

空间环境对漫反射板的影响^{*}

王英鉴

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

光学系统在空间环境条件下的衰变对卫星遥感仪器探测精度有重要影响。漫反射板是星载光学遥感仪器辐射定标的重要工具。本文通过对 ADEOS/TOMS 和 Earth Probe/TOMS 仪器漫反射板漫反射率衰变特性的比较, 分析研究了原子氧和太阳紫外辐射对漫反射板的影响。结果表明, 太阳紫外辐照和原子氧剥蚀引起的漫反射板反射率衰变系数分别为 $0.00049/h$ 和 $1.2 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$, 但在卫星入轨初期, 太阳紫外辐照的影响可增加约 4 倍。

关键词 原子氧剥蚀—太阳紫外辐照—漫反射板

1 引言

热层大气处于扩散分离状态, 随高度增加较轻成分的相对含量逐渐增大。在 200—700 km 高度范围原子氧为主要成分。尽管这层大气密度只有 10^6 — $10^{10}/\text{cm}^3$, 但由于原子氧是一种强氧化剂、具有很强的腐蚀性, 并且航天器又以 8 km/s 的高速度运动, 因此原子氧对星上遥感器的影响是不可忽略的。

原子氧剥蚀效应曾在 STS-5、STS-8 和 STS-41G 等航天飞机上进行过多次试验, 试验样品多达几百种。仅航天飞机 STS-8 一次试验的样品就达 300 多种, 在航天飞机 STS-41G 上还对 Hubble 天文望远镜所使用的材料进行了专门试验。原子氧积分通量与航天器运行高度原子氧数密度、飞行攻角和暴露时间有关。为研究不同飞行攻角下原子氧剥蚀效应的变化特性, 美国开展了 LDEF 试验, 从 1984 年 4 月到 1990 年 1 月进行了长达近 6 年的卫星测量^[1,2]。原子氧剥蚀效应的影响也引起国内学者的关注^[3,4], 但工作刚刚开始。

航天器表面和材料中吸附的气体杂质在高真空环境下释放出来, 在太阳紫外辐射照射下可对各种光学遥感系统形成污染, 降低其性能; 使航天器表面涂层光学性能变化, 影响其温控^[5]。美国天空实验室携带的 S192 多光谱扫描器于 1973 年发射后不久, 其紫外通道很快被污染, 以致于无法工作就是一例。

漫反射板是星载光学遥感装置辐射定标的重要手段, 特别对紫外、可见和近红外遥感装置中应用更特别广泛。漫反射板在空间环境条件下的稳定性将直接影响星上遥感装置的辐射定标精度。漫反射板在空间环境条件下的衰变可增大遥感仪器的探测误差、甚至导致反演结果的错误。本文将通过对 ADEOS 卫星 TOMS 仪器和 Earth Probe 卫星 TOMS 仪器漫反射板漫反射率衰变特性的分析比较, 研究原子氧剥蚀和太阳紫外辐照对星上紫外遥感仪器辐射定标用漫反射板的影响。

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (49990455)

2001-07-22 收到原稿, 2001-11-22 收到修改稿

2 资料来源

ADEOS-1 卫星和 Earth Probe 卫星所使用的 TOMS 仪器是继 TOMS/NIMBUS 7 之后, 美国研制的第二代大气臭氧总量紫外探测仪器. 该仪器共研制 3 台, 前两台分别装在 ADEOS-1 卫星和 Earth Probe 卫星上.

ADEOS-1 于 1996 年 8 月 17 日发射, 太阳同步轨道, 标称轨道高度 800 km, 运行周期 101 min, 星下点地方时 1030, 该卫星于 1997 年 6 月 30 日失效. TOMS 是该卫星的 9 个载荷仪器之一, 在卫星运行期间它获得了 9 个月的大气臭氧总量资料. ADEOS/TOMS 的星上辐射定标采用三漫反射板系统, 盖板每轨道定标一次, 工作板每星期定标一次, 参考板在 ADEOS-1 寿命期内仅定标 2 次. 辐射定标用漫反射板安装在卫星迎风面, 辐射定标在北极上空日夜交界面附近进行. 在 ADEOS-1 寿命期内盖板的太阳总辐照时间为 463 h, 工作板为 2.06 h, 参考板仅为 0.14 h. 考虑到工作板和参考板的太阳紫外辐照时间较短, 这里仅分析了 360 nm 波段盖板的衰变特性 [6].

