

文章编号:1001-9014(2005)05-0361-05

介质吸收散射对半透明涂层表面双向反射特性的影响

夏新林, 任德鹏, 谈和平

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:对表面光滑、基底面漫射的吸收-散射性半透明涂层,通过建立入射光谱的辐射传递模型,采用蒙特卡罗法求解分析了涂层光学厚度、介质散射及基底面反射对涂层表面双向反射特性的影响.结果表明,即使在不考虑涂层表面 Fresnel 反射的条件下,吸收-散射性半透明涂层的反射也呈现明显的各向异性,其 BRDF 分布与吸收性半透明涂层的 BRDF 特性有明显差别.

关键词:表面辐射;BRDF;半透明涂层;吸收-散射介质;蒙特卡罗法
中图分类号:O435;TK124 **文献标识码:**A

EFFECTS OF MEDIUM ABSORPTION AND SCATTERING ON BI-DIRECTIONAL REFLECTION OF SEMITRANSSPARENT COATINGS

XIA Xin-Lin, REN De-Peng, TAN He-Ping

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

Abstract:For the absorbing-scattering semitransparent coatings with smooth surface and diffuse opaque substrate, the propagation model of the incident spectrum was derived and the spectral radiative transfer was solved by Monte Carlo method. The effects of the optical thickness, medium scattering and substrate reflection on the bi-directional reflection of the coating surface were analyzed. The results show that the reflection of an absorbing-scattering semitransparent coating is obviously anisotropic even if the Fresnel reflection on surface is not taken into account, and its BRDF is quite different from that of an absorbing coating.

Key words: surface radiation; BRDF; semitransparent coatings; absorbing-scattering medium; Monte Carlo method

引言

利用涂层使物体表面呈现特定的光谱或方向辐射特性,具有广泛的应用背景.了解涂层材料性质对表面辐射特性的影响和作用机制,对涂层研制有重要意义.长期以来,除实验测量外^[1,2],对涂层的反射特性理论研究通常假设涂层为光学厚^[3],注重涂层反射的光谱分布与表面粗糙度的影响^[1,2,4].近年来,一些研究者注意到,涂层在许多情况下是半透明的,涂层介质的吸收、散射与基底反射对涂层反射有重要影响^[3,5,6,7].例如,Geotti-Bianchini等(2003年)实验研究了薄膜吸收与基底反射对 SiO₂ 薄膜近法向的红外镜反射特性的影响^[3];Rodriguez等(2000年)测量了 TiO₂ 薄膜的可见光与近红外漫反射对薄

膜厚度的依赖关系^[5];Nijnatten(2001年)提出一种伪费涅尔方法预测光学厚涂层的方向反射特性,比较了考虑介质吸收与否的预测结果差别^[6].

双向反射分布函数(BRDF)是描述表面辐射特性的基本参数^[2],受计算方法限制,以往考虑涂层吸收与基底反射的研究难以给出涂层表面 BRDF,而是给出法向-法向或方向-半球反射率^[3,5,6].本文通过建立模型,采用蒙特卡罗法模拟吸收-散射性涂层内的辐射传递,获得涂层表面的 BRDF,考察了光学厚度、介质散射及基底面反射的影响.

1 物理数学模型

考虑厚度为 L 的吸收-散射性半透明涂层,如图 1 所示.对某一非偏振光谱,涂层介质的折射率为

收稿日期:2004-10-31,修回日期:2005-01-31

Received date: 2004-10-31, revised date: 2005-01-31

基金项目:国家973资助项目(2003CB214500)、霍英东青年教师基金(81050).

