

基于 BRDF 条件下卫星可见光散射特性分析

杨明¹ 韩磊² 吴晓迪¹ 吕相银¹

(¹ 电子工程学院安徽省红外与低温等离子体重点实验室, 安徽 合肥 230037; ² 武汉军械士官学校, 湖北 武汉 430075)

摘要 引入双向反射分布函数(BRDF)分析卫星可见光散射特性。建立卫星结构模型并分析了太阳在大气层外可见光辐射照度,将单一波长 BRDF 测量方法扩展到可见光波段的加权平均测量,利用 BRDF 经验模型和实验获得的表面样片的实验数据,数值求解出卫星表面材料的 BRDF 的三维特性。最后分别在漫反射和非漫反射两种条件下,计算出卫星可见光散射强度的空间分布,为空间目标的可见光探测与识别提供依据。

关键词 散射;双向反射分布函数(BRDF);空间分布;卫星

中图分类号 V418

OCIS 290.0290 290.1483

文献标识码 A

Visible Light Scattering of Satellite Based on Bidirectional Reflectance Distribution Function

Yang Ming¹ Han Lei² Wu Xiaodi¹ Lü Xiangyin¹

(¹ Key Laboratory of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Electronic Engineering Institute, Hefei, Anhui 230037, China
² Wuhan Ordnance Non-Commissioned Officers Academy, Wuhan, Hubei 430075, China)

Abstract Visible scattering characteristics of a space satellite are studied based on bidirectional reflectance distribution function(BRDF). A physical model of satellite is established and spectral irradiance in the visible solar spectrum is analyzed. Measuring method of single-wavelength BRDF is extended to average BRDF in visual band. Based on empirical model and experimental values, three dimensional scattering characteristics of the satellite surface material are calculated. Spatial distribution of visible scattering intensity is obtained under the diffuse reflection and non-diffuse reflection. The result offers support for the detection and recognition of spatial objects.

Key words scattering; bidirectional reflectance distribution function; spatial distribution; satellite

1 引言

空间目标可见光探测,主要依靠目标表面对大气层外太阳光的反射特性。国内外很多学者在这方面进行了研究,但大多是基于电磁散射理论或将目标表面看作理想的漫反射表面(朗伯面)进行光学特性分析^[1~4]。由于可见光波长较短,电磁散射理论描述目标可见光特性有其局限性;同时由于卫星表面材料的特殊性,按朗伯面来进行光学特性分析也不够准确。

在武器研制、目标隐身以及理论建模的研究中,了解目标材料和涂层的反射特性具有重要的意义。目标材料、涂层特性、表面结构决定了其在空间的反射分布特征以及光谱反射特性,本文引入目标表面光学特性的描述函数——双向反射分布函数(BRDF)来精确描述卫星的可见光散射特性,并与粗糙表面漫反射理论的计算结果进行对比分析。

2 大气层外太阳光谱照度

首先建立卫星物理模型(图 1):三轴稳定卫星,卫星电池帆板对日定向,轨道高度 863 km,轨道倾角 98.9°,偏心率 0.00188,周期 102 min,卫星本体为 1.0 m×1.0 m×1.0 m 的方体结构,太阳能电池帆板的几

收稿日期: 2010-04-01; 收到修改稿日期: 2010-07-05

基金项目: 安徽省红外与低温等离子体重点实验室基金(2007A012012F)资助课题。

作者简介: 杨明(1986—),男,助理工程师,主要从事空间光学方面的研究。E-mail: yangming8619@163.com

何尺寸的几何尺寸为 $4.0\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 0.025\text{ m}$, 距离本体 0.1 m , 工作方式为对日定向。建立卫星本体坐标系 $OXYZ$, 与卫星星体固连, 原点 O 为卫星目标的质心; OZ 通过坐标原点, 从卫星目标的质心指向地心; OX 通过坐标原点, 位于轨道平面内垂直于 OZ , 在对地定向状态下指向前方前进方向; OY 垂直于轨道平面, 指向轨道角速度的负方向。

