

LEO轨道卫星原子氧环境SPENVIS软件仿真

黄莹

哈尔滨师范大学物理与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2024年1月5日; 录用日期: 2024年3月4日; 发布日期: 2024年3月11日

摘要

原子氧(AO)是影响低地球轨道(LEO)卫星在轨性能的重要空间环境因素之一, 其氧化性会对卫星表面材料及舱外组件造成损伤, 严重影响卫星在轨寿命, 有必要对LEO轨道上的AO环境进行比较, 做好AO防护工作。本文使用SPENVIS仿真软件, 计算并分析了LEO轨道卫星的AO环境, 考虑了轨道高度、轨道倾角、太阳活动指数与地磁活动指数等因素的影响。本仿真计算结果可以用于低轨卫星AO防护设计, 为后续卫星设计选材时提供数据参考。

关键词

SPENVIS, 原子氧, 平均密度, 注量

SPENVIS Software Simulates of Atomic Oxygen Environment of LEO Satellites

Ying Huang

School of Physics and Electronic Engineering, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Jan. 5th, 2024; accepted: Mar. 4th, 2024; published: Mar. 11th, 2024

Abstract

Atomic oxygen (AO) is one of the important space environmental factors that affects the on-orbit performance of satellites in the Low Earth Orbit (LEO). The oxidation caused by AO can damage the surface materials and components of satellites, hence significantly reduce the on-orbit lifetime of the satellites. It is necessary to compare the environment of AO in LEOs and do well in AO protection. In this paper, we use the SPENVIS software to calculate and analyze the AO environment in LEOs. The effects of orbital altitude, orbital inclination, solar activity intensity, and earth's magnetic field intensity are considered. These results offer useful references for the selection of mate-

rials used in satellite design and can be used to create an efficient AO protection for LEO spacecrafts.

Keywords

SPENVIS, Atomic Oxygen, Average Density, Fluence

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在低地球轨道(LEO, 200 km~1000 km)环境下, AO 是空间环境中含量最丰富的元素[1] [2] [3] [4]。AO 具有高的化学活性和高的碰撞动能, 能够与多种材料发生氧化剥蚀作用, 会造成聚合物材料不断被侵蚀, 甚至完全剥蚀, 造成纤维复合材料力学性能下降等, 严重影响卫星寿命。以 NASA 而言, 从 1981 年到 2008 年, 进行了一系列原子氧在轨监测测试, 其中包括 LDEF 长期暴露试验、STS 航天飞机短期暴露试验、Mir 国际空间站 OPM, POSA 试验等。对于需要长期在 LEO 上运行和工作的卫星, 例如: 空间站卫星、极地卫星、遥感卫星等, AO 环境带来的这种负面效应是不能忽略的[5] [6] [7]。

本文利用 SPENVIS 仿真软件, 选择 ESA (欧洲航天局)空间环境标准(ECSS-E-04A) [8]中的 NRLMSISE-00 参照大气模式计算空间中 AO 的数密度和注量, 分析了轨道高度、轨道倾角、太阳活动强度和地球磁场强度对 AO 数密度和注量的影响。仿真结果可作为试验依据, 为后续防护设计及其他卫星提供参考。

2. 原子氧环境仿真分析

AO 是 LEO 环境的主要组成部分之一。它是由氧分子在紫外线(UV)辐射下的光解离过程形成的[9]。AO 在撞击卫星表面时可能发生弹性镜面反射, 或者其能量和动能发生变化而产生漫射散射。入射 AO 可能与附着在卫星表面的其他物质发生反应。AO 的有害影响主要表现在与卫星表面物质的直接反应生成挥发性氧化产物, 产生剥蚀效应[10]。随着材料的逐渐侵蚀, 材料的质量丧失, 表面性能恶化, 引起部件结构失效、热控制损失或污染。从而成为影响 LEO 卫星在轨寿命与可靠性的重要因素。在分析 AO 与 LEO 卫星相互作用时, 为了合理并且有效地对卫星进行 AO 防护设计, 需预先做好卫星表面 AO 平均密度相应仿真。

2.1. 仿真分析原理

AO 仿真分析的目的是评估 LEO 大气环境中 AO 对航天器外部材料的影响, 其结果是导致表面材料成比例侵蚀。这种影响被定义为穿过航天器表面材料的 AO 通量对时间的积分。下面是空间 AO 环境参数的计算方法:

