

圆筒腔壁的表观黑度计算

北京航空航天大学 朱谷君 张建强 徐南荣

【摘要】提出了一种计算发动机喷管内壁表观黑度的模型,该模型考虑了燃气及波长范围对壁面表观黑度的影响。并对于模型圆筒壁腔进行了算例计算。结果表明:表观黑度与计算域内辐射换热结果有关。

主题词: 辐射 计算 喷管 黑度

分类号: V 231. 1 V 232. 5

表观黑度^[1]与通常所说的材料本身的黑度(或发射率)有很大区别,表观黑度不仅与材料本身的黑度有关,而且在很大程度上取决于系统内的辐射换热,因而表观黑度不能视为常数。

1 计算模型

把喷管的形体近似为一端开口、另一端封闭的直圆筒,筒内充满高温燃气。筒壁材料的黑度为定值(灰体);燃气的压力、温度和成份均匀分布(对非加力状态此假设可用)。沿轴向把圆筒壁划分成圆环,沿径向把前端盖划分成环盘作为计算单元,各单元的温度是已知的。

对于给定的波长 λ_1 和 λ_2 范围,壁面单元 k 的有效辐射 $J_{k, \Delta\lambda}$ 可表示为

$$J_{k, \Delta\lambda} = \epsilon_{v, k} E_{bk, \Delta\lambda} + (1 - \epsilon_{v, k}) H_{k, \Delta\lambda} \quad (1)$$

式中 $\epsilon_{v, k}$ 是 k 单元的壁面黑度; $E_{bk, \Delta\lambda}$ 是 k 单元温度下在对应波段范围内的黑体辐射力; $H_{k, \Delta\lambda}$ 是 k 单元在对应波段内的投射辐射。应用封闭腔模型, k 单元上的投射辐射是腔壁所有单元和燃气对它投射的总和,即

$$H_{k, \Delta\lambda} = \sum_{j=1}^N (J_{j, \Delta\lambda} F_{k-j} \bar{\tau}_{k-j, \Delta\lambda} + E_{bg, \Delta\lambda} F_{k-j, \Delta\lambda} \bar{\alpha}_{k-j, \Delta\lambda}) \quad (2)$$

其中 F_{k-j} 是单元 k 对 j 的角系数; $E_{bg, \Delta\lambda}$ 是燃气温度下对应波段内的黑体辐射力; $\bar{\tau}_{k-j, \Delta\lambda}$ 和 $\bar{\alpha}_{k-j, \Delta\lambda}$ 是单元 k 和 j 之间在波段内的穿透率和吸收率,应与角系数结合在一起按下式积分算出^[2]

$$F_{k-j} \bar{\tau}_{k-j, \Delta\lambda} = \frac{1}{A_k} \int_k \int_j \tau_{\Delta\lambda}(s) \frac{\cos\theta \cdot \cos\theta}{\pi s^2} dA_j dA_k$$
$$F_{k-j} \bar{\alpha}_{k-j, \Delta\lambda} = \frac{1}{A_k} \int_k \int_j \alpha_{\Delta\lambda}(s) \frac{\cos\theta \cdot \cos\theta}{\pi s^2} dA_j dA_k$$

由于所有参数具有轴对称的性质,在数值积分中可简化为

$$F_{k-j} \bar{\tau}_{k-j, \Delta\lambda} = \sum_{j=1}^N \tau_{\Delta\lambda}(s_{kj}) \frac{\cos\theta \cdot \cos\theta}{\pi s_{kj}^2} \Delta A_j, \quad F_{k-j} \bar{\alpha}_{k-j, \Delta\lambda} = \sum_{j=1}^N \alpha_{\Delta\lambda}(s_{kj}) \frac{\cos\theta \cdot \cos\theta}{\pi s_{kj}^2} \Delta A_j$$

