

文章编号:1000-6893(2010)11-2139-07

# 金属光谱发射率的仿真与分析

柯维娜, 朱定强, 蔡国飙

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

## Simulation and Analysis of Spectral Emissivity of Metals

Ke Weina, Zhu Dingqiang, Cai Guobiao

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**摘要:** 在研究物体的辐射特性时,需要用到物体表面的发射率等物性参数作为输入参数。实验测量发射率数据的适用范围受到一定限制,不能满足所有情况的数值仿真需要。从电磁波传播的基础理论着手,结合金属自由电子气模型,考虑光学参数的色散关系和空气入射到金属内折射角的复数关系,并在随机模拟金属粗糙表面的基础上,模拟并讨论了不同影响因素下实际金属表面的光谱发射率变化趋势。将本文的数值仿真与其他相关的实验和仿真数据进行对比,结果表明,该方法从本质理解并计算金属实际表面光谱发射率数值,结果可信,并具有普遍适用性。

**关键词:** 金属材料; 发射率; 光学参数; 粗糙表面; 数值模拟

**中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A

**Abstract:** The study of the radiation characteristics of an object requires several physical property parameters of the object, including its emissivity. Test data are usually limited by test circumstances and can not meet the requirements for emissivity numeric simulation. This article creates an academic computational method. First, it explores the theory of electromagnetic waves transmitting in metals combined with a free-electron model of metals. Then it discusses the dispersive relation of optical constants and the complex refractivity in the light incidencing from air to metal, and performs a random simulation of a rough metal surface. Furthermore, it discusses the various factors which affect the regular law of metal spectral emissivity. Compared with similar tests and numeric data, this method for computation of any kind of metal emissivity is credible and widely applicable.

**Key words:** metal material; emissivity; optic parameter; rough surface; numeric simulation

空间目标探测技术随着空间研究活动的深入而受到越来越多的重视,利用物体的红外辐射特性探测目标是一种非常有效的方法。侦查与隐身的对抗逐渐成为影响现代军事战争发展的重要因素,基于红外波段的目标识别和隐身技术都需要精确研究目标的辐射特性。影响目标红外辐射特性的一个重要参数即材料的红外发射率。

材料的发射率除与观测波长、观测方向及立体角相关外,还受到材料种类、温度、样品形貌特征、化学特征、物理学结构特征以及样品厚度等材料性质因素的影响<sup>[1]</sup>。在材料发射率测量实验中,只能得到特定实验条件下的物体的发射率,很难真实反映众多目标实际状态下的发射率,从而影响辐射特性的精确定量研究。国内开展的发射率数值模拟相对较少,在已开展的研究中,没有考

虑目标表面的真实物面信息<sup>[2]</sup>,或者仅研究一维粗糙表面的发射率<sup>[3]</sup>,同时需要测量反射率作为初始输入数据<sup>[4]</sup>,仍具有一定的物理和应用局限性。

真实物体的表面具有一定的粗糙度,在航空航天领域,大部分金属制品均由机械加工完成。D. J. Whitehouse 等<sup>[5]</sup>在 1970 年的实验结果表明,许多工程表面的高度分布都满足高斯分布,其表面轮廓具有指数自相关函数关系,国内研究指出如果把粗糙表面的粗糙度分布看成一个随机过程,其完整的统计描述应当包括概率分布密度(高度分布)函数和自相关函数<sup>[6]</sup>。Y. Z. Hu 等<sup>[7]</sup>引入 Johnson 转换系统并利用二维数字滤波技术实现三维高斯和非高斯表面的模拟。

## 1 金属理论发射率计算模型

### 1.1 金属内电磁传播理论

研究物质辐射性质的理论出发点,即描述电  
© 航空学报杂志社 http://hkxb.buaa.edu.cn

磁场和物质相互作用的麦克斯韦方程组,基于介质中的麦克斯韦方程组和基本向量变换关系可以得到波矢的方程为<sup>[8]</sup>

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{k} = \omega^2 \mu_0 \boldsymbol{\mu} \boldsymbol{\epsilon}_0 \boldsymbol{\epsilon} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{k} = \mathbf{k}_{re} + i\mathbf{k}_{im}$ 为用复数矢量描述的波矢, $\mathbf{k}_{re}$ 和 $\mathbf{k}_{im}$ 分别为波矢的实部和虚部; $\omega$ 为介质中传播电磁波的角频率, $\omega = 2\pi c/\lambda$ ,其中 $\lambda$ 为入射光波长, $c$ 为光在真空中的传播速度; $\boldsymbol{\epsilon}$ 为介质的复介电常数,其表达式为 $\boldsymbol{\epsilon} = \boldsymbol{\epsilon}_{re} + i\boldsymbol{\epsilon}_{im}$ , $\boldsymbol{\epsilon}_{re}$ 和 $\boldsymbol{\epsilon}_{im}$ 分别为复介电常数的实部和虚部; $\boldsymbol{\mu}$ 为介质的磁导率; $\boldsymbol{\epsilon}_0$ 和 $\boldsymbol{\mu}_0$ 分别为真空中的介电常数和磁导率。

