第 35 卷第 1 期
2016 年 2 月

红 外 与 毫 米 波 学 报
J. Infrared Millim. Waves

Vol. 35, No. 1
February, 2016

文章编号: 1001 - 9014(2016)01 - 0109 - 07

DOI: 10.11972/j.issn.1001 - 9014.2016.01.018

钛合金粗糙表面的偏振光及变温 BRDF 特性

关洪宇[1,2], 张文杰[1], 赵军明[1*], 刘林华[1*], 史要涛[3]

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
3. 湖北航天技术研究院总体设计所,湖北 武汉 430040)

摘要: 基于红外光谱椭偏仪测得钛合金 *TC4* 在 *298 ~ 773 K* 范围的光学常数,结合 *Monte Carlo* 射线跟踪法对钛合金随机粗糙表面的双向反射分布函数(*BRDF*)进行了研究. 分析了不同表面粗糙度、入射光偏振态及温度对钛合金表面 *BRDF* 分布的影响. 结果表明: 偏振光入射下钛合金的 *BRDF* 分布随入射角度及表面粗糙度的变化趋势与非偏振光相同; 入射平面内粗糙钛合金表面的 *BRDF* 随光源偏振态变化与光滑平板具有相同趋势; *TE* 波入射时的 *BRDF* 反射峰值大于 *TM* 波入射; 钛合金粗糙表面的 *BRDF* 镜反射峰值随温度升高有下降趋势; 在所研究的温度范围内(*298 ~ 773 K*),峰值变化在 *10.2%* 以内,温度变化对 *TM* 波下钛合金 *BRDF* 分布特性的影响大于 *TE* 波,且在入射角度增大时影响增大.

关 键 词: 粗糙表面; 钛合金; 偏振光; 双向反射分布函数

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A

Polarization and temperature dependent BRDF of titanium alloy rough surface

GUAN Hong-Yu[1,2], ZHANG Wen-Jie[1], ZHAO Jun-Ming[1*], LIU Lin-Hua[1*], SHI Yao-Tao[3]

(1. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics of CAS, Changchun 130033, China;
3. System Design Institute of Hubei Aerospace Technology Academy, Wuhan 430040, China)

Abstract: Based on the measured optical constants of titanium alloy TC4 in temperature range 298 ~ 773K, the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of rough titanium alloy TC4 surface was studied by numerical simulation with the Monte Carlo raytracing approach. The effect of different polarized light incidence, different surface roughness and different temperature on BRDF distribution of rough titanium alloy surface was analyzed. The results show that, the change of BRDF distribution with the incident angle and the roughness of titanium alloy under polarized light is the same as that for unpolarized light. The BRDF of rough titanium alloy surface in incident plane changes with light polarization has the same trend with that of smooth plate. The BRDF peak under TE light incidence is greater than that of TM light. The BRDF peak in specular reflective direction of rough titanium alloy surface decreases with temperature increasing. In the temperature range studied in this paper (298 ~ 773 K), the peak changes within 10.2%. The effect of temperature on the BRDF distribution of titanium alloy under TM polarized light is greater than that of TE light, which increases with the increase of incident angle.

Key words: rough surface, titanium alloy, polarized light, BRDF

PACS: 44.40. + a

收稿日期: 2015-02-28,**修回日期:** 2015-06-16 **Received date:** 2015-02-28,**revised date:** 2015 -06-16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51336002); 国家自然科学基金创新研究群体(51121004)

Foundation items: Supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China(51336002); the Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China(51121004)

作者简介(Biography): 关洪宇(1989-),男,黑龙江哈尔滨人,研究实习员,硕士,主要从事粗糙表面辐射特性方面的研究工作. E-mail: 309140464@qq.com

* **通讯作者(Corresponding author):** E-mail: jmzhao@hit.edu.cn, lhliu@hit.edu.cn

引言

钛及其合金因具有良好的物理化学性能，如抗腐蚀、抗氧化、耐高温、高强度重量比等，在航空航天、航海、建筑、医疗等领域有广泛应用[1-3]. 钛合金在高达 500 ~ 600 条件下仍具有良好的机械性能，远高于铝合金、镁合金和聚合纤维等轻型航空航天材料的工作温度极限[4]. 钛及其合金同时可以用作舰艇外壳及内部管道回路系统的材料，使其具有了无磁性、航速快、噪音小等优点，在水面舰船、航空母舰、深潜器上都有大量应用[5].

对钛合金辐射特性的研究在飞行器设计、海面目标探测等方面有重要价值. 目前国内外对钛合金粗糙表面双向反射分布函数的研究还鲜见报道. 对钛合金粗糙表面的双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function，BRDF) 进行了研究，分析了不同偏振光、表面温度及表面粗糙度对钛合金粗糙表面 BRDF 特性的影响.

1 不同温度下钛合金的光学常数

采用光谱椭偏法测量了 TC4 钛合金不同温度下的光学常数. 样片为 20 mm × 20 mm × 1 mm 的 TC4 钛合金板. 被测表面采用 W0.5 的金刚石研磨膏进行抛光，表面粗糙度小于 10 nm. 本文所使用的测量设备为 J. A. Woollam 公司生产的 IR-VASE 型红外光谱椭偏仪. 实验时首先测量了室温 298 K 时的光学常数，然后将样片依次升温至 373 K、573 K、773 K，使用 Instec 公司的 STC200 温度控制器进行温度控制，误差为 ±0.1 K. 表 1 给出了波长为 1.55 μm，不同温度下 TC4 钛合金材料的光学常数，其中 n 为折射率，K 为吸收指数.

