定义粒子的入射方向为 x 轴,如图 3 所示,只有当 $v_x \geq 0$ 时才对平均速度进行计算。

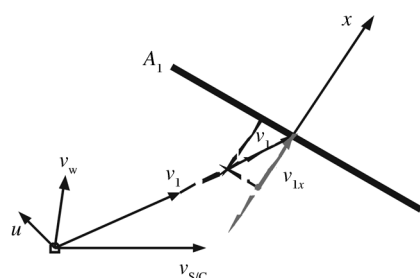


图 3 原子氧对航天器表面撞击示意

Fig. 3 Schematic diagram of AO impact on the surface of spacecraft

原子氧的平均速率的计算公式为:

$$\bar{v}_x = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} v_x f(\vec{v} - \vec{v}_{aero}) dv_x dv_y dv_z$$

原子氧束流密度 $\phi = N_0 \bar{v}_x$, 其中 N_0 为大气中原子氧的数密度,因此:

$$\phi = N_0 \sqrt{\frac{2RT}{M}} [e^{-s^2} + \sqrt{\pi} (1 + \text{erf}(s))]]$$

其中: s 为原子氧的速比, $s = \frac{\vec{v}_{aero} \cdot \vec{X}}{u_m}$; erf 为误差

函数, $\text{erf}(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-x^2} dx$ 。

粒子的速度是由动力学速度 (aerodynamic velocity) 和热运动速度 (thermal motion) 两部分矢量求和得出的。即:

$$\vec{v} = \vec{v}_{aero} + \vec{u}$$

式中: $\vec{u}$ 为热运动速度矢量; $\vec{v}$ 为动力学速度矢量。

高层大气中的粒子热运动服从 Maxwellian 分布,速度方向分布服从各向同性。

若 $f(u_i)$ 是速率为 u_i 的概率,则:

$$f(u_i) = \frac{1}{\sqrt{\pi} u_m} \exp\left(-\frac{u_i^2}{u_m^2}\right)$$

式中: u_m 为热运动速率; u_i 为 x, y 或 z 方向的热运动速率分量。

大气的热运动速率 u_m 又可由下述公式获得:

$$u_m = \sqrt{\frac{2RT}{M}}$$

式中: T 为大气的环境温度, K; R 为常量, $R = 314 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$; M 为分子的质量浓度, g/mol;

动力学速度为大气自旋速度与航天器速度的矢量和为:

$$\vec{v}_{aero} = \vec{v}_w - \vec{v}_{s/c}$$

式中: $\vec{v}_w$ 由大气自旋模型 (HWM-90) 获得; $\vec{v}_{s/c}$ 为航天器的速度。

3 空间站运行轨道空间原子氧积分通量分析

3.1 空间站构型

根据空间站构型设计,应用 ENVIPACK 软件对空间站构型进行建模。依照空间站初步方案,未来空间站由核心舱、节点舱、实验舱 I、实验舱 II、神舟飞船、货运飞船组成,如图 4 所示。核心舱、实验舱 I、实验舱 II、神舟飞船通过节点舱对接,货运飞船与核心舱尾部对接。经过整体构型网格化设置,空

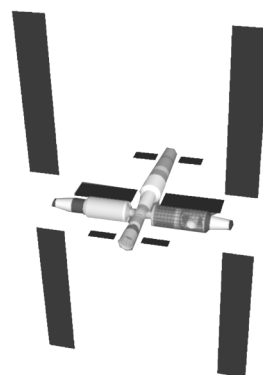


图 4 空间站构型建模

Fig. 4 Modeling of the ISS configuration

间站各舱体共设置网格化节点 2924 个,如图 5 所示,规则结构网格化相对疏松,不规则区域相对密集。

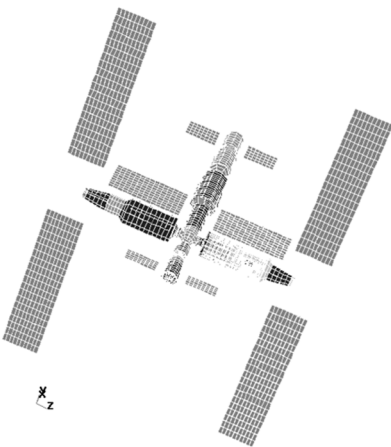


图 5 空间站构型网格化
Fig.5 Gridding of the ISS configuration

3.2 任务环境输入条件

假设空间站飞行轨道高度为 400 km,轨道倾角为 43°,2020 年发射升空,在轨飞行 20 年。该轨道星下点轨迹(10 轨)如图 6 所示。

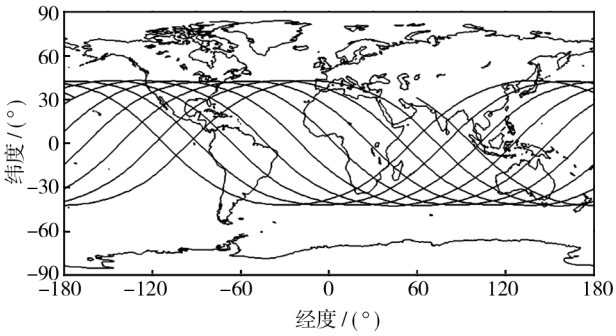


图 6 空间站在轨运行星下点轨迹示意
Fig.6 Ground track of the ISS in orbit

4 空间站运行轨道空间原子氧积分通量分析

本研究以年为单位,对空间站寿命期内各年份“途经”的空间位置处原子氧密度平均值、迎风方向/撞击平均束流密度/剂量进行分析。

以空间站轨道、发射时间及在轨寿命等参数为输入,利用 MSISE90 模型进行计算分析,结果见表 2。

表 2 寿命期内空间站经受的原子氧积分通量计算结果
Table 2 Computation results of the AO flux attacking the ISS within its lifetime

