中国光学 Chinese Optics 核心期刊

变温下材料表面近红外双向反射分布函数的测量研究

马王杰慧 刘彦磊 陈志影 刘玉芳

Near-infrared BRDF of material surfaces at varying temperatures

MA Wang-jiehui, LIU Yan-lei, CHEN Zhi-ying, LIU Yu-fang

引用本文:
马王杰慧, 刘彦磊, 陈志影, 刘玉芳. 变温下材料表面近红外双向反射分布函数的测量研究[J]. 中国光学, 2020, 13(5): 1115-1123. doi: 10.37188/CO.2019-0256
MA Wang-jiehui, LIU Yan-lei, CHEN Zhi-ying, LIU Yu-fang. Near-infrared BRDF of material surfaces at varying temperatures[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(5): 1115-1123. doi: 10.37188/CO.2019-0256

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2019-0256

文章编号 2095-1531(2020)05-1115-09

变温下材料表面近红外双向反射分布函数的测量研究

马王杰慧,刘彦磊,陈志影,刘玉芳*
(河南师范大学 物理学院 河南省红外材料光谱测量与应用重点实验室, 河南 新乡 453007)

摘要:基于自行研制的双向反射分布函数(BRDF)测量装置,采用绝对测量方法在 20~800 ℃ 的温度范围内测量了粗糙黄铜表面在近红外波段下的光谱偏振双向反射分布函数,分析了温度对 BRDF 的影响。结果表明,温度对黄铜表面的 BRDF 有明显的影响,随着温度的升高,BRDF 整体呈现出稳定-增大-减小的变化趋势。对不同温度下材料表面的场扫描电镜、粗糙度和 X 射线衍射测试表明,温度对样品表面 BRDF 产生影响的主要原因是表面形貌和化学成分的改变。

关 键 词:光谱 BRDF;黄铜;近红外;温度
中图分类号:O433.1 **文献标志码:**A **doi:**10.37188/CO.2019-0256

Near-infrared BRDF of material surfaces at varying temperatures

MA Wang-jiehui, LIU Yan-lei, CHEN Zhi-ying, LIU Yu-fang*
(*Henan Key Laboratory of Infrared Materials & Spectrum Measurements and Applications*, *School of Physics*, *Henan Normal University*, *Xinxiang* 453007, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *yf-liu@htu.cn*

Abstract: The spectral polarized BRDF of a brass surface in the near-infrared region was measured using the absolute measurement method with a home-made device. The temperature range was 20~800 ℃, and the influence of temperature on the BRDF was analyzed. The results indicate that temperature has an obvious influence on the BRDF of brass. With an increase in temperature, the BRDF was almost constant at first, then increased before finally decreasing. Scanning electron microscope testing, roughness measurement and X-ray diffraction analysis of the brass surface at different temperatures were performed. The test results indicate that the influence of temperature on BRDF can be attributed to variation in surface morphology and chemical composition.

Key words: spectral BRDF; brass; near-infrared; temperature

收稿日期:2020-01-13; **修订日期:**2020-02-19

基金项目:国家自然科学基金(No. 61627818, No. 61675065, No. U1804261, No. 61905068);河南省高等学校重点科研项目(No. 20A140015)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61627818, No. 61675065, No. U1804261, No. 61905068); Key Scientific Research Projects of Henan Province Colleges and Universities (No. 20A140015)

1 引 言

双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)是表征目标表面空间光学反射特性的物理量,能够有效描述目标表面的光学反射特性[1]。因此,BRDF 在目标光散射计算、地物遥感、目标识别和材料的光学性能研究等领域有着广泛的应用[2-5]。近几十年来关于 BRDF 的研究工作从未间断,这些工作主要集中在 BRDF 测量装置的研制、材料 BRDF 的测量、BRDF 模型的建立和 BRDF 的应用等方面[6-12]。

BRDF 不是材料的本征物理特性,容易受诸多因素的影响,其中温度是重要的影响因素之一。目前,关于 BRDF 测量工作的研究报道大多是在室温下完成[13-16],而对变温下测量的研究较少:戴景民等人[17] 设计了一套变温下 BRDF 测量装置,并使用此装置测量了 25~500 ℃ 温度范围内、632.8 nm 波长下铜表面的 BRDF,并分析了温度对 BRDF 的影响及其形成机理;关洪宇等人[18] 测量了钛合金表面在 25~500 ℃ 温度范围内、1.55 μm 波长下的光学常数,模拟了不同粗糙度和不同温度下的偏振 BRDF,并详细分析了粗糙度、入射光偏振和温度对 BRDF 的影响;Albert W. Bailey 等人[19] 采用 1.06 μm 高能激光对样品进行加热,测量了不同温度下不锈钢和铜表面的 BRDF,发现未熔化材料表面的 BRDF 峰值随温度的升高呈先增加后减小的趋势。他们认为导致 BRDF 峰值增加的原因是激光束燃烧污染物清洁表面,BRDF 峰值减小的原因是表面氧化,同时,他们发现熔融的不锈钢表面 BRDF 镜面峰值的位置随温度的升高会发生变化,认为这是由于样品表面的形变导致的。然而,以上关于变温下 BRDF 的测量工作主要集中在单波长下,不能够体现变温下材料表面偏振 BRDF 在近红外波段随波长的变化情况。材料在近红外波段特定波长处的光谱反射吸收特性取决于材料的化学成分和组成结构,目标材料在近红外波段的光谱偏振 BRDF 能够反映材料的本征属性,为物质成分的定性和定量分析、隐身材料的设计和伪装效果的评估方法等提供数据。因此,变温下近红外光谱偏振 BRDF 的测量不仅有利于描述不同温度下材料表面完整光谱偏振反射特性,而且对变温下近红外光谱偏振 BRDF 模型的建立和相关领域的发展具有推动作用。