1) AO 通量计算方法:

$$\varphi = N_0 \cdot \bar{V}_x = N_0 \cdot \sqrt{\frac{RT}{2\pi M}} \left\{ \exp(-s^2) + \sqrt{\pi} s [1 + \operatorname{erf}(s)] \right\} \quad (1)$$

式中: N_0 为 AO 数密度, atoms/cm³; \bar{V}_x 为入射 AO 平均法向速度分量,

$\bar{V}_x = \left(\frac{RT}{2\pi M} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ \exp(-s^2) + \pi^{\frac{1}{2}} \cdot s [1 + \text{erf}(s)] \right\}$; erf 为标准偏差函数, $\text{erf}(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-x^2} \cdot dx$; s 为 AO 的速度比, $s = (V_{\text{aero}} \cdot x) / u_m$; V_{aero} 为气体动力学速度; u_m 为 AO 粒子的平均热运动速度;

2) AO 注量计算方法:

$$\Phi_a = \Phi \cdot t \quad (2)$$

式中: Φ_a 为 AO 累计总量(atoms/cm²); Φ 为 AO 通量(atoms/cm²·s); t 为卫星飞行时间。

2.2. 分析流程

本文使用国外研究者根据航天器在轨飞行试验和地面模拟试验的结果研发的 SPENVIS 软件针对航天器表面 AO 累积注量进行分析的技术流程如图 1 所示, 具体步骤如下: 首先, 设置一个简单的航天器与 AO 相互作用模型。其次, 在模型的基础上设定具体的航天器运行轨道参数以及空间环境参数, 本文选择 NRLMSISE-00 参照大气模式, 设置航天器表面材料为 Kapton。最后, 根据设定的参数进行航天器表面 AO 累积注量仿真分析。

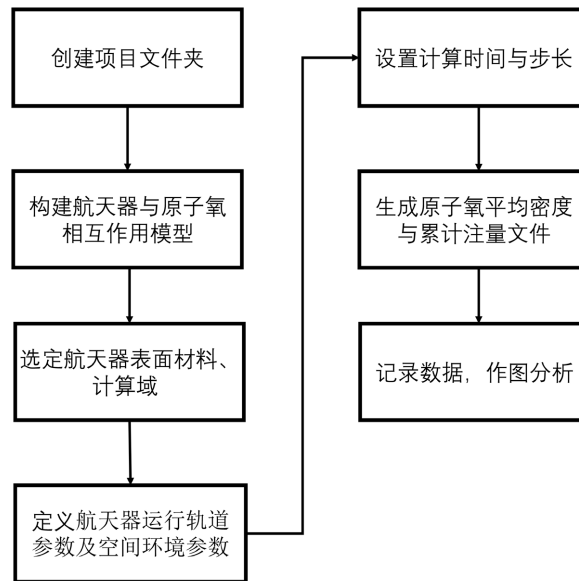


Figure 1. SPENVIS software analysis flow chart

图 1. SPENVIS 软件分析流程图

3. 不同 LEO 卫星的原子氧环境分析

AO 的密度会随轨道高度、轨道倾角、太阳活动周期、地球磁场强度、时间及季节的变化而变化。下面我们主要讨论轨道高度、轨道倾角、太阳活动强度及地球磁场强度等因素对 LEO 卫星 AO 平均密度和注量的影响。本文选定 NRLMSISE-00 参照大气模式, 选定航天器表面材料为 Kapton, 在不考虑其他因素影响的情况下深入研究 AO 环境, 确定每次任务时长为 86,340 s。

3.1. 轨道高度的影响

以空间站卫星轨道参数(轨道高度 400 km, 轨道倾角 51.5°)为基准, 设置轨道倾角分别为 6°、51.5°、98°, 轨道高度由 100 km 升高至 1400 km 高度范围, 比较轨道高度变化对 AO 平均密度和注量的影响。