金属的复折射率定义为 $\mathbf{n} = n + i\kappa$ ,其中 $n$ 和 $\kappa$ 是固体光学性质的基本参数,分别为物体的实折射率和消光系数。当平面光波垂直入射时,应用广义的麦克斯韦关系,得到金属的基本光学常数折射率和消光系数与金属介电常数之间的关系,表达式分别为<sup>[8]</sup>

$$\left. \begin{aligned} n(\omega) &= \pm \sqrt{\frac{\sqrt{\boldsymbol{\epsilon}_{re}^2(\omega) + \boldsymbol{\epsilon}_{im}^2(\omega)} + \boldsymbol{\epsilon}_{re}(\omega)}{2}} \\ \kappa(\omega) &= \pm \sqrt{\frac{\sqrt{\boldsymbol{\epsilon}_{re}^2(\omega) + \boldsymbol{\epsilon}_{im}^2(\omega)} - \boldsymbol{\epsilon}_{re}(\omega)}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

当角频率 $\omega$ 的单色平面电磁波入射到金属表面时,电场振幅以波矢虚部 $\mathbf{k}_{im}$ 指数的形式衰减。由式(1)可知,振幅的衰减幅度决定于入射光波频率和介质的介电常数和磁导率。

## 1.2 金属自由电子气模型

金属处于各种频率的电磁场作用中,自由电子的运动状态改变导致物理特性发生变化。金属自由电子气模型是经典的洛伦兹理论的谐振子运动方程<sup>[9]</sup>当谐振子固有频率为零时的特殊情况。应用洛伦兹理论中固体的复介电常数的实部和虚部的函数关系,并考虑金属自由电子和带间跃迁分别对光的吸收作用<sup>[9]</sup>,得到金属的介电常数的实部和虚部可分别表示为

$$\left. \begin{aligned} \boldsymbol{\epsilon}_{re}(\omega) &= 2 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \Gamma^2} + \frac{\omega_p^2(\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \Gamma^2 \omega^2} \\ \boldsymbol{\epsilon}_{im}(\omega) &= \frac{\omega_p^2 \Gamma / \omega}{\omega^2 + \Gamma^2} + \frac{\omega_p^2 \Gamma \omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \Gamma^2 \omega^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $\omega_0$ 为谐振子固有频率; $\Gamma = Ne^2/\sigma_0 m$ 为衰减速率, $e$ 为电子电荷数, $N$ 为单位体积内自由电子数密度, $\sigma_0$ 为金属在静电场中电导率; $m$ 为

电子静止质量; $\omega_p = \sqrt{Ne^2/m\epsilon_0}$ 为等离子体振荡频率。

## 1.3 金属界面的反射

当一束光从一种折射率为 $n_1$ 的介质,沿着一定方向以 $\theta_{in}$ 角度入射到折射率为 $n_2$ 、无限大且均匀的光滑金属表面,发生反射和透射。假设介质 $n_1$ 和金属之间的界面无厚度,并且无界面电荷和电流。由反射率 $R$ 定义和电场及磁场的振幅边界条件,得到考虑偏振情况的反射率表达式为<sup>[8]</sup>

$$\left. \begin{aligned} R_P &= \frac{(n_2 \cos \theta_{in} - n_1 \cos \theta_t)^2 + (\kappa_2 \cos \theta_{in} - \kappa_1 \cos \theta_t)^2}{(n_2 \cos \theta_{in} + n_1 \cos \theta_t)^2 + (\kappa_2 \cos \theta_{in} + \kappa_1 \cos \theta_t)^2} \\ R_N &= \frac{(n_2 \cos \theta_t - n_1 \cos \theta_{in})^2 + (\kappa_2 \cos \theta_t - \kappa_1 \cos \theta_{in})^2}{(n_2 \cos \theta_t + n_1 \cos \theta_{in})^2 + (\kappa_2 \cos \theta_t + \kappa_1 \cos \theta_{in})^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $\theta_{in}$ 为入射角; $\theta_t$ 为折射角; $n_1$ 和 $\kappa_1$ 分别为折射率为 $n_1$ 的介质的折射率和消光系数; $n_2$ 和 $\kappa_2$ 分别为折射率为 $n_2$ 的介质的折射率和消光系数;下标P和N分别表示水平和垂直两种偏振情况的反射率。