本文基于自行研制的 BRDF 测量装置测量了变温下黄铜表面的近红外光谱偏振 BRDF,并对影响测量结果的因素做了分析。论文的结构如下:第二部分主要介绍本文所采用的测量原理与装置,第三部分介绍样品的制备和测量过程;第四部分给出测量结果与讨论;第五部分对全文的工作进行总结。

2 测量原理与装置

2.1 BRDF 测量原理

Nicodemus 将双向反射分布函数 f_r 定义为光辐射的反射辐亮度 $\mathrm{d}L_r$ 与入射辐照度 $\mathrm{d}E_i$ 的比值[1]

$$f_r(\theta_i,\phi_i,\theta_r,\phi_r,\lambda)=\frac{\mathrm{d}L_r(\theta_i,\phi_i,\theta_r,\phi_r,\lambda)}{\mathrm{d}E_i(\theta_i,\phi_i,\lambda)}, \tag{1}$$

其中,θ 和 ϕ 分别表示天顶角和方位角,下标 i 和 r 分别表示入射和反射,λ 为波长。图 1 给出了 BRDF 定义的几何关系。

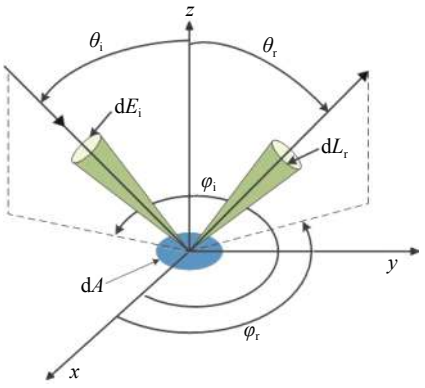

图 1 双向反射分布函数的几何关系图

Fig. 1 Geometric relationship diagram of incident and reflected beams for BRDF

本文采用一种改进的 BRDF 绝对测量方法[16],其表达式为:

$$f_r(\theta_i,\phi_i,\theta_r,\phi_r,\lambda)=\frac{L_r(\theta_i,\phi_i,\theta_r,\phi_r,\lambda)}{L_o(0,0,0,0,\lambda)}\cdot\frac{1}{\Omega_r\cos\theta_i}. \tag{2}$$

对于均匀性、稳定性和准直性较好的光源,$L_o(0,0,0,0,\lambda)$ 是与波长有关的函数,通过在安放样

品前测量光源就可以得到; 对于固定的测量装置, 探测立体角 Ω_r 是常数, 可以根据探测器的孔径尺寸和探测距离计算得到; 角度因子 $\cos\theta_i$ 由入射天顶角决定。因此, 根据测量原理可知, 测得反射辐亮度 $L_r(\theta_i,\phi_i,\theta_r,\phi_r,\lambda)$ 即可得到待测目标的 BRDF。

2.2　测量装置

本文的测量工作基于一套自主设计的 BRDF 测量装置展开[16], 图 2 给出了测量装置的设计图。其中 ARM1 和 ARM2 为转臂, TAB 1 和 TAB 2 为转台。

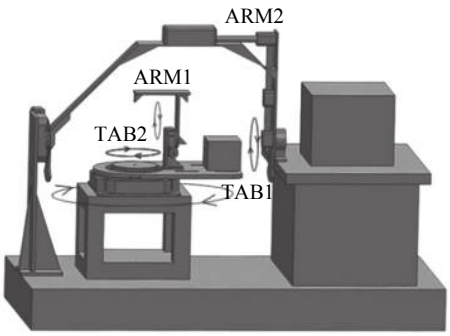

图 2　BRDF 测量装置设计图

Fig. 2　Design scheme of the BRDF measurement apparatus

为了实现高温下目标表面 BRDF 的测量, 本文对现有的测量装置进行了改进, 添加了自主设计和加工组装的圆柱形平板加热器, 示意图如图 3(a)所示。加热器放置于转台 TAB2 上。入射和反射天顶角的测量范围与加热器样品腔的设计有关, 主要由样品腔的直径、保温层厚度和样品厚度决定。图 3(b)给出了样品腔的示意图, 图中 R、d 和 h 分别为样品半径、保温层厚度和样品厚度, 通过 $\tan\theta_{i\max}=\tan\theta_{r\max}=R/(d-h)$ 可以计算得到最大入射和反射天顶角。文中的测量目标是直径为 50 mm、厚 3 mm 的圆片状样品, 即 R=25 mm、h=3 mm, 加热器保温层的厚度 d=8 mm, 通过计算得到最大入射和反射天顶角为: $\theta_{i\max}=\theta_{r\max}$=78°。由此可知, 高温下入射和反射天顶角的测量范围为−78°~78°。加热器的温控系统主要由日本岛电公司生产的高精度的 PID 温度控制器(SR23)和北京希曼顿公司生产的调功调压器(SHIMADEN PAC01A)组成, 温控精度可达 0.1 级, 能够有效减小温控精度对测量结果的影响。改进后的 BRDF 测量装置能够实现变温下目标表面的 BRDF 测量, 温度范围为室温至 800 ℃。需要说明的是, 在室温下, 采用样品台替代加热器, 此时入射和反射天顶角的测量范围为: −90°~90°。