表 1 不同温度下钛合金在波长为 1.55 μm 的光学常数

Table 1 Optical constants of titanium alloy in different temperatures at wavelength 1.55 μm

温度	298 K	373 K	573 K	773 K
n	7.44	7.31	7.20	5.74
k	9.17	9.00	8.78	7.61

由表 1 可以看出，钛合金的折射率以及吸收指数均随温度升高显著改变，从 298 K 升温到 773 K，折射率降低约 23%，吸收指数降低约 17%.

基于测量得到的光学常数可由菲涅尔方程计算得到不同入射角度时光滑钛合金板的反射率，研究波长为 1.55 μm. 图 1 和图 2 分别给出了在非偏振态和偏振光照射下的光滑钛合金板的反射率变化曲线. 可以看出，对于非偏振光和偏振光，随着温度的升高，不同入射角度下的反射率逐渐下降. 随着入射角度的增大，温度对反射率的影响逐渐减小. 在法向入射时，温度升高对反射率的影响最大，如温度为 773 K 与 298 K 相比，法向反射率降低约 4%. 这说明，与钛合金的光学常数相比，温度对其平板反射率的影响相对要小.

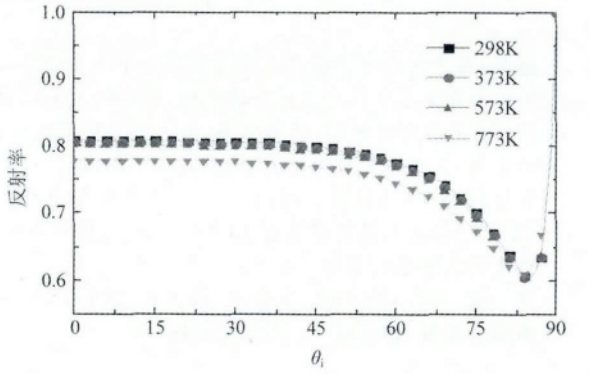


图 1 非偏振光入射时不同温度下光滑钛合金平板的反射率

Fig. 1 Reflectivity of smooth titanium alloy plate at different temperature under unpolarized light incidence

2 钛合金粗糙表面的偏振光 BRDF 分布特性

基于已知的材料光学常数，同时结合表面的几何形貌就可以进行表面 BRDF 的模拟和分析. 本文基于前面测得的钛合金在不同温度下的光学常数作为已知物性数据，通过随机粗糙表面模型建立钛合金粗糙表面的几何形貌，然后结合 Monte Carlo 光线跟踪方法[6] 模拟光子的传输过程，得到不同粗糙度下的 BRDF，并对其分布特性进行分析.

二维随机粗糙表面的几何形貌可表示为平面坐标的函数为 $z = \varsigma(x, y)$. 表面高度随机分布的统计特性由高度概率分布函数 $p(\varsigma)$ 和自相关函数 $C(\tau)$ 两个分布函数确定. 本文中钛合金粗糙表面的构建应用高斯随机粗糙表面模型，表面高度的概率分布函数和自相关函数均为高斯分布，表示如下[7]：

$$p(\varsigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{\varsigma^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

$$C(r_x, r_y, \tau) = \langle \varsigma(x_1, y_1)\, \varsigma(x_2, y_2) \rangle = \sigma^2 \exp\left(-\frac{r_x^2 + r_y^2}{\tau^2}\right) \quad (2)$$

其中 σ 为均方根高度，τ 为相关长度，$r_x = x_1 - x_2$，$r_y = y_1 - y_2$，(x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 表示表面上两个不同点的位置坐标，算子 $\langle\ \rangle$ 表示系综平均. 对式(2) 进行

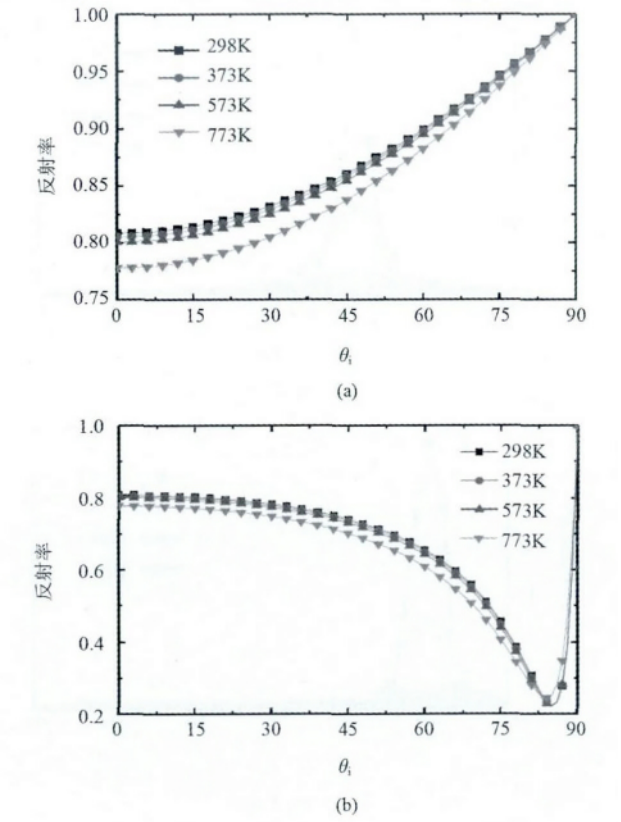


图 2　不同温度下光滑钛合金板的反射率(a) TE 波入射,(b) TM 波入射

Fig. 2　Reflectivity of smooth titanium alloy plate at different temperature: (a) TE wave incidence, (b) TM wave incidence

