

# 关于高温气体辐射参量的讨论

徐南荣

(北京航空学院)

## 1. 引言

对于高温气体的红外辐射,国内许多单位已做了不少有意义的工作<sup>[1,2]</sup>。但是,以什么参量来度量气体的辐射,在不少关于气体辐射的文章中,是不统一和不确切的。这些文章中较多地采用了辐射亮度和辐射强度的概念,这是从固体辐射概念直接引用过来的。

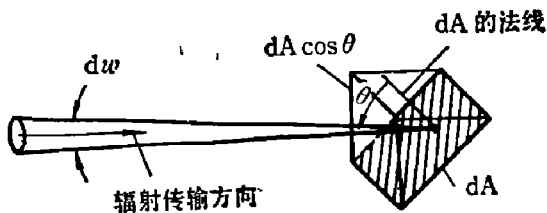


图1 辐射在介质中传输的辐射亮度示意图

积上通过的单位立体角内的辐射功率(见图1)。

## 2. 高温气体辐射亮度

根据在介质中辐射传输的定律,光谱辐射亮度的微分方程为<sup>[4]</sup>

$$\frac{\partial L_{\omega}(\omega, s)}{\partial s} = -k(\omega, s)\rho(s)L_{\omega}(\omega, s) + k(\omega, s)\rho(s)L_{\omega}^0(\omega, s); \quad (1)$$

沿射线方向的积分为

$$L_{\omega}(\omega, s) = \int_{-\infty}^s L_{\omega}^0(\omega, s) \exp\left[-\int_s^s k(\omega, s'')\rho(s'')ds''\right] \cdot k(\omega, s')\rho(s')ds'; \quad (2)$$

式(1)和式(2)中,  $L_{\omega}$  为射线上所求点处的光谱辐射亮度;  $\omega$  为红外辐射波数;  $s$  为要研究点的坐标;  $L_{\omega}^0$  为黑体的光谱辐射亮度;  $s'$  为辐射路径中的任一点,该点处气体微团发出的光谱辐射亮度为  $L_{\omega}^0 k(\omega, s')\rho(s')ds'$ ;  $s''$  为  $s'$  至  $s$  路径中的任意一点,要研究  $s'$  辐射的衰减时,需要将吸收系数  $k(\omega, s'')$  与  $\rho(s'')$  的乘积沿此途径积分;此途径中的坐标用  $s''$ 。

要研究一团高温气体对空间某一点的辐照形成的射照度时,只要将式(2)对工作波数间隔再积分,同时再对高温气团所研究的空问点所张的立体角积分(可分别对所张的方位角  $\phi$  和高低角  $\theta$  的范围积分),就可以得出该点的辐照度  $H$  为

$$H = \iiint_{\theta, \phi, \omega, s} L_{\omega}^0(\omega, s) \exp\left[-\int_s^s k(\omega, s'')\rho(s'')ds''\right] k(\omega, s')\rho(s') \cos\theta \sin\theta ds' d\omega d\theta d\phi; \quad (3)$$

式中  $\theta, \phi$  角见图2。

在用热象仪对高温气体成象时,不能用上面辐照度  $H$  的概念。底片上微面积  $dF$ (见图3)上的光谱辐照度  $H_{\omega}$  为与  $dF$  对应的微立体角  $d\Omega$  内的气体通过热象仪光学系统后

