

红外标准辐射源特性的蒙特—卡罗解*

戴景民 何 谨 陈文贤 褚载祥

(哈尔滨工业大学精密仪器系, 黑龙江, 哈尔滨, 150006)

摘要: 介绍了红外标准辐射源(表面含镜反射成分)辐射特性的几种研究方法. 着重介绍了 Monte-Carlo 法及应用此法对该种黑体辐射源特性的研究结果, 并给出了一些重要结论.

关键词: 黑体, 发射率, 红外辐射源, 蒙特—卡罗法.

引言

在空腔壁面为漫反射的重要假设下, 各国学者对各种轴对称、等温或非等温黑体空腔的辐射特性计算作了大量的工作^[1~9]. 目前已可以利用计算机精确地求得空腔的有效发射率分布.

但实际空腔, 特别是应用于红外技术的黑体空腔, 腔壁面的反射模式不仅仅为漫反射, 还具有一定的镜反射成分. 而且随着波长的增加镜反射成分也将增加^[10,11]. 因此, 必须建立一种适用实际镜—漫混合反射模式的数学模型.

早于 1964 年 Lin 和 Sparrow^[12~14]就对纯镜反射表面的圆筒、圆锥腔辐射特性计算作了仔细的研究. 但由于其中能量交换系数的计算过于繁琐, 且对一些复杂的空腔也无法求解, 因而此方法并没有得到广泛的应用.

在研究另一类镜反射半球空腔(即所谓的 LAND SP 辐射温度计)被测表面有效发射率分布时, 我校及加拿大国家研究院学者们^[15,16]利用“镜面分割及射线跟踪法”成功地解决了此问题. 基本思想为: 把半球镜面分割成大量近似为平面的微面元并根据光学射线的反射定律跟踪腔内的热辐射射线, 从而求得被测表面上各微面元之间的能量交换系数, 最终得到被测表面有效发射率分布. 但此方法仅适用于半球面空腔, 很难应用于一般轴对称常用黑体空腔.

七十年代初 Ono A^[17]首先把蒙特—卡罗法引入镜—漫混合反射表面空腔的有效发射率计算, 给出了无盖圆筒、无盖圆筒—圆锥组合腔的辐射特性, 同时引出了一些有价值的结论. 但由于受光束跟踪模型的限制, 无法对带盖常用空腔及高质量的复杂腔型(如圆筒—内凸锥空腔)进行求解.

本文 1991 年 9 月 18 日收到, 修改稿 1992 年 3 月 16 日收到.

*国家自然科学基金资助项目.

近些年来, 我们也采用蒙特-卡罗法推导出计算黑体空腔定向有效发射率的普遍公式和通用的光束跟踪模型^[18], 使用这种比较简明的概率模型对实际使用空腔, 在不同的 ρ_s/ρ (ρ_s 为材料表面镜反射率; ρ 为材料表面反射率, 以下同) 比值下得到它们的辐射特性的计算结果.

1 蒙特-卡罗解的数学模型及光束跟踪

对于一个具有不透明壁面的等温空腔, 检测器接收来自 D 方向的发射微面元 dx_0 , 所张立体角 $d\omega_0^D$ 内的辐射通量为 $d\phi_0^D$. 考虑到空腔效应, 其方向有效发射率可写为:

$$\varepsilon_a^D(x_0) = \frac{d\phi_0^D}{L_b \cdot \cos \theta_0^D \cdot d\omega_0^D \cdot dx_0}, \quad (1)$$

式 (1) 中 L_b 为黑体光谱辐射亮度, θ_0^D 为 dx_0 微面元出射到 D 方向的光束与该面元法线之间夹角, x_0 为 dx_0 的位置.

为了计算方便及揭示基尔霍夫定律的推广应用范围, 定义一个重要的参数 $\rho_a^{D,h}(x_0)$ 为:

$$\rho_a^{D,h}(x_0) = 1 - \varepsilon_a^D(x_0), \quad (2)$$

从物理意义上说, 此参数正是定向半球有效反射率. 式 (2) 中 D 为光线入射方向, h 表示半球方向. $\rho_a^{D,h}(x_0)$ 可以展成一个无穷级数:

$$\rho_a^{D,h}(x_0) = \sum_{i=1}^{\infty} f_i, \quad (3)$$

式 (3) 中 f_i 为从 D 方向入射到 dx_0 微面元的辐射能流在全反射腔壁上经 i 次反射后, 最终从腔口逸出的能流占总入射能流的比例.

考虑到腔壁面的反射成分 (反射率 ρ), 则最终可得:

$$\rho_a^{D,h}(x_0) = \sum_{i=1}^{\infty} F_i \cdot \rho^i, \quad (4)$$

式 (4) 中 F_i 为空腔壁面为全反射时 (无吸收), 从 D 方向入射辐射能流经 i 次反射最后从腔口逸出的能流所占的比例.