傅里叶变换,可以得到功率谱密度函数

$$W(k_x,k_y,\tau)=\frac{1}{(2\pi)^2}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}C(r_x,r_y,\tau)\exp\left[-i(k_xr_x+k_yr_y)\right]\mathrm{d}r_x\mathrm{d}r_y=\frac{\sigma^2\tau^2}{4\pi}\exp\left[-\frac{\tau^2}{4}(k_x^2+k_y^2)\right],\quad(3)$$

其中 k_x 和 k_y 表示在空间频率域的变量. 基于谱密度分布可以根据离散傅里叶反变换获得二维随机粗糙表面表面高度的空间函数关系.

对于所构建的二维随机粗糙表面几何模型,设材料为无限厚,给定所研究温度下的钛合金材料的光学常数,使用 *Monte Carlo* 射线跟踪法对钛合金粗糙表面的 *BRDF* 分布特性进行模拟,分析不同入射光偏振、粗糙度及温度对钛合金 *BRDF* 特性的影响.

2.1　不同粗糙度下钛合金粗糙表面的 BRDF

选取四种不同粗糙度的随机粗糙表面,各随机粗糙表面参数如表 2 所示. 入射光源波长 1.55 μm,研究温度为 298 K 时不同表面粗糙度对钛合金 BRDF 分布特性的影响.

表 2　随机粗糙表面参数

Table 2　Parameters of the random rough surfaces

随机粗糙表面	样品 1	样品 2	样品 3	样品 4
σ/mm	0.010	0.018	0.030	0.030
τ/mm	0.030	0.030	0.035	0.050

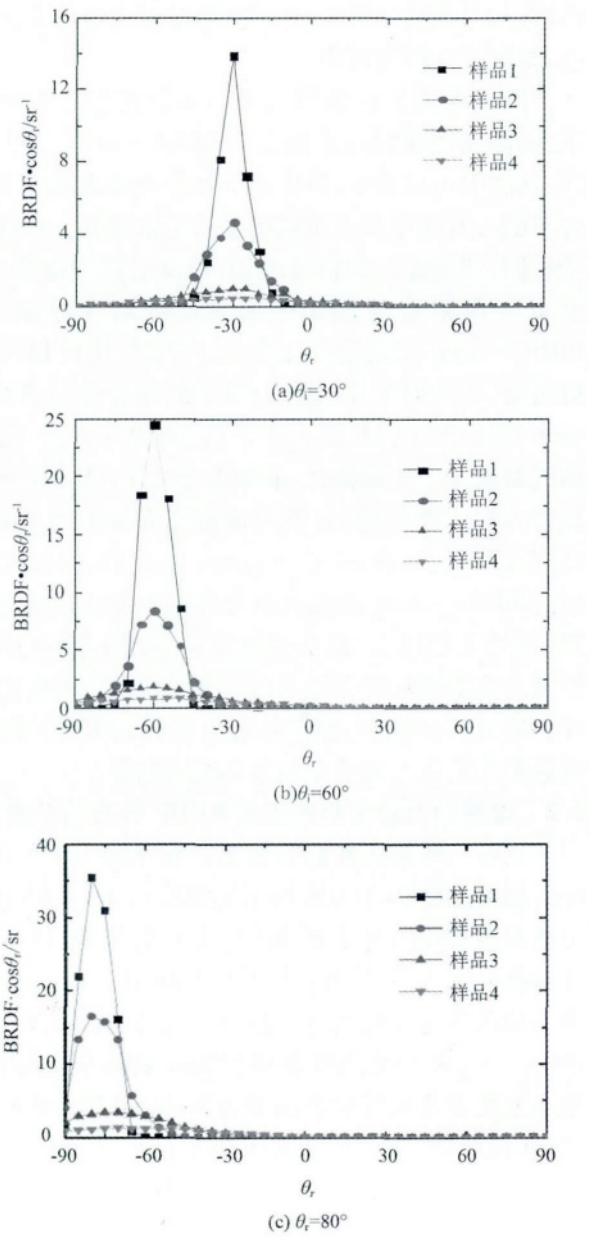


图 3　非偏振光入射时不同表面粗糙度下钛合金的 DRDF · cosθ_r 分布

Fig. 3　DRDF · cosθ_r of titanium alloy with different surface roughness under unpolarized light incidence

图 3 为非偏振光入射时,不同表面粗糙度下钛合金的 BRDF · cosθ_r 变化曲线. 从图 3 可以看出,不同入射角度下钛合金表面的 BRDF 在其镜反射方向

附近出现峰值，并且，随着入射角度的增大，镜反射方向上探测到的峰值逐渐增大，说明随着入射角度增加镜反射性增强. 随着表面粗糙度增加，各入射角度下的峰值逐渐由陡峭变得平缓，峰值宽度逐渐变宽，散射角度范围逐渐增大，入射面内的 BRDF 曲线逐渐趋于平滑. 这是由于当表面较光滑时，多数光子被直接反射到镜反射方向及其附近区域，镜反射特性较强，当粗糙度增加，光子在粗糙面内经历多次散射，导致镜反射性减弱.