作者简介:夏新林(1966-),男,河北阜城人,哈尔滨工业大学能源科学与工程学院教授、博士.研究方向:热辐射、耦合换热.

n , 吸收、散射系数分别为 κ_a, κ_s , 散射反照率为 ω ; 不透明基底面漫反射率为 ρ_s ; 涂层表面平整光滑; 环境折射率为 1. 根据定义, 参见图 2, 涂层表面的双向反射分布函数可表示为:

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

式中, θ_i, θ_r 分别是入射角与反射角; $I_i(\theta_i), I_r(\theta_r)$ 分别是入射辐射强度与反射辐射强度, $d\Omega_i$ 是入射辐射能束的立体角. 对吸收-散射性半透明涂层, 其对入射光谱的反射由表面 Fresnel 反射、进入涂层的光谱经介质吸收-散射及基底反射后传递到表面的透射构成. 除 θ_i, θ_r 外, $BRDF(\theta_i, \theta_r)$ 还与 n, τ, ω, ρ_s 有关, 其中, $\tau = (\kappa_a + \kappa_s)L$ 为涂层的光学厚度.

对满足 Fresnel 反射与 Snell 折射的涂层表面, 反射辐射强度 $I_r(\theta_r)$ 可表示为:

$$I_r(\theta_r) = \rho(\theta_i)I_i(\theta_i)\delta_{ir} + I_{ml}(\xi)[1 - \rho(\xi)]/n^3 \quad (2)$$

式中, $I_{ml}(\xi)$ 是涂层介质内经基底面反射后沿 ξ 角到达涂层表面内侧的辐射强度总和, ξ 是与 θ_i, θ_r 对应的涂层表面内侧折射角; $\delta_{ir} = \begin{cases} 1, & \theta_r = \theta_i \\ 0, & \theta_r \neq \theta_i \end{cases}$; 表面反射率 $\rho(\theta_i), \rho(\xi)$ 由 Fresnel 公式确定.

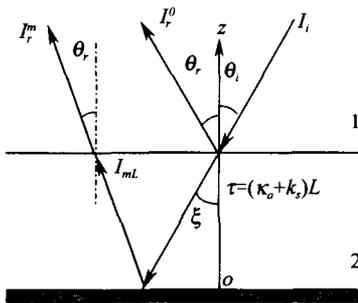


图 1 物理模型与坐标系
Fig. 1 Physical model and coordinate system

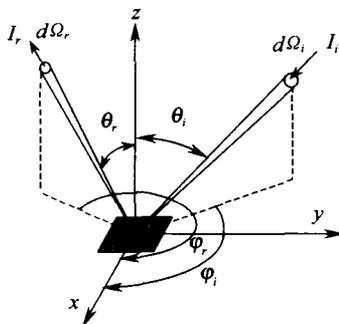


图 2 表面双向反射示意图
Fig. 2 Schematic diagram of surface bi-directional reflection

$$\rho(\theta_i) = \frac{1 \sin^2(\theta_i - \xi)}{2 \sin^2(\theta_i + \xi)} \left[1 + \frac{\cos^2(\theta_i + \xi)}{\cos^2(\theta_i - \xi)} \right] \quad (3)$$

以入射光谱强度 $I_i(\theta_i)$ 、漫射基底面反射辐射强度 $I_m(0, \xi)$ 为边界条件, 求解涂层介质内的光谱辐射传递, 并叠加求和可得出 $I_{ml}(\xi)$. 对吸收-散射性介质, 某一光谱的辐射传递方程及漫射基底面反射辐射强度 $I_m(0, \xi)$ 分别为:

$$\begin{aligned} \frac{dI_m(S, \xi)}{dS} + \kappa \cdot I_m(S, \xi) \\ = \frac{\kappa \cdot \omega}{4\pi} \int_{\Omega' = 4\pi} I_m(S, \xi') \cdot \Phi(\xi, \xi') d\Omega' \quad (4) \end{aligned}$$

$$I_m(0, \xi) = \frac{\rho_s}{\pi} \int_{\Omega' = 2\pi} I_{m0}(\xi') \cdot \cos\xi' d\Omega' \quad (5)$$

式中, $I_m(S, \xi)$ 是涂层介质内 S 处沿 ξ 角方向的光谱辐射强度, $S = z/\cos\xi$; $\kappa = \kappa_a + \kappa_s$ 是介质的衰减系数; $\Phi(\xi, \xi')$ 是散射相函数; $I_{m0}(\xi')$ 是沿 ξ' 角方向到达基底面的光谱辐射强度.