根据卫星热控需要, 电池阵背面强化散热, 减少吸收地球反照辐射, 使用低吸收率的涂层——SR107 白漆; 靠近电池阵的两侧为散热面, 外表面也涂 SR107 白漆; 本体另外四个外表面包覆多层隔热组件, 隔热组件外表面涂覆低吸收-发射比的导电性 F46 镀银二次表面镜热控涂层^[5]。表 1 列出了卫星模型表面各种材料和涂层的太阳吸收率和红外发射率。

表 1 卫星表面材料及热控涂层的太阳吸收率

Table 1 Absorptivity of surface material and thermal control coatings

Location	Material	Solar absorptivity
outer surface of multilayer insulation	silver plated F46 second surface mirror	0.12
radiator surface	SR107 white coating	0.17
obverse side of solar panels	solar crystalline silicon module	0.80
inverse side of solar panels	SR107 white coating	0.17

由于非自发光空间目标是被太阳光照射而产生亮度的, 因此分析卫星的可见光特性需要计算太阳可见光波段 ($0.38 \sim 0.76\ \mu\text{m}$) 在目标表面处产生的光谱照度。对于远离地球大气的太阳, 研究它的光谱特性时, 可将它看作是一个温度为 5900 K 的辐射黑体, 而且是一个点光源。由普朗克黑体辐射公式, 太阳光的光谱辐射出射度 $M(\lambda)$ 及太阳光辐射到地球表面的光谱辐照度 $E_{\text{sun}}(\lambda)$ 分别为

$$M(\lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T) - 1]}, \quad (1)$$

$$E_{\text{sun}}(\lambda) = \frac{R_{\text{sun}}^2 M(\lambda)}{A_u^2}, \quad (2)$$

式中 λ 为波长, c_1 为第一黑体辐射常量, c_2 为第二黑体辐射常量, T 为太阳平均温度, $T = 5900\text{ K}$, R_{sun} 和 A_u 分别为太阳半径和日地距离, $R_{\text{sun}} = 6.9599 \times 10^8\text{ m}$, $A_u = 1.49597892 \times 10^{11}\text{ m}$ 。图 2 表示太阳在大气层外的可见光波段照度。

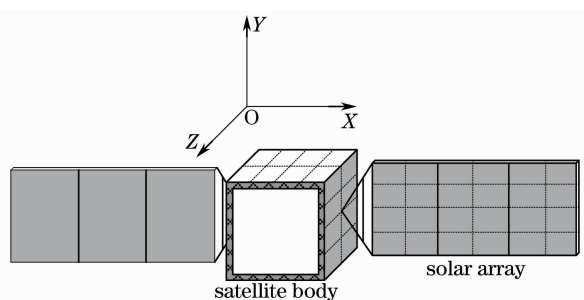


图 1 卫星物理模型

Fig. 1 Physical model of satellite

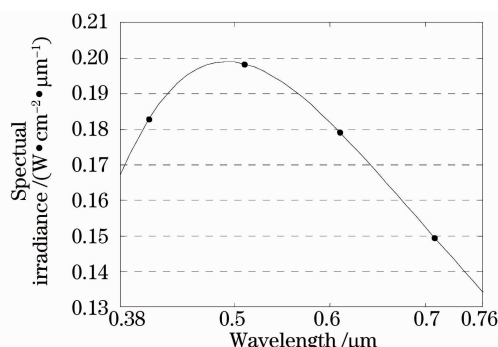


图 2 太阳可见光波段光谱照度

Fig. 2 Extra-atmospheric visible spectral irradiance

3 卫星表面样片可见光光谱 BRDF 加权平均

为了计算太阳光入射时卫星的散射特性, 将卫星表面样片的光谱 BRDF 对大气层外可见光波段内的谱辐射照度加权平均, 可以获得太阳光入射时目标样片的平均 BRDF^[6]。太阳光谱入射时, 样片表面的光谱辐射亮度为

$$L_{rs}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = f_{rs}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \cdot E_i(0^\circ, \lambda) \cos \theta_i, \quad (3)$$