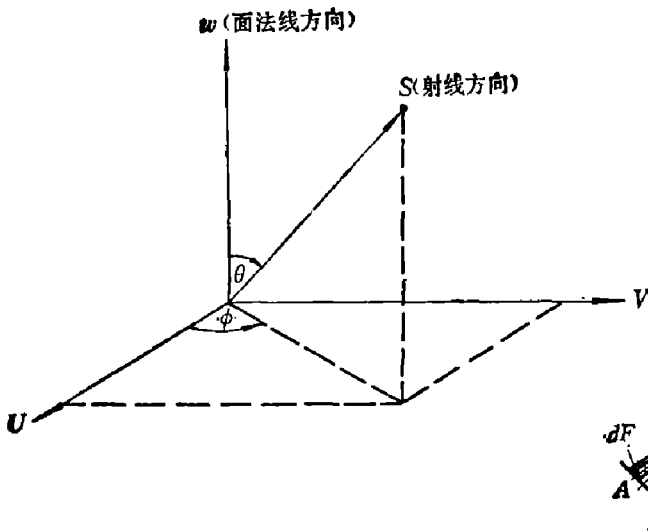


图2 辐射线的空间几何关系

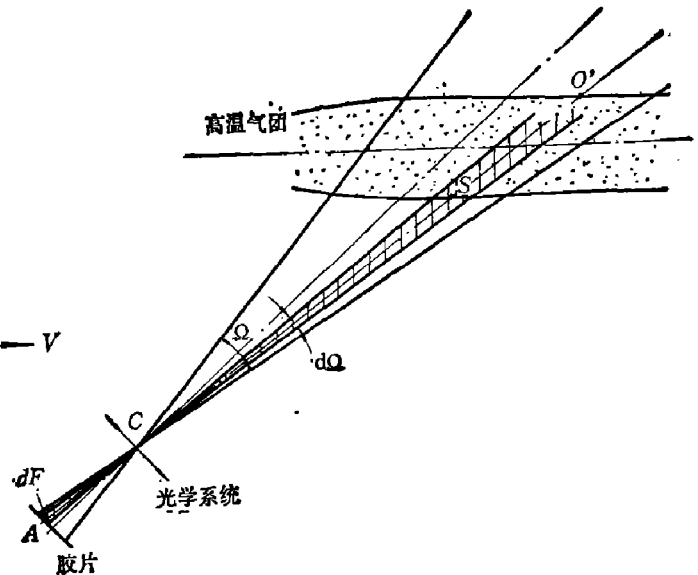


图3 热象仪对高温气体成像示意图

在  $dF$  上形成的照度。  $H_\omega$  可表示为

$$H_\omega = \frac{\pi}{4} L_\omega \left( \frac{D_0}{f} \right)^2; \quad (4)$$

式中,  $D_0/f$  为热象仪光学系统的相对孔径,  $L_\omega$  为介质中的辐射传输路径上的辐射亮度, 也即与辐射传输路线相垂直的单位面积上通过的在以  $AO'$  为中心线的单位立体角内的辐射功率。在热象仪的视场角不大的情况下, 它也表示微面积  $dF$  ( $dF = f^2 \times d\omega$ ) 处所对应的以  $ACO'$  线为中心的单位立体角内气体辐射所形成的光谱辐射亮度。

由上可以推论, 高温气体团内, 由于温度、压力、密度等分布不均匀而形成不同射线上的辐射亮度不一致时, 在热象仪底片上各点的照度将是不均匀的。

从上面的关于气体的辐射亮度概念中可以看到, 利用在介质中辐射传输的亮度概念, 计算气体辐射对空间某一点处的照度时, 只要用辐射亮度表达式(2)对路程  $s$ 、波数  $\omega$ 、方位角  $\phi$ 、高低角  $\theta$  进行四重积分就可得到。当需要用热象仪计算对高温气体成像后在底片上的照度分布时, 只要用式(2)计算不同射线方向的辐射亮度, 再经过换算后就得出照度分布值。

从上面的分析也可看出, 本文所提的辐射亮度是在分散性介质(如气体)中辐射传输所用的亮度概念。它用于衡量在一个汇聚形的单位立体角内各辐射分子或粒子对垂直于该立体角中心线的单位面积上所形成的辐射功率总和。无疑, 此功率总和与各辐射分子的参数, 如温度、密度、压力等有关, 或者说与辐射气团的温度、密度和压力分布有关, 而不仅仅与气团的表层气体参数有关。要计算一个辐射性气团对空间某一个面积上形成或通过的功率或照度时, 就可利用上述这种亮度概念, 再用上面式(3)进行多重积分而得。积分运算中所需的各种分子辐射参数目前已有不少资料可供参考<sup>[4,5]</sup>。

