

# 具有倒锥底面的圆筒形空腔的发射率

谢 顺 康

(中国计量科学研究院成都分院)

提 要

本文精确计算了具有倒圆锥底面的漫射等温圆筒形空腔的局部有效发射率, 指出锥长的最佳值介于0.3至0.4倍筒长之间。

## 一、理论基础

在许多光辐射测量场合, 常常需要一种模拟绝对黑体辐射的空腔辐射器来提供标准辐射源。黑体空腔有多种形状, 但通常采用轴对称的圆筒和圆锥以及它们的组合体。已有几种方法<sup>[1~3]</sup>用来精确计算腔壁的局部有效(或表观)发射率 $\varepsilon_w$ , 其中, Bartell 和 Wolfe<sup>[3]</sup>给出的公式是简明的 Gouffé 型表达式。若腔具有漫射壁表面且是等温的, 则

$$\varepsilon_w = \frac{\varepsilon [1 + (1 - \varepsilon)(B_w - A_w)]}{\varepsilon(1 - B_w) + B_w} \quad (1)$$

这里 $\varepsilon$ 为壁材料发射率,  $w$ 代表壁上任一面积元 $dw$ 的内点,  $A_w$ 为 $dw$ 对空腔开口的辐射几何因子,  $B_w$ 为空腔关于 $w$ 点的平均几何因子。按照 Bartell 和 Wolfe, 它是壁面各点的 $A_w$ 值按面积的加权平均值。即

$$A_w = \int_{S_0} d^2F_{w,0} = dF_{w,S_0} \quad (2)$$

$$B_w = \frac{1}{1 - A_w} \int_S A_n d^2F_{w,n} \quad (3)$$

这里 $S$ 代表空腔的内表面积,  $S_0$ 代表展布于开口的最小内表面积,  $d^2F_{w,0}$ 为 $dw$ 对 $S_0$ 上面元 $dO$ 的辐射几何因子,  $dF_{w,S_0}$ 为 $dw$ 对整个开口的辐射几何因子,  $d^2F_{w,n}$ 为 $dw$ 对 $S$ 上面元 $dn$ 的辐射几何因子。

我们不难进一步揭示 $B_w$ 值的物理实质。事实上, 对球面腔而言,  $A_w = B_w = S_0 / (S + S_0)$ 。故 $B_w$ 与 $S_0 / (S + S_0)$ 差值之大小, 体现了由于空腔非球面性所引起的 $w$ 点发射率值相对为球形腔时的值的偏离程度。 $A_w$ 和 $B_w$ 包含了所有多重反射的影响, 仅由空腔的几何形态所决定。因此, 问题最终归结为纯几何量的计算。

## 二、计算方法

现考虑(1)式对一种特殊形状的空腔——具有倒锥底面的带盖圆筒形空腔的应用。此

种空腔由于能提供高发射率和大的辐射通量,已用于辐射标准,其几何形状如图1所示。圆筒半径为  $R_2$ , 长为  $H$ ; 开口半径为  $R_1$ ; 底面圆锥高为  $L$ 。取圆锥基底中心  $O$  为原点建立直角坐标系,使  $Z$  轴位于腔的轴线上。对实际应用来说,我们只考虑  $L < H/2$  的情形。因为当锥尖伸近开口时,将导致锥尖部分的发射率迅速下降,发射率分布的均匀性也大大变坏。

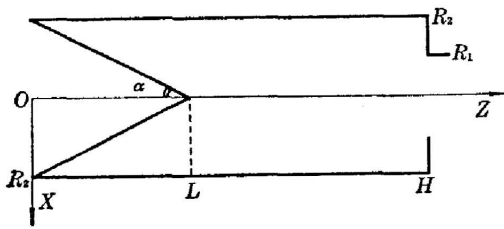


图1 空腔的几何关系

为求得  $B_w$  的具体计算式,我们采用 Bodford 和 Ma<sup>[1]</sup> 的分区近似法(当  $w$  为奇异点时,要同时运用极限法则)。将圆锥壁、圆筒壁和盖子壁各分成若干个环形带,由对称性视每个带上的  $A_w$  为常值(实际取为元区间两端点处值的平均值),因此(3)式的积分可近似地以求和代替之。借助 Bartlett<sup>[4]</sup>原理,环形带之间的交换因子还可进一步表示成面积元对两有限曲面的辐射因子之差,从而把  $B_w$  的计算化为面元对有限曲面的辐射几何因子的计算。

由辐射几何因子的定义,面元  $dw$  对有限面  $A$  的几何因子(图2)为<sup>[5]</sup>

$$dF_{w,A} = \int_A \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi h^2} dA \quad (4)$$

这里,  $\beta_1$  和  $\beta_2$  分别为  $dw$  和  $A$  上面元  $dA$  的法线和两面元连线之夹角,  $h$  为二者之间的距离。在本问题中,有相当多的面积积分(4)的原函数不能表示成有限形式,必须进行数值积分。反之,对于可表示成有限形式的  $A_w(dF_{w,s_0})$  和  $A$  为圆面时的相应  $dF_{w,A}$ ,却可以通过对 Walsh<sup>[6]</sup>关于两同轴圆盘的辐射交换关系式施行简单的微分和代数运算而得到,而毋需对(4)式积分。