Earth Probe 卫星于 1996 年 7 月 2 日发射, 太阳同步轨道, 轨道高度 670—690 km, 运行周期 98 min. TOMS 是该卫星的惟一载荷仪器. 与 ADEOS/TOMS 主要不同点是辐射定标用漫反射板安装在卫星避风面, 辐射定标在南极上空日夜交界面附近进行.

3 分析和讨论

图 1 给出了 Earth Probe/TOMS 和 ADEOS/TOMS 漫反射板衰变特性的测量结果. 可以看出, 在太阳紫外辐射照射 100 h 前后, 两漫反射板衰变特性有明显的不同. 这里将空间环境条件下, 漫反射板的衰变大致分为下面 3 种情况讨论.

(1) 太阳紫外辐射照射 100 h 后, Earth Probe/TOMS 漫反射板的衰变特性.

由于 Earth Probe/TOMS 漫反射板指向卫星轨道运行的反方向, 根据 LDEF 测量结果 [7], 其原子氧通量比在卫星轨道运行方向约小 10^{20} 以上, 可以忽略. 因此, 可以认为, 此时 Earth Probe/TOMS 漫反射板的衰变是由于太阳紫外辐照所引起. 从图中资料拟合得, 太阳紫外辐照衰变系数为

$$\alpha_1 = 0.00049/\text{h}.$$

(2) 太阳紫外辐射照射 100 h 后, ADEOS/TOMS 漫反射板的衰变特性.

从图 1 可看出, 太阳紫外辐射照射 100 h 后, ADEOS/TOMS 漫反射板衰变速率比 Earth Probe/TOMS 漫反射板明显的快得多. 但两者除卫星高度不同外, 其差别仅在于 ADEOS/TOMS 漫反射板指向卫星轨道运行方向, 而 Earth Probe/TOMS 漫反射板指向卫星轨道运行的反方向. 图 2 给出了 Earth Probe/TOMS 和 ADEOS/TOMS 漫反射板反射率之比 R_1 的变化特性. 可以认为此比值主要由于两漫反射板安装位置的差别, 即原子氧剥蚀所引起.

原子氧剥蚀效应引起的漫反射板反射率变化可写为

$$\rho = \exp(-\alpha_0 t N_{\text{O}}).$$

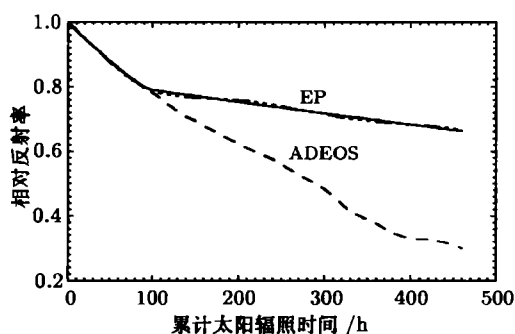


图1 ADEOS/TOMS 和 Earth Probe/TOMS 漫反射板的衰变特性

Fig.1 The measured variations of diffuser reflectances for ADEOS/TOMS and Earth Probe/TOMS

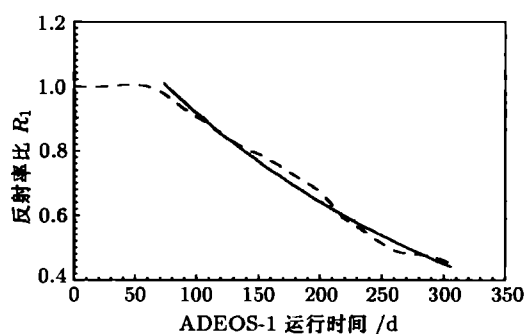


图2 ADEOS/TOMS 和 Earth Probe/TOMS 漫反射板反射率之比 R_1 的变化特性

Fig.2 Variations of the ratio R_1 of diffuser reflectances for ADEOS/TOMS and Earth Probe/TOMS