图 4 和图 5 分别给出了不同偏振态光源照射下，不同表面粗糙度的钛合金 BRDF·$\cos\theta_r$ 变化曲线. 从图中可以看出，偏振光下钛合金表面的 BRDF 分布随入射角度及表面粗糙度的变化规律与非偏振光相同，即随着入射角度增加，镜反射特性增强，镜反射方向附近峰值随表面粗糙度增大而减小，BRDF·$\cos\theta_r$ 变化曲线逐渐趋于平缓. 比较相同入射角度，不同偏振态入射光源下的钛合金的 BRDF 分布，可以看出，TE 波入射下的 BRDF·$\cos\theta_r$ 变化曲线峰值大于非偏振光，非偏振光大于 TM 波. 并且随着入射角度的增加，不同偏振态光源下的 BRDF 差别逐渐增大. 在 80 度入射时，对应 TE 偏振光入射的 BRDF·$\cos\theta_r$ 在镜反射方向的数值达到对应的 TM 波的 2 倍以上. 这些变化特征与图 1、图 2 中光滑钛合金表面反射率随入射角度及偏振态的变化规律相同，这表明随机粗糙钛合金表面的 BRDF 随光源偏振态变化与光滑平板具有相同趋势.

2.2 温度对钛合金粗糙表面 BRDF 分布的影响

构建二维随机粗糙表面均方根高度 $\sigma = 0.018$ mm，相关长度 $\tau = 0.030$ mm，光源波长 $\lambda = 1.55\mu$m，分析温度对钛合金表面 BRDF 分布的影响. 图 6 为非偏振光下入射平面内钛合金的 BRDF·$\cos\theta_r$ 随反射天顶角变化曲线图. 从图 6 中可以看出，钛合金的 BRDF·$\cos\theta_r$ 变化曲线表现出镜反射特征，反射能量主要集中在镜反射方向附近区域. 随着温度的升高，在镜反射方向附近峰值呈减小趋势，但减小的幅度不大. $\theta_i = 30°$时，温度为 298 K 和 773 K 时，钛合金的 BRDF·$\cos\theta_r$ 在镜反射方向的峰值分别是 5.629 sr^{-1}和 5.5737 sr^{-1}，降低了 0.98%；$\theta_i = 60°$时，温度为 298 K 和 773 K 时，钛合金的 BRDF·$\cos\theta_r$ 在镜反射方向的峰值是 9.3436 sr^{-1}和 8.959 sr^{-1}，降低了 4.1%；$\theta_i = 80°$时，温度为 298 K 和 773 K 时，钛合金的 BRDF·$\cos\theta_r$ 在镜反射方向的峰是 20.338 sr^{-1}和 19.888 sr^{-1}，降低了 2.2%.

图 7 给出了入射角度为 30 度时，使用不同偏振

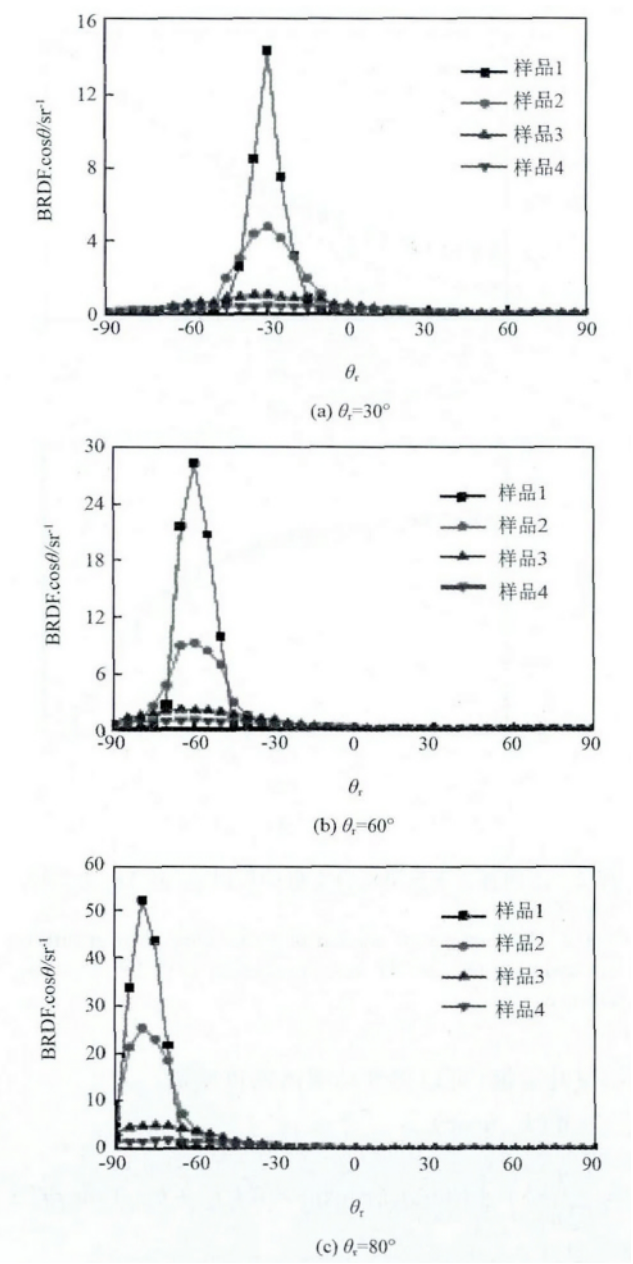


图 4 TE 偏振光入射时不同粗糙度下钛合金的
Fig. 4 BRDF·$\cos\theta_r$ of titanium alloy with different surface roughness under TE wave incidence