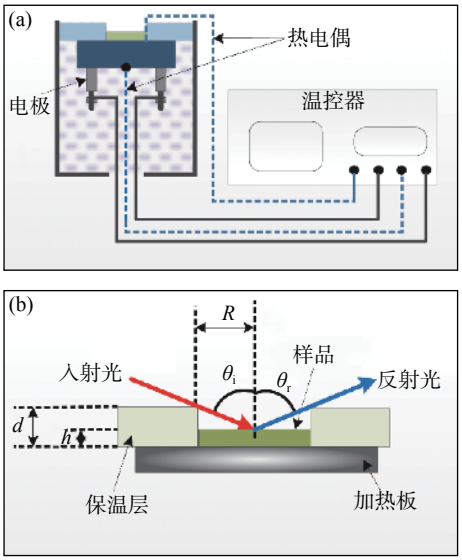

图 3　平板加热器示意图。(a)加热器和温控器; (b)样品腔

Fig. 3　Schematic diagram of plate heater. (a) heater and thermostat; (b) sample cavity

3　测量过程

首先需要说明的是, 本文中的 BRDF 测量装置属于传统测量装置。采用传统测量装置测量目标表面的空间光学反射特性十分耗时, 长时间加热会导致测量开始和测量完成时样品表面的热氧化程度发生变化, 从而影响测量结果的准确性和可靠性。为了减小加热时间对测量结果的影响, 本文仅对黄铜表面的面内光谱偏振 BRDF 进行了测量。在测量过程中, 波长范围为 1 100~2 300 nm, 间隔 5 nm; 温度范围为 20 ℃~800 ℃; 入射天顶角为 5°~75°, 间隔 5°; 入射和反射方位角分别为 0°和 180°; 入射光为非偏振光, 测量了反射光分别为 s 偏振和 p 偏振的 BRDF。

在实验中选择直径为 50 mm、厚度为 3 mm 圆片形状的商用黄铜作为样品, 采用 240 目、400 目、800 目、1 000 目、1 500 目和 2 000 目的碳化硅砂纸依次对每一块样品进行机械打磨, 再用 600 目的碳化硅砂纸进行手动均匀打磨; 接下来, 分别采用丙酮和无水乙醇对样品进行清洗后, 将

样品放入纯净水中并使用超声波清洗机进行进一步的清洗，以确保样品表面无污垢残留。完成样品的加工后，对样品表面的面内光谱偏振 BRDF 进行测量。具体测量过程如下：首先，将处理好的样品放置在样品腔的中心位置；然后，打开加热器并输入目标温度，当样品被加热至目标温度并达到稳定后开始 BRDF 测量；该温度下的测量完成后，更换样品重复上述过程，依次实现不同温度下的 BRDF 测量。

如前文所述，样品表面的加热时间对测量结果有一定的影响，给定温度下样品的加热时间主要由两部分组成：一是样品从室温加热至目标温度并达到稳定所需要的升温时间；二是样品面内光谱偏振 BRDF 的测量时间，主要取决于设备转臂的转动速度，与设备的优化设计相关。表 1 给出了不同温度下的升温时间和测量时间。

表 1 不同温度下的升温时间和测量时间

Tab. 1 Heating time and measuring time at different temperatures

目标温度/℃	升温时间/min	测量时间/min
100	2.7	15.2
200	3.0	15.2
300	3.1	15.2
400	3.4	15.2
500	3.7	15.2
600	4.1	15.2
700	4.6	15.2
800	5.1	15.2

4 测量结果与讨论

为了研究黄铜的偏振 BRDF 随温度的变化情况，图 4 给出了入射天顶角为 45°、波长为 2 000 nm 时的面内偏振 BRDF。从图 4(a)能够看出，在反射天顶角一定的情况下，$T\leqslant300$ ℃ 时，BRDF 在温度升高时比较稳定，几乎不受温度的影响；在 300 ℃<$T\leqslant400$ ℃ 时，温度对 BRDF 有积极影响；$T\geqslant400$ ℃ 时，温度对 BRDF 有消极影响。也就是说，随着温度的升高 BRDF 呈现稳定-增大-减小的变化趋势，并且这一变化趋势几乎不受反射天顶角的影响。在给定温度下，BRDF 随反射天顶角的增加先增大后减小，在镜面反射方向达到最大值，这一趋势几乎不受温度的影响。观察图 4(b)能够发现，p 偏振 BRDF 随温度和反射天顶角的变化与 s 偏振 BRDF 的变化规律相似。对比图 4 中的两幅图可以发现，黄铜表面 BRDF 随反射天顶角和温度的变化均不受入射光偏振态的影响。

