

# Ti-6Al-4V 合金方向光谱发射率特性研究

赵晚梦, 李龙飞, 原泽野, 王刚圈, 刘玉芳\*, 于坤\*\*

河南省红外材料光谱测量与应用重点实验室, 河南师范大学物理学院, 河南 新乡 453007

**摘要** 利用傅里叶红外光谱仪在温度范围为 573~953 K、波长范围为 3~20  $\mu\text{m}$  下测量 Ti-6Al-4V 合金在  $0^\circ\sim 84^\circ$  下的方向光谱发射率, 并系统研究了方向变化对其光谱发射率的影响。实验结果表明, 在波长小于 10.3  $\mu\text{m}$  的短波处, Ti-6Al-4V 合金发射率在  $0^\circ\sim 84^\circ$  下随角度变化呈现出类似绝缘体的特性, 而在大于 10.3  $\mu\text{m}$  的长波处, 其变化呈现出类似金属的特性。该合金的光谱发射率在 573~773 K 范围内随温度的升高而增大, 并且在  $0^\circ\sim 70^\circ$  与  $80^\circ\sim 84^\circ$  内随波长变化趋势相反。当 Ti-6Al-4V 合金氧化后, 其发射率在  $60^\circ$  时达到最大值且非金属特性在长波处随氧化时间增加越来越明显。由此可见, 在不同测量角度下, 温度、波长和氧化程度等因素对 Ti-6Al-4V 发射率的影响很大, 该研究可以丰富 Ti-6Al-4V 合金的方向光谱发射率数据库, 为辐射测温技术提供数据支持。

**关键词** 光谱学; Ti-6Al-4V 合金; 方向发射率; 温度; 波长; 角度; 氧化

中图分类号 O433.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0830002

## Directional Spectral Emissivity of Ti-6Al-4V Alloy

Zhao Wanmeng, Li Longfei, Yuan Zeyue, Wang Gangquan, Liu Yufang\*, Yu Kun\*\*

*Henan Provincial Key Laboratory of Infrared Materials & Spectrum Measures and Applications,  
College of Physics, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453007, China*

**Abstract** In this paper, the directional emissivity of Ti-6Al-4V alloy at  $0^\circ\sim 84^\circ$  was measured using Fourier transform infrared spectroscopy at a temperature range of 573~953 K and a wavelength range of 3~20  $\mu\text{m}$ . The influence of direction on the spectral emissivity was systematically studied. Results show that the emissivity of Ti-6Al-4V alloy is similar to that of an insulator in the angle range of  $0^\circ\sim 84^\circ$  when the measurement wavelength is less than 10.3  $\mu\text{m}$ , and therefore, it is more similar to that of metal when the wavelength exceeds 10.3  $\mu\text{m}$ . The emissivity increases with temperature that ranges between 573~773 K, and it is observed that the change trend of emissivity with wavelength is opposite for the angle range of  $0^\circ\sim 70^\circ$  and  $80^\circ\sim 84^\circ$ . When the Ti-6Al-4V alloy is oxidized, its emissivity is maximum at  $60^\circ$ , and the non-metallic properties of emissivity at long-wavelength are evident with the increasing oxidation time. Therefore, this study enriches the directional spectral emissivity database of Ti-6Al-4V alloys and provides data support for radiation temperature measurement technology.

**Key words** spectroscopy; Ti-6Al-4V alloy; directional emissivity; temperature; wavelength; angle; oxidation

**OCIS codes** 300.6170; 300.6340; 300.2140

## 1 引 言

Ti-6Al-4V 具有密度小、比强度和比刚度高、抗腐蚀以及高温力学性能优越等特点, 在航空航天领域和舰艇及兵器等军品制造领域的应用日益广泛, 在汽车、化学和能源等行业也有着巨大的应用潜力<sup>[1-6]</sup>。然而, 由于在实际应用中, 高温、高摩擦等条件容易导致“钛火”发生, 故钛合金在很多方面的应用受到了限制。温度是钛起火的重要条件之一, 尽

管利用热电偶可对钛合金进行温度监测, 但该方法动态性差, 易破坏待测物体表面的温度分布, 因此, 快速并准确测量钛合金的温度仍然是重中之重。辐射测温具有无污染、响应速度快等优点, 是目前应用最广泛的表面温度测量方法之一。辐射测温需要知道物体准确的发射率或发射率模型, 而发射率跟物体的材料、温度、波长、测量角度等因素有关, 是一个很难准确测量的物理量<sup>[7-8]</sup>。研究表明, 发射率越高, 辐射测温温度误差越小, 所以可以利用材料在某

收稿日期: 2019-11-12; 修回日期: 2019-12-27; 录用日期: 2019-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(61675065, U1804261, 61627818)

\* E-mail: yf-liu@htu.edu.cn; \*\* E-mail: yukun@htu.edu.cn

个角度的最强的光谱辐射来测温,以此减小温度测量误差<sup>[9]</sup>。因此研究钛合金在不同条件下的方向光谱发射率具有重要意义<sup>[10-11]</sup>。

