

粗糙铝表面光谱偏振 BRDF 的测量与建模

刘彦磊¹, 刘子龙¹, 周孝好²

(1.中国计量科学研究院 国家计量科学数据与能源计量中心,北京 100029;
2.中国科学院 上海技术物理研究所;红外物理国家重点实验室,上海 200083)

摘要:金属铝在航空航天、军事国防、电子通信等领域具有重要应用,对铝材料表面光谱偏振散射特性的研究有助于丰富材料的光学信息,能够为铝材料的应用提供数据支撑.首先基于一套传统双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function, BRDF)测量装置在近红外波段测量了粗糙铝表面的光谱偏振 BRDF,并分析了入射天顶角、粗糙度等因素对测量结果的影响.测量结果表明:入射角、波长、偏振态和表面粗糙度对 BRDF 有显著影响.其次,分别采用 Beckmann 分布和指数分布概率密度分布函数建立了 BRDF 模型,并对实验结果进行了拟合.通过对比能够发现:对于同一样品和相同入射条件,不同的模型能够得到不同的拟合结果;对于不同粗糙度的样品采用不同的模型可能得到更好的拟合结果.

关键词:光谱偏振;铝;粗糙度;近红外;双向反射分布函数模型

中图分类号: O433

文献标志码: A

文章编号: 1000-2367(2024)03-0113-06

铝是一种重要的轻金属,因其优异的性能被广泛应用于航空航天、电气、汽车工业等领域^[1-5],对其表面光学散射特性的研究能够丰富其光学特性数据,为铝在相关领域的应用提供数据支撑.因此,近几十年来关于铝表面光学特性的研究从未间断.贾辉等^[1]基于自主搭建的装置研究了入射角度、粗糙度和波长对铝漫反射板的影响.张磊等^[2]测量了波长为 1 064 nm 时铝表面的双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function, BRDF),研究了粗糙度和入射角度对测量结果的影响.帅永等^[6]通过实验方法对微粗糙硬铝表面的散射特性进行了测量,结果表明:在长波及大角度入射时后向散射明显增强.孟令鹏等^[7]在 200~1 000 nm 波长范围内收集了 25~500 °C 铝板表面加热过程以及 500~25 °C 冷却过程中材料表面的散射谱数据,指出温度变化对材料吸收率或反射率产生的影响是引起材料表面 BRDF 值变化的主要原因.

然而,已有的研究主要集中在非偏振 BRDF 的测量,关于偏振 BRDF 的研究很少见到报道.研究铝表面的偏振光谱 BRDF 能够提供更全面的光学散射信息^[8],在目标检测和识别中具有重要的应用价值.本文在近红外波段测量了铝的光谱偏振 BRDF,分析了粗糙度、入射角和波长等因素对测量结果的影响,并基于不同的法线密度分布函数建立了 BRDF 模型.

1 测量装置及参数设置

采用传统的 BRDF 测量装置,主要包含光源、探测系统及转角装置,机械部分设计图和光路图及试验系

收稿日期:2023-09-11;修回日期:2023-11-10.

基金项目:红外物理国家重点实验室开放课题(SITP-NLIST-ZD-2023-06).

作者简介:刘彦磊(1986-),男,河南郑州人,中国计量科学研究院讲师,博士,主要从事目标表面双向反射分布函数测量与应用方面的研究.

通信作者:刘子龙, E-mail:liuzl@nim.ac.cn.

引用本文:刘彦磊,刘子龙,周孝好.粗糙铝表面光谱偏振 BRDF 的测量与建模[J].河南师范大学学报(自然科学版),2024,52(3):113-118.(Liu Yanlei, Liu Zilong, Zhou Xiaohao. Measurement and modeling of spectral polarized BRDF of rough aluminum surface[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2024, 52(3):113-118. DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2023.09.11.0001.)

统的主要技术指标分别在附录图 S1 和表 S1 中给出.其中,光源选用具有很好准直性、均匀性和稳定性的溴钨灯(GLORIA-T250A),探测器选用与溴钨灯光源的光谱特性和电路特性相匹配的电制冷钢镓砷探测器(DInGaAs 2600-TE),高精度转角装置可以实现空间上的 4 个变量($\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r$)的控制^[9-10].

本研究的测量原理^[9-10]为

$$f_f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{L_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)}{L_o(0, 0, 0, 0, \lambda)} \cdot \frac{1}{\Omega_r \cos \theta_i}, \quad (1)$$

其中, θ_i 和 φ_i 表示入射天顶角和方位角, θ_r 和 φ_r 表示反射天顶角和方位角, λ 表示波长, $L_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)$ 反射辐射亮度, $L_o(0, 0, 0, 0, \lambda)$ 为反射镜的反射辐射亮度, 在测量时等效为光源辐射亮度, Ω_r 为探测立体角, $\cos \theta_i$ 为角度因子.

本实验测量的波长范围为 1 200~2 400 nm, 间隔为 5 nm; 入射天顶角的范围为 $5^\circ \sim 75^\circ$, 间隔为 5° . 对于给定的入射角, 反射天顶角的测量范围为 $-90^\circ \sim 90^\circ$, 在镜面反射方向附近的角度间隔设定为 1° , 远离镜面反射方向的区域设定为 2° . 入射光为非偏振光, 反射光分别为 s 偏振和 p 偏振光. 需要指出的是, 虽然在测量中反射天顶角的范围设置为 $-90^\circ \sim 90^\circ$, 仅给出了测量结果大于零的部分.