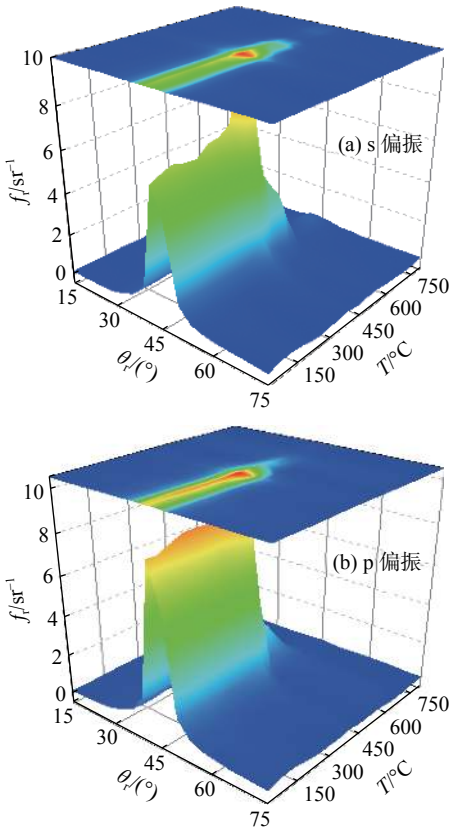

图 4 θ_i=45°，λ=2 000 nm 时，样品的面内 BRDF。(a)和(b)分别为 s 偏振和 p 偏振测量结果

Fig. 4 The BRDF of sample at θ_i=45° and λ=2 000 nm. (a) s-polarized (b) p-polarized

为了清楚地展示黄铜表面 BRDF 随波长的变化，图 5(a)~(d)给出了入射天顶角分别为 15°、30°、45°和 60°时镜面反射方向的 s偏振光谱 BRDF。从图 5(a)能看出，在给定波长下，BRDF 随着温度的升高呈现稳定-增大-减小的变化趋势，这一趋势不受波长的影响。给定温度下，镜面 BRDF 随着波长的增大而增大，这种变化趋势几乎也不受温度的影响。这是因为对于给定的光

学表面, 随着波长的增加, 相对粗糙度 σ/λ 减小, 待测表面相对于入射光波长趋近于光滑, 镜面反射方向的反射强度增大, 从而导致 BRDF 增大。通过观察图 5(b)~5(d)能够发现, 入射天顶角 θ_i 分别为 30°、45°和 60°时, s 偏振 BRDF 随温度和波长的变化趋势与 θ_i=15°时的一致。对比 4 幅子图能够看出, 样品镜面反射方向的 s 偏振 BRDF 随着入射天顶角的增加而逐渐增大。

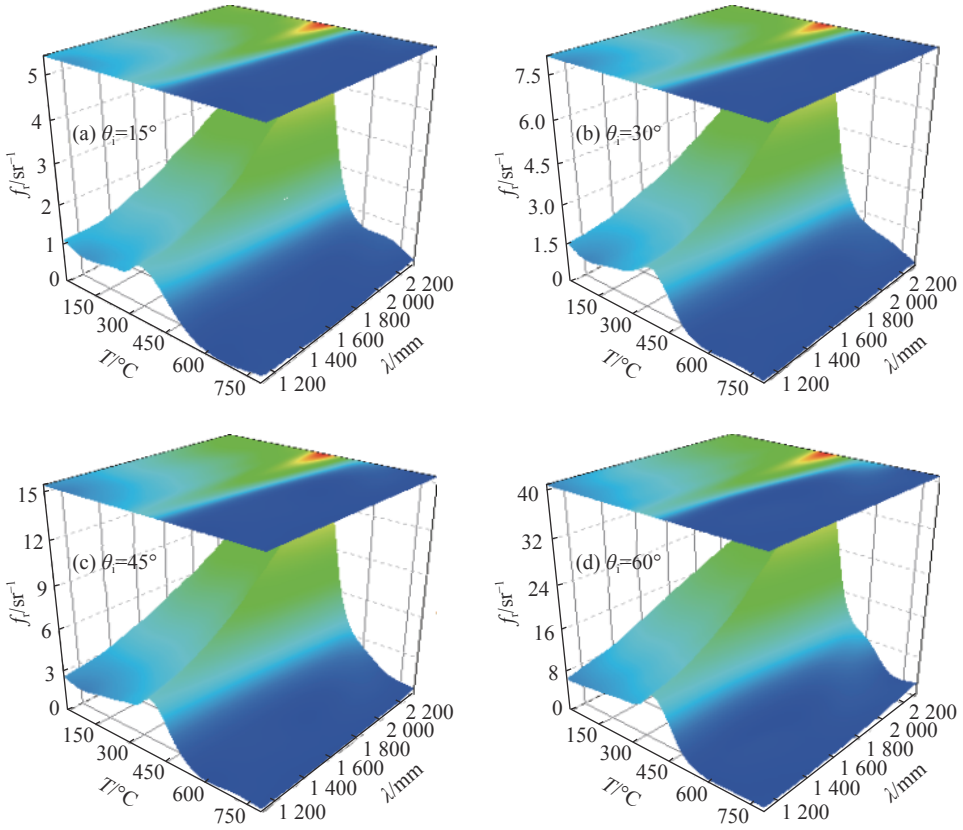

图 5　样品镜面反射方向的 s 偏振 BRDF。(a)~(d)依次为入射角 15°、30°、45°和 60°的测量结果

Fig. 5　The s-polarized BRDF of sample at the different specular reflection directions. (a) θ_i=15° (b) θ_i=30° (c) θ_i=45° (d) θ_i=60°

