

doi: 10.3788/gzxb20124103.0353

# 遮光罩内壁蜂窝结构单元的双向反射特性

陈学, 孙创, 夏新林

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 内壁蜂窝结构是决定遮光罩杂散光抑制性能的主要因素, 掌握其各向异性辐射传输特性对遮光罩的杂散光分析和优化设计具有重要意义. 针对蜂窝结构单元, 建立辐射传输模型, 导出了表面双向反射分布函数的离散表达式; 通过蒙特卡罗法模拟蜂窝结构单元的辐射传输过程, 分析了几何参量和涂层反射率对等效面反射特性的影响; 根据模拟所得双向反射分布函数数据库, 建立了用于遮光罩杂散光分析的蜂窝结构等效面的反射特性概率模型. 分析结果表明, 蜂窝结构对杂散光呈现很强的后向散射特征, 等效面的反射特性概率模型与直接模拟结果符合很好, 可用于遮光罩杂散光分析和设计.

**关键词:** 杂散光; 蒙特卡罗法; 双向反射分布函数; 蜂窝结构单元

**中图分类号:** TK124

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2012)03-0353-5

## 0 引言

杂散光问题在空间光学系统的研制中逐渐受到重视, 杂散光分析与抑制已成为光学工程中的关键技术之一, 并影响着某些特殊光学系统性能的进一步提高<sup>[1-4]</sup>. 遮光罩和挡光环是消除杂散光的主要手段; 杂散光分析时, 直接对遮光罩内壁真实结构进行光线追迹比较繁琐、费时, 常采用等效面的双向反射分布函数对其综合反射作用进行描述<sup>[4]</sup>. 微小蜂窝代替挡光环作为抑制结构已经得到了应用<sup>[5]</sup>, 但导致遮光罩内壁结构更加复杂, 直接光线追迹几乎难以实现. 因此, 可借助等效面的概念, 但蜂窝结构等效面的双向反射特性还没有相关文献说明.

本文用蜂窝结构单元来表征整个蜂窝结构, 采用蒙特卡罗法, 对单元的辐射传输过程进行模拟, 分析单元等效面的反射特性及影响因素; 根据数值结果, 建立并验证了蜂窝结构等效面的反射特性概率模型.

## 1 数学物理模型

如图 1 所示, 蜂窝结构单元为具有一定壁厚、顶部开口的正六棱柱, 各表面均喷涂消光涂层(黑漆), 本文将单元顶面看作等效平面进行分析.

蒙特卡罗法作为一种概率模拟方法, 已经在杂散光计算中得到了广泛应用<sup>[6-9]</sup>. 采用蒙特卡罗法求

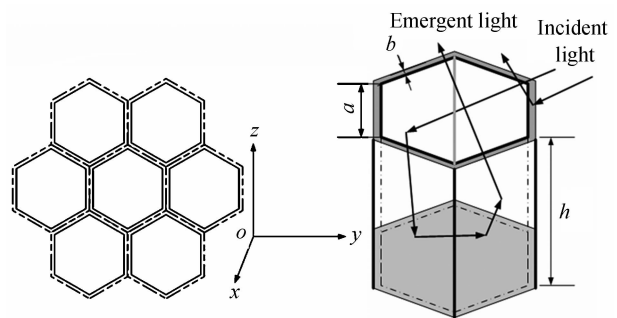


图 1 蜂窝结构单元和光路示意图

Fig. 1 Structure of honeycomb cell and path of ray

解光线传输过程的基本思想和理论在很多文献中有详细的介绍<sup>[4,7-9]</sup>. 本文仅对光线抽样概率模型和各向异性反射方向空间分布概率模型给予说明.

### 1.1 光线抽样概率模型

模拟光线抽样时, 产生随机数  $R_b$ . 若随机数  $R_b \leq S_1 / (S_1 + S_2)$ , 则光线到达单元顶面壁; 反之, 光线进入单元空腔内部. 其中,  $S_1$ 、 $S_2$  分别为单元顶面壁面积和开口面积.

### 1.2 各向异性反射方向空间分布概率模型

表面的基本散射特性采用双向反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) 描述, 根据 BRDF 的数值可以导出表面反射率. BRDF 定义为反射辐射强度与投射能量之比 (见图 2).