目前,研究人员针对钛合金的发射率变化做了深入研究,例如,2013年 Zhang 等<sup>[12]</sup>利用傅里叶光谱仪测量了钛合金在温度为 600,700,800 K,波长范围为 5~10  $\mu\text{m}$  的光谱发射率,发现了钛合金的发射率与波长近似呈指数关系,并描述了光谱发射率数据在多波长辐射测温中的应用。另外,2016年 Li 等<sup>[13]</sup>也曾利用单色仪在 1500~2000 nm 波长范围内研究了 Ti-6Al-4V 在 823~973 K 热氧化过程中的红外法向光谱发射率。研究发现,Ti-6Al-4V 合金表面氧化膜的生长遵循抛物线规律,在 923 K 以上生长速度较快。2018年 Wang 等<sup>[14]</sup>基于反射率法对钛合金的点火温度进行了测定,发现点火过程的温度范围为 1653~1857  $^{\circ}\text{C}$ ,点火温度大约在 1680  $^{\circ}\text{C}$ 。然而,目前报道的文章大部分只是研究了 Ti-6Al-4V 的法向光谱发射率变化情况,关于方向发射率的报道较少。因此系统地研究在不同测量角度下,温度、波长、以及氧化程度对 Ti-6Al-4V 发射率的影响,对提高其辐射测温精度具有重要意义。针对方向光谱发射率的测量,国内外已经提出多种方案并成功搭建了相关的测量设备,例如,2006年 Del Campo 等<sup>[15]</sup>搭建了在受控条件下进行红外光谱方向发射率测量的新型实验设备。2012年 Rydzek 等<sup>[16]</sup>优化了一套方向发射率测量装置,测量角度为  $0^{\circ}\sim 85^{\circ}$ ,在不同的检测角度给出了各种材料的测量结果。2018年 Wang 等<sup>[9]</sup>设计了真空和氧化气氛下的实验装置,研究了氧化条件下的 304 不锈钢在 800~1100  $^{\circ}\text{C}$  范围内的光谱(2~6  $\mu\text{m}$ )和方向( $0^{\circ}\sim 86^{\circ}$ )发射率,并在  $75^{\circ}$  角度下建立了发射率测温模型。

本文利用傅里叶转换红外(FTIR)光谱仪搭建了方向光谱发射率测量装置,测量了 Ti-6Al-4V 合金在氮气环境及氧化条件下的方向发射率,其中,温度范围为 573~953 K,波长范围为 3~20  $\mu\text{m}$ ,测量角度为  $0^{\circ}\sim 84^{\circ}$ 。与已报道的工作相比,本文在更宽的波段内系统地研究了 Ti-6Al-4V 合金方向发射率,详细分析了方向变化对其光谱发射率的影响,发现在波长小于 10.3  $\mu\text{m}$  的短波处,Ti-6Al-4V 合金发射率在  $0^{\circ}\sim 84^{\circ}$  下随测量角度变化呈现出类似绝缘体的特性,而在大于 10.3  $\mu\text{m}$  的长波处,其变化呈现出类似金属的特性。该研究丰富了钛合金方向光谱发射率数据库,并为钛合金辐射测温技术提供了

数据支持。

## 2 基本原理

### 2.1 测量原理

方向光谱发射率  $\epsilon(\lambda, \theta, T)$  被定义为在同一温度  $T$ 、同一波长  $\lambda$  下,沿物体辐射表面法向成  $\theta$  角的辐射亮度  $L_s(\lambda, \theta, T)$  与黑体在法向发出的辐射亮度  $L_b(\lambda, T)$  之比,即

$$\epsilon(\lambda, \theta, T) = \frac{L_s(\lambda, \theta, T)}{L_b(\lambda, T)}, \quad (1)$$

式中:s 表示样品;b 表示黑体。黑体的辐射亮度  $L_b(\lambda, T)$  可表示为

$$L_b(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T) - 1]}, \quad (2)$$

式中: $c_1$  是第一辐射常数, $c_1 = 3.7145 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2}$ , $c_2$  是第二辐射常数, $c_2 = 1.43879 \times 10^8 \mu\text{m}^4 \cdot \text{K}$ 。对于实际测量过程而言,光谱仪测量的黑体信号  $S_b(\lambda, T)$  为

$$S_b(\lambda, T) = R(\lambda)L_b(\lambda, T) + S_0(\lambda), \quad (3)$$

式中: $R$  表征傅里叶光谱仪的光谱响应; $S_0$  为背景辐射。将参考黑体炉分别设定为两个不同的温度  $T_1$  和  $T_2$ <sup>[17]</sup>,可得

$$R(\lambda) = \frac{S_b(\lambda, T_1) - S_b(\lambda, T_2)}{L_b(\lambda, T_1) - L_b(\lambda, T_2)}, \quad (4)$$

$$S_0(\lambda) = S_b(\lambda, T_1) - R(\lambda)L_b(\lambda, T_1). \quad (5)$$

样品的辐射亮度可以表示为

$$L_s(\lambda, \theta, T) = \frac{S_s(\lambda, \theta, T) - S_0(\lambda)}{R(\lambda)}. \quad (6)$$