图 6 给出了入射天顶角分别为 15°、30°、45°和 60°时, p 偏振镜面 BRDF 的测量结果。从图 6 可以看出, p 偏振 BRDF 随温度、波长和入射天顶角的变化趋势与图 5 中的 s 偏振基本一致。由图 5 和图 6 能够得知, 入射光偏振态对 BRDF 随温度、波长和入射角的变化趋势影响不大。

根据图 5 和图 6 的测量结果可得出以下结论, 镜面 BRDF 随入射角的增加而增大, 这一趋势的产生可归因于两个方面: (1)随着入射角的增大, 镜面反射方向的反射率增大; (2)根据测量原理式, 角度因子 $\cos\theta_i$ 位于分母上且随入射角的增大而减小, 从而导致 BRDF 增大。为了进一步研究反射率和角度因子对 BRDF 的影响, 图 7(a)、7(b)、7(c)和 7(d)分别给出了波长为 2 000 nm 时, 不同温度下样品镜面反射方向的 s 偏振的反射率和 BRDF 与 p 偏振的反射率和 BRDF。从图 7(a)和 7(c)可看出, 在给定入射天顶角和偏振态的情况下, 反射率随波长的变化曲线受温度的影响。在给定温度下, 样品的反射率随入射角度的增加而逐渐增大。这一趋势表明, 增大入射天顶角能够有效增加镜面反射方向的反射率。对比图 7(a)、7(b)、7(c)和 7(d)能够发现, 同一温度和偏振态下, 反射率和 BRDF均随入射角的增大而增大, 但是两者的增长速率明显不同, 这主要归因于角度因子。测量结果表明, BRDF 随入射角的增加而增大, 其增长趋势同时受样品表面反射率和角度因子的影响。

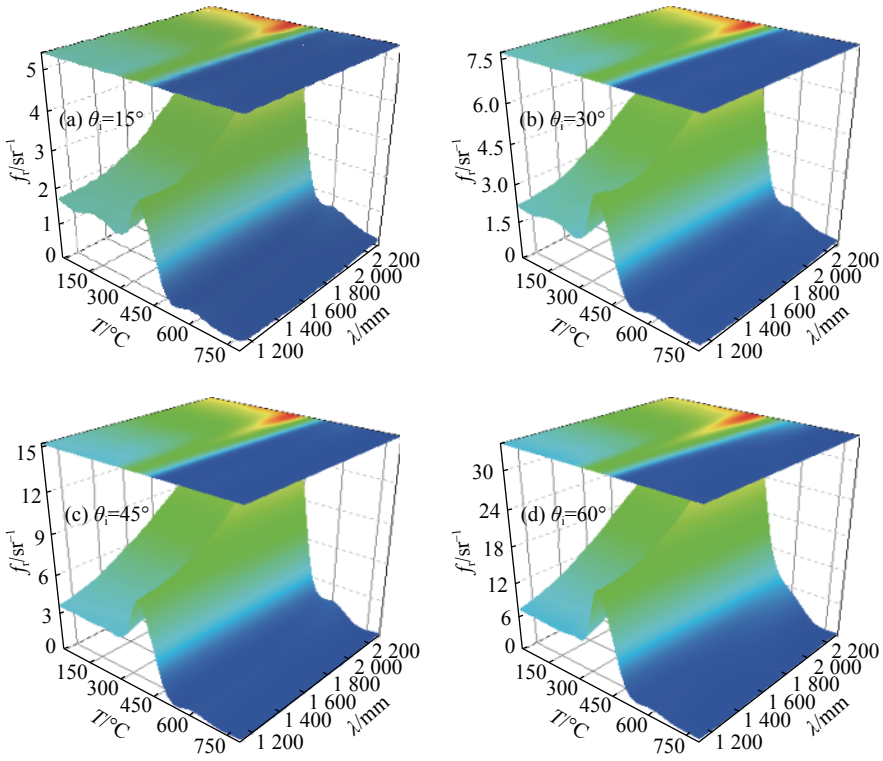

图 6 样品镜面反射方向的 p 偏振 BRDF。(a)~(d)依次为入射角 15°、30°、45°和 60°的测量结果

Fig. 6 The p-polarized BRDF of sample at different specular reflection directions. (a) θ_i=15° (b) θ_i=30° (c) θ_i=45° (d) θ_i=60°