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 90816022) 资助

第一作者: 陈学 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光学系统杂散光分析与抑制研究. Email: hit\_chenxue@163.com

导师 (通讯作者): 夏新林 (1966-), 男, 教授, 主要研究方向为杂散辐射、辐射-对流耦合换热. Email: xiaxl@hit.edu.cn

收稿日期: 2011-05-27; 修回日期: 2011-12-15

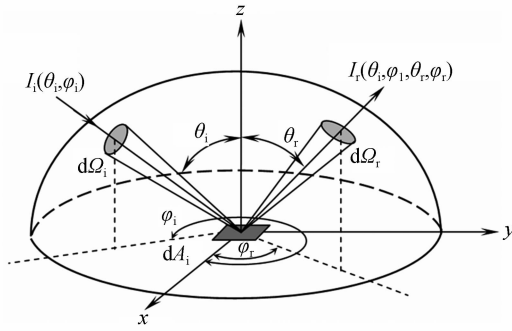


图 2 表面双向反射分布函数示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of surface BRDF

$$BRDF(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{I_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{I_i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\Omega_i} \quad (1)$$

式中,  $\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r$  分别表示能束入射、反射的天顶角和圆周角;  $I_i(\theta_i, \varphi_i), I_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$  分别表示入射辐射强度与反射辐射强度;  $d\Omega_i, d\Omega_r$  分别表示入射、反射能束的立体角。

根据蒙特卡罗法的概率模型理论和 BRDF 的定义, 可推导出表面各向异性反射方向分布的概率模型表达式

$$R_\varphi = \frac{\int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} BRDF(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \sin \theta_r \cos \theta_r d\theta_r d\varphi_r}{\int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} BRDF(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \sin \theta_r \cos \theta_r d\theta_r d\varphi_r} \quad (2)$$

$$R_\theta = \frac{\int_0^{\pi/2} BRDF(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \sin \theta_r \cos \theta_r d\theta_r}{\int_0^{\pi/2} BRDF(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \sin \theta_r \cos \theta_r d\theta_r} \quad (3)$$

式(2)中分母即是定向-半球反射率  $\rho(\theta_i, \varphi_i)$ , 式(3)中角度  $\varphi$  的数值由式(2)求得。

## 2 数值求解

采用蒙特卡罗法进行数值模拟, 分析蜂窝结构单元等效面的双向反射特性. 平行光束沿  $(\theta_i, \varphi_i)$  方向入射, 发射面的抽样光线数密度为  $n$  束/mm<sup>2</sup>, 每束光线所代表能量为  $e$ , 将反射方向的半球空间离散为  $N \times M$  个立体角. 入射光线经单元作用后, 沿反射方向  $(\theta_r, \varphi_r)$ 、在  $d\Omega_r$  立体角内离开单元顶面单位面积的光线为  $m$  束/mm<sup>2</sup>. BRDF 离散表达式

$$BRDF(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{2m}{n \cdot \sin(2\theta_r) \cdot \Delta\theta_r \Delta\varphi_r} \quad (4)$$

式中,  $\Delta\theta_r, \Delta\varphi_r$  分别表示反射方向立体角对应的天顶角和圆周角离散步长。

由式(4)可知, BRDF 的数值准确度受到  $n$  以及  $\Delta\theta_r$  和  $\Delta\varphi_r$  离散参数的影响, 数值求解归结为在一定的反射方向离散数下, 以足够大的  $n$  值求解  $m$  值。

## 3 模拟结果及分析

### 3.1 离散参数确定与对称性检验

取一定几何尺寸 ( $a=h=5$  mm,  $b=0.5$  mm) 的

蜂窝结构单元进行试算, 以确定各离散参数的数值, 黑漆为漫反射、反射率  $\rho=0.13$ 。

试算发现, 当  $N \times M \geq 18 \times 36, n \geq 10^7$  时, BRDF 数值结果趋于稳定. 因此, 文中所有计算均采用  $N \times M=18 \times 36, n=10^7$  数值组合。

从单元截面为正六边形的几何特性可知: 光线从具有对称性的方向入射时, BRDF 分布应该一致. 取入射天顶角  $45^\circ$ , 圆周角  $0^\circ$  和  $60^\circ$  模拟; 同时对计算程序的正确性进行检验. 从图 3 可以看出, 对称性方向入射时, 入射平面内 BRDF 变化曲线基本重合, 从而该结论得到了验证。