显然, 式 (4) 就可用蒙特-卡罗法来求解. 可以把从 D 方向入射到 dx_0 微面元上的辐射能流看作 N 根光束, 为了保证计算精度及节省计算时间, 一般取 $N = 10^4 \sim 10^5$ 为宜. 采用概率抽样, 用随机数 R_ε (ε 为腔壁材料发射率) 来决定每根光束是否被吸收, 用随机数 R_ρ 来决定该光束的反射模式 (小于 ρ_s/ρ 为镜反射). 对于漫反射情况, 由随机数 R_θ 、 R_ϕ 来决定光束方向及与壁面的下一个交点. 而对镜反射情况, 由反射定律求出反射光束方向及与壁面的下一个交点, 接着重复上面步骤, 一直到每根光束被壁面吸收或从腔口逸出为止. 在计算机上重复 N 根射线的处理过程, 就可以求出从腔口逸出的光束总数 N_{out} , 于是可得:

$$\rho_a^{D,h}(x_0) = \frac{N_{\text{out}}}{N}. \quad (5)$$

在构造了问题解的概率模型后, 主要的复杂问题, 就是光束在腔内多次反射的跟踪. 此部分详见参考文献 [18].

2 各种常用黑体腔型辐射特性的蒙特-卡罗解

使用上述概率模型及光束跟踪法, 对带盖的圆筒, 圆筒-圆锥, 圆筒-双锥及圆筒-内凸锥等常用红外黑体空腔作了计算. 并在 $\rho_s=0$ 的情况下 (即全漫反射) 与 Bedford 积分方程精密解作了比较, 取得了满意的结果.

空腔的几何符号: L 为腔长, R_0 为空腔半径, R_A 为腔口半径, θ 为锥角, ε 为腔壁材料发射率, ρ_s 为腔壁镜反射率, ρ 为腔壁全反射率, x_0 表示距腔轴心 $R_0/2$ 处单位微面元的位置.

表 1 给出了带盖圆筒空腔在不同的镜反射成分下的定向有效发射率及全漫射时的有效发射率精密解. 由表 1 可见, 蒙特-卡罗法在 $\rho_s=0$ 时与积分方程组法精密解吻合较好. 同时也可以看到此种空腔 N_{out} 由于底面为平面而增加, 即 $\rho_a^{D,h}(x_0)$ 值增加而造成法向有效发射率的下降 (当 ρ_s 增加时), 因此, 很不适宜于红外标准辐射源.

表 1 带盖圆筒空腔定向有效发射率 ($L=160\text{mm}$, $R_0=17\text{mm}$, $R_A=14\text{mm}$, $N=10^5$)
Table 1 Directional effective emissivities of the baffled cylindrical cavity

$\varepsilon_a^D(x_0)$		ρ_s/ρ			
		0	0.1	0.2	Bedford 精密解
ε	0.7	0.9970	0.9677	0.9374	0.9972
	0.88	0.9990	0.9860	0.9740	0.9990

表 2 带盖圆锥-圆筒空腔的法向有效发射率 ($L/R_0=8$, $R_A/R_0=0.8$, $\varepsilon=0.7$, $N=10^5$)
Table 2 Normal effective emissivities of the cylindro-cone cavity

ε_a^D		θ						
		60°	72°	90°	120°	150°	160°	180°
ρ_s/ρ	0	0.9967	0.9966	0.9961	0.9960	0.9962	0.9965	0.9970
	0.1	0.9969	0.9968	0.9957	0.9966	0.9967	0.9968	0.9677
	0.2	0.9970	0.9968	0.9936	0.9969	0.9968	0.9972	0.9374

表 2 给出了在不同锥角下带盖圆锥-圆筒空腔的法向有效发射率. 由表 (2) 中数据可见, 其定向有效发射率对锥角较为敏感, 在锥角为 90° 及 180° (此时已蜕变为圆筒腔) 时, $\varepsilon_a^D(x_0)$ 锐减, 且镜反射成分增加时, 减小越烈. 从几何形状上不难看出, 当锥角为 180° 时, 光束只需一次镜反射即逸出腔口, 而锥角为 90° 时, 则光束要连续两次镜反射才逸出

腔口. 在其它锥角时, 则至少需要三次连续镜反射才能逸出腔口. 这就是此锥角的空腔辐射特性随 ρ_s 增加而减小的原因.

八十年代以来, 性能优良的圆筒-内凸锥空腔得到广泛的使用. 此种黑体空腔具有有效发射率高(而且在底面分布均匀)、轴向尺寸小、重量轻、易于保持等温等优点. 它首先由英国 NPL 提出作为低温及甚低温玻尔兹曼常数测量装置中的标准辐射源及检测器^[19], 而其辐射特性的精密计算(全漫射)也已由我国及加拿大学者们给予完满的解决^[9]. 我们采用蒙特-卡罗法首次估算了该种空腔在具有镜反射情况下的辐射特性, 而这对采用此种空腔作为红外标准辐射源是至关重要的.

典型的不同锥角下圆筒-内凸锥法向有效发射率示于表 3. 除了锥角为 180° (此时空腔蜕变为圆筒腔) 以外, 定向有效发射率值对 ρ_s/ρ 及 θ 的变化不太敏感, 辐射特性有较大改善.