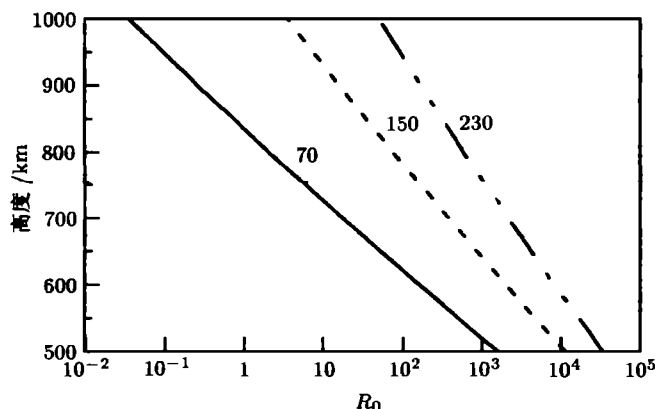


图3 不同太阳活动条件下, 原子氧剥蚀效应与太阳紫外辐照对漫反射板反射率衰变影响之比 R_0 随高度的变化特性

Fig.3 Variations of the R_0 value with altitude for different solar activity, here R_0 is the ratio of the effects of atomic oxygen erosion and solar UV exposure on the reflectance of solar diffuser. The numbers are the $F_{10.7}$ values

从图2可得

$$\alpha_0 N_O = 0.0035/d,$$

其中, N_O 为原子氧积分通量. ADEOS-1 卫星运行期间, 正处于太阳活动低谷期, $F_{10.7}$ 指数的平均值约为 73, 原子氧的年积分通量为 $1.05 \times 10^{17}/\text{cm}^2$, 由此可以给出原子氧剥蚀系数

$$\alpha_0 = 1.2 \times 10^{-17} \text{cm}^2.$$

应该指出, 对 3 轴稳定的太阳同步卫星而言, 太阳辐射仅在南极 (或北极) 上空附近才能照射到漫反射板上, 而原子氧剥蚀效应则在整个卫星轨道上起作用. 比较原子氧剥蚀效应和太阳紫外辐照对漫反射板反射率衰变的影响可以看出, 对 800 km 卫星轨道高度,

卫星运行一圈原子氧剥蚀效应对漫反射板反射率衰变的影响和太阳紫外辐射照射半小时的影响大体相当。事实上,在极区上空太阳对 ADEOS/TOMS 漫反射板的照射时间仅为 6 min 左右;也就是说对 ADEOS-1 卫星,原子氧剥蚀效应引起的漫反射板反射率衰变比太阳紫外辐照影响约大 5 倍。

由于随太阳活动的不同,高层大气密度剧烈变化,对太阳同步轨道高度,氧原子是大气的主要成分,因此原子氧通量也随太阳活动剧烈变化。图 3 给出了不同太阳活动条件下,原子氧剥蚀效应与太阳紫外辐照对漫反射板反射率衰变影响之比 R_0 随高度的变化特性,图中数字给出了 $F_{10.7}$ 值。由于太阳紫外辐射强度随太阳活动变化较小,对 100—300 nm 波段,太阳活动峰年比太阳活动谷年的变化一般小于 100%,远小于原子氧通量的变化,这里我们忽略了太阳紫外辐射强度随太阳活动的变化;图中数字给出了太阳活动指数 $F_{10.7}$ 的值。可以看出,因为 ADEOS-1 卫星的运行正处于太阳活动谷年,否则,原子氧剥蚀效应对漫反射板的影响将相当于太阳紫外辐照影响的几十甚至几百倍。虽然随着高度的增加,原子氧剥蚀效应的影响相对减弱,但即使在约 900 km 的轨道高度,一般情况下原子氧剥蚀效应对漫反射板的影响也相当于太阳紫外辐照影响的几倍甚至上百倍。应该指出,图 3 是根据上述原子氧剥蚀系数外推给出,由于原子氧剥蚀的非线性,这一结果只能是定性的。更精细的结果有待进一步的测量资料。