由式(1)和式(2)可消去 $H_{k, \Delta\lambda}$, 建立 $J_{k, \Delta\lambda}$ 与温度的关系式

$$\sum_{j=1}^N \left\{ \delta_{kj} \left(\frac{1}{1 - \epsilon_{w,j}} \right) - F_{k-j} \bar{\tau}_{k-j, \Delta\lambda} \right\} J_{k, \Delta\lambda} = \sum_{j=1}^N \left\{ \delta_{kj} \left(\frac{\epsilon_{w,j}}{1 - \epsilon_{w,j}} \right) E_{bj, \Delta\lambda} + E_{bg, \Delta\lambda} F_{k-j} \bar{\alpha}_{k-j, \Delta\lambda} \right\} \quad (3)$$

其中: $k = 1, 2, \dots, N$, δ_{kj} 是克罗尼柯算符。

根据式(3)可以求得各单元壁的有效辐射 $J_{k, \Delta\lambda}$, 最后计算其表现黑度 $\epsilon_{k, \Delta\lambda}$

$$\epsilon_{k, \Delta\lambda} = J_{k, \Delta\lambda} / E_{bk, \Delta\lambda} \quad (k = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

上述计算涉及波段内的燃气吸收率 $\alpha_{\Delta\lambda}(s)$ 和穿透率 $\tau_{\Delta\lambda}(s)$ 它们是光学厚度 $K_{\Delta\lambda}$ 的函数,

$$K_{\Delta\lambda} = \bar{a}_{\Delta\lambda} s \quad (5)$$

这里 $\bar{a}_{\Delta\lambda}$ 是燃气在波段内的平均吸收系数。本文采用文献[3]对二氧化碳和水蒸汽给出的标准状态光谱吸收系数 $a_{STP}(\lambda)$, 折算成燃气状态的光谱吸收系数 $a(\lambda)$, 并在给定的计算波段内加权平均求出平均吸收系数 $\bar{a}_{\Delta\lambda}$

$$\bar{a}_{\Delta\lambda} = \left[\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} a(\lambda) \cdot E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda \right] / \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda \quad (6)$$

2 算例和计算结果

圆筒半径 0.35 m, 长 3 m, 材料黑度均为 0.7。圆筒壁面温度为 700 K, 端盖温度为 600 K。燃气温度为 850 K, 二氧化碳和水蒸汽的分压均为 6.66 kPa。计算按波长 1- 2 μm 、2- 3 μm 、3- 4 μm 、4- 5 μm 、5- 6 μm 和 1- 6 μm 进行计算。为了比较, 也对各个波段在没有燃气作用的情况, 作了计算。部分计算结果见图 1、2。从计算结果中可看出以下规律:

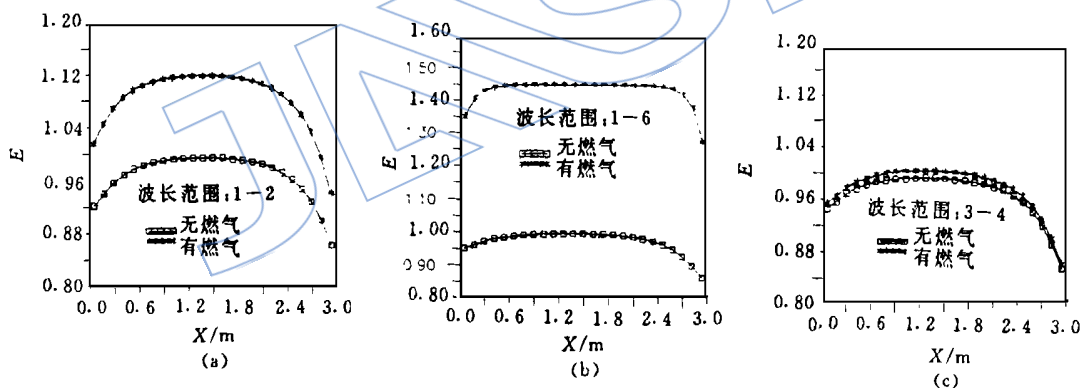


图1 表现黑度沿轴向变化

(1) 对于没有燃气的情况, 辐射换热在壁面之间进行。因为筒壁温度较高而端盖温度较低, 故筒壁损失净热流, 端盖得到净热流, 筒壁的表现黑度均小于 1 而端盖均大于 1。筒壁的中间部分距端盖较远, 角系数较小, 净热流也小, 故表现黑度很接近于 1; 在靠近出口处, 因筒壁的热损失加大, 故表现黑度明显降低。