2 样品制备

选择厚度为 3 mm, 直径为 50 mm 的圆形铝片作为样品. 首先, 用金属抛光机对样品进行抛光, 然后选取粗糙度为 120 目、400 目、800 目和 1 200 目的 SiC 砂纸分别对 4 个样品进行打磨; 然后, 采用质量分数 $\geq 99.5\%$ 的丙酮溶液和无水乙醇清洗样品; 最后, 将样品放入纯净水中并使用超声波清洗机进行进一步清洗, 以确保表面无污垢残留. 加工完成后, 将样品依次标记为 1#、2#、3#、4#. 并用粗糙度测试仪(TimeTR220)测量样品表面粗糙度, 分别测得表面算术平均粗糙度 $R_a = 0.465, 0.165, 0.135, 0.089$. 采用光学显微镜(Motic BA310met)对样品的表面形貌进行了表征, 如附录图 S2 所示.

3 结果与讨论

为了研究表面粗糙度对 BRDF 的影响, 在 $\theta_i = 30^\circ, \lambda = 1\ 550\ \text{nm}$ 下测量了 1#~4# 样品的偏振 BRDF 并计算了 BRDF 的对数值, 结果如图 1 所示, 其中, BRDF^s 和 BRDF^p 分别表示反射光为 s 偏振和 p 偏振时的 BRDF 值. 显然, BRDF 随着反射天顶角的增大而先增大后减小, 峰值出现在 $\theta_i = \theta_r$ 方向, 且峰值随样品表面粗糙度的减小而增大. 观察图 1 可以看出, 随着粗糙度增加, 偏离峰值位置的 BRDF 逐渐增大. 这说明样品表面的粗糙度对 BRDF 具有明显的影响. 此外, 能够发现反射光的偏振态对 BRDF 随反射天顶角的变化趋势没有影响.

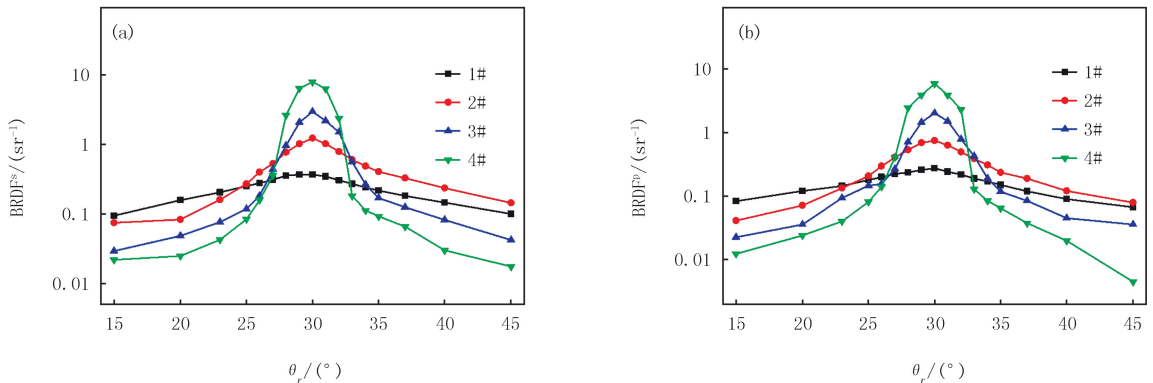


图1 $\lambda=1\ 550\ \text{nm}$ 时, 样品表面的 BRDF^s 与 BRDF^p 随反射天顶角的变化

Fig. 1 The curve of BRDF^s and BRDF^p of the sample surface with the reflection zenith angle at $\lambda=1\ 550\ \text{nm}$

为了分析波长和反射天顶角对粗糙铝表面偏振 BRDF 的影响, 文中对 $\theta_i = 30^\circ$ 时样品 1#~4# 的光谱偏振 BRDF 进行了测量, 结果如图 2 所示. 从图 2(a) 可以看出, 在波长一定时, BRDF^s 随着 θ_i 的增加先增大

后减小,峰值出现在 $\theta_i = \theta_r$ 方向;入射天顶角一定时,随着波长增加,BRDF^s 在镜面方向附近逐渐增大,在偏离镜面方向几乎不发生变化.通过图 2(a-d)可以看出,粗糙度对铝表面 BRDF 随反射天顶角和波长的变化趋势几乎没有影响.对比图 2(a-d)和图 2(e-h)可以看出 BRDF^p 的变化趋势与 BRDF^s 一致,这说明反射光的偏振状态对样品 BRDF 的变化趋势没有影响.