式中 $E_i(0^\circ, \lambda)$ 是 0° 入射时太阳光的光谱辐射照度, f_{rs} 表示光谱双向反射分布函数。对 (3) 式在 $380 \sim 760\text{ nm}$ 内积分, 可以得到太阳光入射时样片表面反射的总辐射亮度为

$$L_{sp}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \int_{380}^{760} L_{rs}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) d\lambda = \cos \theta_i \int_{380}^{760} f_{rs}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) E_i(0^\circ, \lambda) d\lambda. \quad (4)$$

太阳光以 θ_i 角入射时, 在可见光波段内的入射照度为

$$E_{sp}(\theta_i) = \int_{380}^{760} E_i(\theta_i, \lambda) d\lambda = \cos \theta_i \int_{380}^{760} E_i(0^\circ, \lambda) d\lambda. \quad (5)$$

由 BRDF 的定义可得

$$f_{sp}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{L_{sp}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{E_{sp}(\theta_i, \varphi_i)}. \quad (6)$$

将(4)和(5)式代入(6)式,积分步长取 1 nm 并化为求和得

$$f_{sp}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{\sum_{\lambda=380}^{760} f_{rs}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) E_i(0^\circ, \lambda)}{\sum_{\lambda=380}^{760} E_i(0^\circ, \lambda)}, \quad (7)$$

式中 $f_{sp}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 就是太阳光入射时目标样片表面的平均 BRDF。从(7)式可以看出, $f_{sp}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 是目标样片光谱 BRDF 对太阳光谱辐射照度的加权平均,可以反映出太阳光入射时目标样片表面的散射特性。

根据文献[6]测量的卫星包覆材料和太阳电池帆板表面的光谱 BRDF,并根据加权平均公式得出入射角为 $10^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 和 60° 条件下,目标样片表面可见光 BRDF 值在上半球空间的三维分布,如图 3 所示。

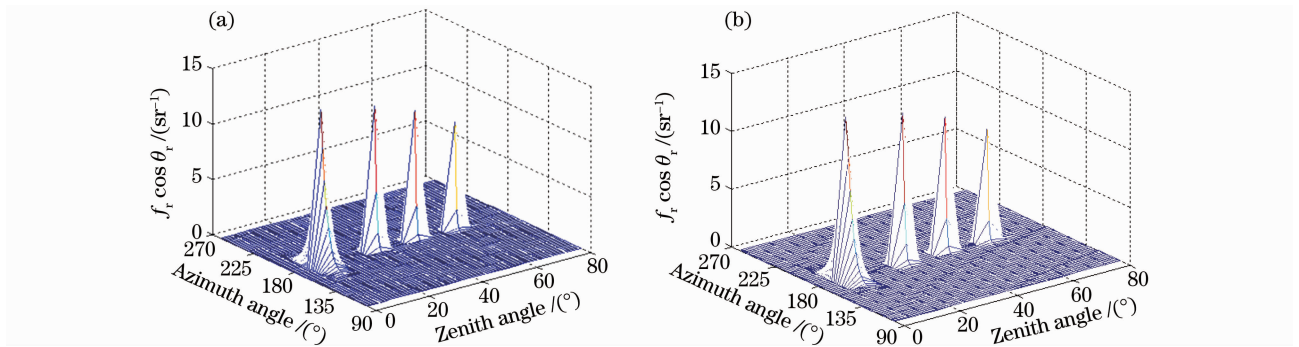


图 3 (a) 包覆材料和(b)太阳电池阵的 BRDF 三维计算值

Fig. 3 BRDF 3D profiles of satellite (a) coating material and (b) solar panel

该计算结果与文献[7]的测量结果一致,包覆材料外表面的 F46 镀银二次表面镜和硅电池表面,可见光反射以镜面反射为主,而 SR107 白漆的光谱双向反射分布函数随观测角的变化很小,该材料可以视为朗伯反射体。