2 数值求解

采用蒙特卡罗方法数值求解. 将立体角为 $d\Omega_i$ 、沿 θ_i 方向入射到涂层表面单位面积内的辐射能离散为能量为 e^* 的 N 份能束, 将反射方向半球空间离散为步长为 $\Delta\theta_r$ 的 NM 个立体角. 设经涂层表面、介质与基底面传播后, 沿 θ_r 方向、在 $d\Omega_r$ 立体角内离开涂层的辐射能束数为 M . 根据辐射强度与 $BRDF$ 的定义, 可推导出如下的 $BRDF(\theta_i, \theta_r)$ 离散表达式:

$$BRDF(\theta_i, \theta_r) = M / (N\pi \cdot \sin 2\theta_r \cdot \Delta\theta_r) \quad (6)$$

根据式(2)~(5)分别建立涂层表面 Fresnel 反射、折射、介质内传播吸收或散射以及基底面反射等物理过程的概率模型, 参见有关文献. 采用如下典型散射相函数描述介质的散射方向分布:

$$\Phi(\xi, \xi') = 1 + b\cos\vartheta; \quad b \in (-1, 0, 1) \quad (7)$$

表 1 本文模拟结果与文[3]中实验值及计算值的比较
Table 1 Results comparisons with the experimental and calculating values in Ref. [3]

		$\lambda(\mu\text{m})$				
反射率		11.11	11.77	12.50	13.33	14.29
薄膜厚度 $L = 0.3\mu\text{m}$	本文结果	0.587	0.681	0.714	0.715	0.729
	文[3]实验值	0.683	0.708	0.720	0.731	0.752
	文[3]计算值	0.861	0.834	0.865	0.870	0.871
薄膜厚度 $L = 0.6\mu\text{m}$	本文结果	0.466	0.612	0.659	0.649	0.655
	文[3]实验值	0.521	0.633	0.624	0.631	0.701
	文[3]计算值	0.742	0.801	0.817	0.819	0.821

式中, ϑ 为散射方向 ξ 与原传播方向 ξ' 的夹角; 系数 $b=0$ 时, 代表各向同性散射; $b=-1$ 时, 代表强后向散射; $b=1$ 时, 代表强前向散射. 由该式可容易得出散射方向的天顶角分布概率模型.

根据光谱从入射到离开涂层表面所经历的各物理过程概率模型, 对传播过程进行随机抽样, 统计获得从不同 θ_i 方向、 $d\Omega_i$ 立体角内离开涂层的能量份数 M 值, 最终由式(6)计算出 BRDF.

3 计算结果与分析

3.1 离散参数与比较验证

试算发现, 当离散参数 $N \geq 10^7$ 、 $NM \geq 30$ 时, BRDF 的数值结果趋于稳定, 因此, 计算中取 $N = 10^7$ 、 $NM = 30$. 为验证模型与方法的可靠性, 对文[3]中的铝基底— SiO_2 薄膜的多光谱近法向镜反射 ($\theta_i = \theta' = 6^\circ$) 进行模拟, 并与其实验和计算结果比较, 如表 1 所示. 本文得出的 $L = 0.3 \mu\text{m}$ 薄膜的各光谱反射率略低于文[3]的实验值; 对 $L = 0.6 \mu\text{m}$ 的薄膜, 有 3 个光谱的结果略低于、2 个光谱的结果略高于实验值; 而文[3]的计算结果均高于其实验值.