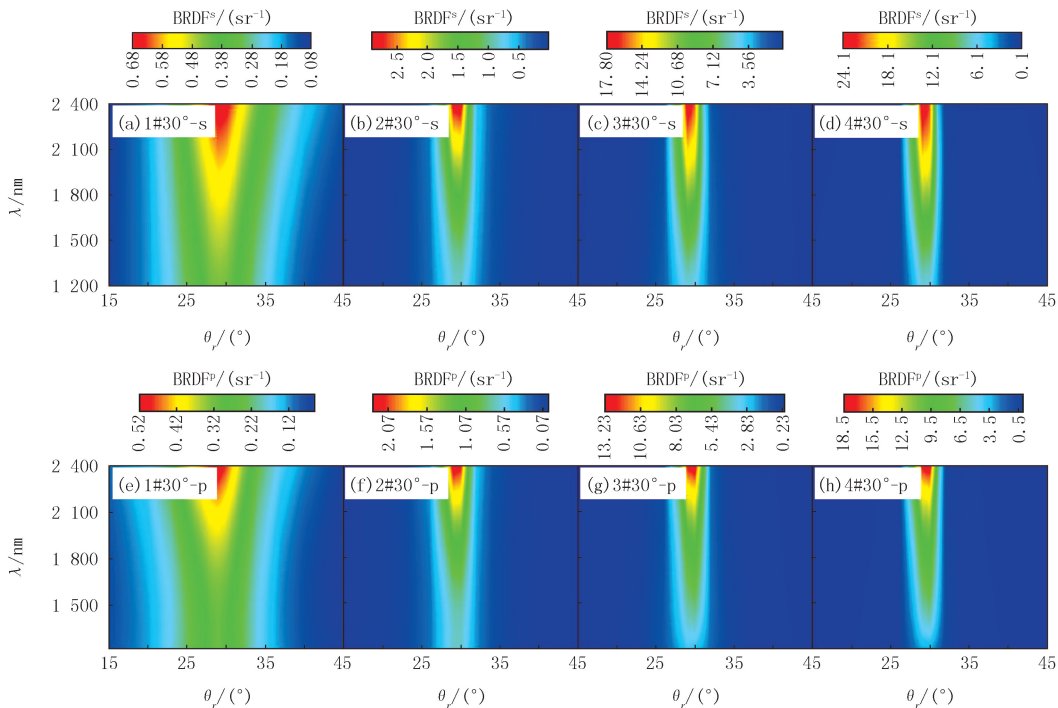


图2 $\theta_i=30^\circ$ 时,1#~4#样品的面内BRDF^s(a-d)和BRDF^p(e-h)

Fig.2 In-plane BRDF^s(a-d) and BRDF^p(e-h) of 1#-4# samples at $\theta_i=30^\circ$

根据以上测量结果可知:反射天顶角和波长对铝表面偏振 BRDF 影响均独立于反射光的偏振状态和样品表面的粗糙度.因此,对铝表面的散射特性研究可以分为在给定反射天顶角下研究光谱散射特性和在给定波长下研究空间散射特性.为了验证这一结论,文中分别测量了 $\theta_i = 45^\circ$ 和 $\theta_i = 60^\circ$ 时,样品 3 # 和 4 # 的光谱偏振 BRDF,测量结果如附录图 S3 所示.很明显, $\theta_i = 45^\circ$ 和 $\theta_i = 60^\circ$ 下的测量结果与 $\theta_i = 30^\circ$ 的变化趋势一致.

为了研究入射天顶角的影响,测量了 θ_i 在 $10^\circ \sim 80^\circ$ 范围内样品 1 # ~ 4 # 的偏振 BRDF,角度间隔为 10° ,波长为 $\lambda = 1\ 550\ \text{nm}$,结果如图 3 和图 4 所示.从图中能够看出:粗糙度一定时,BRDF 的峰值随着入射天顶角的增加而增加.这可能由 2 个方面因素引起:1)随着 θ_i 的增加,样品在 $\theta_i = \theta_r$ 方向的反射率增大;2)随着入射天顶角的增大,角度因子 $\cos \theta_i$ 减小,导致 BRDF 值明显增大.另外,对比图 3 和图 4 能够发现,在相同粗糙度下 BRDF^s 的值明显大于 BRDF^p,这说明反射光的偏振态对测量结果有明显的影

4 粗糙铝表面 BRDF 的建模

COOK-TORRANCE(C-T)模型广泛用于描述各向同性材料^[10-15] 的散射特性.本课题组在之前的工作^[10]中考虑了温度 T 在实验中的影响,基于传统 C-T 模型建立了关于 d, s, m, n 和 T 的 5 参数模型

$$f_r = \frac{\rho_d}{\pi} + \frac{\rho_s}{\pi} \frac{F(\theta_0) \cdot D(\alpha, T) \cdot G(\omega_i, \omega_r)}{\cos \theta_i \cos \theta_r \sin(\theta_i + \theta_r)}, \tag{2}$$

其中, ρ_d 和 ρ_s 分别是漫反射率和镜面反射率; $F(\theta_0)$ 为非涅耳反射项; $D(\alpha)$ 为微面的概率密度分布函数; $G(\omega_i, \omega_r)$ 为微面之间的遮挡和阴影效应引起的几何衰减因子.

以公式(2)为基础,分别采用 Beckmann 分布和指数分布作为法线概率密度分布对测量结果进行拟合.

Beckmann 分布 $P(x) = \frac{1}{\pi m^2} e^{-\frac{x}{m^2}}$, 其中 $x = \tan^2 \alpha$, m 为微面元的均方根斜率.微面元法线的概率密度分

布函数项 $D(\alpha) = \frac{\chi_{[0, \pi/2]}(\alpha)}{\cos^4 \alpha} P(x)$, 其中 $\chi_{[0, \pi/2]}(\alpha) = \begin{cases} 1, [0, \pi/2], \\ 0, \text{其他}. \end{cases}$