### 2.2 实验设备

实验装置如图 1 所示,主要分为以下 5 个部分:样品室、黑体炉(样品炉)、光学系统、旋转台、带有 DLATGS 探测器的傅里叶红外光谱仪。通过比例-积分-微分(PID)温控器实现样品的控温,并在样品背面镶嵌热电偶测量样品的真实温度。在样品炉下面设有一个旋转台,使样品中心位于旋转台中心位置,步进电机带动旋转台旋转,完成不同角度的测量。当样品温度在设定的温度下趋于稳定时,样品或参考黑体发出的辐射由旋转的离轴抛物面镜采集,并经抛物面镜反射进入傅里叶红外光谱仪后被探测器接收。

### 2.3 实验过程

待测样品为 11 块直径为 50 mm,厚度为 2 mm 的 Ti-6Al-4V 合金样品,用 320,800,1200,1500 目的砂纸依次在抛光机上进行抛光,使所有样品粗糙

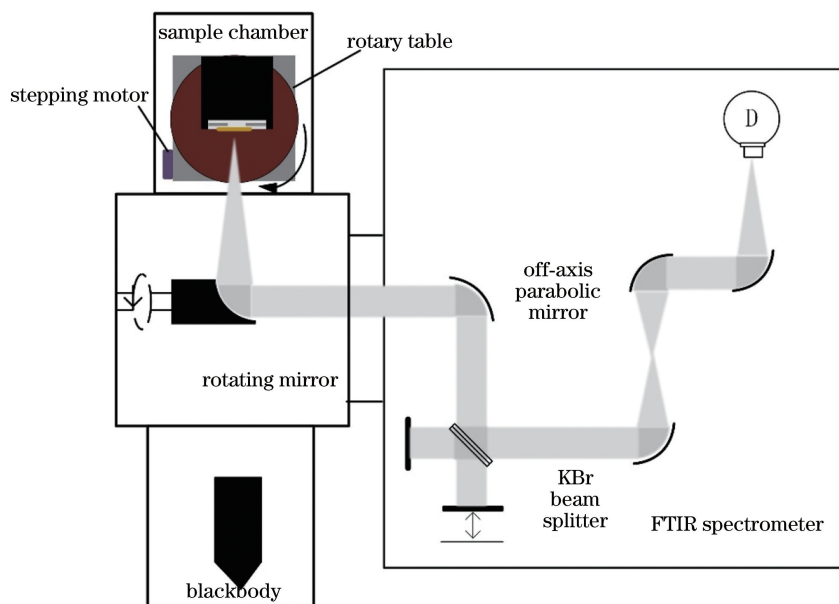


图 1 方向光谱发射率测量设备

Fig. 1 Directional spectral emissivity measuring equipment

度保持一致,采用丙酮和无水乙醇清洗样品表面的油污和杂质,然后用蒸馏水清洗干净,烘干后在真空马弗炉中退火处理 1 h,冷却后备用。首先随机选取一块样品夹在样品炉上,吹入氮气。在温控器上设定加热炉温度,待样品背部的热电偶温度达到设定温度,并稳定 30 min 后,转动步进电机开始测量,每  $2^\circ$  测量一次,直至  $84^\circ$ ,然后再转动抛物面镜测量样品炉法向的辐射亮度。按照上述步骤依次测量出样品在温度 573,623,673,723,773,823 K 时的辐射信号。其次将另外 10 块样品依次加热到 953 K,10 块样品的测量角度分别设置为  $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 84^\circ$ 。待样品温度稳定后,测量样品在各个角度下的光谱发射率,然后停止吹入氮气,并按照同样的流量吹入空气,每隔 5 min 测量一次,直到测量的发射率曲线不再随时间发生改变。测量完成后将上述样品重新打磨,并按照上述步骤重复测量三次。

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 波长的影响

图 2 给出 Ti-6Al-4V 合金在  $0^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 84^\circ$  测量角度下的光谱发射率随波长的变化情况。由图可知,在不同测量角度下,波长对 Ti-6Al-4V 合金的发射率影响很大,尤其是当测量角度超过  $70^\circ$  时发射率趋势随着波长增加发生改变。如图 2(a)~(e)所示,当测量角度为  $0^\circ$  时的光谱发射

率在短波处略小于,而在长波处略大于  $50^\circ$  的光谱发射率。当测量角度从  $50^\circ$  逐渐增至  $70^\circ$  时,发射率值整体逐渐上升,并且发射率曲线随波长的增加整体呈下降的趋势。随波长的增加,发射率曲线整体呈下降的趋势。 $70^\circ$  与  $60^\circ$  的发射率曲线间隔随着波长的增加越来越大,说明发射率值在  $70^\circ$  时在长波处的增加速率比在短波处的增加速率高。当测量角度升至  $80^\circ \sim 84^\circ$  时,发射率值整体急剧下降,在短波处的下降速率高于长波处的下降速率,甚至在  $84^\circ$  时发射率几乎接近于 0,使得整体趋势不同于  $0^\circ \sim 70^\circ$ ,而是随着波长的增加呈上升趋势。发射率在  $4.3 \mu\text{m}$  和  $6.3 \mu\text{m}$  波长处产生了强烈震荡,这是因为辐射光信号在传播过程中受到空气中水和二氧化碳吸收作用的影响<sup>[18]</sup>。当温度为 823 K 时,如图 2(f) 所示,在  $12 \mu\text{m}$  处出现了一个小波峰,随着测量角度的增加,波峰越来越明显,这可能是由于样品在测量的过程中表面发生了氧化所致。