年份	撞击通量 密度/cm ⁻²	迎风方向 密度/cm ⁻²
2020	3.29E+19	4.32E+21
2021	4.66E+19	6.09E+21
2022	4.57E+19	5.99E+21
2023	3.39E+19	4.45E+21
2024	2.05E+19	2.69E+21
2025	1.13E+19	1.49E+21
2026	6.66E+18	8.73E+20
2027	6.48E+18	8.51E+20
2028	6.48E+18	8.51E+20
2029	6.49E+18	8.52E+20
2030	1.41E+19	1.85E+21
2031	3.29E+19	4.32E+21
2032	4.65E+19	6.09E+21
2033	4.59E+19	5.99E+21
2034	3.40E+19	4.45E+21
2035	2.05E+19	2.69E+21
2036	1.13E+19	1.49E+21
2037	6.66E+18	8.73E+20
2038	6.48E+18	8.51E+20
2039	6.48E+18	8.51E+20
在轨 20 年	4.42E+20	5.79E+22

通过应用 ENVIPACK 软件对空间站在轨期间原子氧积分通量进行仿真计算,空间站在轨运行 20 年后,各个表面所遭受的原子氧积分通量如图 7 所示。

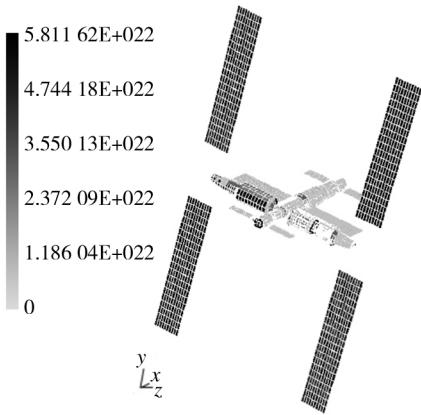


图 7 空间站在轨 20 年各处表面原子氧积分通量仿真结果
Fig.7 Simulation result of the AO flux attacking the ISS for 20 years

5 结论

对仿真计算结果进行分析,可得到以下结论。

1) 迎风方向上原子氧撞击累计剂量最高,达到 5.79×10^{22} atoms/cm² 左右,主要出现在两个实验舱的迎风方向上和太阳帆板上。

2) 实验舱相对原子氧撞击方向夹角 β 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内的表面,以及节点舱前端面遭受原子氧作用剂量在 2×10^{22} atoms/cm² 左右。

3) 载人飞船、核心舱以及货运飞船表面由于基本平行于飞行方向,也即基本平行于原子氧束流方向,因而其表面遭受原子氧剂量小于 1×10^{22} atoms/cm²。

4) 实验舱相对原子氧撞击方向夹角 β 在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 范围内的表面基本不受原子氧影响(背风面)。

参考文献:

- [1] CONNELL J W, YOUNG P R. The Effects of Low Earth Orbit Exposure on Some Experimental Fluorine and Silicon-containing Polymer [C]//NASA Goddard Space Flight Center, the 18th Space Simulation Conference: Space Mission Success Through Testing. 1994:157—175. (余不详)
- [2] 都亨,叶宗海. 低轨道航天器空间环境手册[M]. 北京:国防工业出版社,1996.
DU Heng, YE Zong-hai. Handbook for Spacecraft Traveling in Low Orbit [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996.
- [3] 姜利祥,李涛,冯伟泉,等. 原子氧环境下磁力矩器用聚合物材料的质损和红外光谱分析[J]. 航天器环境工程,2008,25(6):542—545.
JIANG Li-xiang, LI Tao, FENG Wei-quan, et al. FT-IR and Mass Loss Analysis of Polymer Materials in Magnetic

Torquer after Atomic Oxygen Exposure [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(6):542—545.

- [4] 刘宇明,姜利祥,冯伟泉,等. 防静电 Kapton 二次表面镜的电子辐照效应[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(5):411—414.
LIU Yu-ming, JIANG Li-xiang, FENG Wei-quan, et al. The Effects of Electron Irradiation on ITO/Kapton/Al Films[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(5):411—414.
- [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.
HUANG Ben-cheng, TONG Jing-yu. Space Environment Engineering[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2010.
- [6] 童靖宇,刘向鹏,张超,等. CAST2000 卫星太阳电池阵基板原子氧防护技术研究[J]. 装备环境工程,2008,5(6):72—75.
TONG Jing-yu, LIU Xiang-peng, ZHANG Chao. et al. Study on Atomic Oxygen Protection Coating of Solar Cell Array Panel on CAST2000 Satellite[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(6):72—75.
- [7] ARNOLD G S, PEPLINSKI D R. Reaction of High-velocity Atomic Oxygen Carbon [J]. AIAA Journal, 1984, 24(4):673—677.
- [8] GROH de K K, BANKS B A, MCCARTHY C E, et al. Misse 2 Peace Polymer Atomic Oxygen Erosion Experiment on the International Space Station[J]. High Performance Polymers, 2008.
- [9] BRUCE A B, JANE A B, GROH de K K, et al. Atomic Oxygen Erosion Yield Predictive Tool for Spacecraft Polymers in Low Earth Orbit[R]. NASA Report, 2008. (余不详)
- [10] BANKS B A, GROH de K K, MILLER S K. Low Earth Orbital Atomic Oxygen Interactions with Spacecraft Materials [C]//Materials Research Society Symposium Proceedings. 2004. (余不详)