(2) 即使没有燃气作用, 表现黑度随波长范围也有变化。算例中波长为 1- 2 μm 时, 端盖的表现黑度 ϵ 约为 2.65, 实际上在该波长范围的辐射净热流并不大, 主要是端盖温度 600 K 在波长 1- 2 μm 的辐射功率太小造成的。由公式

$$\epsilon_{, \Delta\lambda} = 1 - \frac{q_{\Delta\lambda}}{E_{b, \Delta\lambda}} \left(\frac{1 - \epsilon_w}{\epsilon_w} \right)$$

可看出, 端盖 $q_{\Delta\lambda}$ 是负值, 故 $\epsilon_{, \Delta\lambda} > 1$; 而 $E_{b, \Delta\lambda}$ 由黑体辐射函数求得为 $0.002134 E_b$ 。当波长为 1

- $6\text{ }\mu\text{m}$ 时, 尽管 $q_{\Delta\lambda}$ 绝对值会大得多, 但此时的 $E_{b,\Delta\lambda}$ 也增大到 $0.4036E_b$, 故端盖表观黑度反而降低到 1.39 左右。

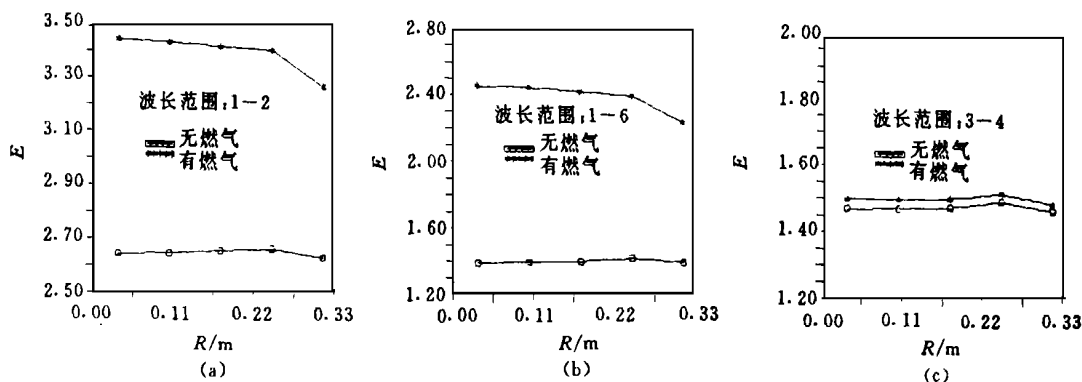


图 2 表观黑度沿端盖径向的变化

(3) 当有燃气作用时, 因为燃气温度最高, 端盖和筒壁表观黑度均比无燃气作用时增大; 而增大幅度最小的是波长 $3\text{--}4\text{ }\mu\text{m}$ 的波段, 因为该波段范围二氧化碳和水蒸汽的平均吸收系数都很小。

(4) 在燃气作用下, 筒壁表观黑度的分布与无燃气情况基本一样, 但绝对值一般可大于 1, 这是因为燃气辐射使筒壁的净热流成为负值 (受热) 所致。

3 结 论

壁面表观黑度是发动机喷口辐射计算的基本参数, 它受许多因素的影响, 特别是壁面的温度分布、燃气参数 (表现为吸收系数) 的影响。表观黑度随波长范围有明显的变化, 在喷口辐射计算中应予考虑。总之, 表观黑度是整个计算域内辐射换热结果的表现, 对于具体的发动机情况 (结构、壁温分布、燃气参数及计算波段等), 需要进行单独的计算。

参 考 文 献

- 1 邹建军, 张青藩. 喷管的表观黑度及其红外辐射强度的计算. 隐射技术, 1993, 4
- 2 R. 西格尔, J. R. 豪厄尔. 热辐射传热. 科学出版社, 1990
- 3 Ludwig C B, Malkmus W, Reardon J E, Thomson J A L. Handbook of Infrared Radiation From Combustion Gases. NASA SP-3080, 1973

(责任编辑 杨再荣)