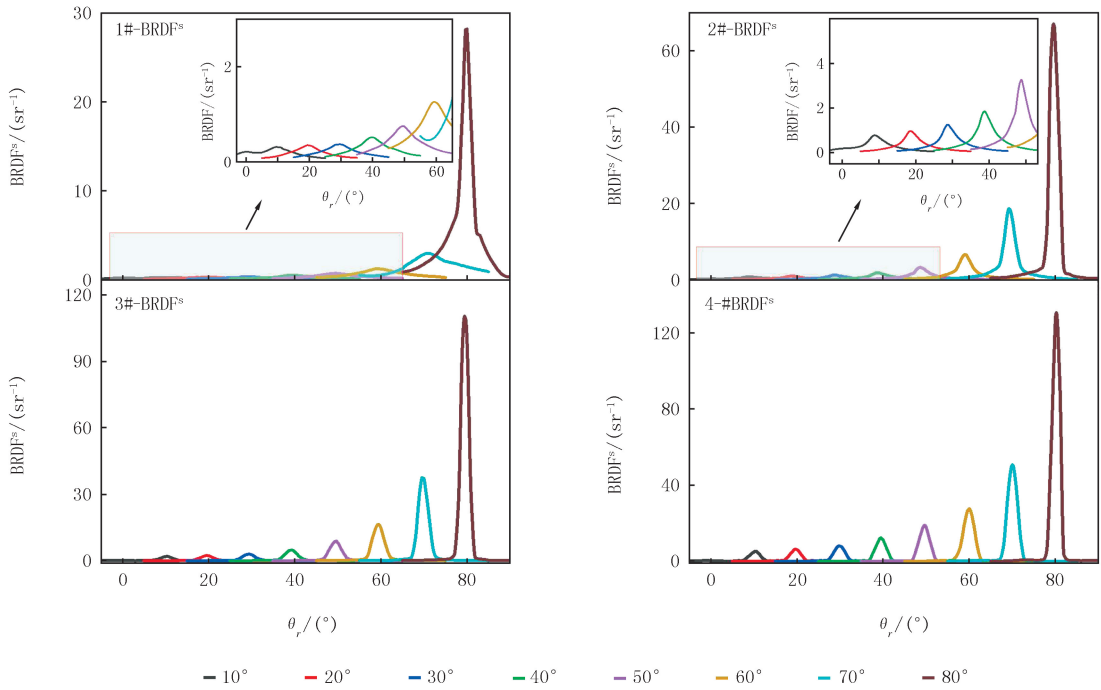


图3 $\lambda=1500\text{ nm}$ 时, 样品1#~4#在不同入射天顶角下的BRDF^s

Fig.3 The BRDF^s of samples 1#-4# with different incident zenith angles at $\lambda=1500\text{ nm}$

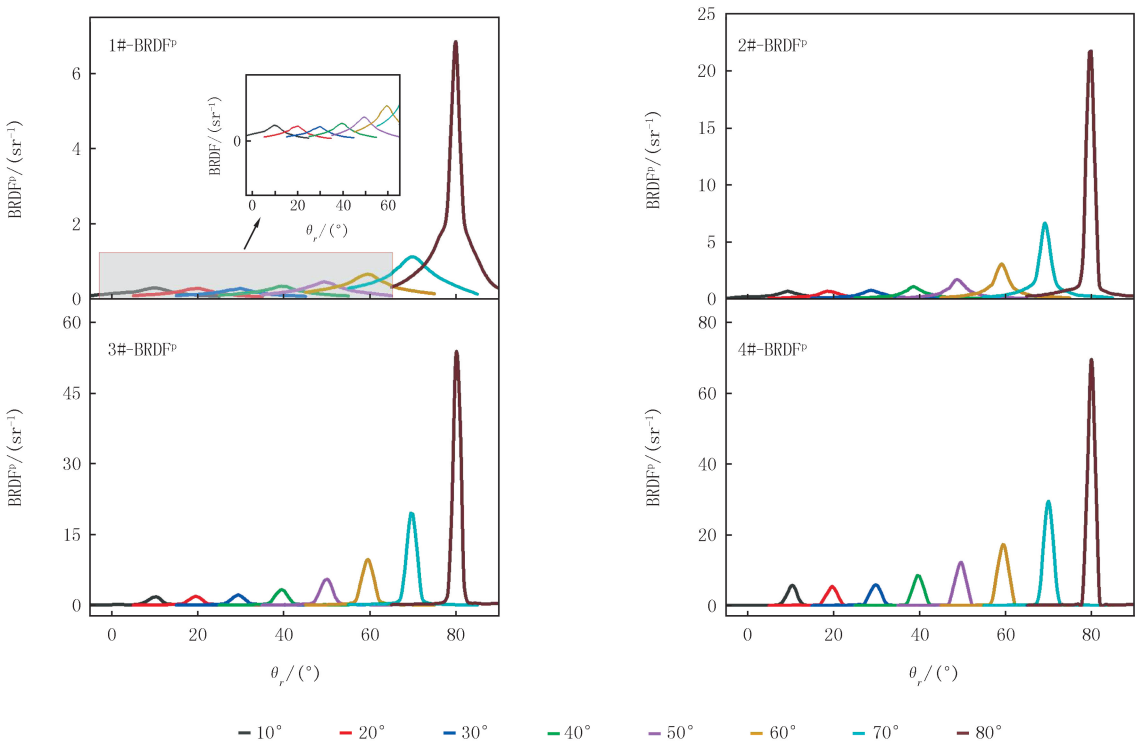


图4 $\lambda=1500\text{ nm}$ 时, 样品1#~4#在不同入射天顶角下的BRDF^p

Fig.4 The BRDF^p of samples 1#-4# with different incident zenith angles at $\lambda=1500\text{ nm}$

指数分布 $P_e(x) = \frac{(1-x)^2}{4\pi(4x+m^2)(1+x)^2}$, 其中, $x = \tan^2\alpha$, $\alpha = \sin\theta\sin\varphi$, m 为微面元均方根斜率. 因此, 指数型微面元发现的概率密度分布函数项 $D_e(\alpha) = \frac{\chi_{[0,\pi/2]}(\alpha)}{\cos^4\alpha} P_e(x) = \chi_{[0,\pi/2]}(\alpha) \frac{c}{\pi(4\tan^2\alpha + m^2)}$, 其中

c 为大于 0 的常数.

