

非均匀涂层的热辐射

徐文兰 罗宁胜 张 珉 沈学础

(中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家实验室, 上海, 200083)

摘要——考虑非均匀涂层自身辐射, 以及对衬底辐射的透射和对外来辐射的反射, 建立了热辐射传输方程; 给出了涂层表观发射比和反射比的公式; 并讨论了影响涂层辐射性能的诸因素。

关键词——热辐射, 非均匀涂层, 热辐射传输方程。

1. 引 言

在航空, 红外辐射加热等许多现代技术设备中, 为了防护或热设计等需要, 往往在基底材料的表面上涂以涂层。在这些涂层中, 往往含有许多颗粒、孔隙和夹杂物, 因此涂层是不均匀的。文献[1]虽然给出了非均匀涂层的辐射计算, 但是, 在计算中仅考虑了涂层对外来辐射的反射, 并且简单地把发射比定义为 1 与反射比之差, 显然这与实际情况不符。本工作则充分考虑了引起涂层辐射的三个来源: 涂层自身辐射, 涂层对衬底辐射的透射和涂层对外来辐射的反射。推导了热辐射传输方程, 并从基本概念出发给出涂层的表观发射比和反射比。讨论了它们与涂层参数(如厚度, 吸收系数)的关系, 从而为涂层热设计提供了参考。

2. 非均匀涂层的热辐射传输方程

衬底上的非均匀的涂层如图 1 所示。设涂层厚度为 d , 面积足够大, 因此可忽略边缘效应, 采用一维分析简化问题。图 1 中, 涂层左侧为衬底, 右端为真空或空气, 衬底辐射透过它和涂层的界面, 其单位面积的辐射功率为 J_b , 涂层自身单位体积向四周的辐射功率为 C , 外界真空在涂层表面单位面积上的辐照功率为 J_e , 对于漫入射的镜反射系数如下: ρ_b 为基底对从涂层入射到它上面的完全漫辐射功率的反射比; ρ_i 是涂层和真空界面对从涂层内入射的完全漫辐射功率的反射比, ρ_e 为涂层和真空界面对外来入射功率的反射比。涂层内沿 x 方向的正向能流为 I , 反向能流为 J , 则有

$$I(x+dx) - I(x) = -AI dx + SJ dx + C dx - SI dx, \quad (1)$$

式(1)中, A 为涂层单位体积的吸收系数, 其值为通常朗伯-比尔定律定义的吸收系数 α 的两倍; S 为涂层单位体积的后散射系数; A 和 S 的量纲都是长度的倒数. 式(1)中右边第一项是由于吸收导致的正向能流的减少值; 第二项是因反向能流后散射引起的正向能流的增加值; 第三项是涂层自身辐射值; 第四项是由于后散射引起的正向能流减少值.

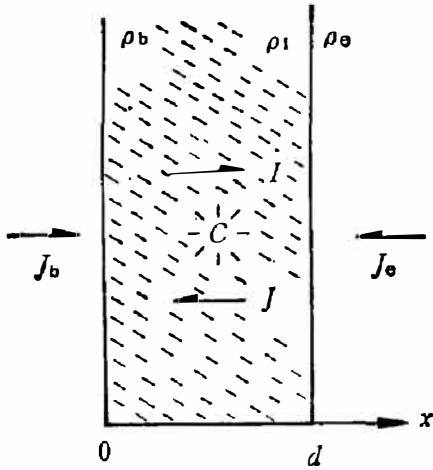


图1 衬底上的非均匀涂层
Fig. 1 The inhomogeneous coating on substrate.

与式(1)同理, 可以考虑 $J(x) - J(x+dx)$, 从而列出微分方程组

$$\begin{cases} \frac{dI}{dx} = -(A+S)I + SJ + C, \\ \frac{dJ}{dx} = (A+S)J - SI - C; \end{cases} \quad (2)$$

式(2)的通解为对应齐次方程的通解加上特解, 即

$$\begin{cases} I = L_1(1-F)e^{\beta x} + L_2(1+F)e^{-\beta x} + \frac{C}{A}, \\ J = L_1(1+F)e^{\beta x} + L_2(1-F)e^{-\beta x} + \frac{C}{A}, \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中

$$F = \sqrt{A/(A+2S)}, \quad \beta = \sqrt{A(A+2S)};$$

涂层在 $x=0$ 和 $x=d$ 处的边界条件为

$$\begin{aligned} I(0) &= J(0)\rho_b + J_b, \\ J(d) &= J_e(1-\rho_e) + I(d)\rho_i; \end{aligned} \quad (4)$$