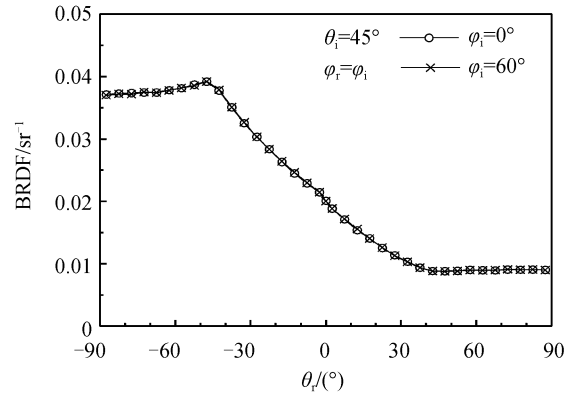


图 3 对称性方向入射时 BRDF 分布  
Fig. 3 Distribution of BRDF with symmetrical incident angle

由讨论可知, 光线以相同的天顶角入射时, BRDF 的分布随入射圆周角呈周期性的变化

$$BRDF(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = BRDF\left(\theta_i, \varphi_i + \frac{\pi}{3}, \theta_r, \varphi_r + \frac{\pi}{3}\right) \quad (5)$$

### 3.2 基本特性分析

光线以不同方向入射时分别进行数值模拟. 为了便于结果分析, 在单元顶面中心建立当地坐标系  $O'X'Y'Z'$ , 以光线入射方向在顶面的投影方向为  $X'$  轴,  $Z'$  轴方向朝上,  $Y'$  轴方向按右手法则得到。

从图 4 和图 5 可以看出, BRDF 分布呈现有规律各向异性: 在散射方向  $(\theta_r, \varphi_r) = (\theta_i, \varphi_i)$  附近区