4 可见光散射空间分布

根据本文建立的卫星结构模型,计算卫星表面面元的可见光散射强度,最后将每个空间散射方向上可见面元的可见光散射强度相加,求得整个卫星的可见光散射强度。可见面元的判定采用太阳光入射投影模型,只是此时面元发射光线的方向不是太阳光入射反方向,而直接是空间散射光强接收方向。本文将采用漫反射理论和双向反射理论分别计算卫星可见光散射的空间分布。由于卫星表面存在可视关系,漫反射条件下,面元可见光反射出射度为

$$M_i^{sun} = \rho(E_i^{dir} + \sum_j^N F_{i,j} M_j^{sun}), \quad (8)$$

式中 E_i^{dir} 表示面元可见光照度(不含散射照度), ρ 为目标样片的可见光波段半球全反射率。联立方程组求解 M_i^{sun} , 则散射光强为

$$I_s(\theta_r) = \frac{M_i^{sun}}{\pi} \cos \theta_r \cdot A, \quad (9)$$

式中 A 为微面元的面积。

在双向反射条件下,由于卫星表面的可见光照射包括太阳直射和地球反照辐射,太阳直射时入射方向明确,对于卫星本体包覆材料外表面和硅电池阵满足双向反射条件。利用目标样片的平均 BRDF 计算散射光

强,

$$I_s(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) = f_{sp}(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) \cdot E_{i-sp}(0^\circ) \cos \theta_r \cos \theta_i \cdot A, \quad (10)$$

式中 $f_{sp}(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)$ 为太阳光直接入射时目标样片的平均 BRDF; θ_i, θ_r 和 φ_r 为面元坐标系中的入射角、散射角和相对方位角; $E_{i-sp}(0^\circ)$ 为 0° 入射时, 大气层外太阳光在 380~760 nm 内的辐射照度, 可以通过对图 2 中太阳光的谱辐射照度积分求得, 为 625 W/m^2 。卫星散热面和电池阵背阳面涂层具有漫反射性质, 对于太阳直射热流采用漫反射理论计算。同时, 对于地球反照太阳光, 几乎每个方向都有反照能量贡献, 所以也采用粗糙表面漫反射理论来计算面元的地球反照太阳光散射强度。

在双向反射条件下计算时, 需要将非漫反射和漫反射分开计算。满足漫反射条件的计算仍采用(8)式, E_{dir}^{dir} 改为满足漫反射条件下的可见光照度。最后将每个方向上可见面元的两部分散射光强相加, 便得到了卫星表面可见光散射强度的空间分布。图 4 列出了 0 时刻散热面和电池阵向阳面上可见光照度, 由于可见光遮挡和散射影响, 整个几何面上可见光照度不均匀。

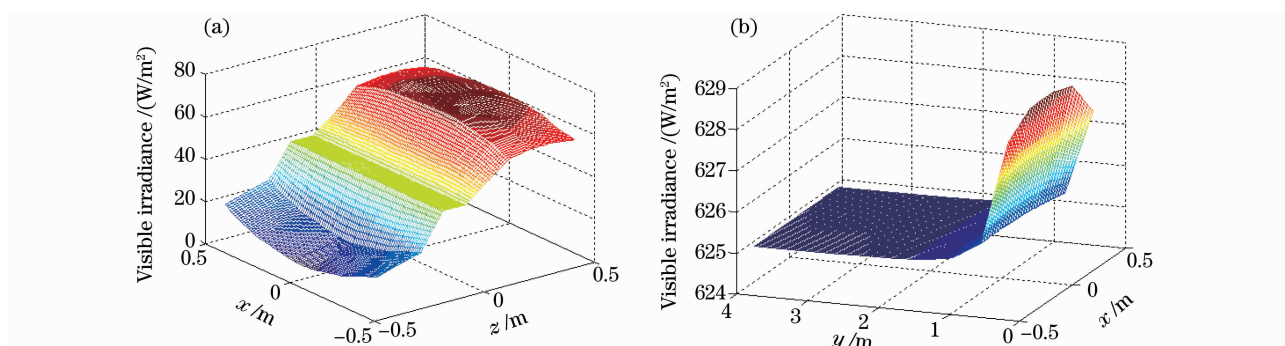


图 4 0 时刻可见光照度散热面(a)和电池阵向阳面(b)