态入射光源得到的不同温度下钛合金的 BRDF·$\cos\theta_r$ 变化曲线. 从图 7 可以看出，不同偏振态光源下钛合金入射平面内的 BRDF·$\cos\theta_r$ 变化曲线在镜反射方向出现峰值，且 TE 偏振光照射下的镜反射峰值高于 TM 偏振光入射的情形. 不同温度下钛合金的 BRDF·$\cos\theta_r$ 变化规律基本相同，镜反射方向附近区域峰值随温度增加呈现下降趋势，但下降幅度很小. 在 TE 波入射下，298 K 时钛合金的 BRDF·$\cos\theta_r$ 最大值为 5.7949sr^{-1}，773 K 时最大值为 5.603 9sr^{-1}，在此温度区间内，BRDF·$\cos\theta_r$ 随温度

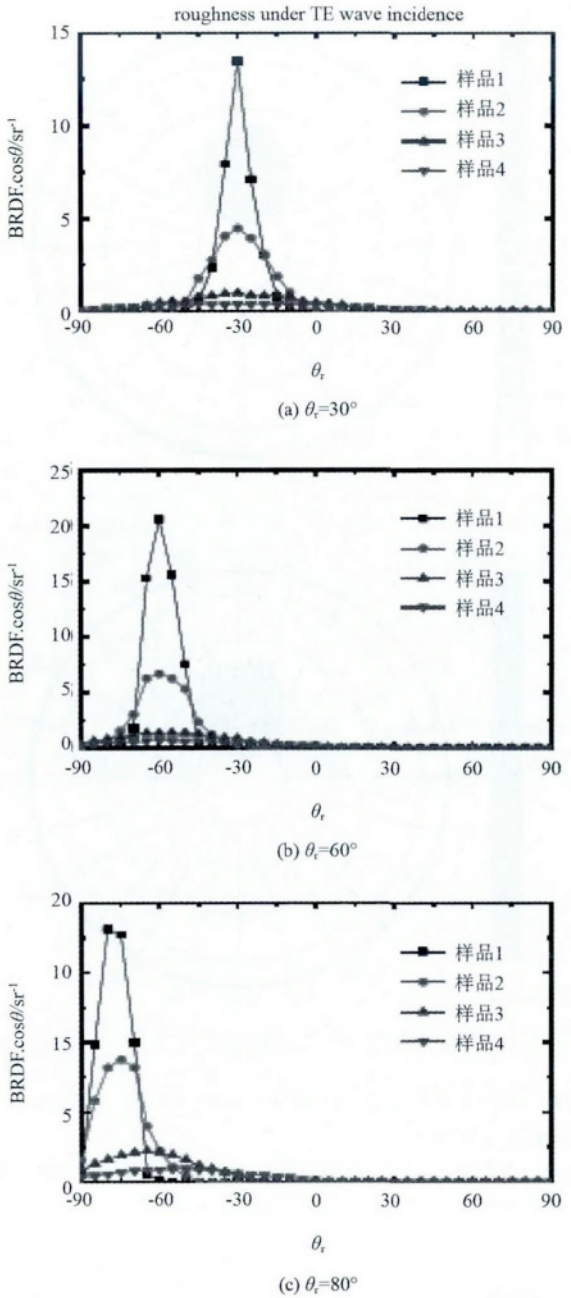


图 5　TM 偏振光入射时不同粗糙度下钛合金的 BRDF · $\cos\theta_r$

Fig. 5　BRDF · $\cos\theta_r$ of titanium alloy with different surface roughness under TM wave incidence