3.2 涂层光学厚度的影响

为揭示涂层介质的吸收-散射作用, 取介质折射率 $n=1$. 以吸收性涂层为例考察光学厚度 ($\tau = \kappa_0 L$) 的影响. 计算中, 基底面反射率 $\rho_s = 0.8$, 即 $BRDF \approx 0.255$. 由图 3 可看出(曲线 1-5: $\vartheta = 5^\circ, 25^\circ, 45^\circ, 65^\circ, 85^\circ$), $\tau \leq 0.01$ 时, 对不很大的入射角 ($\theta_i \leq 65^\circ$), 涂层表面的 BRDF 与漫射基底面 BRDF 很接近. $\tau \geq 0.1$ 时, 在较大的 θ_i 范围内 ($\theta_i \leq 60^\circ$), 涂层表面的 BRDF 分布形态与漫射基底面 BRDF 接近, 但 BRDF 值明显降低. $\tau \geq 1.0$ 时, 涂层表面的 BRDF 很小 (< 0.05).

3.3 漫射基底面的反射影响

图 4 是基底面漫反射率 ρ_s 不同时, 折射率 $n=1$ 的吸收性涂层表面的 BRDF 模拟结果(曲线 1-3: $\theta_i = 15^\circ, 45^\circ, 75^\circ$). 可以看出, 涂层光学厚度 τ 一定时, 表面的 BRDF 值随 ρ_s 的减小而变小, 但方向性分布形态几乎不变. 随着 τ 增大, 涂层介质的吸收作用增强, 基底面的反射作用变小.

3.4 涂层介质散射的影响

图 5 是不同散射反照率 ω 下, 吸收-各向同性散射涂层表面的 BRDF 模拟结果(曲线 1-3: $\theta_i = 15^\circ, 45^\circ, 75^\circ$), 其中, $\rho_s = 0.8$. 容易看出, 与图 4 中纯吸收性涂层的情况相反, 光学厚度 τ 不变时, 介质散射作用使涂层表面的 BRDF 随 θ_i 的增大而增大.