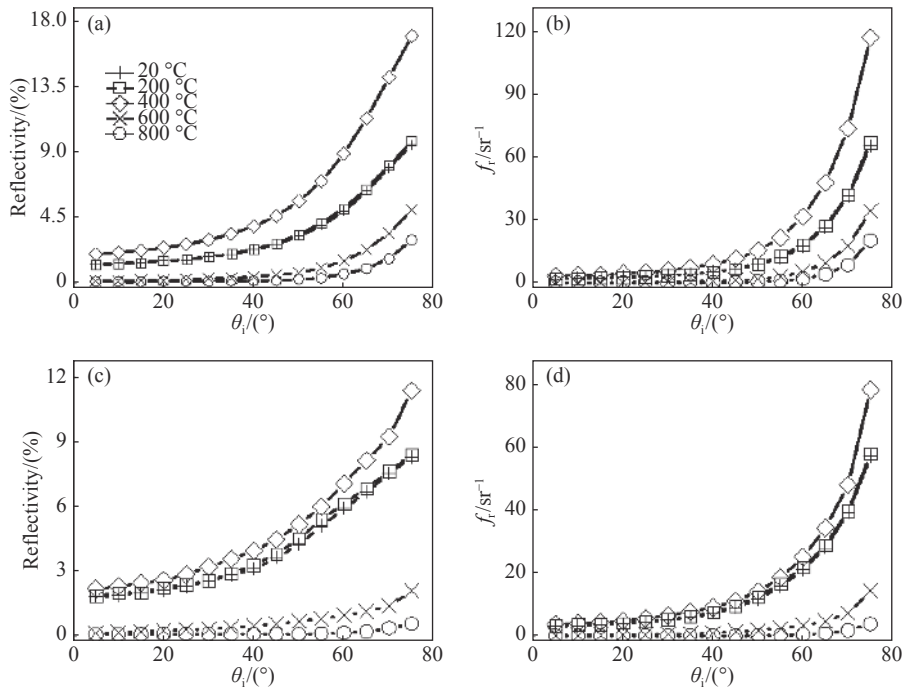

图 7 λ=2 000 nm 时, 样品镜面反射方向的反射率和 BRDF。(a)~(d)依次为 s 偏振反射率、s 偏振 BRDF、p 偏振反射率和 p 偏振 BRDF

Fig. 7 The polarized reflectivity and BRDF of sample at the specular reflection direction and λ=2 000 nm. (a) s-polarized reflectivity; (b) s-polarized BRDF; (c) p-polarized reflectivity; (d) p-polarized BRDF

根据第 4 部分的测量结果可知, 温度对黄铜样品表面的 BRDF 造成影响的原因可归纳为: (1)样品表面形貌的改变; (2)化学成分的改变; (3)表面应力的变化。鉴于场发射扫描电镜测试能够表征样品表面的微观形貌[20-22]。为了验证以上猜想, 对不同温度下的样品表面做了场发射扫描电镜测试, 如图 8 所示。从图 8 可以看出: 温度低于 400 ℃ 时, 样品表面形貌随着温度的升高无明显变化; 在 400 ℃, 表面形貌发生变化; 温度高于 400 ℃ 时, 表面形貌的变化随温度的升高而更加明显。