(3) 太阳紫外辐射照射的前 100 h、即卫星入轨后的前 70 d,漫反射板的衰变特性。正如图 1、2 指出,此时 ADEOS 与 Earth Probe 卫星 TOMS 仪器漫反射板的衰变大致相同,表明此时原子氧剥蚀效应对漫反射板的影响不是主要的。由图 1 可得,此时漫反射板反射率的衰变系数为

$$\alpha_2 = 0.002/\text{h},$$

比太阳紫外辐照的影响约大 4 倍,与 800 km 轨道高度原子氧剥蚀效应的影响大致相当。

对空间环境条件下,漫反射板衰变的机制目前一般认为主要由于太阳紫外辐照下污染成分的光化学沉积和原子氧剥蚀效应所致。当卫星入轨后,卫星表面和内部材料吸附的气体在高真空环境下慢慢释放出来,环绕卫星表面形成一个污染层。根据 MSX 卫星的测量结果^[6],在太阳照射下比无光照情况下,吸附气体释放速度加快,卫星表面气压增高 1—2 量级。而 Kruger 和 Shapiro 的实验测量指出^[9],有光照比无光照时通过光化学过程污染物的沉积速度约大 1 个量级以上,即污染物沉积对漫反射板衰变的影响主要取决于太阳紫外辐照时间。对 NIMBUS 7 卫星 SBUV/TOMS 仪器漫反射板衰变的实测结果也证实了这一点^[10]。

目前认为,原子氧剥蚀效应对光学薄膜的影响,主要是由于活性原子氧与薄膜材料的氧化作用所致。航天飞机 STS-8 对不同光学薄膜进行了原子氧剥蚀效应试验,其积分原子氧通量为 $3.5 \times 10^{20}/\text{cm}^2$ 。试验结果指出^[11],铝膜的膜层厚度从 3.4 nm 降低为 2.6 nm,而氧化层厚度从 15 nm 增加为 16.5 nm。而对漫反射板更重要的是其表面粗糙度的均方根值由 2.08 nm 降为 1.77 nm。这种氧化层加厚和表面粗糙度降低可能是原子氧剥蚀效应对漫反射板漫反射率影响的主要原因。遗憾的是,目前还没有在原子氧剥蚀条件下对漫反射板漫反射率变化的直接测量结果。

对原子氧剥蚀效应,一些观点认为它有利于清除表面污染物,从这一点看似它可提高光学表面的反射率或透过率,但 LDEF 卫星试验指出^[10],在所试验的高、中、低 3 种

原子氧通量和太阳紫外辐照情况下,随着原子氧通量的增加,表面污染物沉积加剧.他们认为,对表面污染来说,原子氧和太阳紫外辐照的相互作用过程是极其复杂的、并可能导致表面的严重污染.

应该指出,在卫星入轨初期,卫星对污染气体的释放速度远高于运行后期.根据 MSX 卫星测量结果^[8],卫星表面气压在入轨初期比入轨几十天后要高 3—4 个量级.上述漫反射板的第三种衰变情况可能就是这种卫星表面严重污染气体在太阳紫外辐照下的沉积所致.如前所述,此时 ADEOS 与 Earth Probe 卫星 TOMS 仪器漫反射板衰变大致相同表明,可能是 ADEOS-1 卫星运行正处于太阳活动谷年,且 ADEOS-1 卫星运行时间较短,使原子氧剥蚀效应与太阳紫外辐照的相互作用对漫反射板衰变影响较小所致.

4 结论

根据上述分析、讨论,可得出以下结论:

(1) 太阳紫外辐照对星上紫外辐射定标用漫反射板 360 nm 波段反射率影响的衰变系数为 0.00049/h.