### 3. 气体辐射与固体辐射的区别

气体辐射与固体辐射不同, 它不象固体仅从表面辐射, 而是在整个体积内进行的。固体辐射亮度表示单位面积的辐射面向单位立体角内发出的功率, 此立体角对所研究的入射面而言是发散形的。当辐射面的温度分布不均匀时, 在离开辐射面距离为  $R$  处(当距离  $R$  远大于辐射面的任一线尺寸时)的一个入射面上的照度  $H$  为

$$H = \frac{1}{R^2} \int_F L dF;$$

式中,  $F$  为辐射面的面积;  $L$  为它的辐射亮度。

由上可见, 气体辐射亮度和固体辐射亮度的概念不同, 其计算也比固体的要复杂得多。因而自然会提出, 能否把气体辐射看作固体辐射来处理? 如果可以, 又有什么条件?

首先, 如前所述, 两种辐射的模型相差甚远。但是, 确实有人想用固体辐射的概念来描述气体辐射并做了大量的工作, H. O. Hottel<sup>[6]</sup> 对已进行的大量试验做了归纳总结, 他把一个均质气团在全波长范围的总辐射表达成了黑体辐射的斯忒藩——玻耳兹曼定律的形式。但是它不能给出分波段的表达式。也有人在做了相当工作后, 提出在某种特定情况下可用固体概念替代气体概念来计算某一个波段内的辐射, 例如 R. D. 小哈得逊<sup>[7]</sup> 在计算飞机喷气流在正后方的辐射时就利用了固体亮度的概念。

然而, 进一步分析可以发现, 把气体当作固体处理时, 有几个问题不好处理。例如比辐射率  $\epsilon$  如何确定? 文献[6]的大量试验曲线表明, 把一个均质气团的辐射用固体辐射的斯忒藩——玻耳兹曼定律的形式表示时, 其  $\epsilon$  随气体的温度、压力、密度及射线行程而呈复杂的变化关系, 然而文献[6]未给出分波段的  $\epsilon$ , 更未给出非均质气团的分波段的  $\epsilon$ 。文献[7]给出了两个计算实例的某个波段的  $\epsilon$  值, 其它情况则未给出而且也难以给出。其次, 如何确定非均质气团的等效温度? 据已有资料, 对类似流管中一端较热一端较冷的, 但在每个截面上的温度分布均匀的气团, 有一些经验性的公式<sup>[8]</sup>, 但对一个温度分布较复杂的不均匀气团, 目前仍无可供借鉴的公式可用于计算其等效温度。再则, 如何确定辐射面积? 对黑体辐射, 朗伯定律提供了依据。但是气体辐射则不然, 当方向不同时, 气团与所研究面的空间几何关系, 射线长度, 射线上各点的温度、压力、密度的变化规律均发生了变化, 这种变化绝不能单纯靠取投影面积而概括的。

由此, 本文认为, 在没有大量的理论和试验数据可依的前提下, 气体辐射不宜直接借用固体辐射的概念。

### 参 考 文 献

- [1] 路学荣, 红外应用文选, 天津 8358 所, 1980. 303~333.
- [2] 周鼎新, 红外研究, 1(1982), 4: 247.
- [3] Robert Siegel, John R. Howell, *Thermal Radiation Heat Transfer*, 2nd ed. 1981.
- [4] Ludwig C. B., et al., *NASA SP-3080*, 1973.
- [5] AD-A087361.
- [6] William H. Mcadams (ed.), *Heat Transmission*, Chapter 4, Mc Graw Hill Book Company, New York, 3rd ed., 1954.
- [7] R. D. 小哈得逊, 红外系统原理, 国防工业出版社, 1975 年.
- [8] 钟声玉、王克光编, 流体力学与热工理论基础, 机械工业出版社, 1980.

(本文 1985 年 9 月 30 日收到)