#### 3.2 角度的影响

从图 2 可看出,  $80^\circ$  时的光谱发射率曲线与  $0^\circ \sim 60^\circ$  时的曲线在  $10.3 \mu\text{m}$  附近有一个交点。这说明,在波长小于  $10.3 \mu\text{m}$  和大于  $10.3 \mu\text{m}$  的两个波段内, Ti-6Al-4V 合金随测量角度变化将出现不同的变化规律。为了系统地研究测量角度对光谱发射率的影响,图 3 分别在  $3.5, 10.3, 20.0 \mu\text{m}$  波长下给出了 Ti-6Al-4V 合金在 573~773 K 范围随测量角度变化的光谱发射率。

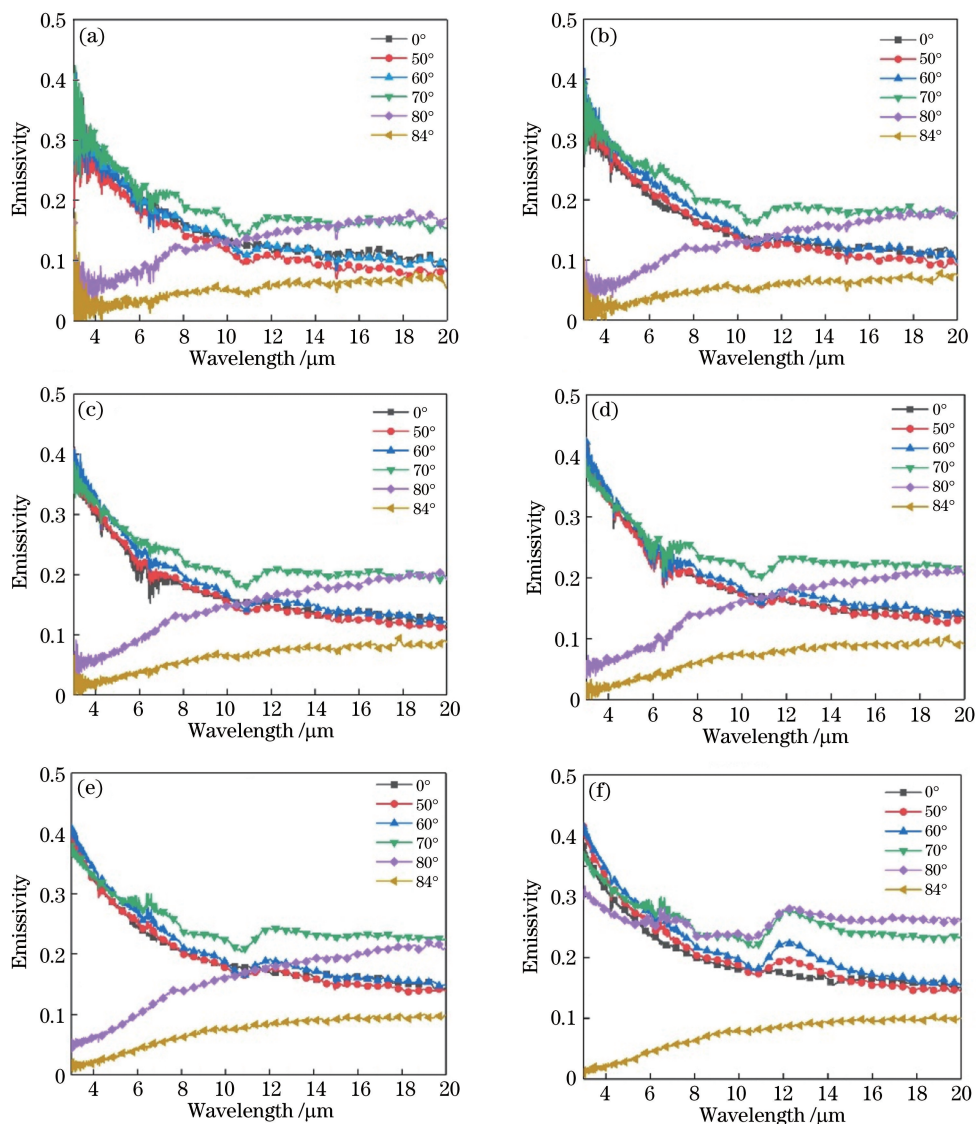


图 2 不同温度和测量角度下波长对钛合金的方向光谱发射率的影响。(a) 573 K; (b) 623 K; (c) 673 K; (d) 723 K; (e) 773 K; (f) 823 K

Fig. 2 Effect of wavelength on the spectral emissivity of Ti-6Al-4V alloy at different temperatures and detection angles. (a) 573 K; (b) 623 K; (c) 673 K; (d) 723 K; (e) 773 K; (f) 823 K

从图 3(a)~(c) 可以发现, 当温度为 573~673 K 时, 发射率在 3.5  $\mu\text{m}$  处随测量角度变化的规律不明显, 这是因为在较低温度下, 系统的信噪比相对较低, 使得测量结果具有较大的不确定度。从整体上来看, 当波长为 3.5  $\mu\text{m}$  时, 发射率随着测量角度缓慢增加, 在 60° 达到最大值, 当角度超过 70° 后, 发射率急剧降低, 甚至接近于 0, 随测量角度变化规律呈现出类似绝缘体特性。当波长为 20.0  $\mu\text{m}$  时, 发射率在 0°~10° 逐渐减少, 随角度增加发射率开始逐步上升, 直到 70° 达到最大值, 随着测量角度的继续增加, 发射率开始逐渐降低, 变化规律呈现出类似金属的特性, 这一现象与 Del Campo 和 Rydzek<sup>[15-16]</sup>