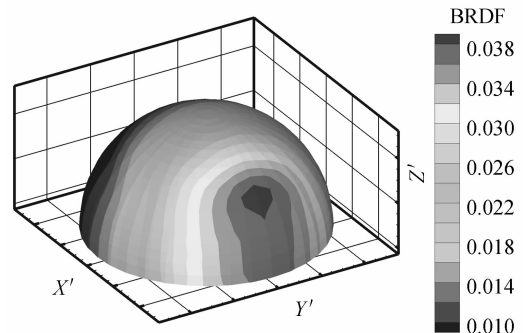


图 4  $(45^\circ, 0^\circ)$  入射时 BRDF 空间分布  
Fig. 4 Spatial distribution of BRDF

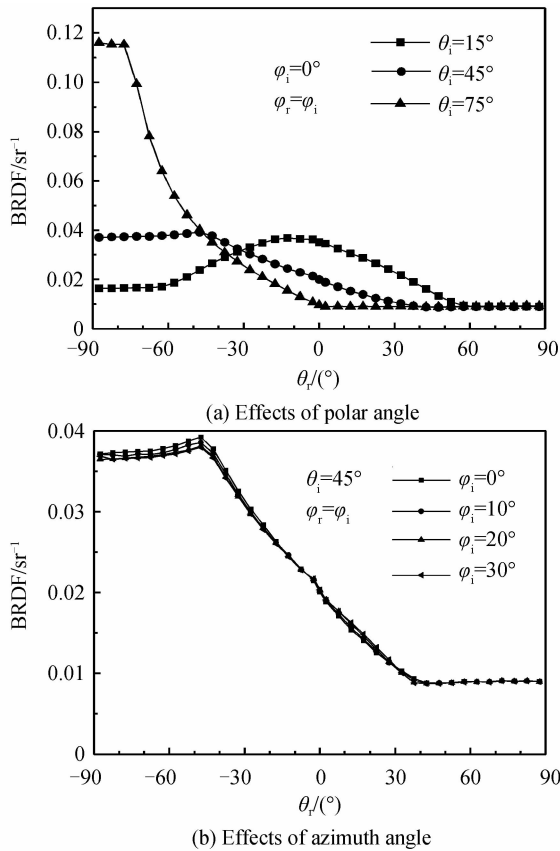


图 5 不同入射角度下入射平面内 BRDF 分布  
Fig. 5 BRDF of different incident angles

域集中分布,并向其他散射方向递减,出现强烈的后向散射.以相同圆周角  $\varphi_i$ ,不同天顶角  $\theta_i$  入射时,峰值区域随着  $\theta_i$  的变化而移动,反射峰值随  $\theta_i$  的增大而增大;即  $\theta_i$  越大,后向散射越强.以相同  $\theta_i$ ,不同  $\varphi_i$  入射时,BRDF 分布形态相似,变化趋势一致,仅在峰值上有较小的变化.可见,入射圆周角对整体的反射特性影响较小.进而可通过离散计算求得单元等效面的反射率  $\rho' \approx 0.063$ ,相对于涂层反射率 0.13 而言,蜂窝结构消光能力更强.

通过数值模拟,可以建立光线以不同方向入射时,蜂窝结构单元等效面的反射特性(BRDF)数据库.

### 3.3 影响因素

#### 3.3.1 几何参量的影响

**壁厚影响:**蜂窝结构单元壁厚增加,顶面开口面积所占比例减小,顶面壁的反射逐渐成为主要部分,反射特性将逐渐接近涂层的反射特性;反之,会逐渐趋近于零壁厚时空腔的反射特性.

**高度影响:**令高度与边长之比  $\delta = h/a$ ,由图 6 可以看出,高度增加,BRDF 数值在较小  $\theta_r$  范围内减小幅度较大,曲线分布向高度值较大的曲线收拢,即同一入射角度下,BRDF 分布逐渐趋于稳定;另外,高度增加, $\rho(\theta_i, \varphi_i)$  逐渐减小并趋于定值.可见,高度增加到一定程度,反射特性几乎不再变化.

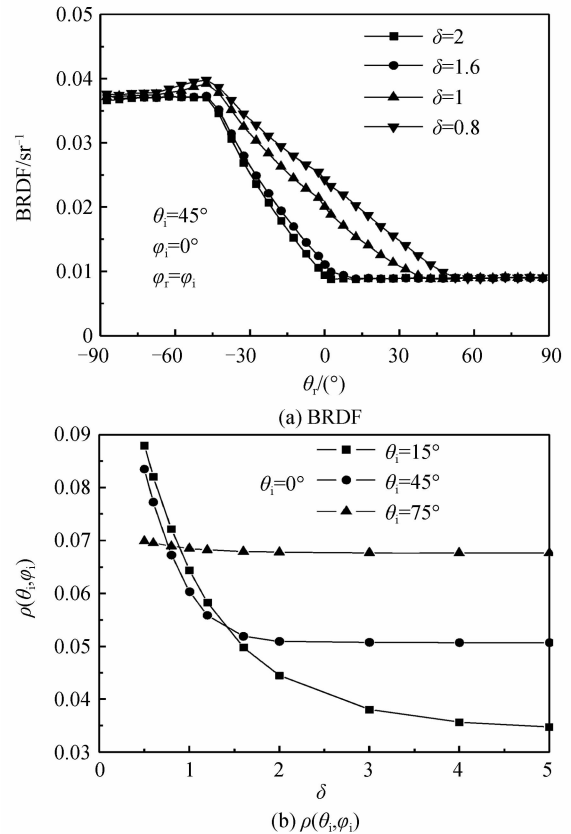


图 6  $\delta$  对反射特性的影响  
Fig. 6 Effects of  $\delta$  on the reflection characteristics