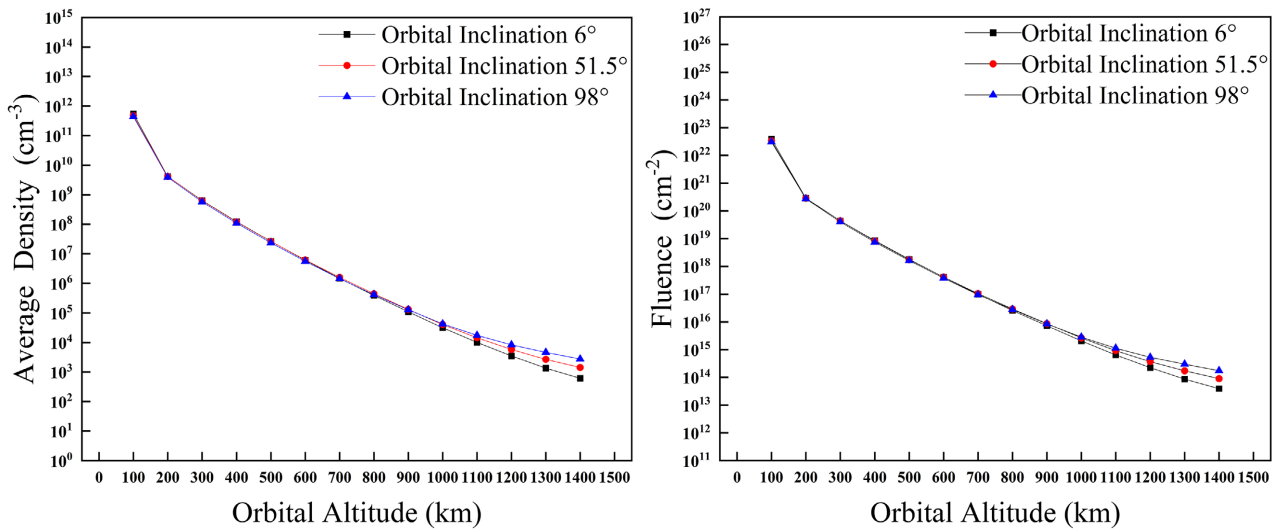


Figure 2. For different orbital inclinations, the average density and fluence of AO as functions of orbital altitude
图 2. 不同轨道倾角下，AO 平均密度与注量随轨道高度的变化

如图 2 仿真结果显示，当轨道倾角一定时，随着轨道高度的升高，AO 平均密度和注量呈下降趋势。轨道倾角为 51.5°时，400 km 高度 AO 平均密度约为 $1.2 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ，与 800 km 高度相比高 3 个数量级；轨道倾角为 51.5°时，400 km 高度 AO 注量约为 $8.7 \times 10^{18} \text{ atoms}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ，与 800 km 高度相比高 2 个数量级。

3.2. 轨道倾角的影响

以极地卫星轨道参数(轨道高度 800 km, 轨道倾角 70°)为基准, 设置轨道高度分别为 300 km、400 km、800 km、1200 km, 选取轨道倾角依次为 0°、25°、50°、70°、90°、98°, 比较轨道倾角变化对 AO 平均密度和注量的影响。