当光从空气入射到金属表面时, $n_1 = 1, \kappa_1 = 0$ ,根据基尔霍夫关系,在本文计算不考虑偏振情况下,光谱发射率计算公式为

$$\xi = \frac{2n_2 \frac{\cos \theta_t}{\cos \theta_{in}}}{\left(n_2 + \frac{\cos \theta_t}{\cos \theta_{in}}\right)^2 + \kappa_2^2} + \frac{2n_2 \frac{\cos \theta_{in}}{\cos \theta_t}}{\left(n_2 + \frac{\cos \theta_{in}}{\cos \theta_t}\right)^2 + \kappa_2^2} \quad (5)$$

应用菲涅耳折射定律,则折射角和入射角之间的关系为

$$n_1 \sin \theta_{in} = n_2 \sin \theta_t \quad (6)$$

在实际问题中,空气的复折射率为实数,即 $n_1 = n_1 = 1$ ,但金属的折射率 $n_2$ 为复数,因此式(6)中的 $\theta_t$ 应该为复折射角,但光线在金属中传播为实路径,因此,不能将式(6)中的折射角 $\theta_t$ 简单代入式(5)中,具体金属内的实折射角计算公式参见文献[10]。

将实折射角、金属介质折射率、消光系数的计算公式代入发射率计算式(5),推导出发射率关于金属物性参数和入射角的函数关系式,再结合光

学常数的色散关系式(2),最终得到金属的光谱方向发射率关于入射波长、入射角度和金属物性参数的函数关系式。

## 2 粗糙表面计算机模拟

为研究金属实际粗糙表面光谱发射率,近似认为在选定的粗糙表面计算区域内,光谱发射率为均一值。将粗糙表面的计算区域视为法线向量和高度都随机分布的若干三角形小面元的集合,在小面元内,近似认为光与面元的相互作用仅有镜反射,同时考虑不同面元间多次反射,对不同小面元的辐射情况进行平均,得到所研究粗糙表面的光谱发射率。

### 2.1 高斯粗糙表面的模拟

将实际粗糙表面的粗糙度分布看成一个随机过程,则完整的统计描述包括粗糙表面高度分布函数和自相关函数。在工程实际中,金属加工工艺会使金属表面形成特定纹理结果。根据所需要模拟表面的特性,拟合测量数据或者进行适当假设,得到所模拟表面的自相关函数,利用傅里叶滤波技术可以得到表面高度具有指定分布的粗糙表面。具体原理及算法详见参考文献[7]。

为研究粗糙表面粗糙度对金属光谱发射率的影响,研究具有指定自相关函数的粗糙表面仿真情况,其自相关函数分别为

$$R(k, l) = \sigma \exp \left\{ -4.5 \left[ \left( \frac{k}{\beta_x} \right)^2 + \left( \frac{l}{\beta_y} \right)^2 \right] \right\} \quad (7)$$

式中: $k, l$ 分别为粗糙表面离散化 $x, y$ 方向上位置坐标; $\sigma$ 为粗糙表面的表面均方根粗糙度; $\beta_x, \beta_y$ 分别为 $x, y$ 方向上的相关长度。定义 $\gamma = \beta_x / \beta_y$ 为模式参数,反映了粗糙表面的各向异性性质;当 $\gamma = 1$ 时,表面各向同性;当 $\gamma \neq 1$ 时,表面各向异性。

### 2.2 遮挡效应

粗糙表面离散小面元具有高度分布起伏特性,且面元法线向量分布服从高斯或非高斯的指定分布,图 1 为随机模拟粗糙表面示意图。从某方向看去,由于高度和法线向量的不同分布特性,导致某些面元间存在相互遮挡效应,将影响辐射发射和在不同面元间吸收,因此对表面方向发射率产生影响,在粗糙表面发射率模拟中,需要考虑