等得到的结论一致。然而当温度为 823 K 时, 如图 3(f) 所示, 钛合金的发射率在 10.3  $\mu\text{m}$  和 20.0  $\mu\text{m}$  处, 角度为 80° 时达到了最大值, 根据参考文献, 钛合金的发射率在 823 K 随着氧化时间的增加发生了轻微变化<sup>[13]</sup>。因此, 图中该现象很有可能是因为该样品在 823 K 发生了轻微的氧化所致。

### 3.3 温度的影响

由于钛合金的电阻率随温度的升高而增大<sup>[19]</sup>, 根据哈根-鲁本斯关系<sup>[20]</sup>, 法向发射率  $\epsilon$  和电阻率  $r_e$ 、波长  $\lambda$  之间的关系满足

$$\epsilon = 36.5 \left( \frac{r_e}{\lambda} \right)^{\frac{1}{2}} - 464 \frac{r_e}{\lambda}, \quad (7)$$



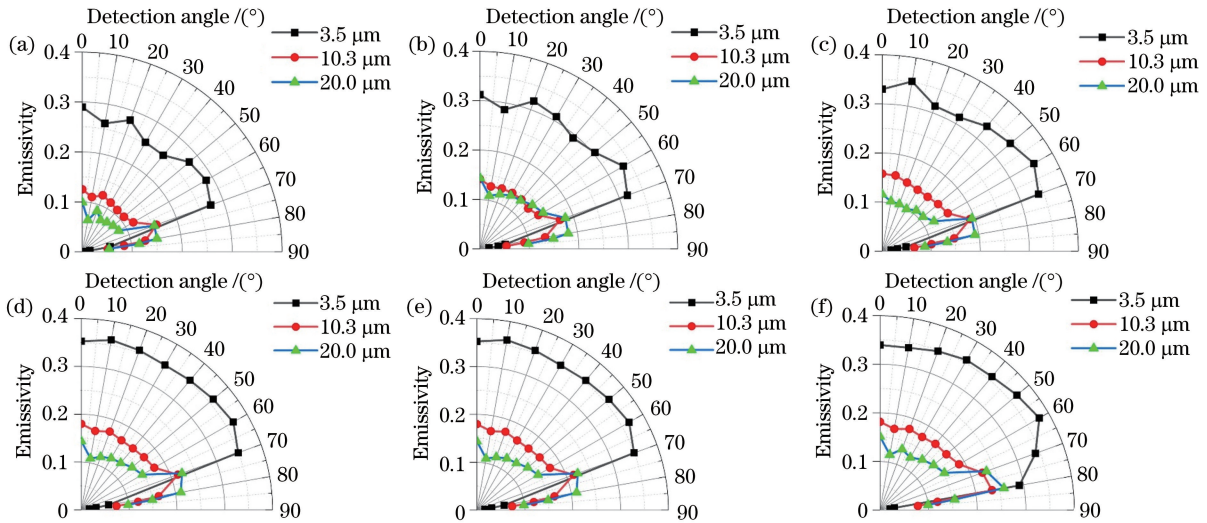


图 3 不同温度下测量角度对 Ti-6Al-4V 合金的光谱发射率的影响。(a) 573 K;(b) 623 K;(c) 673 K; (d) 723 K;(e) 773 K;(f) 823 K

Fig. 3 Effect of detection angle on spectral emissivity of Ti-6Al-4V alloy at different temperatures. (a) 573 K; (b) 623 K; (c) 673 K; (d) 723 K; (e) 773 K; (f) 823 K

式中： $r_e$  为电阻率，单位为  $\Omega \cdot \text{cm}$ ； $\lambda$  为波长，单位为  $\mu\text{m}$ 。当默认波长不变时，从(7)式可以看出，发射率  $\epsilon$  是关于电阻率的一元二次函数，其对称轴为

$$r_{es} = \left(\frac{36.5}{464}\right)^2 \lambda. \quad (8)$$

当电阻率大于 0，小于  $r_{es}$  时，发射率随电阻率的增大而增大。根据已报道的钛合金的电阻率数据，可知钛合金在 200~2000 K 时的电阻率变化范围为  $0.7 \times 10^{-4} \sim 1.3 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ <sup>[21]</sup>，远小于  $3 \sim 20 \mu\text{m}$

波段内的  $r_{es}$ ，因此在该波长范围和温度范围内，钛合金的发射率应随温度的升高而增大。图 4 给出发射率在  $0^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 84^\circ$  下随温度变化的光谱图，随着温度的升高，Ti-6Al-4V 合金在入射角为  $0^\circ \sim 84^\circ$  的发射率在 573~773 K 范围内随温度的升高而增大，说明实验结果符合金属辐射理论。另外，将得到的法向发射率的数据与已报道文献中的数据作对比，发现测量结果与文献中发射率随温度的变化趋势一致<sup>[12]</sup>。如图 4 所示：当测量角度为

