

中 华 人 民 共 和 国

计量器具检定规程

500~1000K 工业黑体辐射源

JJG 309—83

(试 行)



国家计量局

北 京

目 录

一、概述.....	(1)
二、技术要求.....	(2)
三、检定设备.....	(3)
四、检定方法.....	(6)
五、检定结果的处理.....	(9)
附录 1 500~1000K 理想黑体的光谱辐射特性	(11)
附录 2 常用黑体腔材料的全发射率	(14)
附录 3 空腔有效发射率的估算	(14)
附录 4 常用红外探测器光谱响应度曲线及红外窗口材料的 光谱透射比曲线	(16)
附录 5 有效辐射光阑大小及探测器位置的选择	(17)
附录 6 测量数据处理及误差估算	(18)
附录 7 检定证书格式	(22)

500~1000K工业黑体辐射源检定规程

本规程适用于新制造的、使用中以及修理后的 500~1000K 工业黑体辐射源的检定。

一、概 述

1 500~1000K 工业黑体辐射源是指用于红外探测元件及红外仪器整机性能测试的,工作在 500~1000K 温度范围(固定温度点工作或可调温度点工作)的黑体辐射源。以下简称工业黑体。

2 工业黑体结构示意图如图 1 所示。

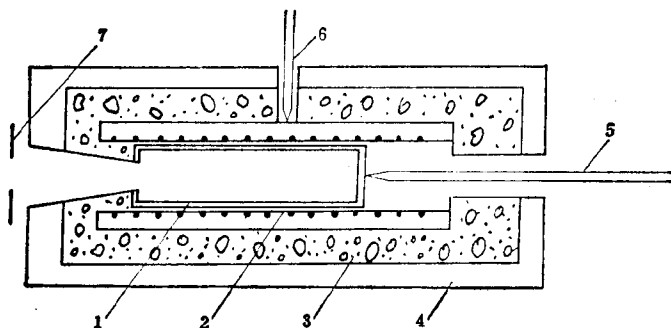


图 1 工业黑体结构示意图

- 1—黑体腔; 2—加热器; 3—保温层;
4—冷却水管或风道; 5—黑体腔测温元件;
6—黑体腔控温元件; 7—精密辐射光阑

2.1 黑体腔常用的腔形有圆柱形、圆锥形、球形、以及其它轴对称旋转体组合。

2.2 加热器常用电阻型加热器。

2.3 保温层可以是热绝缘材料,也可以是辐射反射屏。

2.4 冷却方式 有水冷或风冷。

2.5 测温元件和控温元件可以是热电偶或电阻温度计。

2.6 精密辐射光阑可以装置在黑体本体上,也可以分离设置。光阑直径通常在1~10mm之间分级可变。

2.7 工业黑体应配有控温仪和工作温度指示仪表,保证黑体稳定地工作在所设定的温度上。

3 黑体辐射源的辐射特征

3.1 工业黑体的辐射出射度按下式计算:

$$M = \varepsilon \sigma T^4 W \cdot \text{m}^{-2} \quad (1)$$

式中: T ——工业黑体有效辐射面的绝对温度;

σ ——斯忒藩-玻尔兹曼常数,其值为 $5.670 \times 10^{-8} [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$

ε ——工业黑体的有效发射率。

3.2 依据对辐射源光谱特性的要求选择工业黑体的工作温度。

3.3 工业黑体的有效发射率与腔体材料表面发射率、腔形、腔的温度分布有关。当上述三个参数确定的情况下可以对工业黑体的有效发射率进行计算。

二、技术要求

4 工业黑体按其性能参数分为一,二,三等。

5 一般性能应满足如下要求:

5.1 外形尺寸合理,便于使用和送检。

5.2 结构紧凑、装配可靠。

5.3 腔体内表面氧化膜或涂料无明显剥落。

5.4 水冷水管无漏水,风冷风扇无异常声响。

5.5 通电工作后,用验电笔检查腔体不应带电,腔口处无水汽或挥发物凝聚。

5.6 在设定工作温度上工作,工业黑体前表面温升不得超过环境温度10K。

6 工业黑体腔体参数应符合如下要求:

6.1 应具有准确尺寸的腔形图,并标明有效辐射面的位置。有效

辐射面直径应大于 12mm。

6.2 腔体有效辐射面中心、腔体开口中心、以及黑体前表面开口中心（或者精密辐射光阑中心）应在一直线上，其偏差不应超过 0.5mm。这条直线称为工业黑体的光轴。

6.3 有效辐射面边缘与腔体开口边缘连线所形成的立体角顶点应位于黑体前表面开口之外，到黑体前表面的距离必须大于 180 mm。

6.4 在假定腔体有均匀温度分布和腔体材料有标称样品发射率值的条件下，工业黑体的有效发射率计算值对于一等应大于 0.995，对于二等应大于 0.99，对于三等应大于 0.97。所使用的计算公式可以根据具体情况选定。

7 工业黑体的温度特性

7.1 工业黑体稳定到设定温度后，要求温度稳定度对于一等应优于 $0.001T/h$ ；对于二等优于 $0.002T/h$ ；对于三等应优于 $0.003T/h$ 。 T 为设定温度值（下同）。

7.2 工业黑体应配有相应准确度的控温仪表和测温仪表，能在 3 小时内稳定到设定温度。

7.3 黑体腔有效辐射面或有效辐射部分的温度均匀性对于一等应优于 $0.001T$ ；对于二等应优于 $0.002T$ ；对于三等应优于 $0.003T$ 。

7.4 工业黑体配备的测温仪表应能直接或间接测量黑体腔有效辐射面或有效辐射部分的温度。测温准确度对于一等应优于 0.1%；对于二等应优于 0.2%；对于三等应优于 0.5%。

8 工业黑体的辐射特性主要由实测的有效发射率来表征。

8.1 工业黑体的实测有效发射率对于一等应大于 0.99；对于二等应大于 0.98；对于三等应大于 0.95。

8.2 工业黑体实测有效发射率在检定周期内其变化对于一等不超过 1%；对于二等不超过 2%；对于三等不超过 3%。

三、检定设备

9 500~1000K 国家级标准黑体一台，以下简称标准黑体。其主要特征参数如下：

9.1 标准黑体的腔体参数

9.1.1 标准黑体的腔体尺寸如图2所示。

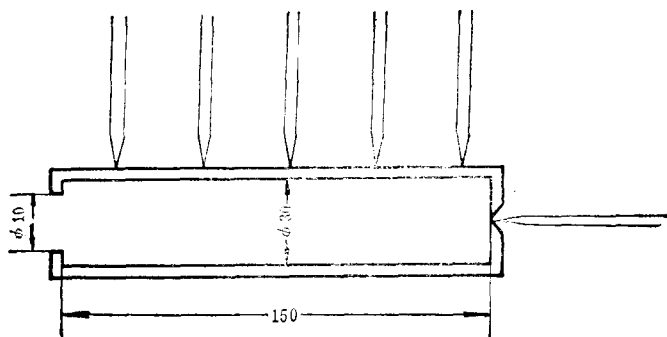


图2 标准黑体的腔体结构

9.1.2 腔体由镍铬合金钢制成, 经过高温氧化致黑, 材料表面发射率大于0.70。

9.1.3 选择腔底作为有效辐射面, 腔底前表面加工成同心圆环, 便于对光。背面有测温孔, 便于准确测量有效辐射面温度。

9.1.4 腔壁外侧有若干测温点, 便于监测腔体温度分布。

9.2 标准黑体的温度特征

9.2.1 标准黑体有效辐射面(圆柱腔腔底)温度均匀性为 $\pm 0.02\%T$ 。

9.2.2 在从腔底向外长度为110 mm的腔体等温区内, 温差不超过 $0.2\%T$ 。

9.2.3 有效辐射面的温度测量准确度为 $0.06\%T$ 。

9.2.4 标准黑体升温由多点PID控温仪控制。3小时内达到设定温度及稳定的温度分布。黑体温度的稳定度为 $0.02\%T \cdot h^{-1}$ 。

9.3 标准黑体有效发射率的计算值为0.999。

9.4 标准黑体的辐射准确度为0.6%。

10 温度控制及测量设备

10.1 DWK-703 控温仪或其它同等准确度控温仪一套。

10.2 一等标准铂铑 10-铂热电偶 2 支。

10.3 测温用无热电势多点转换开关 1 个。

10.4 分辨率为 $1\mu\text{V}$ ，准确度为 0.01% 的数字电压表 1 台。

10.5 水银温度计（分度值 0.2°C ，示值范围 $0\sim 50^\circ\text{C}$ ）一支。

11 辐射测量装置一套。

11.1 精密光阑一组，直径的公称尺寸分别为 1.9, 2.1, 2.2, 2.6, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 mm。