残差平方和(SSE)是用来衡量模型拟合程度的量, 一组数据的残差平方和越小, 其拟合效果越好. Beckmann 分布和指数分布的拟合结果如图 5 所示. 通过对比曲线的吻合情况及 SSE 值可以看出, 对于 1# 和 2# 样品, 指数分布的 SSE 小于 Beckmann 分布的 SSE, 说明指数分布的拟合值与测量值符合较好; 对于 3# 和 4# 样品, Beckmann 的拟合值与测量值符合较好. 这说明, 当样品表面较为粗糙时, 指数分布能够较好表征表面的微面元法线分布; 当表面较光滑时 Beckmann 分布能够较好的表征表面的微面元法线分布. 拟合结果说明: 对于同一样品的测量数据, 采用不同的模型或者法线密度分布函数能够得到不同的拟合结果; 即使对于同一种材料, 也很难通过单一模型准确获得其表面的光学散射特性. 这对 BRDF 模型的普适性提出新的要求.

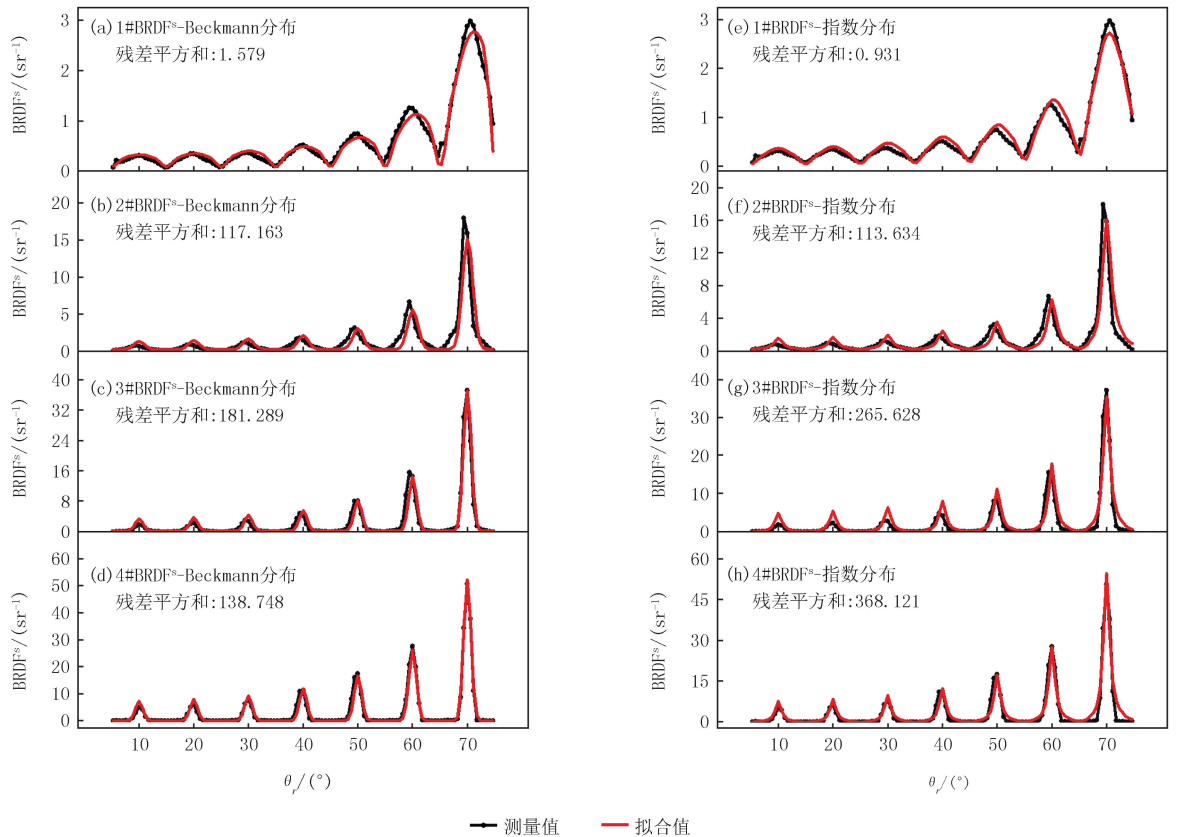


图5 两种分布下, 样品1#~4#BRDF^s的测量和拟合结果

Fig.5 Measurement and fitting results of BRDF^s of samples 1#~4# under two distributions

基于以上结论, 分别采用指数分布和 Beckmann 分布对 1# ~ 4# 样品的 BRDF 进行拟合. BRDF^s 和 BRDF^p 的测量结果和拟合结果在附录图 S4 中给出. 从图 S4 中能够看出, 采用不同微面元法线分布组合的方式建立模型对测量结果进行拟合能够得到更好的结果.