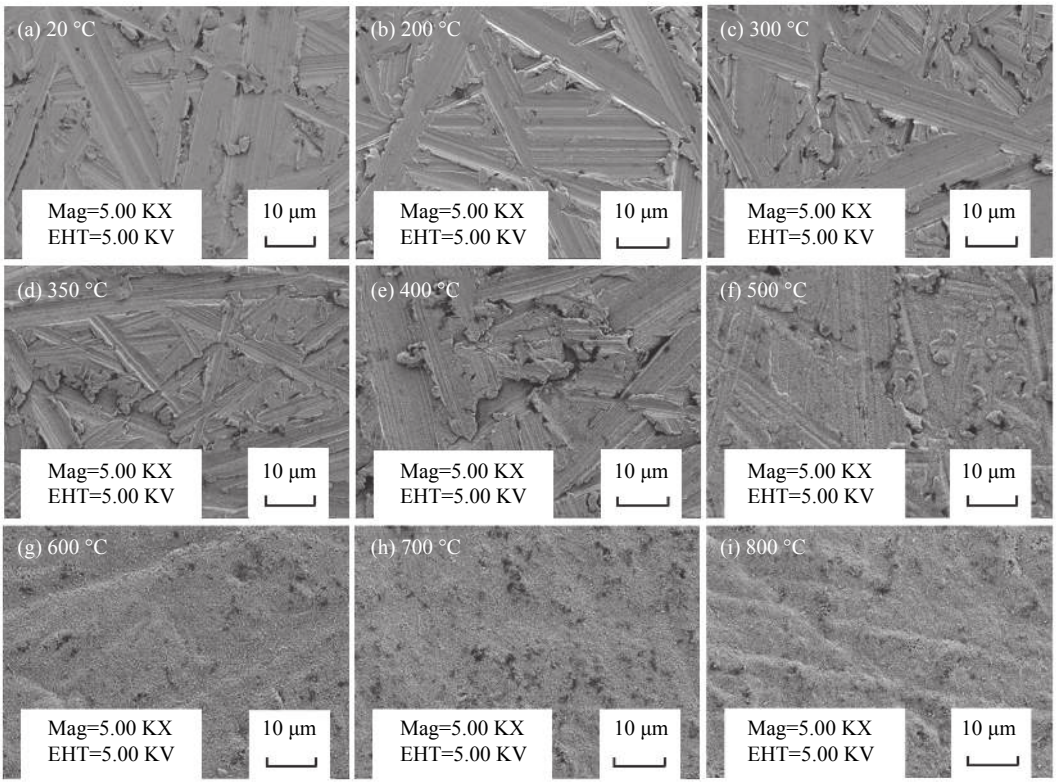

图 8　不同温度下样品表面的显微照片

Fig. 8　Scanning electron micrographs of sample surface at different temperatures

表 2 给出了不同温度下样品表面的粗糙度。其中 R_a、R_z 和 R_q 分别为算术平均粗糙度、轮廓最大高度和均方根粗糙度。从表 2 可看出, T<400 ℃ 时, 样品表面粗糙度几乎不变; T≥400 ℃ 时, 样品表面粗糙度随着温度的升高而逐渐增大。结合图 8 和表 2 可知, 当温度高于 400 ℃ 时, 随着温度的升高, 样品表面形貌发生明显改变, 粗糙度逐渐增大, 镜面反射方向的反射强度减弱, 从而导致 BRDF 减小。测量结果表明, 表面形貌的改变是温度对样品表面 BRDF 造成消极影响的原因之一。

表 2　不同温度下样品表面的粗糙度

Tab. 2　Roughness values of the sample surface at different temperatures

温度/℃	R_a/μm	R_z/μm	R_q/μm
20	0.155	1.223	0.202
200	0.159	1.254	0.207
300	0.158	1.249	0.210
350	0.161	1.243	0.208
400	0.185	1.303	0.240
500	0.187	1.479	0.247
600	0.223	1.593	0.288
700	0.258	1.769	0.333
800	0.356	2.294	0.445

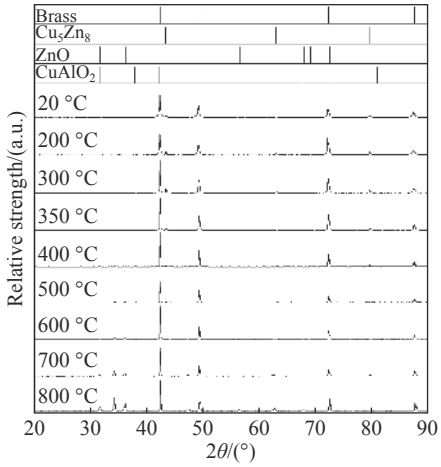

图 9 不同温度下样品表面的 X 射线衍射图和表面成分

Fig. 9 X-ray diffraction pattern and chemical composition of sample surface at different temperatures

X 射线衍射能够分析样品表面的化学成分[20-21]，本文对不同温度下的样品进行 X 射线衍射测试，结果如图 9 所示。从图 9 可看出，样品表面的化学成分随着温度的升高出现了不同程度的增长和改变；T<400 ℃ 时，样品表面的化学成分几乎不变；T≥400 ℃ 时，出现了 ZnO 和 $CuAlO_2$。这说明 T≥400 ℃时，氧化物的出现导致样品表面形貌改变、粗糙度增大，从而对 BRDF 造成影响。当 T<400 ℃ 时，样品表面未发生氧化，表面形貌和粗糙度均无明显变化。但是当 300 ℃≤T<400 ℃ 时，温度对 BRDF 有明显的积极影响，这可能是由于表面应力改变导致的，具体原因尚有待进一步研究。

5 结 论

本文测量了变温下黄铜表面近红外波段的光谱偏振 BRDF，并分析了温度、入射角度、波长和偏振等因素对测量结果的影响，详细讨论了温度对 BRDF 造成影响的主要原因。结果表明：(1) BRDF 随着温度的升高呈现稳定-增大-减小的变化趋势，这一变化趋势不受入射天顶角、反射天顶角、波长和偏振态的影响；(2)镜面反射方向的 BRDF 随着波长的增大而增大，该变化趋势几乎不受温度、入射角和偏振态的影响；(3)镜面反射方向的 BRDF 随着入射天顶角的增大而增大，这一趋势同时受样品表面反射率和角度因子的影响；(4)在 400~800 ℃，温度对样品表面 BRDF 产生消极影响的主要原因是表面形貌和化学成分的改变。该实验对不同温度下材料表面空间反射特性的研究、建模和应用具有重要意义。

参考文献：

[1] NICODEMUS F E. Directional reflectance and emissivity of an opaque surface[J]. *Applied Optics*, 1965, 4(7): 767-775.

[2] ELLIS K K. Polarimetric bidirectional reflectance distribution function of glossy coatings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(8): 1758-1762.

[3] SANDMEIER S, MÜLLER C, HOSGOOD B, *et al*.. Physical mechanisms in hyperspectral brdf data of grass and watercress[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(2): 222-233.

[4] SCHAAF C B, GAO F, STRAHLER A H, *et al*.. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1-2): 135-148.