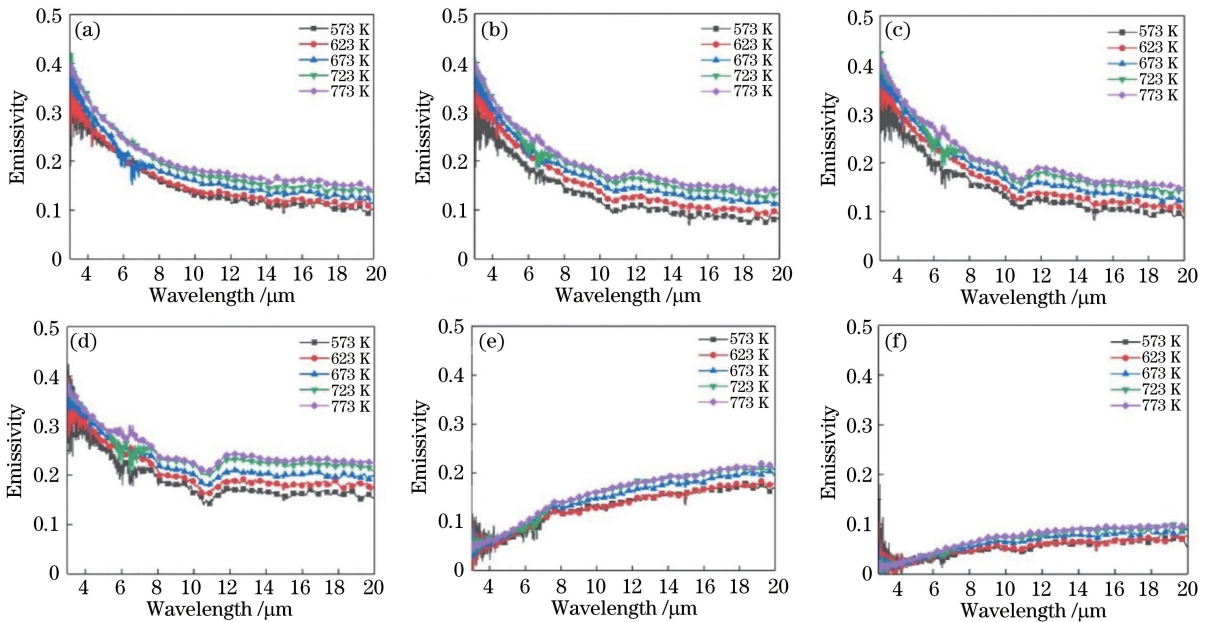


图 4 不同测量角度下温度对 Ti-6Al-4V 合金光谱发射率的影响。(a)  $0^\circ$ ;(b)  $50^\circ$ ;(c)  $60^\circ$ ;(d)  $70^\circ$ ;(e)  $80^\circ$ ;(f)  $84^\circ$

Fig. 4 Effect of temperature on spectral emissivity of Ti-6Al-4V alloy under different angles. (a)  $0^\circ$ ; (b)  $50^\circ$ ; (c)  $60^\circ$ ; (d)  $70^\circ$ ; (e)  $80^\circ$ ; (f)  $84^\circ$

0°~70°时, Ti-6Al-4V 合金发射率在 8~14 μm 波段内,随温度的升高均匀增大,随着测量角度增加,相邻温度点发射率曲线的间隔缓慢增加;当测量角度达到 80°时,随着温度的升高,发射率值整体缓慢增长,并随测量角度增加,发射率曲线在不同温度之间的间隔逐渐减小,与 0°~70°时相反。

### 3.4 氧化的影响

从图 2(f)发现,氧化对方向光谱发射率产生很大影响。为了探究氧化对方向发射率的影响,本研究测量了不同测量角度下 Ti-6Al-4V 合金在 953 K 温度下随氧化时间变化的光谱发射率,结果

如图 5 所示,在不同测量角度下,材料随着加热时间的增加逐渐被氧化,氧化过程中的发射率随着发射率值升高呈现出强烈的波动变化,且随着氧化时间的增加,峰值逐渐向长波移动,这与未氧化过程中的发射率趋势有很大的不同。这是因为在氧化过程中,随着表面氧化膜厚度的增长,辐射光信号会在样品表面发生干涉效应,导致光谱发射率出现峰值,且干涉峰会随氧化时间增长而向长波移动<sup>[22-24]</sup>。为了更清晰地观察其变化规律,图 6 给出了波长为 20.0 μm 时,发射率分别在不同氧化时间下随测量角度变化的极坐标图。如图 6 所示,随着氧化程度