待定系数 L_1 和 L_2 确定为

$$L_1 = (HM - GP e^{-\beta d})/Y, \quad (5)$$

$$L_2 = (GN e^{\beta d} - OH)/Y;$$

在式(5)中

$$M = (1+F) - \rho_b(1-F);$$

$$N = (1+F) - \rho_i(1-F);$$

$$O = (1-F) - \rho_b(1+F);$$

$$P = (1-F) - \rho_i(1+F);$$

$$G = J_b - C/A(1-\rho_b);$$

$$H = J_e(1-\rho_e) - C/A(1-\rho_i);$$

$$Y = MN e^{\beta d} - OP e^{-\beta d}.$$

从式(3, 5)可得涂层内近真空表面处正向能流 $I(d)$ 为

$$I(d) = \frac{(1-F)(HM e^{\beta d} - GP) + (1+F)(GN - OH e^{-\beta d})}{Y} + \frac{C}{A}. \quad (6)$$

在真空近涂层表面处, 总的辐射流 j 应为穿出涂层部分的辐射流加上对外来辐射的反射, 即

$$j = J_e \rho_e + (1-\rho_i)I(d). \quad (7)$$

3. 表观发射比和表观反射比

涂层辐射的能量来自于涂层自身辐射, 对衬底辐射的透射以及对外来辐射的反射三个部分, 为此, 我们把式(7)改写为

$$j = A_1 \frac{C}{A} + A_2 J_b + A_3 J_e, \quad (8)$$

$$\text{式(8)中, } A_1 = (1 - \rho_i) \left\{ 1 - \frac{4F(1 - \rho_b) + [(1 - F) M e^{\beta d} - (1 + F) O e^{-\beta d}](1 - \rho_i)}{Y} \right\},$$

$$A_2 = \frac{4F(1 - \rho_i)}{Y},$$

$$A_3 = \rho_e + \frac{(1 - \rho_i)(1 - \rho_e)[(1 - F) M e^{\beta d} - (1 + F) O e^{-\beta d}]}{Y},$$

其中 A_1 , A_2 和 A_3 分别为涂层自身辐射, 透过涂层衬底的辐射, 对外来辐射的反射在涂层真空表面处总辐射中所占的比例。

由基尔霍夫定律, 物体单位体积产生的辐射功率与朗伯-比尔吸收系数 α 之比等于黑体在同样波长、温度下辐射功率 W_B 的两倍, 即

$$\frac{C}{\alpha} = 2 W_B, \quad (9)$$

式(9)中出现因子 2 是由于黑体辐射功率 W_B 是向 2π 球面度发射的, 而涂层自身辐射 C 是向 4π 空间发射的。与式(9)同理, $A = 2\alpha$, 故而有

$$\frac{C}{A} = W_B. \quad (10)$$

而衬底的辐射功率 J_b 可写为

$$J_b = \epsilon_b W_B, \quad (11)$$

式(11)中, ϵ_b 为衬底材料的发射比。如衬底无限厚, 且与涂层间的界面绝对光滑, 无漫反射, 则有 $\epsilon_b = 1 - \rho_b$, 否则, $\epsilon_b < 1 - \rho_b$ 。综合式(10)和(11), 有

$$j = \tilde{\epsilon} W_B + A_3 J_e, \quad (12)$$

式(12)中,

$$\tilde{\epsilon} = A_1 + A_2 \epsilon_b.$$

设外来辐射 J_e 为零, 则由发射比的基本定义可以看出, $\tilde{\epsilon}$ 就是涂层系统的表观发射比。 A_3 也就是涂层系统的表观反射比。

由于传输方程(2)中各量是波长和温度的函数, 所以求解方程, 实际上也给出了光谱表观发射比 $\tilde{\epsilon}(\lambda, T)$ 和反射比 $A_3(\lambda, T)$ 。

假如涂层 d 足够大, 或吸收系数 A 足够大, 使 $e^{-\beta d} \rightarrow 0$, 则 $A_2 = 0$, 可得

$$\begin{aligned} \tilde{\epsilon} &= \frac{2F(-\rho_i)}{N}, \\ A_3 &= \rho_e + \frac{(1 - \rho_e)^2(1 - F)}{N}. \end{aligned} \quad (13)$$

当 $\rho_e = \rho_i$ 时, $\tilde{\epsilon} + A_3 = 1$, 即涂层不透明时, 表观发射比与表观反射比之和等于 1。

若涂层是均匀的, 即 $S = 0$ 。则式(3)中 $F = 1$, $\beta = A$; 而式(5)中 $M = N = 2$, $O = -2\rho_b$,