[5] SCHAEPMAN-STRUB G, SCHAEPMAN M E, PAINTER T H, *et al*.. Reflectance quantities in optical remote sensing-definitions and case studies[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103(1): 27-42.

[6] MARSCHNER S R, WESTIN S H, LAFORTUNE E, *et al*.. Image-based bidirectional reflectance distribution function measurement[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(16): 2592-2600.

[7] BOUSQUET L, LACHÉRADE S, JACQUEMOUD S, *et al*.. Leaf BRDF measurements and model for specular and diffuse components differentiation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(2-3): 201-211.

[8] 张百顺, 刘文清, 魏庆农, 等. 基于双向反射分布函数实验测量的目标散射特性的分析[J]. 光学技术, 2006, 32(2): 180-182.
ZHANG B SH, LIU W Q, WEI Q N, *et al*.. Analysis of scattering characteristic of the sample based on BRDF experiment measurements[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(2): 180-182. (in Chinese)

[9] LELOUP F B, FORMENT S, DUTRÉ P, *et al*.. Design of an instrument for measuring the spectral bidirectional scatter distribution function[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(29): 5454-5467.

[10] WANG H Y, ZHANG W, DONG A T. Measurement and modeling of Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) on material surface[J]. *Measurement*, 2013, 46(9): 3654-3661.

[11] GATEBE C K, KING M D. Airborne spectral BRDF of various surface types (ocean, vegetation, snow, desert, wetlands, cloud decks, smoke layers) for remote sensing applications[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 179: 131-148.

[12] KALLEL A. Leaf polarized BRDF simulation based on Monte Carlo 3-D vector RT modeling[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 221: 202-224.

[13] PELTONIEMI J I, KAASALAINEN S, NÄRÄNEN J, *et al*.. BRDF measurement of understory vegetation in pine forests: dwarf shrubs, lichen, and moss[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94(3): 343-354.

[14] BARIBEAU R, NEIL W S, CÔTÉ É. Development of a robot-based gonioreflectometer for spectral BRDF measurement[J]. *Journal of Modern Optics*, 2009, 56(13): 1497-1503.

[15] JOHANSSON N, NEUMAN M, ANDERSSON M, *et al*.. Influence of finite-sized detection solid angle on bidirectional reflectance distribution function measurements[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(6): 1212-1220.

[16] 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.

[17] 戴景民, 赵忠义, 李颖. 可变温条件下材料表面的双向反射分布函数测量[J]. 应用光学, 2008, 29(3): 321-325.
DAI J M, ZHAO ZH Y, LI Y. BRDF measurement of material surface at variable temperatures[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(3): 321-325. (in Chinese)

[18] 关洪宇, 张文杰, 赵军明, 等. 钛合金粗糙表面的偏振光及变温BRDF特性[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(1): 109-115.
GUAN H Y, ZHANG W J, ZHAO J M, *et al*.. Polarization and temperature dependent BRDF of titanium alloy rough surface[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35(1): 109-115. (in Chinese)

[19] BAILEY A W, EARLY E A, KEPPLER K S, *et al*.. Dynamic bidirectional reflectance distribution functions: measurement and representation[J]. *Journal of Laser Applications*, 2008, 20(1): 22-36.

[20] 李振, 刘寒蒙, 姚志霞, 等. 二氧化钛纳米管阵列/钛pH电极制备与表征[J]. 分析化学, 2018, 46(12): 1961-1967.
LI ZH, LIU H M, YAO ZH X, *et al*.. Preparation and characterization of titanium dioxide nanotube array/titanium pH electrode[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2018, 46(12): 1961-1967. (in Chinese)

[21] 唐小强, 陈裕雲, 罗燕妮, 等. 基于TiO_2NRs@$ZnIn_2S_4$ NSs复合材料的谷胱甘肽光电化学传感器的构建与应用[J]. 分析化学, 2019, 47(8): 1188-1194.
TANG X Q, CHEN Y Y, LUO Y N, *et al*.. A novel glutathione photoelectrochemical sensor based on titanium dioxide Nanorods@$ZnIn_2S_4$ Nanosheets nanocomposites[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2019, 47(8): 1188-1194. (in Chinese)

[22] 王帅, 徐俊平, 陈厚孚, 等. 金属(氢)氧化物参与木质素微生物转化形成类胡敏酸的结构特征分析[J]. 分析化学, 2019, 47(11): 1809-1815.
WANG SH, XU J P, CHEN H F, *et al*.. Structural characteristics of Humic-like acid from microbial transformation of lignin participated by metal (hydro) oxides[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2019, 47(11): 1809-1815. (in Chinese)

作者简介：

马王杰慧(1996—), 女, 河南许昌人, 硕士研究生, 2018 年于河南师范大学获得学士学位, 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。E-mail: mwmw9691@163.com

刘玉芳(1963—), 男, 河南三门峡人, 博士, 教授, 1987 于河南师范大学获得学士学位, 1990 年于四川大学获得硕士学位, 2004 年于大连理工大学获得博士学位, 主要从事红外物理与技术方面的研究。E-mail: yf-liu@htu.cn