Fig. 4 At 0 visible irradiance of radiator surface (a) and obverse side of solar panel (b)

5 计算结果

卫星表面可见光散射的空间分布采用卫星本体坐标系(如图 5), 分别利用漫反射理论和 BRDF 计算了卫星在升交点位置, 1/4 周期点和 3/4 周期点的卫星可见光散射强度空间分布, 如图 6 所示。对比漫反射和双向反射计算结果可以发现, 可见光散射强度的空间分布基本一致, 但可见光散射强度大小明显不同。从图 6(b), (d), (f)中可以看出, 在 BRDF 条件下, 镜反射分量明显。这是因为在图 3 所示的卫星表面材料 BRDF 三维分布中其反射特性以镜面反射为主。同时由于太阳电池阵的工作方式为对日定向, 在太阳光直射条件下, 其镜反射方向的散射光强非常大, 接近 10^5 W/Sr , 而其它方位和角度散射都由卫星其它表面漫反射造成的, 数量级保持在 10^2 W/Sr 。

6 结 论

空间目标可见光探测, 主要依靠目标表面反射太阳光特性。实际卫星外表面一般都包覆着多层隔热材料, 由于 BRDF 相对于漫反射理论来说, 更能准确描述其可见光散射特性的分布情况。所以, 建立基于 BRDF 条件下的卫星可见光散射特性模型, 能够准确描述卫星可见光散射强度的空间分布。但卫星表面材料的 BRDF 获得有一定的难度, 而且隔热材料一般为软体结构, 在深空负压的状态下, 表面形态极不稳定^[8], 所以基于漫反射理论获得的卫星表面可见光散射强度的空间分布仍具有一定的参考价值。