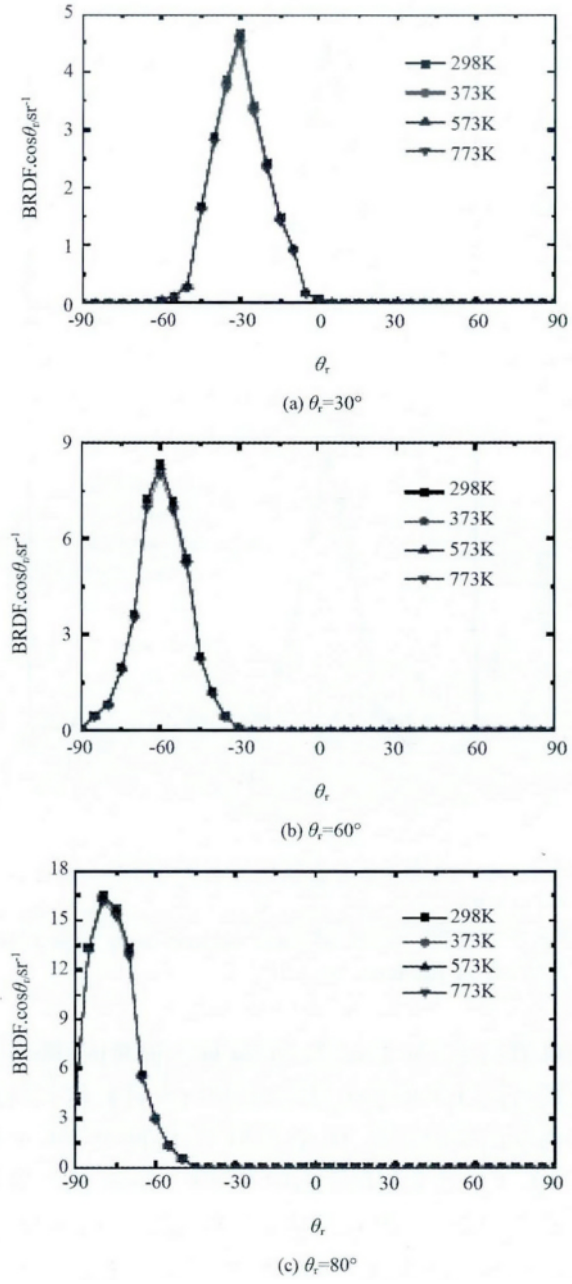


图 6　非偏振光入射时不同温度下钛合金粗糙表面的 BRDF · $\cos\theta_r$ 分布

Fig. 6　BRDF · $\cos\theta_r$ of rough titanium alloy surface at different temperatures under unpolarized light incidence

升高下降 3. 3%; 对于 TM 波,298K 时钛合金的 BRDF · $\cos\theta_r$ 最大值为 5. 4631sr^{-1},773K 时最大值为 5. 226 5 sr^{-1},BRDF · $\cos\theta_r$ 随温度升高下降 4. 3%. 可以看出,温度对 TE 偏振光照射和 TM 偏振光照射的 BRDF 的影响规律相同,BRDF 分布总体上随着温度的升高而变小.

图 8 给出了入射角度为 30 度,温度 $T = 298$ K 时不同偏振态光源下钛合金的 BRDF · $\cos\theta_r$ 极坐标分布图,从图中可以看出,不同偏振态入射时反射能量大部分集中在镜反射方向附近区域 .

图 9 为入射角 $\theta_i = 80°$时,不同偏振光照射得到的不同温度下钛合金 BRDF 模拟结果. 从图中可以看出,TE 和 TM 偏振光照射下,入射平面内的 BRDF · $\cos\theta_r$ 在镜反射方向出现峰值,较之 30 度入射的情形,对应 TE 偏振的峰值远大于 TM 偏振,TE 偏振

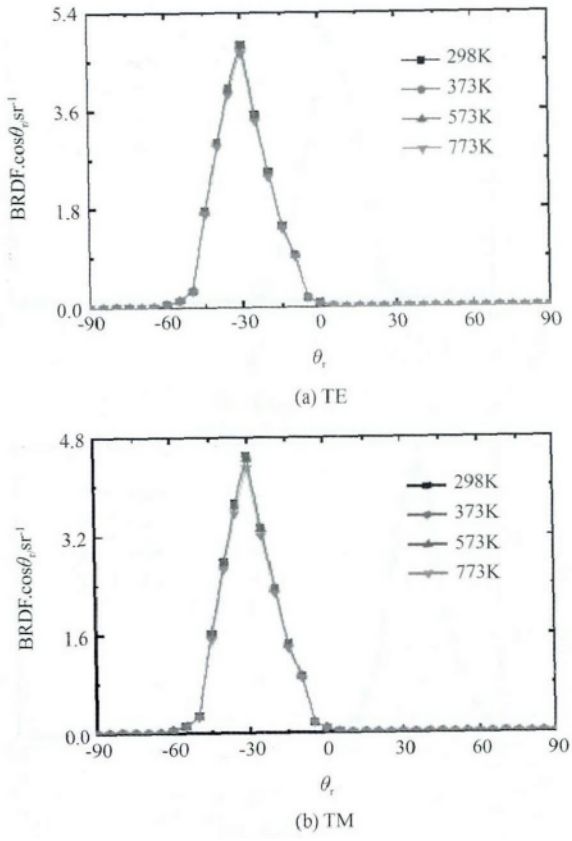


图7 不同温度下钛合金粗糙表面的 BRDF·$\cos\theta_r$ 分布($\theta_i=30°$)

Fig. 7 BRDF·$\cos\theta_r$ of rough titanium alloy surface at different temperatures ($\theta_i=30°$)

的峰值约为 TM 的 4 倍. 和 30 度入射相同,随着温度的增加,BRDF 整体呈降低趋势,在镜反射方向附近的峰值降低显著. TE 波照射下,温度为 298 K 和 773 K 下钛合金粗糙表面的 BRDF·$\cos\theta_r$ 最大值分别是 32.108 sr^{-1} 和 31.909 sr^{-1},在镜反射方向的峰值下降 0.6%,TM 波下 298 K 和 773 K 下钛合金的 BRDF·$\cos\theta_r$ 最大值分别是 10.345 sr^{-1} 和 9.286 8 sr^{-1},在镜反射方向的峰值下降 10.2%. 此外,可以看出,温度变化对钛合金粗糙表面 TM 偏振光入射的 BRDF 的影响大于 TE 偏振光.