11.2 电动水冷开关一个，提供稳定的背景辐射。

11.3 带水冷挡屏的杂散辐射屏蔽罩一个。

11.4 光具座一个，可调支架若干。

11.5 可以自动准确定位的黑体比对台一个。

11.6 内径千分尺（读数值 0.01 mm ，测量范围 $50\sim 575\text{ mm}$ ）一套。

12 辐射探测系统

12.1 辐射探测器的选择

12.1.1 辐射探测应在 $1\sim 15\mu\text{m}$ 的波长范围内有近似平坦的光谱特性。

12.1.2 辐射探测器应有足够高的响应率，能探测到 10^{-9} W 的辐射。

12.1.3 根据不同的情况可以选用的辐射探测器有：无窗锥腔型绝对辐射计，以下简称绝对辐射计；无窗带金黑镀层的热释电辐射计，以下简称热释电辐射计；带 KBr 窗口的真空热电偶，以下简称真空热电偶。

12.2 辐射探测方式可以有如下两种：

12.2.1 直流探测，对于绝对辐射计和真空热电偶可以使用直流探测方式，其方框图如图 3。

12.2.2 交流探测，对于热释电探测器和真空热电偶可以使用交流探测方式，其方框图如图 4。

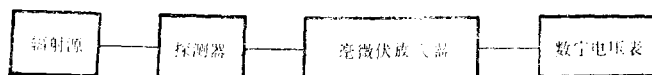


图3 直流探测方框图

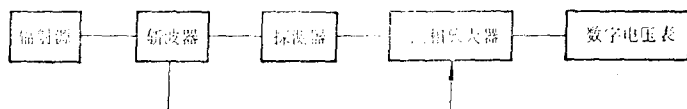


图4 交流探测方框图

12.2.3 无论那种探测方式都要求探测系统至少能读出三位数。

13 光路调整器具

13.1 精度为 0.05 mm 的十字分划板一个。

13.2 DS₃ 型或其它同等准确度的光学水准仪 2 台。

13.3 准直用 He-Ne 激光器一个。

13.4 平行性优于 0.01 mm 的平行平面反射镜一个。

14 其它辅助仪器

14.1 2kVA 电子稳压器 1 台。

14.2 0.5 级, 0~150 V 交直流电压表一台。

14.3 0.5 级, 0~5 A 交直流电流表一台。

14.4 实验室必备工具。

四、检 定 方 法

15 检定准备

15.1 确定测量系统主光轴

15.1.1 按图 5 排列各有关部分。

15.1.2 调整工程水准仪 1 的光轴成水平, 并通过十字分划板的中心, 该光轴定为测量系统的主光轴。

15.1.3 系统主光轴应大致通过水冷挡屏开口的中心。

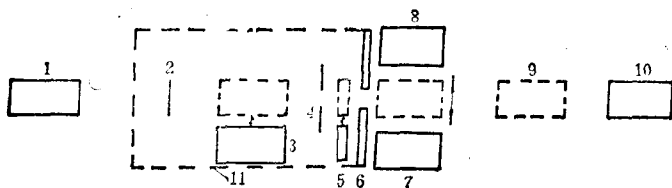


图5 测量系统方框图

- | | | |
|-----------|----------|--------------|
| 1—工程水准仪, | 2—十字分划板, | 3—探测器, |
| 4—精密辐射光阑, | 5—通水开关, | 6—水冷挡屏, |
| 7—标准黑体, | 8—工业黑体, | 9—He-Ne 激光器, |
| 11—辐射屏蔽罩 | | |