$P = -2\rho_i$, $Y = 4e^{Ad} - 4\rho_i\rho_b e^{-Ad}$. 式(8)中 A_1 , A_2 和 A_3 分别为

$$\begin{aligned} A_1 &= (1-\rho_e) \left[\frac{\rho_b(1-e^{-Ad}) + e^{Ad} - 1}{e^{Ad} - \rho_e\rho_b e^{-Ad}} \right], \\ A_2 &= \frac{(1-\rho_e)}{e^{Ad} - \rho_e\rho_b e^{-Ad}}, \\ A_3 &= \rho_e + \frac{(1-\rho_e)^2 \rho_b}{e^{2Ad} - \rho_e\rho_b}. \end{aligned} \quad (14)$$

如衬底的 $\epsilon_b = 1 - \rho_b$, 则均匀涂层的表观发射比为

$$\tilde{\epsilon} = \frac{(1-\rho_e)(1-\rho_b e^{-2Ad})}{1-\rho_e\rho_b e^{-2Ad}}, \quad (15)$$

这个结果和文献[2]中对均匀涂层的计算结果是一致的.

如果均匀涂层 d 或 A 很大, 以至 $e^{-Ad} \rightarrow 0$, 则有 $\tilde{\epsilon} = 1 - \rho_e$, $A_3 = \rho_e$, 涂层的表观发射比和反射比完全由涂层真空表面反射决定.

4. 讨 论

由式(3)、(5)和式(8)、(12), 我们明确了涂层的表观发射比 $\tilde{\epsilon}$ 和表观反射比 A_3 与涂层厚度、表面镜反射率等涂层参数, 以及衬底材料发射比, 衬底与涂层界面的镜反射率等衬底参数的关系. 由这些式子, 我们可以进行实际的计算. $\tilde{\epsilon}$ 和 A_3 随涂层参数和衬底参数的变化如表 1 所示. 表 1 中“ \uparrow ”表示 $\tilde{\epsilon}$ 或 A_3 随变量增加而增加; “ \downarrow ”表示 $\tilde{\epsilon}$ 或 A_3 随变量增加而减少.

表 1 表观反射比和表观发射比随涂层参数和衬底参数的变化

Table 1 Variations of apparent emittance and apparent reflectance with parameters of coating and substrate.

	S	A	d	ρ_b	ρ_e	ϵ_b
$\tilde{\epsilon}$	\downarrow	\uparrow	\uparrow	\uparrow	\downarrow	\uparrow
A_3	\uparrow	\downarrow	\downarrow	—	\uparrow	—

从表 1 中可见, 当涂层的散射系数较小, 吸收系数较大, 厚度较厚, ρ_b 较大, ρ_e 较小与衬底辐射较大时, 表观发射比会增加, 这有利于提高热辐射效率的涂层设计, 相反, 则可用于以隔热为目的的一些涂层的设计.

当涂层的吸收系数 A 足够大, 或者涂层足够厚时, 涂层的总吸收是很大的, 对于衬底的穿透 $A_2 = 0$, 因此 $\tilde{\epsilon}$ 和 A_3 就是式(13)中所给出的量, 它们与涂层厚度 d , 衬底反射率 ρ_b 和衬底辐射 ϵ_b 无关.

在影响涂层表观发射比和表观反射比的诸因素中, 除吸收系数 A 和散射系数 S 是不可测量外, 其它(如厚度, ρ_b , ρ_e 等)均可直接或间接测量, A 和 S 需要根据涂层内颗粒的材料光学常数, 颗粒大小, 体积比等物理量计算而得, 这部分的工作我们将另文讨论.

根据计算得到的 $\tilde{\epsilon}$ 和 A_3 , 很容易从式(15)求得涂层真空表面处能流 j , 这个能流就是紧挨着涂层表面探测器所能感知的能流. 在许多情况下, 我们希望这个能流越大越好. 实际

的涂层可以根据不同的要求和本文提供的公式进行计算和设计。

总之,本文在全面考虑了非均匀涂层系统的三个辐射来源后,推导出热辐射传输方程,并给出了表观发射比和表观反射比的定义和计算公式,介绍了均匀涂层的特例,为实际的涂层设计和计算提供了参考依据。

参 考 文 献

- [1] 陈衡, 红外物理学, 北京: 国防工业出版社, (1985), 83.
[2] Edward D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solid*, Ed. by Edward D. Palik, Academic Press, London, 1985, p 25.

THERMAL RADIATION OF INHOMOGENEOUS COATING

XU WENLAN, LUO NINGSHENG, ZHANG MIN AND SHEN XUECHU

(*National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical
Physics, Academia Sinica, Shanghai, 200083, China*)

ABSTRACT

The radiative transfer equations for inhomogeneous coating are derived considering self-radiation of coating, transmitted radiation of substrate and reflected radiation of incidence. The formulas of apparent emittance and apparent reflectance are given. Influence of various factors on radiation property of coating is discussed.