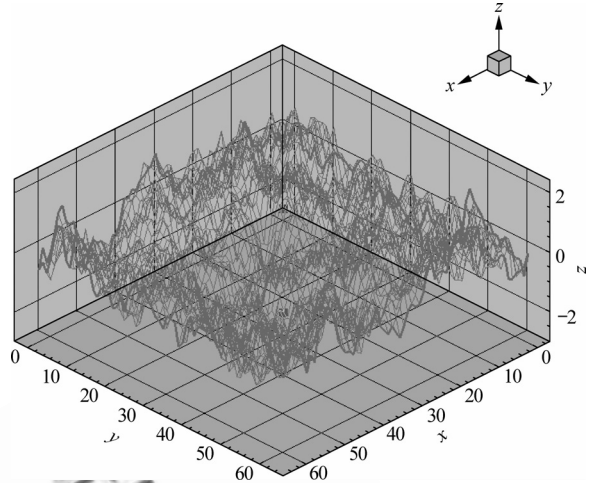


图 1 粗糙表面模拟

Fig. 1 Rough surface simulation

遮挡效应。

判断面元被遮挡的几种方法,如极大极小检验法、Roberts 算法、包含性检验算法等,都是针对多边形,算法较复杂。本文基于粗糙面计算机模拟后将面元离散为三角形,三角形面元各几何向量定义如图 2 所示。

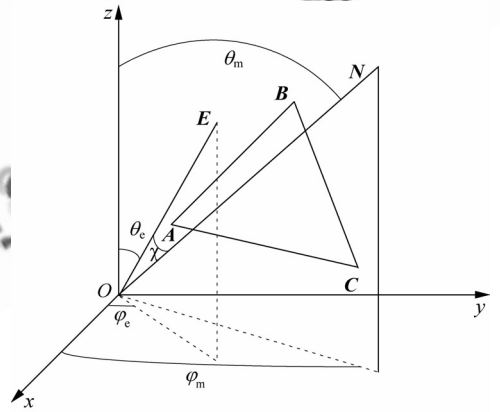


图 2 三角形面元的空间示意图

Fig. 2 Spatial diagram of triangular surface element

采用简单几何投影法,研究遮挡效应,其基本步骤如下:

- (1) 建立以粗糙表面法向为 $z$ 轴的全局坐标系,将粗糙表面离散为三角形面元,并标记每一个面元的 3 点坐标向量 $(A, B, C)$ 和法线向量 $N$ ,确定在全局坐标下的观测方向 $(\varphi_c, \theta_c)$ 。
- (2) 建立观测方向投影面的直角坐标系,观测方向为 $z$ 轴,坐标原点为全局坐标系原点,则投影坐标系坐标轴在全局坐标系下的方向向量分别为

$$\left. \begin{aligned} x &= \{\sin \theta_e \sin \varphi_e, \sin \theta_e \cos \varphi_e, 0\} \\ y &= \{\sin \theta_e \cos \theta_e \cos \varphi_e, \sin \theta_e \cos \theta_e \sin \varphi_e, \\ &\quad -\sin^2 \theta_e\} \\ z &= \{\sin \theta_e \cos \varphi_e, \sin \theta_e \sin \varphi_e, \cos \theta_e\} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

(3) 将面元三角形投影到投影面, 得到面元三角形的投影坐标系坐标  $(A', B', C')$ , 并计算三角形重心向量  $\mathbf{G}$  在投影坐标系的投影长度:

$$d = \mathbf{G} \cdot \mathbf{E} / |\mathbf{E}| \quad (9)$$

向量  $\mathbf{G}$  和  $\mathbf{E}$  的表达式分别为

$$\mathbf{G} = (\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C})/3 \quad (10)$$

$$\mathbf{E} = i \sin \theta_e \cos \varphi_e + j \sin \theta_e \sin \varphi_e + k \cos \theta_e \quad (11)$$

(4) 对每个三角形面元判断是否与观测点向量方向夹角大于  $90^\circ$ , 如果是, 则该面元为自遮挡面元, 否则, 遍历全部三角形, 标记可能遮挡的其他三角形面元。

(5) 在可能遮挡的三角形面元中比较重心的投影长度, 投影长度小的面元遮挡投影长度大的面元, 依据此条件, 再次更新对第  $i$  个三角形面元可能存在遮挡的其他三角形面元。

(6) 在可能存在遮挡的三角形面元中判断是否真正存在遮挡。判断条件即存在相交的边, 或者一个三角形的顶点位于另一个三角形内部。由于最终需要三角形交点信息, 因此, 判断两个三角形是否相交采用判断两个三角形的交点是否位于三角形内部。

(7) 记录交点信息并按逆时针排列, 求得对于第  $i$  个三角形投影面元的遮挡面积。进而求得在该观测方向  $(\varphi_e, \theta_e)$  的遮挡因子  $S_i$ 。