15.1.4 调整工程水准仪 10, 使其光轴与系统主光轴重合。

15.1.5 将准直用 He-Ne 激光器移入光路, 并调整激光器支架使激光束和系统主光轴重合。

15.1.6 工作过程中, 通过工程水准仪 1 瞄准十字分划板来作系统主光轴的检查。

15.2 按第五条要求检查工业黑体的一般性能, 合格后将其装在可调支架上。

15.3 联好电气接线、水管接头。

15.4 装好热偶冷端冰瓶和热偶测量线。

16 光路调整

16.1 启动可自动移动工作台到标准黑体设定位置, 这时标准黑体进入光路。

16.2 调整可调支架, 使标准黑体的光轴与测量系统主光轴重合, 通过工程水准仪 1 观察。

16.3 启动可自动定位工作台, 到工业黑体设定位置, 这时标准黑体移出光路, 工业黑体进入光路。

16.4 调整可调支架, 使工业黑体的光轴与测量系统的主光轴重合, 通过工程水准仪 1 观察。

16.5 启动自动定位工作台。使标准黑体和工业黑体都位于测量系统主光轴之外（如图5所示）。

16.6 将探测器装在可调支架上。探测器到精密有效辐射光阑的距离参看附录5确定。调整可调支架，用工程水准仪10观察使光轴通过探测平面（探测器接收面或限制光阑）中心且相互垂直。

16.7 将预先选定的精密有效辐射光阑装在光阑支架上。光阑直径的选定参看附录5。调整可调支架，用工程水准仪10观察使光阑孔对称地落在工程水准仪的十字线上。

16.8 需要检查探测平面和精密有效辐射光阑平面是否严格垂直系统主光轴时，将He-Ne激光器移入光路。并在探测平面和精密光阑平面上贴一平行平面反射镜。看反射光束与入射光束是否重合。

17 连好辐射探测器系统接线，装好辐射屏蔽罩。

18 使黑体升温并随时监测升温情况。最后使工业黑体和标准黑体都稳定地工作在相同的设定温度上。两者工作温度的差值不应大于5K。

19 用一等标准铂铑10-铂热电偶和适当夹具测量工业黑体辐射腔有效辐射面温度。

19.1 记下测得的有效辐射面温度值 T_s 。

19.2 同时记下工业黑体本身测量仪表温度示值。

19.3 在有效辐射面不同的部位进行6次测量。求出标准偏差 ΔT_s ，以此表示有效辐射面温度的均匀性。

20 记下标准黑体的有效辐射面温度（即腔底温度）值 T_b 。

21 启动可移动工作台到标准黑体设定位置，对来自标准黑体的辐射进行测量。

21.1 以3分钟为时间间隔来开闭水冷开关。

21.2 对应于水冷开关的开闭，辐射探测系统给出标准黑体辐射信号 E_b 和水冷开关背景辐射信号 E_{b_0} 。

21.3 当 E_b 的变化量 ΔE_b 和 E_{b_0} 的变化量 ΔE_{b_0} 分别满足

$$\Delta E_b < 0.05(E_b - E_{b_0})$$

$$\Delta E_{b_0} < 0.05(E_b - E_{b_0})$$

时,开始连续进行 10 个周期的测量读数。

21.4 用水银温度计测出水冷开关出水温度,作为背景辐射的辐射温度 T_{b_0} 。

22 启动可移动工作台,到工业黑体设定位置,准备对工业黑体进行测量。

22.1 以 3 分钟为时间间隔来开闭水冷开关。

22.2 对应于水冷开关的开闭,辐射探测系统给出工业黑体辐射信号 E_s 和水冷开关背景辐射信号 E_{s_0} 。

22.3 当 E_s 的变化量 ΔE_s 和 E_{s_0} 的变化量 ΔE_{s_0} 分别满足

$$\Delta E_s < 0.05(E_s - E_{s_0}),$$

$$\Delta E_{s_0} < 0.05(E_s - E_{s_0})$$

时,开始连续进行 10 个周期的测量读数。

22.4 用水银温度计测出水冷开关出水温度,作为背景辐射的辐射温度 T_{s_0} 。

23 必要时可重复第 21、22 条的测量。

24 测量结束,黑体降温关闭测量仪表,至少 30 分钟后关闭冷却水。

五、检定结果的处理

25 根据第 21 条测量所记录的数据,计算出对应于标准黑体的探测器净输出 E_B 和相对测量标准偏差 $(\delta_n - 1)_B$, 计算方法参见附录 6。

26 根据第 22 条测量所记录的数据,计算出对应于工业黑体的探测器净输出 E_G 和相对测量标准偏差 $(\delta_n - 1)_G$, 计算方法参见附录 6。

27 当 $(\delta_n - 1)_B$ 和 $(\delta_n - 1)_G$ 不大于 2% 时,将 E_G 、 E_B 代入下面公式计算工业黑体的有效发射率 ε_s

$$\varepsilon_s = \varepsilon_b \frac{E_G}{E_B} \frac{T_b^4 - T_{b_0}^4}{T_s^4 - T_{s_0}^4}$$