图 10 给出了入射角 $\theta_i=80°$,温度 $T=298$ K 时钛合金的 BRDF·$\cos\theta_r$ 极坐标分布图. 从图中可见,随着入射角度的增大,反射能量的分布呈现显著的角度空间不均匀性. 与 30 度入射时主要反射能量区近似为圆形相比,此时主要反射能量区接近一个窄的椭圆形. 同时,BRDF·$\cos\theta_r$ 分布的数值整体显著增大. 对于 TE 偏振光,峰值约为 $\theta_i=30°$ 的 5 倍; 对于 TM 偏振光,峰值约为 $\theta_i=30°$ 的 2 倍.

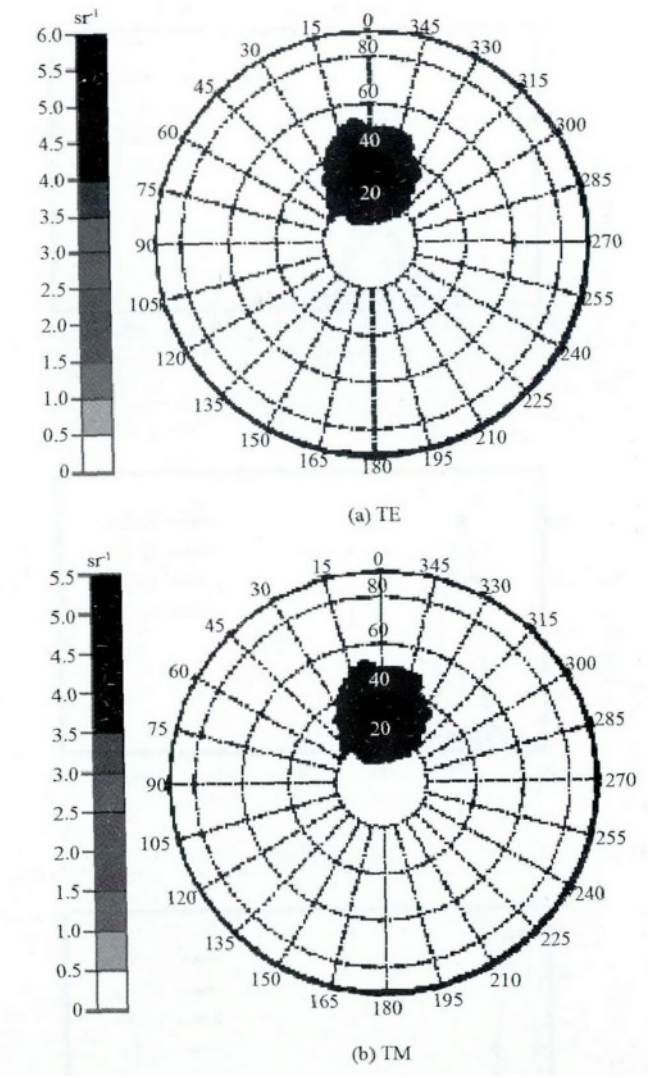


图8 钛合金粗糙表面的 BRDF·$\cos\theta_r$ 极坐标分布图($T=298$ K,$\theta_i=30°$)

Fig. 8 BRDF·$\cos\theta_r$ distribution of rough titanium alloy surface in polar coordinates($T=298$ K,$\theta_i=30°$)

3 结论

基于实验测得的 TC4 在 298 ~ 773K 范围的光学常数数据,通过 Monte Carlo 法对偏振光下钛合金粗糙表面的 BRDF 分布特性进行了分析,研究了不同偏振光照射、不同温度及不同表面粗糙度对钛合金 BRDF 的影响. 结果表明,偏振光下钛合金的 BRDF 分布随入射角度及表面粗糙度的变化规律与非偏振光相同,即钛合金的 BRDF 分布具有镜反射特征,随着入射角度增加,镜反射方向附近峰值增大,入射平面内 BRDF 变化曲线随表面粗糙度的增大由陡峭趋于平缓. 入射平面内粗糙钛合金表面的 BRDF 随光源偏振态变化与光滑平板具有相同趋

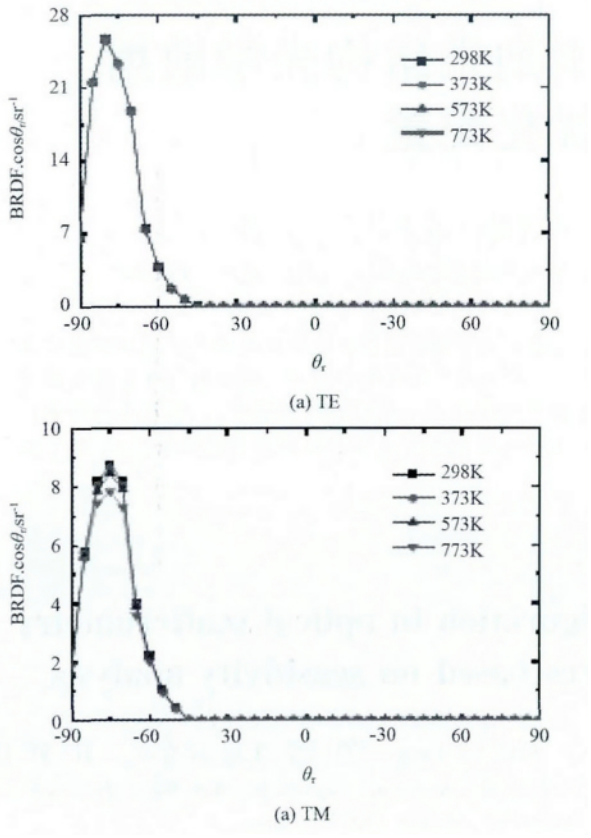


图 9　不同温度下钛合金粗糙表面的 BRDF · $\cos\theta_r$ **分布**($\theta_i = 80°$)