### 3 金属表面发射率模拟

假设  $\bar{\xi}_\lambda(\varphi_e, \theta_e)$  是表面  $A$  的平均方向发射率, 因此表面  $A$  在微元立体角  $d\Omega_e$  内沿着方向  $(\varphi_e, \theta_e)$  内的发射辐射为

$$\int_A \bar{\xi}_\lambda(\varphi_e, \theta_e) M_{\lambda,b}(T_s) \cos \theta_e d\Omega_e dA \quad (12)$$

式中:  $M_{\lambda,b}(T_s)$  为表面在温度  $T_s$  的黑体辐射强度。当每个小面元的发射率为  $\xi_\lambda$  时, 离散表面的发射辐射由下式描述:

$$M_{\lambda,b}(T_s) d\Omega_e \cdot \sum_{i=1}^m \xi_\lambda(\chi) \cos \chi \sec \theta_m S_i \Delta A_i \quad (13)$$

式中:  $\chi$  为发射辐射和单元面的法线的夹角;  $\theta_m$  为

三角形面元法线向量与坐标轴  $z$  的夹角。则由式 (12) 和式 (13) 得到方向  $(\varphi_e, \theta_e)$  上表面的平均光谱发射率为

$$\bar{\xi}_\lambda(\varphi_e, \theta_e) = \sum_{i=1}^m \xi_\lambda(\chi) \cos \chi \sec \theta_m S_i \Delta A_i / \cos \theta_e \int_A dA \quad (14)$$

则在方向  $(\varphi_e, \theta_e)$  上全波长方向发射率为<sup>[11]</sup>

$$\xi(\varphi_e, \theta_e) = \frac{\pi \int_0^\infty \bar{\xi}_\lambda(\varphi_e, \theta_e) M_{\lambda,b}(\lambda, T) d\lambda}{\sigma T^4} \quad (15)$$

## 4 仿真结果及分析

为研究不同情况金属粗糙表面光谱发射率特性, 编程进行计算机仿真, 模拟金属表面发射率与入射角度、波长和粗糙度等参数的变化关系, 文中所列计算温度条件均为常温。

文献[11]中给出 K424 合金镀金抛光面在  $3 \sim 14 \mu\text{m}$  红外波段的平均发射率最低为 0.003, 可以认为该实验情况是金的光滑表面近似, 程序计算给出金光滑表面平均法向发射率 0.0035, 考虑探测器响应与截断影响, 认为两者结果基本符合, 由此验证程序计算金属光滑表面光谱方向发射率的正确性。

### 4.1 光滑金属表面光谱方向发射率

由第 1 节推导可知, 不考虑金属实际表面的粗糙效应,  $\bar{\xi}_\lambda(\varphi_e, \theta_e)$  为金属材料特性参数和发射角度  $\theta_e$  的函数。分别计算不同波长条件下不同金属在表面光滑的理想条件下的光谱方向发射率, 为方便比较, 计算所取参数并不代表真实金属, 其结果如图 3 和图 4 所示。

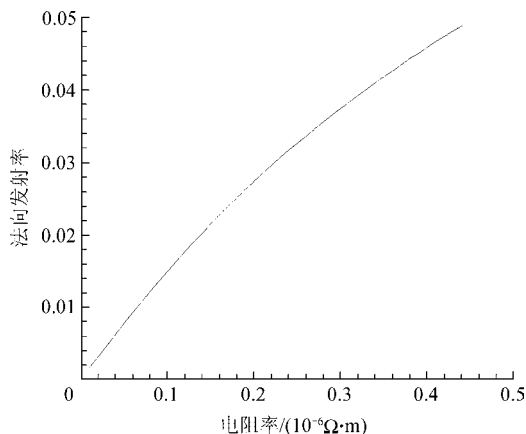


图3 金属光谱法向发射率随电阻率变化关系

Fig. 3 Relationship between normal emissivity and resistivity

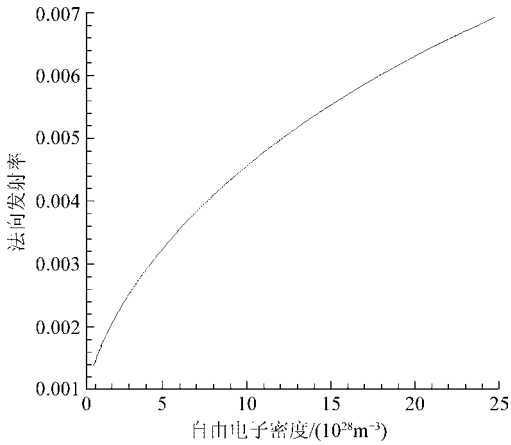


图 4 金属光谱法向发射率随自由电子密度变化关系

Fig. 4 Relationship between normal emissivity and free electron density

图 3 为发射角  $\theta=0^\circ$  时, 波长为  $8\ \mu\text{m}$ , 自由电子密度为  $5.9 \times 10^{28}/\text{m}^3$  时, 金属光谱法向发射率随电阻率变化曲线。由图可知, 金属光谱法向发射率随电阻率的增加而增大。在已知常见金属中, 以银的光滑表面方向光谱发射率为最小。