#### 3.3.2 涂层反射率的影响

由图 7 可以看出,涂层反射率增大,BRDF 的数

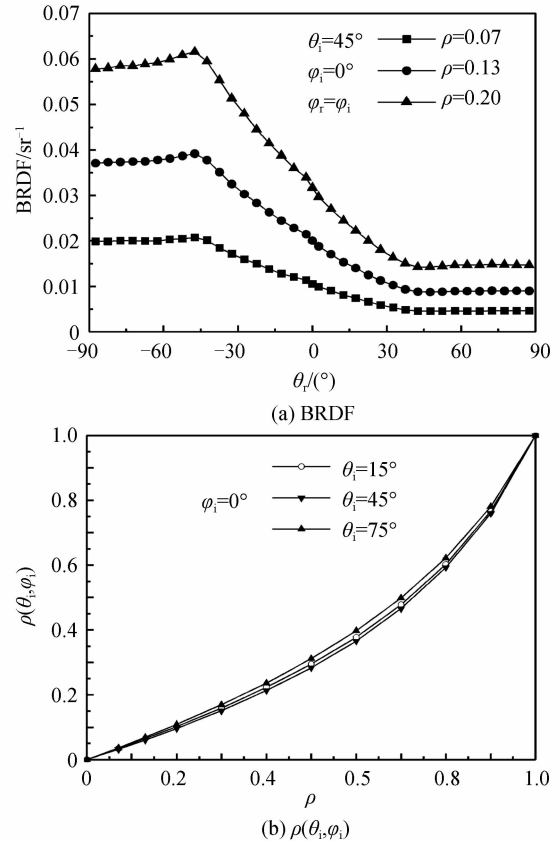


图 7 涂层反射率对反射特性的影响  
Fig. 7 Effects of  $\rho$  on the reflection characteristics

值整体变大,峰值大幅度增加, $\rho(\theta_i, \varphi_i)$ 呈指数上升.可见,虽然蜂窝结构对光线有很强的抑制能力,但仍需重点考虑涂层的作用.

蜂窝结构截面形状影响,如:三角形、正方形和圆形.经分析,截面形状不同时,与正六边形截面具有类似的反射特性,这里不再给出计算结果.

### 3.4 反射特性概率模型验证

由式(2)与式(3)可知,若表面的 BRDF 分布已知,则可以建立相应的反射方向空间分布概率模型,通过随机数的产生和判断求得入射光线的反射方向,计算准确度受到反射方向的离散步长影响.

离散的 BRDF 数值通过式(2)与式(3)离散求和可得到反射角度  $\theta_r, \varphi_r$  分别与随机数  $R_\theta, R_\varphi$  相对应的两个数据表;数值模拟时,判断随机数所在的角度离散区域,再插值计算得到确定的角度值,本文采用线性插值.

以蜂窝结构单元等效面的 BRDF 分布建立等效面的反射特性概率模型;即在杂散光分析时,蜂窝结构的顶面可等效为各向异性反射平面.

选取  $\theta_i = 15^\circ, 45^\circ, 75^\circ, \varphi_i = 0^\circ$ , 通过概率模型模拟计算得到等效面的 BRDF 分布.图 8(a)为通过概率模型模拟得到  $\theta_i = 45^\circ$  时 BRDF 的空间分布,与图 4 形成对比;图 8(b)为各角度下几何结构直接模拟与概率模型模拟得到的入射平面 BRDF 分布对比曲线.可以看出,无论是空间分布还是数值大小,两

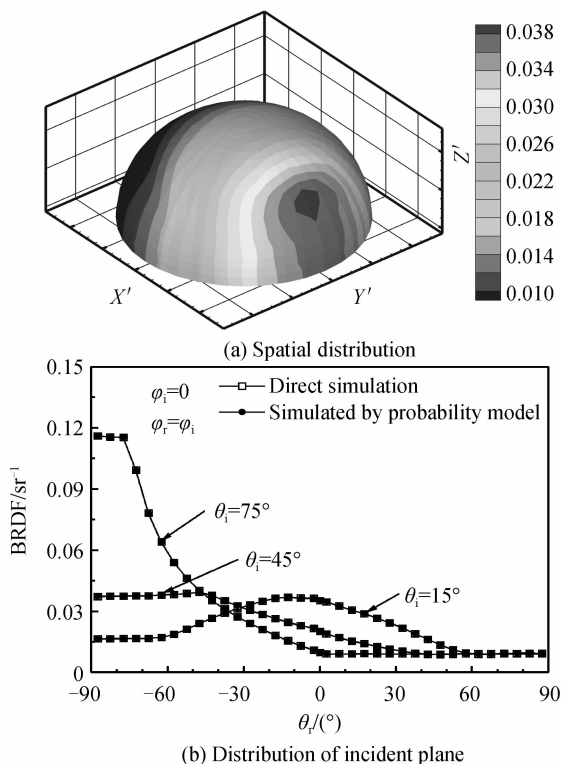


图 8 概率模型的验证

Fig. 8 Verification of probability model

者的结果都非常吻合,从而验证了概率模型的正确性.