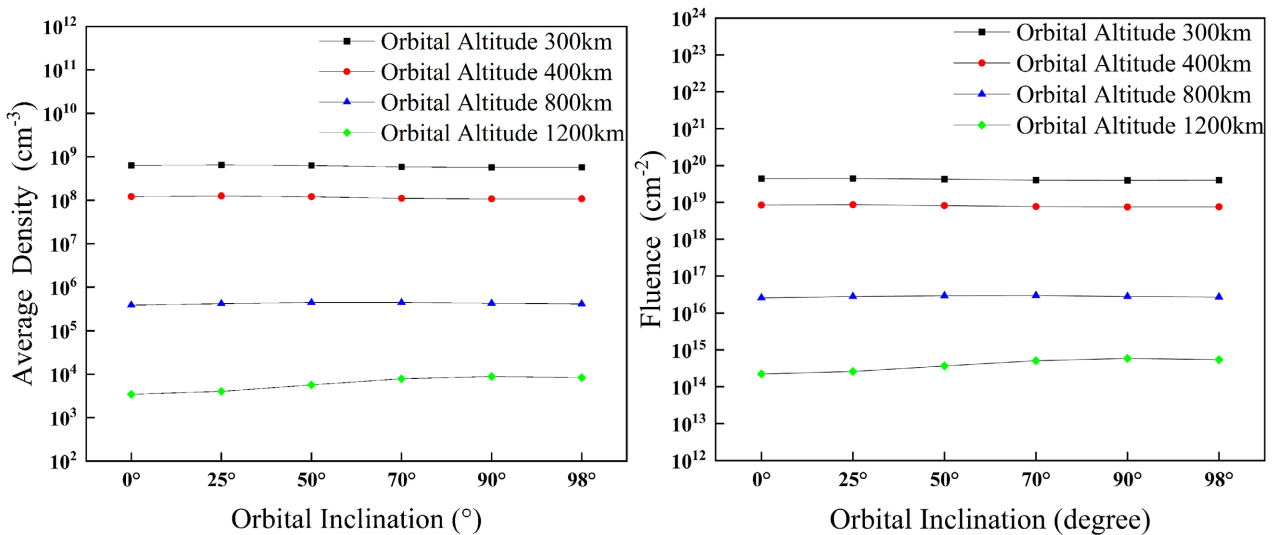


Figure 3. For different orbital altitudes, the average density and fluence of AO as functions of orbital inclination
图 3. 在不同轨道高度下，AO 平均密度与注量随轨道倾角的变化

如图 3 仿真结果显示，当轨道高度为 300 km、400 km、800 km 时，随着轨道倾角的升高，AO 平均

密度和注量变化趋势几乎不大, 都保持一样的数量级。而当轨道高度为 1200 km 时, 随着轨道倾角的升高, AO 平均密度和注量呈上升趋势。即当轨道高度超过一定的范围, 轨道倾角对 AO 平均密度和注量的影响才明显。

3.3. 活动指数的影响

将太阳活动强度和地球磁场强度分别用太阳活动指数($F_{10.7}$)和地磁活动指数(AP)来表示, 太阳活动指数($F_{10.7}$)是指太阳发出的波长为 10.7 cm 的射电辐射强度, $F_{10.7A}$ 是 81 天平均太阳辐射强度, 地磁活动指数(AP)是常用的表征一天地磁扰动平均变化的地磁指数, 是由每天 8 个地磁指数 AP 值的平均值得到的。下面选择设置 3 种活动指数。A 组参数设置为低活动指数 $F_{10.7} = 65$, $F_{10.7A} = 65$, $AP = 0$, B 组参数设置为中活动指数 $F_{10.7} = 150$, $F_{10.7A} = 150$, $AP = 4$, C 组参数设置为高活动指数 $F_{10.7} = 250$, $F_{10.7A} = 250$, $AP = 45$, 以描述活动指数变化对 LEO 卫星 AO 平均密度和注量的影响。

1) 对于不同的轨道高度

以空间站卫星轨道参数(轨道高度 400 km, 轨道倾角 51.5°)为基准, 保持轨道倾角是 51.5° , 轨道高度设置由 100 km 升高至 1400 km 高度范围, 研究轨道高度一定时, 在低中高 3 种活动指数下, AO 平均密度和注量的变化。