图 4 为入射角  $\theta=0^\circ$  时, 波长为  $8\ \mu\text{m}$ , 金属电阻率为  $2.06 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m}$  时, 金属光谱法向发射率随自由电子密度变化曲线。由图可知, 金属光谱法向发射率随自由电子密度的增加而增大。

表 1 给出了真实金属的程序输入条件, 得到 3 种金属光滑表面光谱发射率随波长变化曲线, 由图 5 对比可知, 金属光谱法向发射率在红外波段随入射波长的增加略有减小。

表 1 程序输入数据  
Table 1 Program input data

金属材料	电阻率/ ( $10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m}$ )	自由电子数密度/ ( $10^{28}\ \text{m}^{-3}$ )	入射波长/ $\mu\text{m}$
金	2.06	5.90	1~20
铜	1.56	8.47	1~20
银	1.47	5.86	1~20

对比图 3~图 5 可知, 金属电阻率对发射率的影响大于自由电子密度对发射率的影响。

从图 6 可以看出, 金属的发射率随角度增大而增加, 在角度小于  $80^\circ$  左右时, 受角度的变化影响不大; 当红外辐射角大于  $80^\circ$  时, 金属的红外发射率迅速增大, 在  $90^\circ$  又迅速减小接近于  $0^\circ$ 。因此在进行金属发射率试验测量时, 需要保证试验中光源入射角和观测角在  $0^\circ \sim 60^\circ$  范围内; 同时如

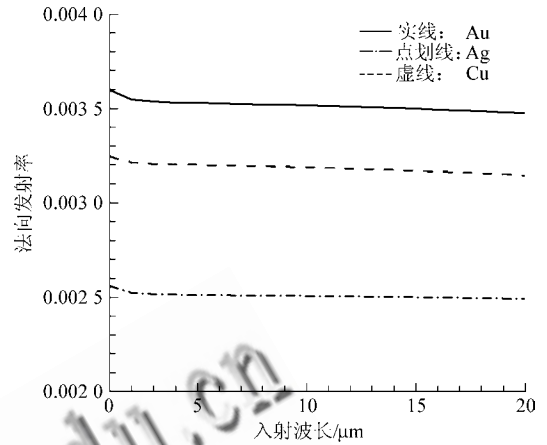


图 5 金属光谱法向发射率与入射波长关系

Fig. 5 Relationship between metal spectral normal emissivity and incident wavelength

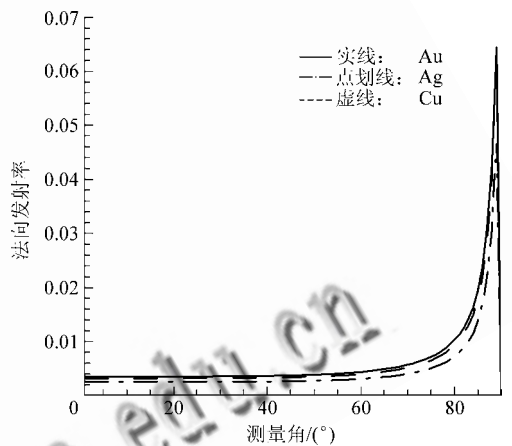


图 6 金属光谱方向发射率与测量角度关系

Fig. 6 Relationship between metal spectral directional emissivity and incident angle

果将试验测量发射率数据运用到数值仿真中, 需要考虑适用的人射角范围。

#### 4.2 粗糙金属表面光谱方向发射率

为验证方法的适用性, 分别对金和铝的不同粗糙度的随机表面, 模拟金属方向发射率随观测角度  $\theta$  的变化关系, 并与相关文献进行比较。

文献[11]中指出, 粗糙合金表面镀金膜粗糙度约为  $10 \sim 20\ \mu\text{m}$ , 镀金膜厚度为  $100\ \text{nm}$  的试样平均红外发射率为  $0.15$ , 镀金膜厚度为  $500\ \text{nm}$  的试样平均红外发射率为  $0.13$ , 对应本文可认为粗糙表面镀金膜厚度无限大, 结果对比如图 7 所示, 结果基本可信。