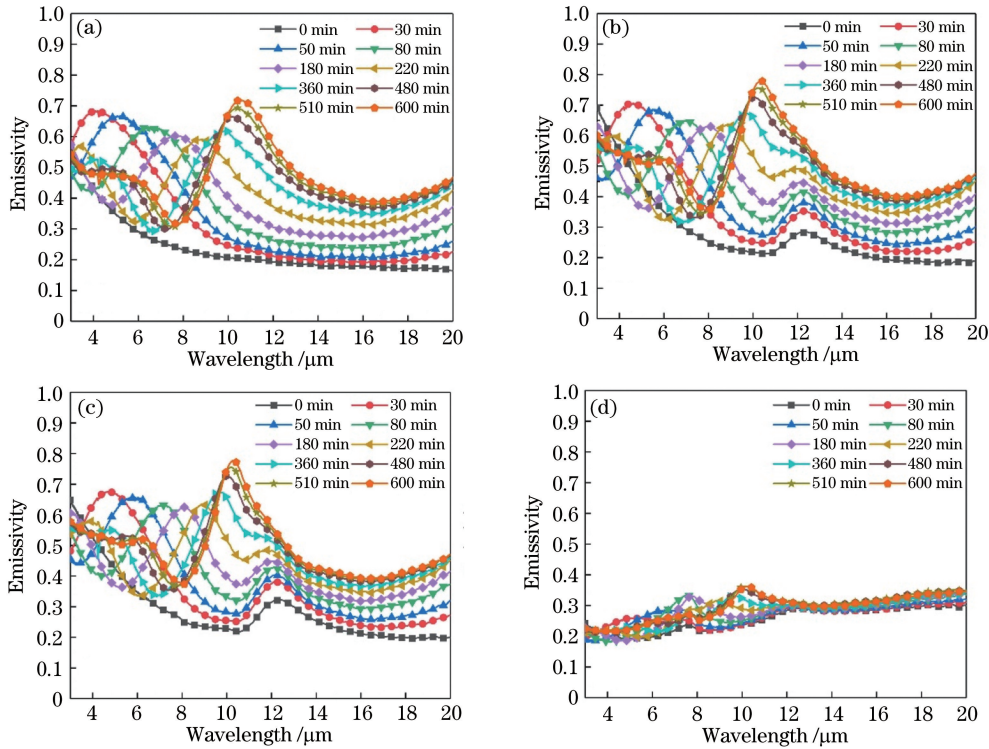


图 5 不同测量角度下氧化时间对 Ti-6Al-4V 合金的光谱发射率的影响。(a) 0°;(b) 50°;(c) 60°;(d) 70°  
Fig. 5 Effect of oxidation time on the spectral emissivity of Ti-6Al-4V alloy at different detection angles. (a) 0°; (b) 50°; (c) 60°; (d) 70°

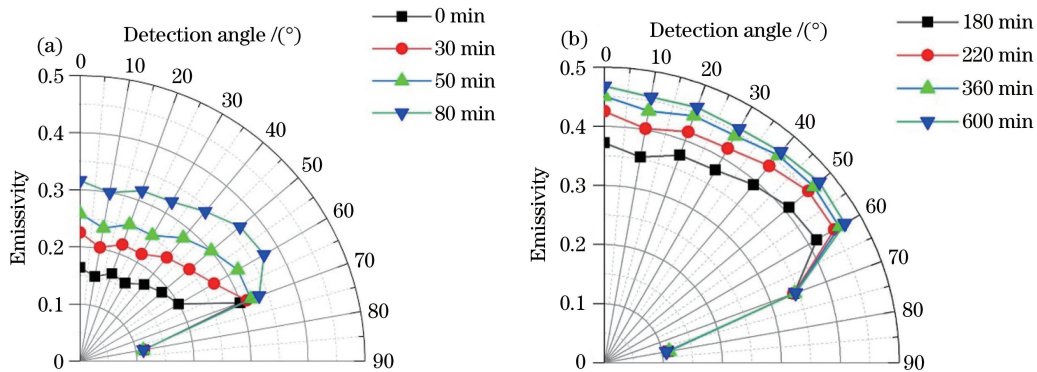


图 6 20.0 μm 波长下不同氧化时间对 Ti-6Al-4V 合金的光谱发射率的影响。(a) 0~80 min;(b) 180~600 min  
Fig. 6 Effect of different oxidation time on the spectral emissivity of Ti-6Al-4V alloy at 20.0 μm. (a) 0~80 min; (b) 180~600 min

逐渐加深,发射率在  $60^\circ$  时达到最大值,当测量角度继续增加,发射率值明显减小,该现象与钛合金的发射率在短波情况随角度变化的趋势相似,这说明 Ti-6Al-4V 合金在氧化过程中非金属特性在长波下随氧化时间增长越来越明显。

## 4 结 论

利用傅里叶红外光谱仪自主搭建了方向发射率测量装置,测量了 Ti-6Al-4V 合金在  $573\sim 823$  K 温度,波长范围为  $3\sim 20\ \mu\text{m}$  时不同测量角度 ( $0^\circ\sim 84^\circ$ ) 下的方向光谱发射率,并系统地分析了在不同测量角度下,温度、波长、以及氧化程度对 Ti-6Al-4V 发射率的影响。结果表明:在波长小于  $10.3\ \mu\text{m}$  的短波处,Ti-6Al-4V 合金在  $0^\circ\sim 84^\circ$  的发射率变化规律呈现出类似绝缘体的特性;而在大于  $10.3\ \mu\text{m}$  的长波处变化规律呈现出类似金属的特性。当温度为  $573\sim 773$  K 时,Ti-6Al-4V 合金的发射率在  $0^\circ\sim 84^\circ$  随着温度的升高而增大。当测量角度从  $0^\circ$  逐渐增加至  $70^\circ$  时,发射率值整体逐渐上升,随着波长增加发射率曲线整体呈现下降的趋势,当测量角度升至  $80^\circ\sim 84^\circ$  时,发射率值整体急剧下降但随着波长的增加呈上升趋势。Ti-6Al-4V 合金在  $953$  K 下发生氧化时,样品的光谱发射率值明显升高,随波长呈现出强烈的波动变化,并且干涉效应形成的干涉峰会随氧化时间增长向长波移动。另外,随着氧化过程的进行,钛合金光谱发射率在长波处将呈现出越来越明显的非金属特性。