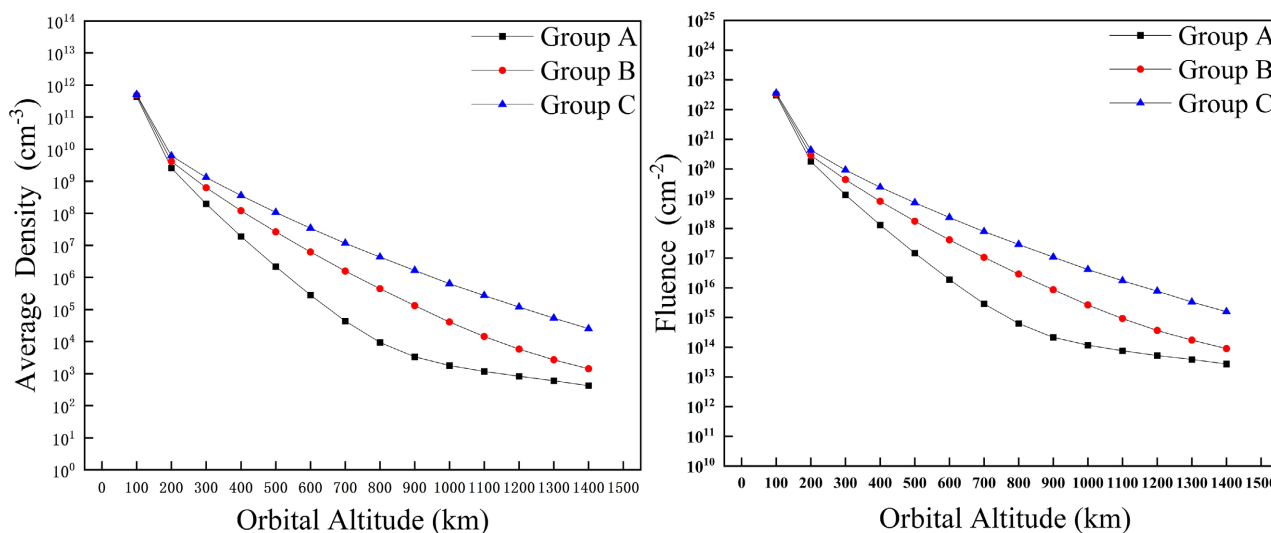


Figure 4. For different activity indices, the average density and fluence of AO as functions of orbital altitude

图 4. 对于不同的活动指数, AO 平均密度与注量随轨道高度的变化

如图 4 显示, 在轨道高度相同的情况下, C 组的 AO 平均密度和注量比 B 组和 A 组的 AO 平均密度和注量大。当轨道高度为 600 km~1100 km 时, 活动指数对 AO 平均密度和注量影响较大。当轨道高度为 800 km 时, C 组 AO 平均密度和注量比 B 组 AO 平均密度和注量高了 10 倍, 比 A 组 AO 平均密度和注量高了 1000 倍。即当太阳活动高年时, 原子氧平均密度与注量越大; 当轨道高度越高时, 太阳活动高年和低年的原子平均密度与注量相差越明显。

2) 对于不同的轨道倾角

以极地卫星轨道参数(轨道高度 800 km, 轨道倾角 70°)为基准, 持轨道高度是 800 km, 轨道倾角设置为 0° 、 25° 、 50° 、 70° 、 90° 、 98° 时, 研究轨道倾角一定时, 在低中高 3 种活动指数下, AO 平均密度和注量的变化。

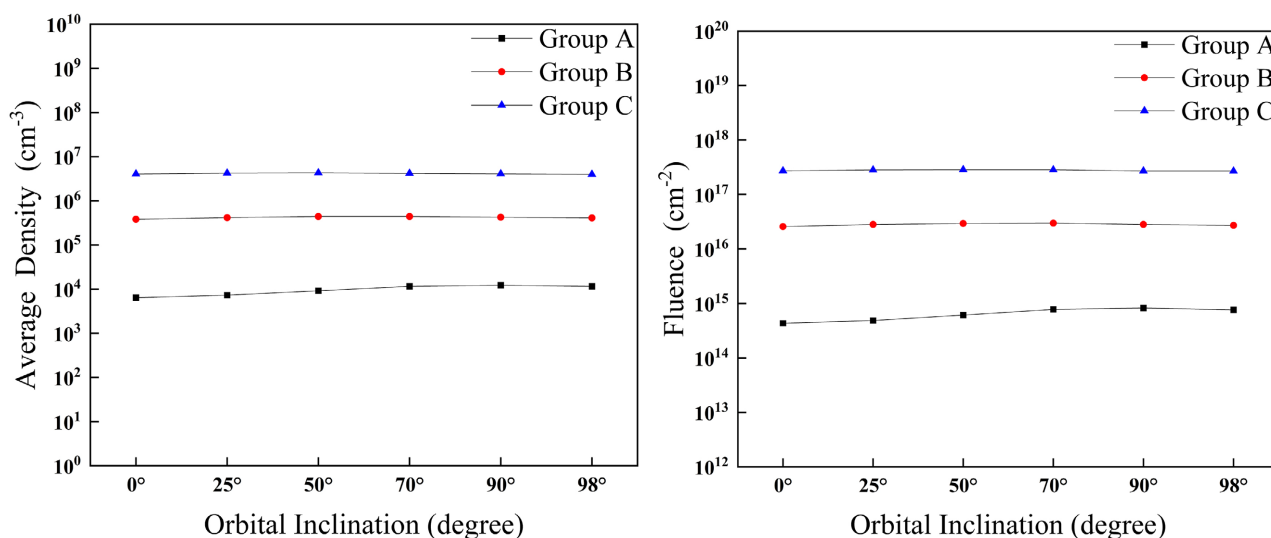


Figure 5. For different activity indices, the average density and fluence of AO as functions of orbital inclination