在这里 ε_b 为标准黑体的有效发射率,其值为 0.999。

28 检定误差的估算见附录6。

29 检定证书格式见附录7。

30 工业黑体检定周期为18个月，使用中的工业黑体送检时需带上次检定证书。

附 录

附录 1

500~1000K 理想黑体的光谱辐射特性

理想黑体的光谱辐射特性可用 Planck 公式来描述:

$$M_{\lambda} = c_1 \lambda^{-5} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (1-1)$$

$$c_1 = 3.7415 \times 10^{-16} \text{W} \cdot \text{m}^2$$

$$c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{K}$$

式中: M_{λ} ——理想黑体的光谱辐射出射度;

T ——理想黑体的绝对温度;

c_1 ——第一辐射常数;

c_2 ——第二辐射常数.

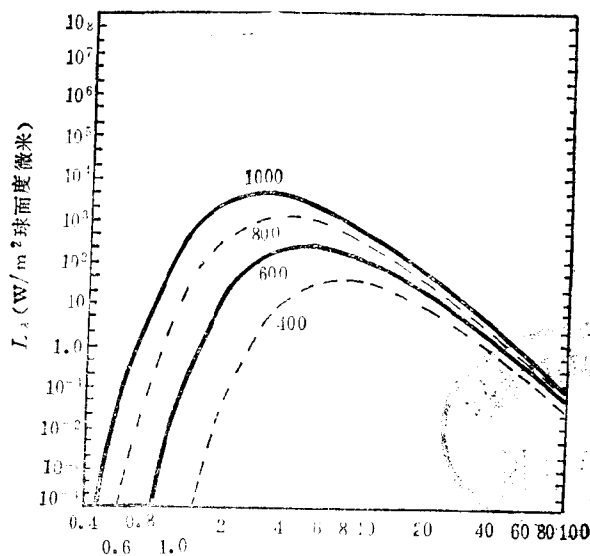


图 1-1 理想黑体的光谱辐射特性曲线

对于 $T = 500 \sim 1000\text{K}$, 图 1-1 给出了理想黑体的光谱辐射特性曲线, 波长 λ (μm)。

对应于最大光谱辐射的波长 λ_m 由 Wein 位移定律确定

$$\text{即: } \lambda_m = \frac{2898}{T} \mu\text{m} \quad (1-2)$$

理想黑体在波长 λ_m 上的光谱辐射出射度 M_{λ_m} 为

$$M_{\lambda_m} = 1.2865 \times 10^{-5} T^5 \text{ W/m}^3 \quad (1-3)$$

相对光谱辐射出射度 M_λ/M_{λ_m} 为

$$\frac{M_\lambda}{M_{\lambda_m}} = \eta(x) = 142.32 \times \frac{x^{-5}}{e^{\frac{4.9651}{x}} - 1} \quad (1-4)$$

$$\text{这里 } x = \frac{\lambda}{\lambda_m}.$$

$\eta(x)$ 与黑体温度无关, 称 Planck 公式的普遍形式, 函数曲线示于图 1-2。

实际工作中常常需要知道从 $\lambda = \lambda_1$ 到 $\lambda = \lambda_2$ 区间内黑体辐射功率占黑体全辐射功率的比例 γ 。

按 γ 的定义, 利用普遍形式的 Planck 公式可以写出

$$\gamma = \frac{\int_{x_1}^{x_2} \eta(x) dx}{\int_0^\infty \eta(x) dx} = \phi(x_2) - \phi(x_1) \quad (1-5)$$