## 4 结论

本文对蜂窝结构单元的辐射传输过程进行了数值模拟,得到单元等效面的 BRDF 数据库,建立并验证了等效面的反射特性概率模型.说明杂散光分析时,蜂窝结构可采用等效面处理,为遮光罩内部光线传输计算提供了依据.主要结论如下:

1) 单元等效面的 BRDF 分布呈各向异性,且后向散射强,蜂窝结构对杂散光有很好的抑制效果.

2) 光线的入射天顶角相同时,单元等效面的 BRDF 随入射圆周角呈周期性变化;入射天顶角对反射特性影响较大,而入射圆周角影响相对较小.

3) 结构设计时应注意,单元的高度增大到一定程度后,反射特性几乎不再变化,而壁厚越薄越好;同时,仍需采用低反射、高吸收的消光涂层.

### 参考文献

- [1] ZOU Gang-yi, FAN Xue-wu. Baffle design and stray light analysis of the off-axis three-mirror telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 605-608.  
邹刚毅, 樊学武. 离轴三反射望远镜遮光罩设计与杂光分析 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 605-608.
- [2] CEN Zhao-feng, HE Zhi-ping, LI Xiao-tong, et al. Stray light analysis of optical system [J]. *Optical Instruments*, 2003, **25**(2): 12-15.  
岑兆丰, 何志平, 李晓彤, 等. 光学系统中杂光分析 [J]. *光学仪器*, 2003, **25**(2): 12-15.
- [3] LIAO Zhi-bo, JIAO Wen-chun, FU Rui-min. Veiling glare index calculation for refract optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(3): 424-427.  
廖志波, 焦文春, 伏瑞敏. 透射式光学系统杂光系数计算方法 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(3): 424-427.
- [4] TAN He-ping, XIA Xin-lin, LIU Lin-hua, et al. Numerical calculation of infrared radiative transfer [M]. Harbin: Press of Harbin Institute of Technology, 2006: 330-354.  
谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射传输的数值计算 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006: 330-354.
- [5] LI Xiao-ping, SHA Sheng-chun, HU Ting-liang. Suppression of stray light for long focal length off-axis three-mirror optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(11): 2063-2068.  
李晓平, 沙晟春, 胡亭亮. 长焦距离轴三反光学系统杂散光的抑制 [J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(11): 2063-2068.
- [6] ZHAO Nan, XUE Yu, WANG Jing. Analysis of stray radiation from infrared optical system with monte-carlo method [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, **3**(6): 665-670.  
赵楠, 薛育, 王晶. 利用蒙特卡洛法分析红外光学系统的杂散辐射 [J]. *中国光学与应用光学*, 2010, **3**(6): 765-770.
- [7] TANG Yong, LU Xin, HAO Yun-cai. Suppression and analysis of stray light in a star sensor [J]. *Aerospace Control*, 2004, **22**(3): 58-61.  
唐勇, 卢欣, 郝云彩. 星敏感器杂光抑制分析 [J]. *航天控制*, 2004, **22**(3): 58-61.
- [8] TAN He-ping, SHUAI Yong, XIA Xin-lin, et al. Reliability of stray light calculation code using the monte carlo method [J]. *Optical Engineering*, 2005, **44**(2): 1-11.
- [9] XIA Xin-lin, SHUAI Yong, TAN He-ping. Calculation

techniques with monte carlo method in stray radiation  
evaluation [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy &*

*Radiative Transfer*, 2005, **95**(1): 101-111.

## **Bidirectional Reflection Characteristics of Honeycomb Cell in Baffle**

CHEN Xue, SUN Chuang, XIA Xin-lin

(*School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

**Abstract:** Honeycomb structure on the inner wall of baffle dominates the performance of stray light suppression of the baffle. It is significant to understand the anisotropic radiation transfer characteristics of the honeycomb cell for stray light analysis and optimum design of baffle. A numerical model of radiative propagation was built for honeycomb cell and the discrete BRDF expression was deduced for the equivalent surface. By simulating the stray light propagation with the Monte Carlo method, the effects of geometric parameters and reflectivity of coating on BRDF of the equivalent surface were analyzed. Based on the obvious backscattering of the honeycomb structure predicted by the BRDF analysis, the probability model of anisotropic reflection was established for the equivalent surface. The BRDF results predicted by the probability model show good agreement with that of the direct simulation, and it can be well used in stray light analysis and design of baffle.

**Key words:** Stray light; Monte-Carlo method; Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF); Honeycomb cell