表 3 不同锥角圆筒-内凸锥空腔法向有效发射率 ($L/R_0=8, R_A/R_0=0.8, \varepsilon=0.7$)
Table 3 Directional effective emissivities of the varied-angle cylindro-inner-cone cavity

$\varepsilon_a^D(x_0)$ ρ_s/ρ	θ						
	60°	72°	90°	120°	150°	160°	180°
0	0.9980	0.9979	0.9979	0.9976	0.9971	0.9968	0.9970
0.1	0.9984	0.9980	0.9979	0.9978	0.9969	0.9975	0.9677
0.2	0.9986	0.9983	0.9982	0.9975	0.9978	0.9975	0.9374

为验证概率模型及光路跟踪法的可靠性还对全漫射圆筒-内凸锥空腔作了计算, 并与积分方程的精密解作了对比. 计算值列于表 4. 两者符合度在 $2/10000 \sim 3/10000$ 之间.

表 4 全漫反射圆筒-内凸锥空腔两种方法计算结果 ($L/R_0=8, \theta=90^\circ, \varepsilon=0.7$)
Table 4 The calculated results by the two methods of the diffuse cylindro-inner-cone cavity

R_A/R_0	0.5	0.8	1.0
蒙特-卡罗法	0.9992	0.9979	0.9964
积分方程法	0.9990	0.9976	0.9962

除此之外, 针对英国 NPL 使用的带镜盖圆筒-内凸锥腔, 利用本文方法对其求解, 并与作者用积分方程法^[8]的计算结果作了比较, 列于表 5.

表 5 NPL 镜盖圆筒-内凸锥空腔两种方法计算结果
($L/R_0=8, R_A/R_0=0.5, \rho_s=0.95, \varepsilon=0.7$)
Table 5 The calculated results by the two methods of NPL cylindro-inner-cone cavity with a mirror lid

$\theta(^{\circ})$	60	90	120
蒙特-卡罗法	0.9992	0.9991	0.9988
积分方程法	0.9994	0.9992	0.9991

3 结论

由上述各种典型空腔计算结果中, 我们可以得到下述结论:

(1) 作为红外标准辐射源的黑体空腔, 最佳选择为圆筒-内凸锥腔, 圆筒-圆锥腔次之, 绝对避免采用圆筒腔.

(2) 在镜反射成分较高时, 锥角为 90° 的各种复合腔其辐射特性均将减小.

(3) 与英国 NPL 学者的预计相反, 腔盖的镜反射并不能显著地提高空腔的辐射特性.

值得指出的是由于本文的计算结果是在假定腔壁面材料 ρ_s/ρ 之比下得到的, 因而 ρ_s 和 ρ 的测试工作是精确定标红外标准辐射源辐射特性的基础.

参考文献

- 1 DeVos J C. *Physics*, 1954;20:669
- 2 Gouffe A. *Rev. Opt.*, 1954;24:1
- 3 Quinn T J, *Brit. Appl. Phys.*, 1967;18:1105
- 4 Sparrow E M, Albers L U *et al.* *J. Heat Transfer*, 1960;82:253
- 5 Bedford R E, Ma C K. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974;64:339
- 6 Bedford R E, Ma C K. *J. Opt. Soc. Am.*, 1975;65:565
- 7 Bedford R E, Ma C K. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976;66:724
- 8 Chu Zaixiang, Sun Yuxing *et al.* *Appl. Opt.*, 1986;25:4343
- 9 Bedford R E, Chu Zaixiang *et al.* *Appl. Opt.*, 1985;24:2971
- 10 Birkebak R G, Gecket E R. *J. Heat Transfer*, 1965;87:85
- 11 Torrance K E, Sparrow E M. *J. Heat Transfer*, 1965;87:283
- 12 Lin S H, Sparrow E M. *Appl. Opt.*, 1965;15:84
- 13 Lin S H, Sparrow E M. *J. Heat Transfer*, 1965;87:299
- 14 Lin S H. *Thesis of Ph. D.*, University of Minnesota, 1964
- 15 Sun Yuxing, Chu Zaixiang. *High Temperature-High Pressure*, 1987;19:293
- 16 Bedford R E, Ma C K, Chu Zaixiang, Sun Yuxing, *High Temperature-High Pressure*, 1988;21:211
- 17 Ono A. *J. Opt. Soc. Am.*, 1980;70:547
- 18 戴景民, 褚载祥等. *宇航学报*, 1989;3:33
- 19 Quinn T J, Martin J E. *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, 1982;5:103

MONTE-CARLO SOLUTIONS FOR INFRARED STANDARD RADIATION SOURCES*

DAI JINGMIN, HE JIN, CHEN WENXIAN, CHU ZAIXIANG

*(Department of Precise Instruments, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150006, China)*

Abstract: Some methods for evaluating the radiation characteristics of infrared standard radiation sources with specularly reflecting surfaces are presented in this paper. The Monte-Carlo method is stressed and the calculated results and relevant important conclusions for these blackbody cavities by using this method are also summarized.

Key words: blackbody, emissivity, infrared radiation source, Monte-Carlo method.

*The project supported by the National Natural Science Foundation of China.