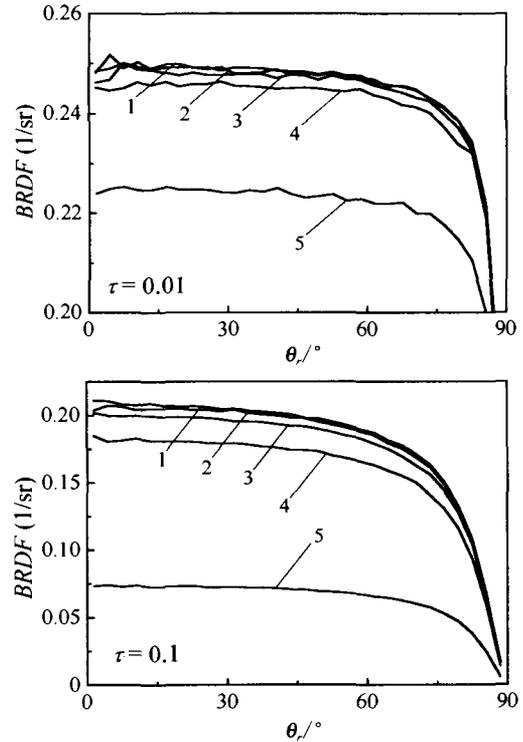


图 3 涂层光学厚度对涂层表面 BRDF 的影响
Fig. 3 Effects of coating optical thickness on the BRDF

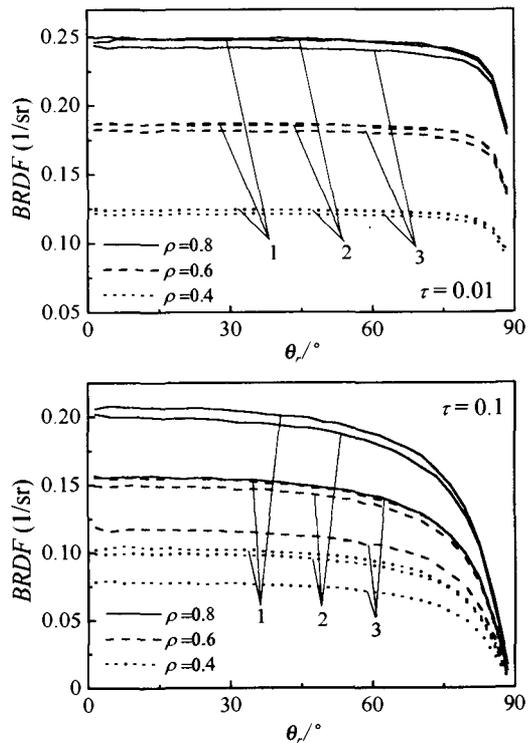


图 4 漫射基底面反射对涂层表面 BRDF 的影响
Fig. 4 Effects of diffuse substrate reflection on the BRDF

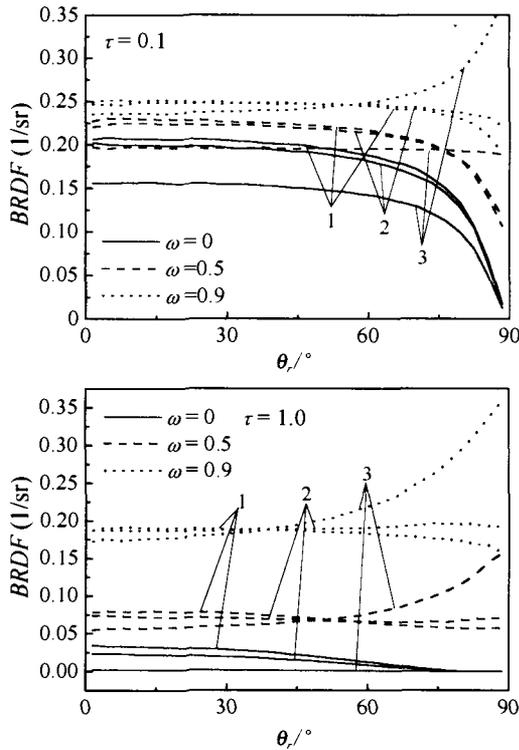


图5 涂层介质散射反照率对表面 BRDF 的影响
Fig. 5 Effects of medium scattering albedo on the BRDF

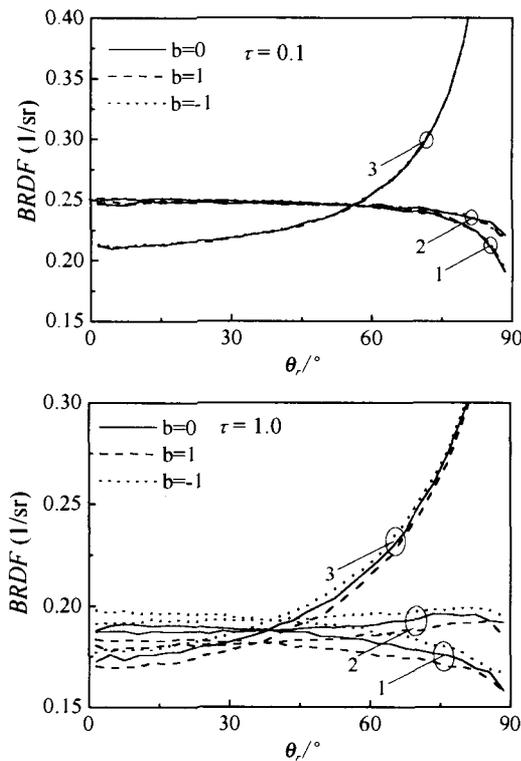


图6 涂层介质散射方向分布对表面 BRDF 的影响
Fig. 6 Effects of scattering distribution on the BRDF

强散射导致大角度入射、反射方向的 BRDF 随 θ 的增大而增大,甚至大于漫射基底面的 BRDF 值.另一方面,随着 ω 增大, τ 对表面 BRDF 的影响减小.图6是 $\rho_s = 0.8$ 、 $\omega = 0.9$ 时,涂层介质的散射方向性分布对表面 BRDF 的影响(曲线 1 - 3: $\theta_i = 15^\circ$ 、 45° 、 75°).可看出,对 $\tau \leq 0.1$ 的涂层,即使散射强度很大,散射的方向性分布的影响极小. $\tau \geq 1.0$ 时,散射方向性分布的影响稍明显.后向散射使表面 BRDF 略有增大;而前向散射使之略微变小.