## 参 考 文 献

- [1] Squillace A, Prisco U, Ciliberto S, et al. Effect of welding parameters on morphology and mechanical properties of Ti-6Al-4V laser beam welded butt joints [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(2): 427-436.
- [2] Sun S, Brandt M, Dargusch M S. Machining Ti-6Al-4V alloy with cryogenic compressed air cooling [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, 50(11): 933-942.
- [3] Vrancken B, Thijs L, Kruth J P, et al. Heat treatment of  $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$  produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, 541: 177-185.
- [4] Yadroitsev I, Krakhmalev P, Yadroitsava I. Selective laser melting of  $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$  alloy for biomedical applications: temperature monitoring and microstructural evolution [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 583: 404-409.
- [5] Peters M, Kumpfert J, Ward C H, et al. Titanium alloys for aerospace applications [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2003, 5(6): 419-427.
- [6] Sui N, Cao J X, Huang X, et al. Effect of composition on microstructure and mechanical properties of TA15 titanium alloy [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2019, 39(1): 48-54.  
隋楠, 曹京霞, 黄旭, 等. 合金成分对 TA15 钛合金组织及力学性能的影响 [J]. *航空材料学报*, 2019, 39(1): 48-54.
- [7] Kurosawa R, Inoue T, Baba Y Y, et al. Normal spectral emissivity measurement of molten copper using an electromagnetic levitator superimposed with a static magnetic field [J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(1): 015603.
- [8] Shi C J, Daun K J, Wells M A. Spectral emissivity characteristics of the Usibor © 1500P steel during austenitization in argon and air atmospheres [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 91: 818-828.
- [9] Wang P, Hu Z W, Xie Z, et al. A new experimental apparatus for emissivity measurements of steel and the application of multi-wavelength thermometry to continuous casting billets [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(5): 054903.
- [10] Adibekyan A, Monte C, Kehrt M, et al. *International Journal of Thermophysics*, 2015, 36(2/3): 283-289.
- [11] Niu C Y, Qi H, Ren Y T, et al. Apparent directional spectral emissivity determination of semitransparent materials [J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(4): 047801.
- [12] Zhang L, Dai J, Zhang Y, et al. A method to identify material based on spectrum analyses [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8759: 87590C.
- [13] Li L F, Yu K, Zhang K H, et al. Study of Ti-6Al-4V alloy spectral emissivity characteristics during thermal oxidation process [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 101: 699-706.
- [14] Wang C, Hu J, Wang F, et al. Measurement of Ti-6Al-4V alloy ignition temperature by reflectivity detection [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(4): 044902.
- [15] Del Campo L, Pérez-Sáez R B, Esquisabel X, et al. New experimental device for infrared spectral directional emissivity measurements in a controlled environment [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(11): 113111.
- [16] Rydzek M, Stark T, Arduini-Schuster M, et al.

- designed apparatus for measuring the angular dependent surface emittance in a wide wavelength range and at elevated temperatures up to 1400° C [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2012, 395: 012152.
- [17] Zhang K H, Yu K, Liu Y F, et al. An improved algorithm for spectral emissivity measurements at low temperatures based on the multi-temperature calibration method[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 114: 1037-1044.
- [18] Zhao B L, Li L F, Zhang K H, et al. Study on the changes of emissivity of basic copper carbonate in the decomposition process [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 139: 641-647.
- [19] Basak D, Kattner U R, McClure J L, et al. Application of laser polarimetry to the measurement of specific heat capacity and enthalpy of the alloy 53Nb-47Ti (mass%) in the temperature range 1600 to 2000 K by a millisecond-resolution pulse heating technique [ J ]. *International Journal of Thermophysics*, 2000, 21(4): 913-926.
- [20] Babrekar H A, Jejurikar S M, Jog J P, et al. Low thermal emissive surface properties of ZnO/polyimide composites prepared by pulsed laser deposition [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(6): 1824-1828.
- [21] Pavičić D Z, Maglić K D. Specific heat and electrical resistivity of 53% niobium-47% titanium alloy measured by subsecond calorimetric technique [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2002, 23 (5): 1319-1325.
- [22] Kumar S, Sankara Narayanan T S N, Ganesh Sundara Raman S, et al. Thermal oxidation of Ti6Al4V alloy: microstructural and electrochemical characterization [ J ]. *Materials Chemistry and Physics*, 2010, 119(1/2): 337-346.
- [23] Iuchi T, Furukawa T, Wada S. Emissivity modeling of metals during the growth of oxide film and comparison of the model with experimental results [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(13): 2317-2326.
- [24] del Campo L, Pérez-Sáez R B, Tello M J. Iron oxidation kinetics study by using infrared spectral emissivity measurements below 570 °C[J]. *Corrosion Science*, 2008, 50(1): 194-199.