表 2 和表 3 分别给出金和铝粗糙表面光谱方向发射率仿真结果与文献[4]中仿真与实验结果的对比。

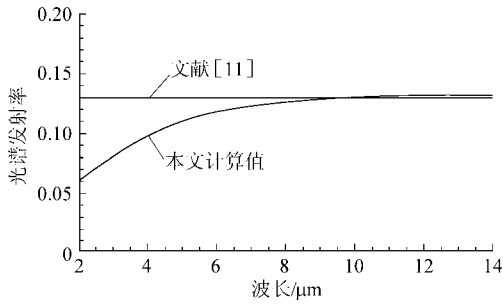


图7 粗糙金表面红外光谱发射率

Fig. 7 Infrared emissivity of rough-surface

表2 金表面方向发射率仿真结果对比

Table 2 Calculated and experimental values of directional emissivity for Au

$\theta_e / (^{\circ})$	本文结果	文献[4]计算	文献[4]实验
15	0.033 771	0.031	0.030
30	0.023 718	0.032	0.036
45	0.024 216	0.033	0.036
60	0.032 227	0.039	0.039
75	0.062 583	0.062	
85	0.267 428	0.152	
87	0.445 385	0.223	

表3 铝表面方向发射率仿真结果对比

Table 3 Calculated and experimental values of directional emissivity for Al

$\theta_e / (^{\circ})$	本文结果	文献[4]计算	文献[4]实验
15	0.059 599	0.031 0	0.031
30	0.037 004	0.032 0	0.034
45	0.031 495	0.033 0	0.033
60	0.036 845	0.039 0	0.041
75	0.063 765	0.065 1	
85	0.185 304	0.159 0	
87	0.301 933	0.377 0	

对应相同铝的样本面积,生成形如图1所示具有不同表面粗糙度表面,相应粗糙度对应不同角度的方向发射率结果如表4所示。

表4 粗糙铝表面方向发射率仿真结果

Table 4 Directional emissivity of rough-surface for Al

$\theta_e / (^{\circ})$	$\sigma$	$2\sigma$	$3\sigma$	$5\sigma$
0	0.170 2	0.303 5	0.387 5	0.474 7
15	0.047 1	0.070 0	0.087 5	0.118 9
30	0.030 3	0.042 5	0.054 5	0.077 0
45	0.024 9	0.037 9	0.050 9	0.074 5
60	0.027 0	0.046 0	0.063 4	0.098 2
75	0.044 9	0.084 8	0.122 4	0.190 9

分析不同粗糙度铝表面方向发射率仿真结果可知,随着表面粗糙度的增加,相同角度下表面方向发射率相应增大;表面各相异性使方向发射率略有减小,但变化不大;在相同表面粗糙度下表面方向发射率随角度增大先减小后增加,该变化趋势与文献[12]中应用散射特征仿真得到的发射率随角度变化趋势相同。

从表2和表3可以看出仿真结果和文献[4]结果对比基本相同,但随角度增加发射率的变化趋势不同,其原因是,由于文献[4]中实验测量状态如光源照射、光谱范围等条件并未详细给出,只描述为“打磨的金属金及铝表面”,在本文验证计算中,只根据上述一个条件给出相近的仿真输入条件得到计算结果,因此在进行实验数据对比时有一定偏差,同时文献[4]中没有考虑表面粗糙遮挡效应对发射率和入射角度的影响,因此文献[4]中变化规律与光滑表面相同。

对本文仿真结果分析如下,首先当表面粗糙度增大,增加了表面粒子吸收光能的机会,同时增大了有效辐射面积,因此方向发射率增大;当表面粗糙度相同时,随着角度的增大,在 $45^{\circ}$ 视角之前,在可视方向上的遮挡面积相对逐渐增加,而投影面积相对减小,使得模拟单位面元内有效发射面积减小,方向发射率随着减小;而当 $45^{\circ}$ 视角之后,投影面积迅速减小进而使有效发射面积相对增大使得方向发射率又增大。

## 5 结论

本文通过公式推导和计算机仿真,得出了金属在红外波段的发射率与入射角度及表面粗糙度的关系,对于研究金属的红外特性有一定的借鉴意义及工程实用价值,总结如下:

(1) 实现了完全通过数值模拟,计算任意金属在给定表面状态情况下对应的光谱发射率和任意波长区间的方向发射率,通过算例对比验证,该计算输入条件简单,结果可信,通用性强。

(2) 金属表面光谱方向发射率随金属电阻率的增加而增大,随自由电子密度的增加而增加;在其他条件如表面粗糙度,加工水平,物面涂层特性等相同情况下,为获得目标较小的红外光谱发射率,应选择电阻率较小的金属材料。

(3) 光滑金属表面光谱法向发射率在红外随波长变化不显著,但当入射角大于 $80^{\circ}$ 时变化剧烈,在实验测量和应用实验数据进行仿真时应考虑误差允许范围。

(4) 金属表面粗糙度影响表面光谱方向发射率和任意波长区间方向发射率,其中方向发射率随表面粗糙度的增大而增加,随角度增加先减小后增大。作为纯金属材料,其方向发射率在 0.01 数量级上,但实际金属表面多包覆氧化层,一般仿真结果小于实验测量值。

### 参 考 文 献

- [1] 陈衡. 红外物理学[M]. 北京:国防工业出版社,1985.  
Chen Heng. Infrared physics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1985. (in Chinese)
- [2] 肖斌安,龚烈航,曾锐. 金属红外发射率的分析和仿真研究[J]. 红外技术,2008,30(6):358-360.  
Xiao Binan, Gong Liehang, Zeng Rui. Analysis and simulation of metallic infrared emissivity[J]. Infrared Technology, 2008, 30(6): 358-360. (in Chinese)
- [3] 张洪波,程曙霞. 固体表面定向发射率的计算模型与试验研究[J]. 中国科学技术大学学报,1998,28(2):221-226.  
Zhang Hongbo, Cheng Shuxia. Research on the directional emittance of solid surface[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 1998, 28(2): 221-226. (in Chinese)
- [4] 程曙霞,张爱丽,何立群,等. 光洁金属表面方向发射率的一种计算方法[J]. 材料研究学报,2002,16(3):319-321.  
Cheng Shuxia, Zhang Aili, He Liqun, et al. A method for obtaining the directional emissivity of the polished metal surface[J]. Chinese Journal of Material Research, 2002, 16(3): 319-321. (in Chinese)
- [5] Whitehouse D J, Archard J F. The properties of random surfaces of significance in their contact[C]// Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1970.
- [6] 陈辉,胡元中,王慧,等. 粗糙表面计算机模拟[J]. 润滑与密封,2006(10):52-55.  
Chen Hui, Hu Yuanzhong, Wang Hui, et al. Computer simulation of rough surfaces[J]. Lubrication Engineering, 2006(10): 52-55. (in Chinese)
- [7] Hu Y Z, Tonder K. Simulation of 3-D random surface by 2-D digital filter and Fourier analysis[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1992, 32(1-2): 82-90.
- [8] 方容川. 固体光谱学[M]. 合肥:中国科技大学出版社,2003.  
Fang Rongchuan. Solid state spectroscopy[M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [9] Fox M. Optical properties of solids[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [10] Born M, Wolf E. Principles of optics[M]. 6th ed. Oxford: Pergamon Press, 1993.
- [11] 黄智斌,朱冬梅,唐秀凤,等. K424 合金镀金膜后红外发射率变化[J]. 稀有金属材料与工程,2009,38(8):1402-1405.  
Huang Zhibin, Zhu Dongmei, Tang Xiufeng, et al. Infrared emissivity change of superalloy K424 with deposited Au film[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(8): 1402-1405. (in Chinese)
- [12] 方利广,俞进,郑军. 一维粗糙表面散射特征的数值分析[J]. 南昌大学学报(理科版),2004,28(4):383-385.  
Fang Liguang, Yu Jin, Zheng Jun. Number analysis of scatter characteristic on one-dimensional random rough surface[J]. Journal of Nanchang University: Natural Science, 2004, 28(4): 383-385. (in Chinese)

#### 作者简介:

柯维娜(1983—)女,博士研究生。主要研究方向:目标红外辐射特性。

Tel: 010-82338591

E-mail: keverna@sa.buaa.edu.cn

朱定强(1966—)男,副教授。主要研究方向:火箭发动机热分析,目标辐射特性。

Tel: 010-82314338

E-mail: zdq66@buaa.edu.cn

蔡国飙(1967—)男,教授,博士生导师。主要研究方向:真空羽流、火箭发动机、超燃冲压发动机和高超声速飞行器设计。

Tel: 010-82316533

E-mail: cgb@buaa.edu.cn

(编辑:赵利)