吸收 - 散射性涂层表面 BRDF 的上述特征是由于介质散射使入射光谱可不经基底面反射而直接散射至涂层表面形成反射,而介质散射与基底面吸收耦合构成光谱传播方向的选择性.当 θ_i 与 θ 足够大时,散射对表面反射的贡献超过 θ 增大所引起的吸收衰减,使该方向的 BRDF 值增大.

4 结论

通过采用蒙特卡罗法模拟吸收 - 散射性涂层表面的 BRDF 分布特性,初步得出以下结论:

(1) 介质吸收、散射与漫射基底面反射的耦合作用决定半透明涂层表面的双向反射特性.即使不考虑表面的 Fresnel 反射,涂层表面的 BRDF 分布也呈现规律性的各向异性.

(2) 不考虑涂层表面 Fresnel 反射条件下,吸收性涂层的 BRDF 方向性分布形态取决于涂层光学厚度.漫射基底面的反射率仅影响 BRDF 数值大小.

(3) 吸收 - 散射性半透明涂层表面的 BRDF 形成机制与纯吸收性涂层不同.涂层介质的散射作用主要取决于散射强度,散射方向分布的影响很小.强散射下($\omega \geq 0.9$),反射角 θ 较大方向的 BRDF 值可大于反射率为 1 的漫射面 BRDF 值.

REFERENCES

- [1] Hutchins M G, Topping A J, Anderson C, et al. Measurement and prediction of angle-dependent optical properties of coated glass products; results of an inter-laboratory comparison of spectral transmittance and reflectance [J]. *Thin Solid Films*, 2001, **392**: 269—275.
- [2] Shen Y J, Zhang Z M, Tsai B K, et al. Bidirectional reflectance distribution function of rough silicon wafers [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2001, **22**: 1311—1326.
- [3] Geotti-Bianchini F, Preo M, Guglielmi M, et al. Infrared reflectance spectra of semi-transparent SiO₂ rich films on silicate glasses; influence of the substrate and film thickness [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2003, **321**: 110—119.
- [4] Makino T, Nakamura A, Wakabayashi H. Directional char-

- acteristics of radiation reflection on rough metal surfaces with description of heat transfer parameters [J]. *JSME International Journal, Series B*, 1999, **42**(4): 745—751.
- [5] Rodriguez J, Gomez M, Ederth J, et al. Thickness dependence of the optical properties of sputter deposited Ti oxides films [J]. *Thin Solid Films*, 2000, **365**: 119—125.
- [6] Nijnatten P A. A pseudo-Fresnel approach for predicting directional optical properties of coated glazing [J]. *Thin Sol-*

id Films, 2001, **392**: 282—288.

- [7] HUANG Yong, LIANG Xin-Gang, Xia Xin-Lin, et al. Thermal emission characteristics of an anisotropic scattering medium layer with gradient index [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (黄勇,梁新刚,夏新林,等.各向异性散射梯度折射率介质层的热发射特性. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(1): 49—52.

(上接第 360 页)

但水汽通道探测器却对辐冷温度的这些变化不太敏感. 相对定标的结果也说明了此点.

表 2 FY-2B 水汽通道与 NOAA-17 卫星 HIRS/3 通道 12 相对定标结果

Table 2 The inter-calibration results of FY-2B WV channel with channel 12 in HIRS/3 on NOAA-17 satellite.