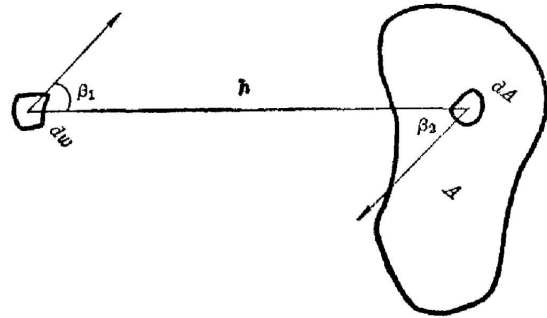


图2 面积元对有限面积的辐射几何关系

### 三、计算结果

用 TQ-16 电子计算机计算了  $\epsilon_w$  沿三个壁面的分布值。由于空腔结构带来的复杂性,计算工作量集中在(4)式的积分上。倘若取大的划分数和高的积分精度,计算时间将长得可怕。然而,也许是空腔本身的相对平坦的高发射率分布帮助我们,使计算变得容易得多。事实上,  $H$  的划分数低于 50,对(4)式积分的相对精度取  $10^{-1}$  或  $10^{-2}$ ,腔的有效发射率就可精确到第五位或第六位。

计算结果表明,局部有效发射率沿三个壁面的变化情况,完全类似于平底圆筒的计算结果<sup>[1]</sup>。重要的差别出现在底锥面和靠近锥面的筒壁部分。对于实际应用来说,通常是将探测器视场限制为这两部分壁面。因此,这里省去了和平底圆筒相近特性的一般讨论,只研究  $Z < H/2$  的那部分壁面。

图3表示  $\epsilon = 0.7$ ,  $H/R_2 = 9.5$  和  $R_1/R_2 = 0.54$  时(这相应于我们的低温全辐射照度标准黑体的几何尺寸),在不同锥高  $L/H = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$  和  $0.45$  下,底锥面和筒壁面的

局部有效发射率变化曲线,其  $Z$  坐标分别记为  $S$  和  $Z_0$ 。为方便地进行比较,图中的横坐标采用相对坐标。而且锥面曲线的横坐标取为锥面上点在  $xy$  平面的投影的径向坐标  $S_r$ ,这样,所有曲线都有着共同的坐标区间。从图 3 可以看出,相对于平底圆筒( $L=0$ )而言,倒锥底圆筒可以显著提高底面的发射率。不过,这是以牺牲均匀性为代价的。然而,当期求高的空腔积分发射率时,这还是值得的。但  $L$  的值不能取得太大,因为随着  $L$  的增大,虽然靠近端面的腔壁的发射率提高了,临近锥顶的壁面的发射率却迅速下降。

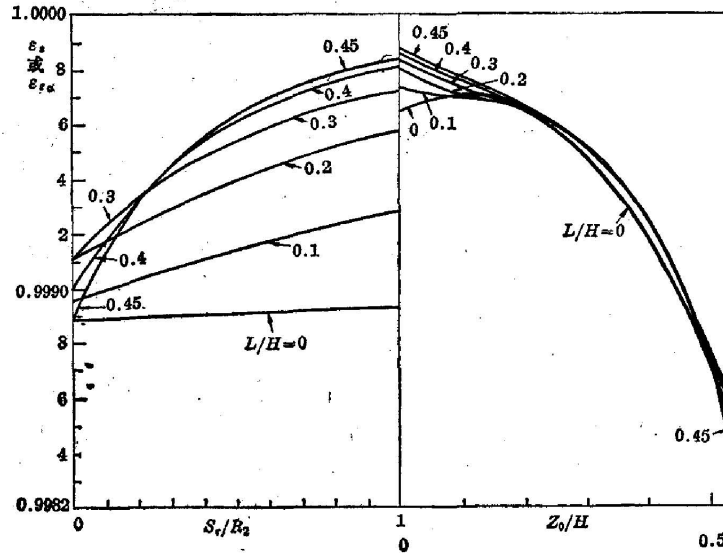


图 3

$H/R_2=9.5, R_1/R_2=0.54, \epsilon=0.7$  时,在不同锥长  $L/H=0$  (即平底)、 $0.1, 0.2, 0.3, 0.4$  和  $0.45$  下,漫射等温带盖倒锥底面圆筒空腔的底锥面和筒壁面 ( $Z_0 \leq H/2$ ) 上的局部有效发射率变化曲线。 $S_r$  为锥面上的点在  $xy$  平面上投影的径向坐标。

从兼顾发射率和均匀性两者出发,  $L/H$  的最佳值应介于  $0.3$  和  $0.4$  之间。

采用底锥面对  $Z < H/2$  的筒壁面的发射率分布似乎影响不大。发射率变化曲线除紧靠端面处可细致地分开外,彼此靠得很近且互相交迭。由此可见,对一定腔长比  $H/R_2$  和开口度  $R_1/R_2$  的空腔来说,关键在于选取锥高  $L$  的值。

## 参 考 文 献

- [1] R. E. Bedford, C. K. Ma; *J. O. S. A.*, 1974, **64**, No. 3 (Mar), 339.
- [2] R. J. Chandos, R. E. Chandos; *Appl. Opt.*, 1974, **13**, No. 9 (Sep), 2142.
- [3] F. O. Bartell, W. L. Wolfe; *Appl. Opt.*, 1976, **15**, No. 1 (Jan), 84.
- [4] A. C. Bartlett; *Phil. Mag.*, 1979, **40**, No. 1 (Jul), 111.
- [5] 埃克尔特和德雷克;《传热和传质》(科学出版社, 1963, 中译本), 409.
- [6] W. T. Walsh; *Proc. Phys. Soc. (London)*, 1920, **32**, 59.

## Emissivities of cylindrical cavities with reverse conical bases

XIE SHUNKANG

(National Institute of Metrology, Chengtu, China)

(Received 4 October 1980)

## Abstract

The local effective emissivities of diffuse isothermal cylindrical cavities with reverse conical bases are precisely calculated, and it is indicated that the optimum value of the cone length situates between three and four tenth of the cylinder length.