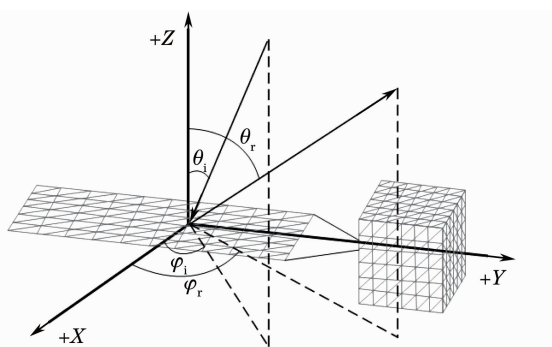


图 5 卫星本体坐标系下可见光散射示意图

Fig. 5 Visible scattering in satellite body coordinate system

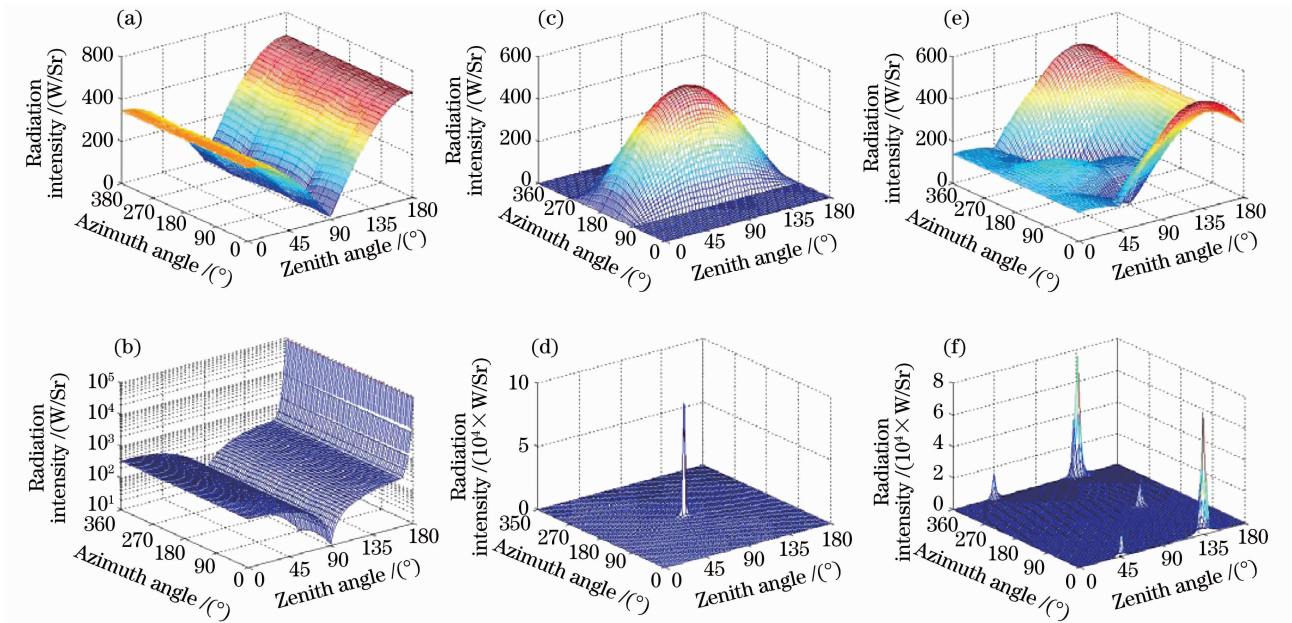


图 6 漫反射和非漫反射条件下可见光散射空间分布。(a)0°漫反射,(b)0°非漫反射,(c)90°漫反射,(d)90°非漫反射,(e)-45°漫反射,(f)-45°非漫反射

Fig. 6 Spatial distribution of visible scattering intensity under diffuse reflection and non-diffuse reflection. (a)0° diffuse reflection,(b)0° non-diffuse reflection,(c)90° diffuse reflection,(d)90° non-diffuse reflection,(e)-45° diffuse reflection,(f)-45° non-diffuse reflection

参 考 文 献

- Liu Jianbin, Wu Jian. Light scattering of spatial target[J]. *Journal of Astronautics*, 2006, **27**(4): 802~805
刘建斌, 吴 健. 空间目标的光散射特性[J]. *宇航学报*, 2006, **27**(4): 802~805
- Y. J. Shen, Z. M. Zhang, B. K. Tsai *et al.*. Bidirectional reflectance distribution function of rough silicon wafers[J]. *Int. J. Thermophys.*, 2001, **22**(4): 1311~1325
- Wu Zhensen, Xie Donghui, Xie Pinghua. Modeling reflectance function from rough surface and algorithms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 897~901
吴振森, 谢东辉, 谢品华. 粗糙表面激光散射统计建模及其算法[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 897~901
- Wu Zhensen, Liu Anan. The light scattering of complex background radiation incident to target[J]. *Journal of Xidian University(Natural Science)*, 2002, **29**(3): 289~293
吴振森, 刘安安. 目标对复杂背景辐射的光散射[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2002, **29**(3): 289~293
- Hou Zengqi, Hu Jingang. *Thermal Control Technology and Application of Spacecraft*[M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 2007
侯增祺, 胡金刚. *航天器热控制技术原理及其应用*[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007
- Cao Yunhua, Wu Zhensen, Zhang Hanlu *et al.*. Research on visible light scattering of spatial targets based on spectral BRDF of target samples[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2264~2268
曹运华, 吴振森, 张涵璐 等. 基于粗糙样片光谱 BRDF 的空间目标可见光散射研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(11): 2264~2268
- Lu Daju, Wan Ming, Yang Rui *et al.*. Reflectivity of measurement of spatial target's surface material[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(8): 1353~1356
路大举, 万 敏, 杨 锐 等. 空间目标表面材料反射率的测量[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(8): 1353~1356
- Kuang Zheng, Su Yanmei, Yang Dezhuang *et al.*. Performance degeneration models of thermal control coatings on spacecrafts and solving for model parameters[J]. *J. Harbin Institute of Technology*, 2008, **40**(5): 767~770
匡 正, 苏艳梅, 杨德庄 等. 热控涂层性能退化模型与模型参数求解[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2008, **40**(5): 767~770