(2) 原子氧剥蚀对星上紫外辐射定标用漫反射板有明显影响,由此引起的反射率衰变系数在 360 nm 波段为 $1.2 \times 10^{-17} \text{cm}^2$. 对 800 km 高度的太阳同步轨道、在太阳活动谷年,它大约是太阳紫外辐照影响的 5 倍,但对中等太阳活动年份,则比太阳紫外辐照影响大上百倍;而在太阳活动峰年,则高达上千倍.

(3) 在卫星入轨初期,污染成分对星上紫外辐射定标用漫反射板有更明显影响,在所讨论的情况下,它约为太阳紫外辐照影响的 4 倍.在 TOMS/ADEOS 的情况下,原子氧剥蚀效应未增大污染成分的影响.

应该指出,本文的分析仅仅是在现有资料的基础上进行的.由于 ADEOS 卫星和 Earth Probe 卫星的有效载荷不同,其污染气体和释放的速度也不会相同,本文的分析只是初步的.详细的结论有待进一步的卫星测量.

参 考 文 献

- [1] Leger L J, Visentine J T. A consideration of atomic oxygen interactions with the space station. *J. Spacecraft*, 1986, **23**(5):505—511
- [2] 王英鉴. 中高层大气对卫星系统的影响. *中国科学*, 2000, **30**(增刊):17—20
- [3] 范权福, 田剑华. 卫星表面原子氧通量和遭遇量的计算及讨论. *空间科学学报*, 1999, **19**(2):167—172
- [4] 卢榆孙, 冯煜东等. 防原子氧与抗辐射环境薄膜性能研究. *空间科学学报*, 1999, **19**(4):375—380
- [5] Bourassa R J, Gillis J R, Rousslang K W. Atomic oxygen and UV radiation mission total exposures for LDEF experiment. N92-24808, 1992
- [6] Krueger A J, Jaross G. TOMS/ADEOS instrument characterization. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1999, **37**(3):1543—1549
- [7] Bourassa R J, Gillis J R. Atomic oxygen exposure of LDEF experiment trays. NASA CR-189627, 1992
- [8] Uy O M *et al.* Contamination lessons learned from Midcourse Space Experiment. *Proc. SPIE*, 1998, 3427:28—42
- [9] Hall D F, Stewart T B, Hayes R R. Photo-enhanced spacecraft contamination deposition. AIAA-85-0953, 1985

- [10] Herman J R, Hudson R D, Serafino G. Analysis of the eight-year trend in ozone depletion from empirical models of solar backscattered UV instrument degradation. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**(D6):7403—7416
- [11] Peter P N, Gregory J C, Swann J T. Effects on optical systems from interactions with oxygen atoms in low earth orbits. *Appl. Optics*, 1986, **25**(8):1290—1298
- [12] Rantanen R *et al.* Comparison of contamination model predictions to LDEF surface measurements. *Proc. SPIE*, 1998, 3427:260—271

EFFECTS OF SPACE ENVIROMENT ON SOLAR DIFFUSER

WANG Yingjian

(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

The degradation of optical system in space environment has an important effect on the measuring precision of satellite-borne remote sensing instruments. The solar diffuser is an important tool of radiation intensity scaling for satellite-borne optical remote sensing instrument. In this paper a comparison of the decay of solar diffusers in ADEOS/TOMS and Earth Probe/TOMS, and analyses the effects of atomic oxygen and solar UV radiation on solar diffuser is given. The results show that the decay coefficients of solar diffuser in the wavelength of 360 nm due to solar UV radiation exposures and atomic oxygen erodes are 0.00049/h and $1.2 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ respectively. So the effect of atomic oxygen erodes is about 5 times of solar UV radiation exposures in the altitude of 800 km during the solar activity minimum. For the solar activity maximum, the effect of atomic oxygen will greatly increase. In the early days of satellite orbit, however, the effect of solar UV radiation exposures on solar diffuser may increase about 4 times. It may be due to the contamination. But our analyses haven't find the interaction between atomic oxygen erodes and contamination effect.

Key words Atomic oxygen erodes, Solar UV radiation exposures, Solar diffuser