在这里我们定义函数

$$\phi(x) = \frac{\int_0^x \eta(x) dx}{\int_0^\infty \eta(x) dx} \quad (1-6)$$

图 (1-3) 示出了函数 $\phi(x)$ 的形式, 利用图 (1-3) 能方便地求出 γ 。

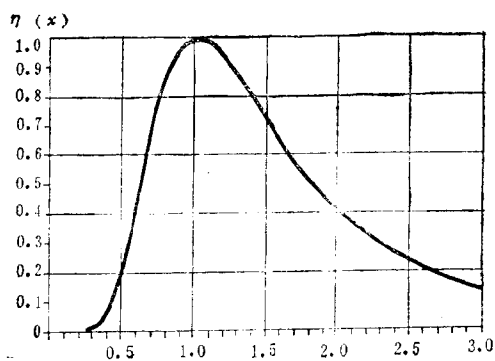


图 1-2 理想黑体普遍形式的 Planck 曲线

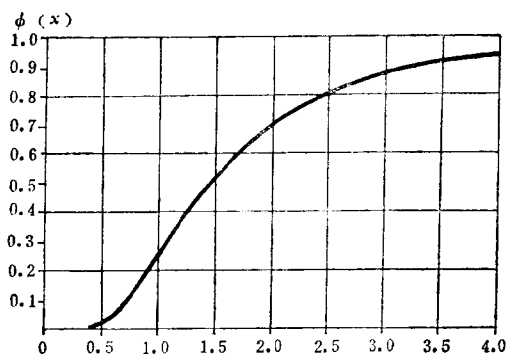


图 1-3 理想黑体在 0 到 λ 的波长间隔内辐射功率
占全辐射功率的比例

附录 2

常用黑体腔材料的全发射率

材 料	表面状态	温度 (°C)	全发射率
灯 黑	熏 制	20~200	0.93
黑 漆	喷 涂	20~200	0.90
不锈钢	经800°C氧化	600	0.85
钢	经600°C氧化	200~600	0.79
铜	经600°C氧化	200~600	0.57
黄 铜	经600°C氧化	200~600	0.61~0.59
铝	经600°C氧化	200~600	0.11~0.19
铝	阳极氧化	100	0.55
镍	氧化面	200~600	0.37~0.48

附录 3

空腔有效发射率的估算

当黑体空腔几何尺寸, 材料发射率确定之后, 可以从理论上对空腔的有效发射率进行计算, 计算的方法很多, 而且往往是很复杂。这里仅列出几种, 作为选择计算方法时的参考。

(一) Gouffe 方法

这种方法是通过求入射光线从腔口反射出的那部分能量从而计算空腔的有效发射率, 给出公式为

$$\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon \left[1 + (1 - \varepsilon) \left(\frac{R}{S} - \frac{R}{\pi D^2} \right) \right]}{\varepsilon \left(1 - \frac{R}{S} \right) + \frac{R}{S}} \quad (3-1)$$

式中: ε ——腔壁材料的发射率;

R ——空腔开口的面积;

S ——空腔内表面的总面积 (包括孔);

D ——孔到腔底的距离。

推导该公式时利用了如下假设条件:

- 1 腔壁面是符合 Lambert 条件的漫射表面。
- 2 腔内的辐射分布经过两次反射后是均匀的。
- 3 等温腔。

(二) 积分方程法

这种方法的出发点是在等温漫射空腔壁面的假定下,认为空腔内壁各点辐射的有效能量等于面元本身的发射加上空腔内其它壁面发射在此面元上的反射,分别列出空腔内壁各点的积分方程,就可以求出空腔内壁任一点的发射率。

这种方法经过 Buckley、Sparrow、Bedford 的发展,已经成为相当准确的计算方法,但鉴于计算的复杂性,这种方法计算空腔的有效发射率必须借助于计算机来完成。

(三) Devos 方法

这种方法对壁面可不作理想漫反射假定,首先求出壁面的实际反射图,并用它来计算空腔内壁的发射率。在理想的没有开孔和温度梯度的情况下,黑体腔内每一点以及所有方向上辐射强度都是均匀的。对于内壁的各个面元,在给定方向上的辐射强度都是由两部分构成:一部分是面元本身的辐射强度,另一部分是来自内壁的其它面元在被研究方向上的反射辐射。然后在这样的理想黑体中相继引入小孔和温度梯度,这时腔体内各部分的辐射强度发生变化,变化的数值与孔的大小、孔的位置和内壁部分的反射率有关。表面元在开口方向上的辐射强度等于本身的辐射强度加上来自内表面其它面元(除去开孔)的在开孔方向上的反射辐射强度,在一级近似中认为内表面其它面元的辐射强度不受干扰,仍然有理想黑体的辐射强度,在二级近似中将一级近似中计算出的内表面其它面元的辐射强度代入,以此类推。可以达到所需要的准确度。

其它还有许多更为复杂的方法,在这里就不一一列举了。事实上除了 Gouffe 方法外,其它都是相当麻烦的。幸运的是,目前国内已有单位可以专门对各种腔型进行有效发射率的计算。