图 5. 对于不同活动指数，AO 平均密度与注量随轨道倾角的变化

如图 5 仿真结果显示，在轨道倾角相同的情况下，C 组的 AO 平均密度和注量比 B 组和 A 组的 AO 平均密度和注量更大。当轨道倾角为 50° 时，C 组 AO 平均密度和注量比 B 组 AO 平均密度和注量高了 10 倍，比 A 组 AO 平均密度和注量高了 1000 倍。即当太阳活动高年时，原子氧平均密度与注量越大；但当轨道倾角越大时，太阳活动高年和低年的原子平均密度与注量相差不大。

4. 结论

本文使用 SPENVIS 仿真软件对 AO 环境进行分析，研究发现轨道高度变化对 LEO 环境中的卫星 AO 数密度影响较大。从 600 km 到 500 km，AO 平均密度和注量提高了 10 倍。在一定高度范围内，轨道倾角变化对 LEO 环境的卫星 AO 数密度影响较大。当轨道高度在 1000 km 以下时，随着轨道倾角的升高，卫星表面 AO 平均密度和注量几乎没有变化。而当轨道高度为 1200 km 时，随着轨道倾角的升高，AO 平均密度和注量呈现上升趋势。太阳活动强度及地球磁场强度变化对 LEO 环境中的卫星 AO 数密度影响较大。活动指数越大，卫星表面 AO 平均密度和注量越大。

参考文献

- [1] Arnold, G.S. and Peplinski, D.R. (1986) Reaction of High-Velocity Atomic Oxygen with Carbon. *AIAA Journal*, **24**, 673-677. <https://doi.org/10.2514/3.9324>
- [2] Koontz, S.L., Allyn, K. and Leger, L.J. (1996) Atomic Oxygen Testing with Thermal Atom Systems: A Critical Evaluation. *Journal of Spacecraft and Rockets*, **33**, 8-14.
- [3] Peters, P.N., Gregory, J.C. and Swann, J.T. (1986) Effects on Optical Systems from Interactions with Oxygen Atoms in Low Earth Orbits. *Applied Optics*, **25**, 1290-1298. <https://doi.org/10.1364/AO.25.001290>
- [4] Gregory, J.C. and Peters, P.N. (1987) The Reactions of 5 eV Oxygen Atoms with Polymeric and Carbon Surfaces in Orbit. *Polymer*, **28**, 459-460.
- [5] 刘宇明, 刘宠, 于强, 等. 特殊空间材料原子氧剥蚀效应评价方法[C]//中国腐蚀与防护学会. 第十一届全国腐蚀与防护大会论文摘要集: 2021 年卷. 2021: 750. <https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2021.016260>
- [6] Aki, G., Kazuki, Y., Yuta, T., *et al.* (2023) Changes in Optical Properties of Polymeric Materials Due to Atomic Oxygen in Very Low Earth Orbit. *Acta Astronautica*, **212**, 70-83. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.07.036>
- [7] Reddy, R.M. (1995) Effect of Low Earth Orbit Atomic Oxygen on Spacecraft Materials. *Journal of Materials Science*, **30**, 281-307. <https://doi.org/10.1007/BF00354389>

-
- [8] Levine, A.S. (1993) Proc. of LDEF Post-Retrieval Symposium. *NASA CP-3275*.
- [9] Pisacane, V. (2008) *The Space Environment at Its Effects on Space Systems. AIAA Education Series AIAA*, New York. <https://doi.org/10.2514/4.862533>
- [10] Banks, B.A., de Groh, K.K. and Miller, S.K. (2004) Low Earth Orbital Atomic Oxygen Interactions with Spacecraft Materials. *MRS Online Proceedings Library*, **851**, 426-437. <https://doi.org/10.1557/PROC-851-NN8.1>