5 结 论

本文基于一套传统 BRDF 测量装置在近红外波段对不同粗糙度的铝表面进行 BRDF 测量, 详细分析了粗糙度、入射角度、波长等因素对铝光谱偏振 BRDF 的影响. 测量结果表明, 以上几个因素对偏振光谱 BRDF

有明显的影 响。此外,分别采用 Beckmann 和指数 2 种微面元法线概率密度分布函数,基于 4 参量基本模型结构建立了 BRDF 模型,并对实验结果进行了拟合。对比拟合和测量结果能够发现:1)对于同一样品,不同的模型能够得到不同的拟合结果;2)对于不同粗糙度的样品采用不同的模型可能得到更好的拟合结果。本文的研究工作一方面为铝光学特性研究和应用提供了数据支撑,另一方面为建立 BRDF 模型提出了新思路——多模型组合。

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2023.09.11.0001)。

参 考 文 献

- [1] 贾辉,李福田.铝漫反射板 200~300 nm 相对双向反射分布函数的实验研究[J].光学学报,2004,24(2):230-234.
- [2] 张磊,杨鹏翎,赵海川,等.铜铝材料粗糙表面的 BRDF 特性研究[J].现代应用物理,2018,9(4):65-69.
ZHANG L, YANG P L, ZHAO H C, et al.Characteristics of bidirectional reflectance distribution function on roughness surface of copper and aluminum materials[J].Modern Applied Physics, 2018, 9(4): 65-69.
- [3] 杨玉峰,吴振森,曹运华.合金铝表面近红外波段光学常数的反演与双向反射分布函数的计算[J].光学学报,2011,31(2):0229001.
- [4] 谢鸣,黄勇,王晓春,等.建筑材料表面红外双向反射分布函数实验分析[J].哈尔滨工业大学学报,2011,43(3):49-53.
- [5] NICODEMUS F E.Directionality reflectance and emissivity of an opaque surface[J].Applied Optics, 1965, 4(7): 767-775.
- [6] 帅永,刘彬,杨果,等.微粗糙硬铝表面双向反射特性实验研究[J].工程热物理学报,2010,31(4):671-674.
- [7] 孟令鹏,李龙,陆旭,等.温度变化对铝材料的 BRDF 影响研究[J].通讯世界,2016(6):246.
- [8] LAI Q Z, XIE Y M, GUO P, et al.Multi-spectral bidirectional reflectance characteristics of crude oils[J].Infrared Physics & Technology, 2020, 109: 103420.
- [9] LIU Y L, YU K, LIU Z L, et al.Polarized BRDF measurement of steel E235B in the near-infrared region: based on a self-designed instrument with absolute measuring method[J].Infrared Physics & Technology, 2018, 91: 78-84.
- [10] CHEN Z Y, LIU Y L, LIU J Y, et al.The measurement and modeling investigation on the BRDF of brass under variable temperature[J].Infrared Physics & Technology, 2023, 128: 104505.
- [11] WESTIN S H, ARVO J R, TORRANCE K E.Predicting reflectance functions from complex surfaces[J].ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1992, 26(2): 255-264.
- [12] TOMINAGA S, NISHI S.Surface reflection properties of oil paints under various conditions[C]//Proc SPIE 6807, Color Imaging XIII: Processing, Hardcopy, and Applications, 2008, 6807: 186-193.
- [13] YU C, SEO Y, LEE S W.Global optimization for estimating a multiple-lobe analytical BRDF[J].Computer Vision and Image Understanding, 2011, 115(12): 1679-1688.
- [14] LI M Z, ZHAO J G, ZHOU Y T.Analysis of the modification method for cook-torrance model[J].Applied Mechanics and Materials, 2014, 556/557/558/559/560/561/562: 4240-4243.
- [15] COOK R L, TORRANCE K E.A reflectance model for computer graphics[J].ACM Transactions on Graphics, 1(1): 7-24.

Measurement and modeling of spectral polarized BRDF of rough aluminum surface

Liu Yanlei¹, Liu Zilong¹, Zhou Xiaohao²

(1. Center for Metrology Scientific Data and Energy Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;

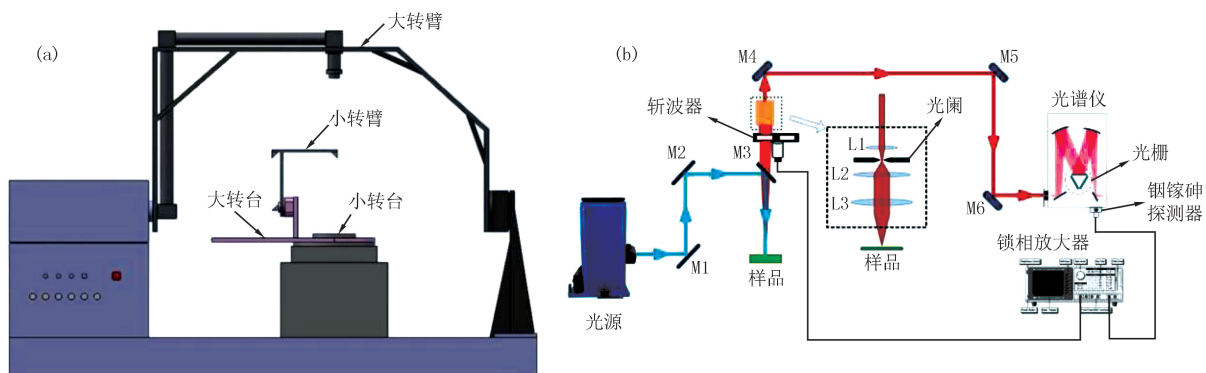
2. Shanghai Institute of Technical Physics; State Key Laboratory of Infrared Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Aluminum plays a vital role in aerospace, military defense, electronic communication, and other fields. Investigating the spectral polarization scattering characteristics of aluminum materials enriches the understanding of their optical properties and aids in providing data support for their applications. In this paper, the spectral polarization BRDF (bidirectional reflectance distribution function) of rough aluminum surface is measured in near infrared band based on a set of traditional BRDF measuring device, and the effects of incident zenith angle and roughness on the measurement results are analyzed. The results shows that the incidence angle, wavelength, polarization state and surface roughness have significant effects on BRDF. Additionally, the BRDF model is established by employing the Beckmann and exponential probability density functions, which are used to fit the experimental results. By compared with different models, it can be found that different models can get different fitting results for the same sample and incident condition, Better fitting results may be obtained by using different models for samples with different roughness.