时间	FY-2B 水汽通道 定标系数	截距	HIRS/3 通道 12 定标系数	截距
2003/02/16	-0.073124	19.23975	-0.037049	20.70293
2003/02/18	-0.061597	18.85464	-0.037051	21.11906
2003/02/19	-0.070299	20.41230	-0.037054	21.07536
2003/02/22	-0.061124	18.77404	-0.037061	21.10984
2003/02/25	-0.061546	18.03404	-0.037057	20.67189
2003/04/25	-0.086691	22.52301	-0.037081	20.92611
2003/04/30	-0.083272	20.63571	-0.037084	20.81677
2003/05/11	-0.062091	17.27405	-0.037091	20.77659
2003/05/13	-0.076598	19.35696	-0.037093	20.80562
2003/05/16	-0.07282	19.18052	-0.037089	20.72629
2003/05/20	-0.087970	21.93407	-0.037091	20.80586
2003/05/22	-0.076128	18.74260	-0.037092	20.64531
2003/05/25	-0.075133	19.52489	-0.037094	20.83763
2003/05/26	-0.073693	18.31944	-0.037093	20.78403
2003/05/27	-0.085470	20.64857	-0.037095	20.96291
2003/05/30	-0.067308	17.77303	-0.037095	20.71378
2003/06/3	-0.074592	19.57626	-0.037096	20.82886
2003/06/4	-0.074961	18.73601	-0.037095	20.78534
平均值	-0.073120	19.23975	-0.03705	20.70293

REFERENCES

- [1] RONG Zhi-Guo, QIU Kang-Mu, HU Xiu-qing, et al. Comparison of pre-launch calibration in lab with the radiometric calibration in orbit for FY-2B meteorological satellite's ir channel [J]. *J. of Infrared Millim. Waves*, (戎志国,邱康睦,胡秀清,等. FY2B 气象卫星红外通道发射前实验室定标与在轨辐射定标比较, *红外与毫米波学报*) 2002, **21**: 408—412.
- [2] RONG Zhi-Guo. Calibration method of scanning radiometer on FY-2 satellite in orbit [J]. *Chinese Space Science and Technology*, (戎志国. FY-2 卫星扫描辐射仪在轨定标方法, *中国空间科学技术*) 2000, **20**: 67—71.
- [3] Mathew M. Gunshor, Timothy J. et al. Intercalibration of geostationary and polar-orbiting infrared window and water vapor radiances [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001, **21**(1): 61—68.
- [4] Sohn B J, SCHMETZ J, Chung E S. Inter-calibration of the Meteosat-7 water vapor channel with SSM/T-2 [J]. *Journal of geophysical research*, 2000, **105**(D12): 673—680.
- [5] Stephen A Tjemkes, König M, Lutz Hans-Joachim. Calibration of meteosat water vapor channel observations with independent satellite observations [J]. *Journal of geophysical research*, 2001, **106**(D6): 5199—5209.
- [6] Yang Zhongdong, Gu Songyan, Qiu Hong, et al. Research on the algorithm of cross calibration about IRMSS on board aboard on CBERS-1 [J]. *J. of Infrared Millim. Waves*, (杨忠东,谷松岩,邱红,等. 资源一号卫星红外多光谱扫描仪交叉定标方法研究, *红外与毫米波学报*) 2003, **22**(4): 281—285.

《红外与毫米波学报》2006 年征订启事

《红外与毫米波学报》是国内红外与毫米波科学技术领域唯一的学报类刊物,着重反映红外与毫米波领域的最新研究成果和技术进展,是中国和国际红外与毫米波学界交流最新研究成果的平台。读者对象:国内外红外与毫米波领域的科研人员,工程技术人员及高等院校师生、研究生等。

本刊为“中国自然科学核心期刊”、“中国科技核心期刊”,多次荣获国家和中国科学院“优秀期刊奖”,为《SCI》(美国科学引文索引)、《EI》(美国工程索引)、《CA》(美国化学文摘)、《SA/INSPEC》(英国科学文摘)等国际著名检索体系收录。

本刊为中、英文混排双月刊,大 16 开本、80 页,定价:10 元/期。国内外公开发行,全国各地邮局均有订阅,邮发代号:4-335。