Fig. 9　BRDF · $\cos\theta_r$ of rough titanium alloy surface at different temperatures ($\theta_i = 80°$)

势. 随着温度升高,钛合金粗糙表面的 BRDF **镜反射方向附近峰值有下降趋势,并且温度变化对** TM **波入射下钛合金** BRDF **分布特性的影响大于** TE **波. 在所研究的温度范围内**(298 ~ 773 K) **,峰值变化在** 10.2% **以内. 随着入射角度的增大,温度对** BRDF **反射峰值的影响增大.**

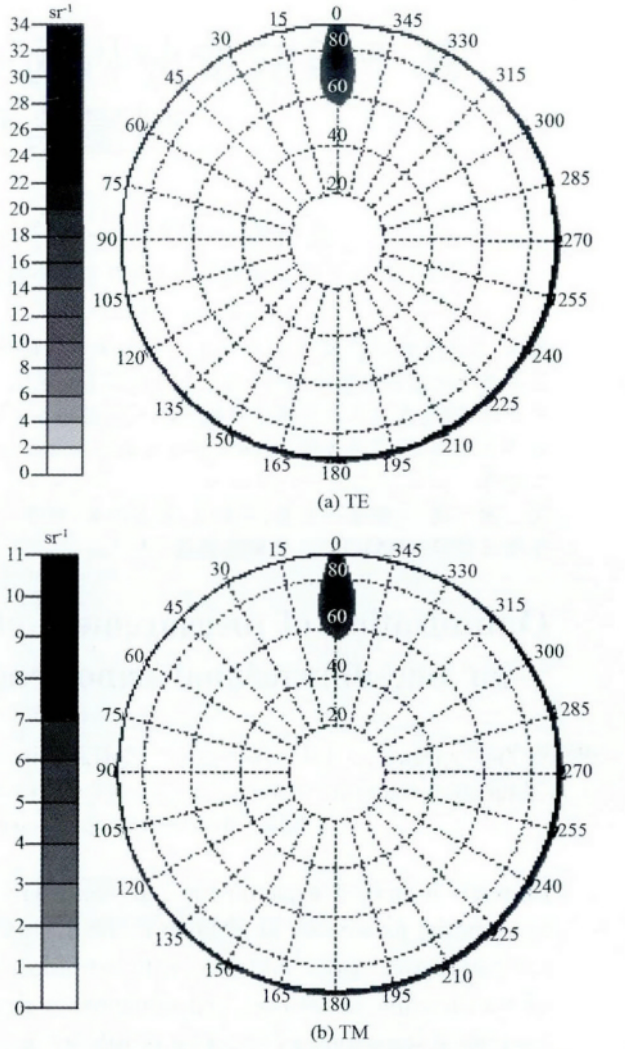


图 10　钛合金粗糙表面的 BRDF · $\cos\theta_r$ **极坐标分布图**($T = 298$K, $\theta_i = 80°$)

Fig. 10　BRDF · $\cos\theta_r$ distribution of rough titanium alloy surface in polar coordinates($T = 298$ K, $\theta_i = 80°$)

References

[1] Peters M, Kumpfert J, Ward C H, *et al*. Titanium alloys for aerospace applications [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2003, **5**(6): 419-427.

[2] Wang K. The use of titanium for medical applications in the USA [J]. *Materials Science and Engineering*: *A*, 1996, **213**(1): 134-137.

[3] Qun Z. New Development of Titanium Alloy and Its Application Actuality [J]. *Titanium Industry Progress*, 2008, **2**: 007.

[4] Mouritz A P. Introduction to Aerospace Materials [M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012: 202-223.

[5] Gorynin I V. Titanium alloys for marine application [J]. *Materials Science and Engineering*: *A*, 1999, **263**(2): 112-116.

[6] TAN He-Ping, XIA Xin-Lin, LIU Lin-Hua, et al. Numerical simulation of infrared radiation characteristics and transmission: Computation of thermal radiation [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press(**谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算: 计算热辐射学. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社**), 2006.

[7] Bergstrom D, Powell J, Kaplan A. A Ray-Tracing Analysis of the Absorption of Light by Smooth and Rough Metal Surfaces [J]. Journal of Applied Physics, 2007, **101**(11): 113504.

[8] JIANG Yi-Jiu. Numerical research on thermal radiative characteristics of one-dimensional periodic microstructure surface [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology(**蒋乙九. 一维周期性微结构表面辐射特性的数值模拟. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学**), 2010.

[9] Hyde M W, Schmidt J D, Havrilla M J. A geometrical optics polarimetric bidirectional reflectance distribution function for dielectric and metallic surfaces [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(24): 22138-22153.