Keywords: spectral-polarized; aluminum; roughness; near-infrared; BRDF model

[责任编辑 杨浦 刘洋]

附录



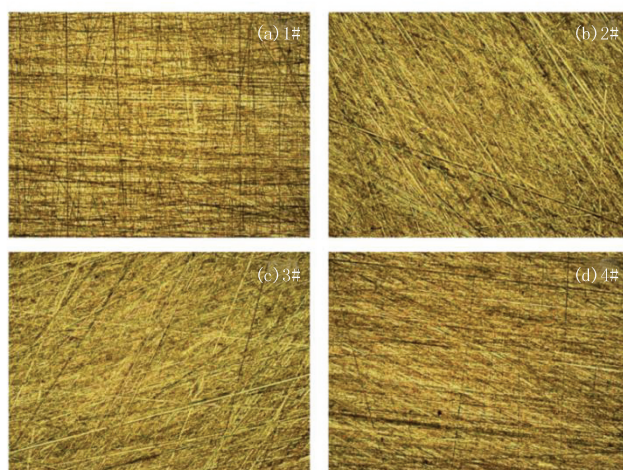
图S1 BRDF实验系统的机械部分设计图(a)及光路图(b)

Fig. S1 Mechanical design of BRDF experimental system(a) and optical diagram(b)

表 S1 BRDF 实验系统的主要技术指标

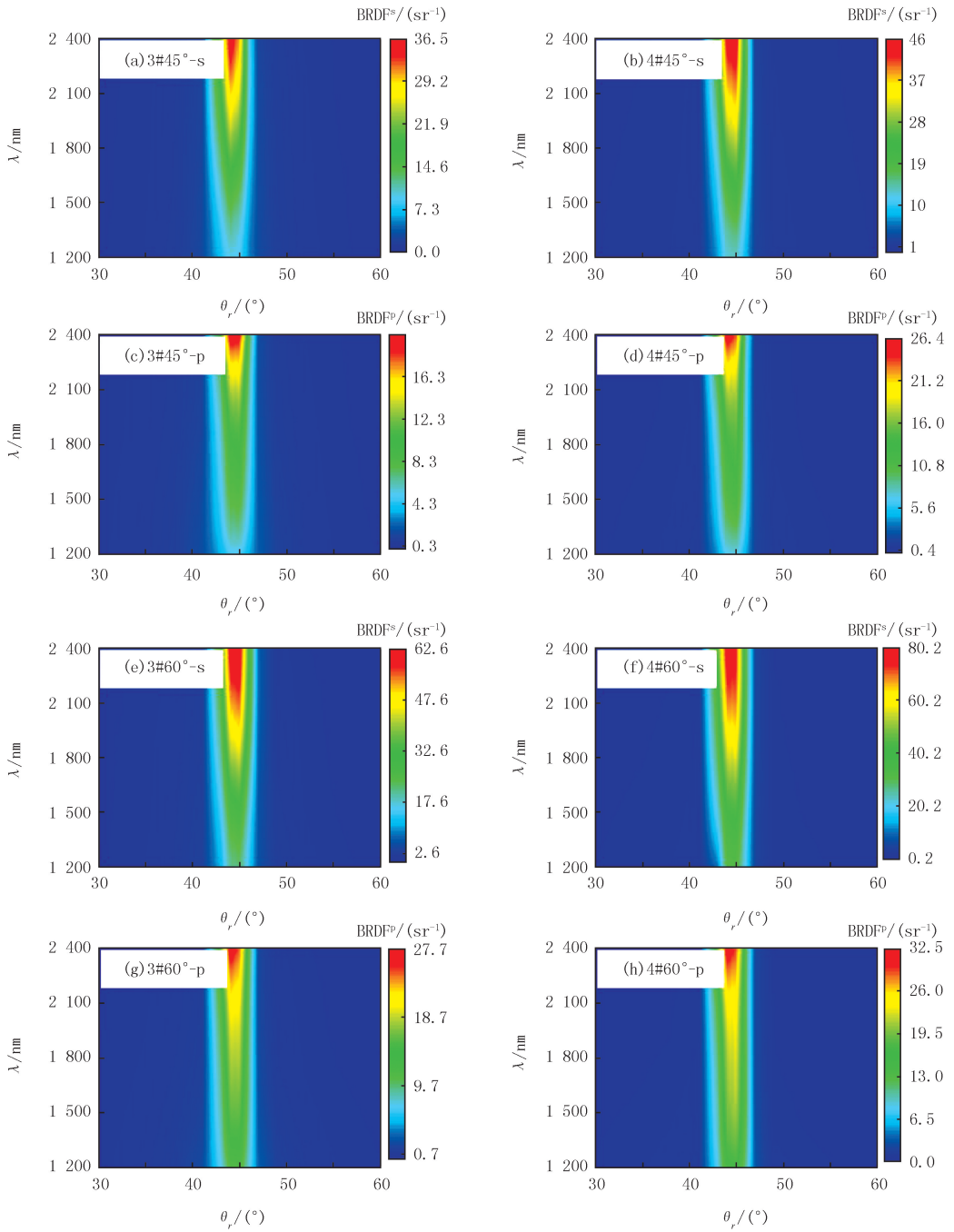
Tab. S1 The main technical index of BRDF experimental system

光谱范围	250~2 500 nm
光谱分辨率	0.4 nm
角度分辨率	2'
天顶角范围	温下: $-82^{\circ}\sim 82^{\circ}$; 室温下: $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$
方位角范围	$0^{\circ}\sim 360^{\circ}$
温度范围	20~800 $^{\circ}\text{C}$



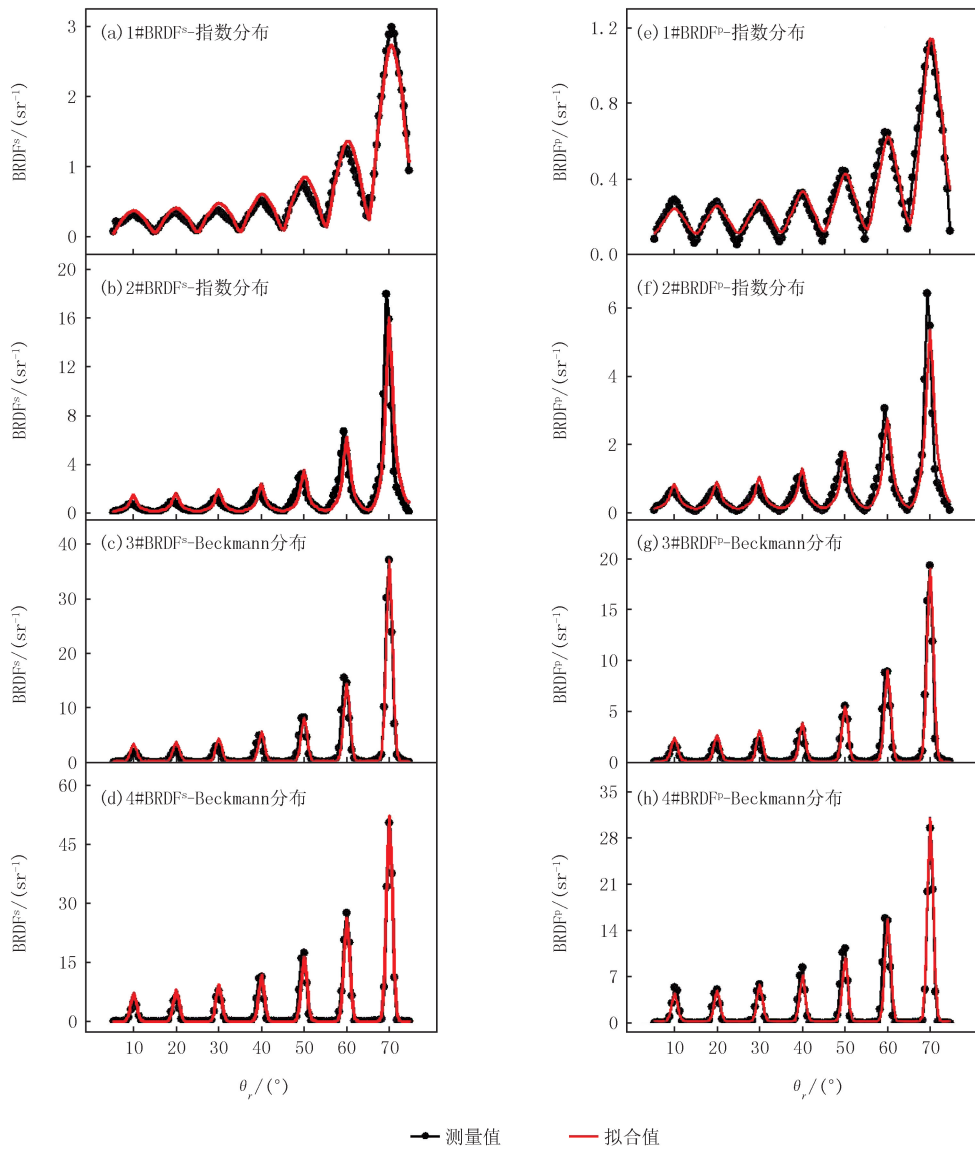
图S2 样品1#~4#的表面形态图

Fig. S2 Surface morphology of samples 1#-4#



图S3 $\theta_i=45^\circ$ 、 60° 时, 样品3#和4#的BRDF

Fig. S3 The BRDF of samples 3# and 4# at $\theta_i=45^\circ$, 60°



图S4 样品1#~4#测量和拟合结果:BRDF^S (a-d) 和BRDF^P (e-h)

Fig.S4 Measurement and fitting results of samples 1#-4#:BRDF^S (a-d) and BRDF^P (e-h)