

红外技术

及其在工业生产中的应用

黄荣华

水利电力出版社

内 容 提 要

本书简要地叙述了红外技术的基本知识,对工业生产中应用较多的红外探测系统及有关红外探测设备作了较详细的分析和介绍。最后以大量的事例说明红外技术在工业生产中的具体应用,及所取得的成功经验。

本书既可供从事红外技术工作的现场技术人员和工人阅读,也可供从事普及或推广应用红外技术的有关人员参考。

红外技术及其在工业生产中的应用

黄 荣 华

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

水利电力出版社印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

787×1092毫米 32开本 7.5印张 166千字 1插图

1987年12月第一版 1987年12月北京第一次印刷

印数0001—3530册

ISBN 7-120-00066-7/TB·1

15143·6497 定 价 1.70元

序 言

红外技术是以红外辐射为特定对象,研究其产生、传输、探测以及与其它物质相互作用的规律;并在此基础上,探索红外辐射作为能量和信息传递的手段,在军事上、在宇宙空间技术上、在工农业生产中以及在科学研究的各个方面的重要应用。

红外技术是一门综合性的科学技术,它是现代物理学和无线电电子学的重要内容之一。它的发展依附于其它现代科学技术的发展。在最近几十年里,由于光学技术、半导体物理学、无线电电子学以及低温技术的迅速发展,有力地推动了红外技术的发展,使之进入了推广应用的新阶段。

今天,红外技术除了广泛地用于军事目标的侦察、搜索、跟踪、通讯和红外制导以外,在遥感、遥测、空间技术上也广泛使用。在工农业生产中,红外测温、红外成像、红外监测与控制,都取得了显著的成效。

随着红外技术和光电子技术的日臻完善,随着宇宙空间研究的广泛开展,随着红外激光器的出现,红外技术的应用也在不断地扩展,应用红外技术的领域正在逐步扩大,红外技术应用的项目也在与日俱增。当然,目前还不能预言,红外技术是否可以应用于所有的领域。但可以断言,红外技术无论在科学技术的研究当中,还是在工农业生产的各个方面;无论是在国防军事部门,还是在人民生活当中;无论是在探索宇宙空间,还是用于地球资源勘探,都将发挥出越来越大的作用。

我国红外技术起步较晚，但发展很快，应用范围也在不断扩大。当前，在各个主要工业部门中，都可找到应用红外技术的具体事例。本书根据现场工作的需要，对红外技术的基本知识和在工业生产中的典型应用范例，作了简单扼要的介绍，以利普及红外技术知识，促使这一新兴的科学技术更快地转变为生产力，更好地为国民经济建设，实现四个现代化服务。

由于红外技术是一门跨学科的科学新技术。它涉及的知识面甚广，内容极其丰富，由于本人知识水平有限，错误在所难免，切望读者批评指正。

本书在编写过程中，曾得到电子工业部第十一研究所罗绳武和傅翔同志及其他单位的有关同志的指导和帮助，并提供了宝贵意见。在此表示衷心地感谢！

黄荣华

一九八六年十二月

目 录

序 言	
第一章 红外技术基础	1
第一节 红外辐射的基本知识	1
第二节 黑体辐射	9
第三节 非黑体辐射	24
第二章 红外探测系统	38
第一节 目标	39
第二节 红外光学系统	41
第三节 辐射调制技术	45
第四节 红外探测器	55
第五节 红外电子系统	72
第三章 红外探测仪器	82
第一节 红外测温	82
第二节 红外成像	99
第三节 红外分析	118
第四章 红外技术在工业生产中的应用	122
第一节 设备的安全监测	122
第二节 红外控制	127
第三节 产品质量检查	137
第四节 红外无损检测	145
第五节 火源探测	150
第六节 地球资源勘察	153
第七节 环境污染的探测	157
第五章 红外技术在电力工业中的应用	160
第一节 电气设备高温过热的原理	160

第二节	电气设备过热部位分析判断	167
第三节	带电检测电气设备温度	174
第四节	红外成像的应用实例	182
第六章	远红外加热与干燥	201
第一节	远红外加热原理	201
第二节	远红外辐射器	206
第三节	远红外加热炉	214
第四节	远红外辐射涂料	216
第五节	远红外辐射层的涂覆工艺	221
第六节	远红外加热应用实例	227

第一章 红外技术基础

第一节 红外辐射的基本知识

一、红外辐射

红外辐射俗称红外线，它是一种人眼看不见的光线。但实际上它和其它任何光线一样，也是一种客观存在的物质。任何一个物体，只要它的温度高于绝对零度，才有红外线向周围空间辐射出来。

我们知道，用一个玻璃三棱镜，可以将一束白光分解为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等七种颜色的单色光。这是因为它们的波长不同，在通过玻璃三棱镜时，产生不同折射现象的缘故。

红外线是位于可见光中的红色光以外的光线。它的波长范围大致在 $0.76\mu\text{m}$ 到 $1000\mu\text{m}$ 的频谱范围之内。相对应的频率大致在 $4 \times 10^{14}\text{Hz}$ 到 $3 \times 10^{11}\text{Hz}$ 之间。红外线与可见光、紫外线、 x 射线、 γ 射线和微波、无线电波一起，构成了整个无限连续的电磁波谱，如图1-1所示。

在红外技术中，一般将红外辐射分为四个区域，即近红外区、中红外区、远红外区和极远红外区。这里所说的远近是指红外辐射在电磁波谱中与可见光的距离，靠近可见光的为近红外区。

红外辐射的物理本质是热辐射。物体的温度越高，辐射出来的红外线越多，红外辐射的能量就越强。科学家们在研

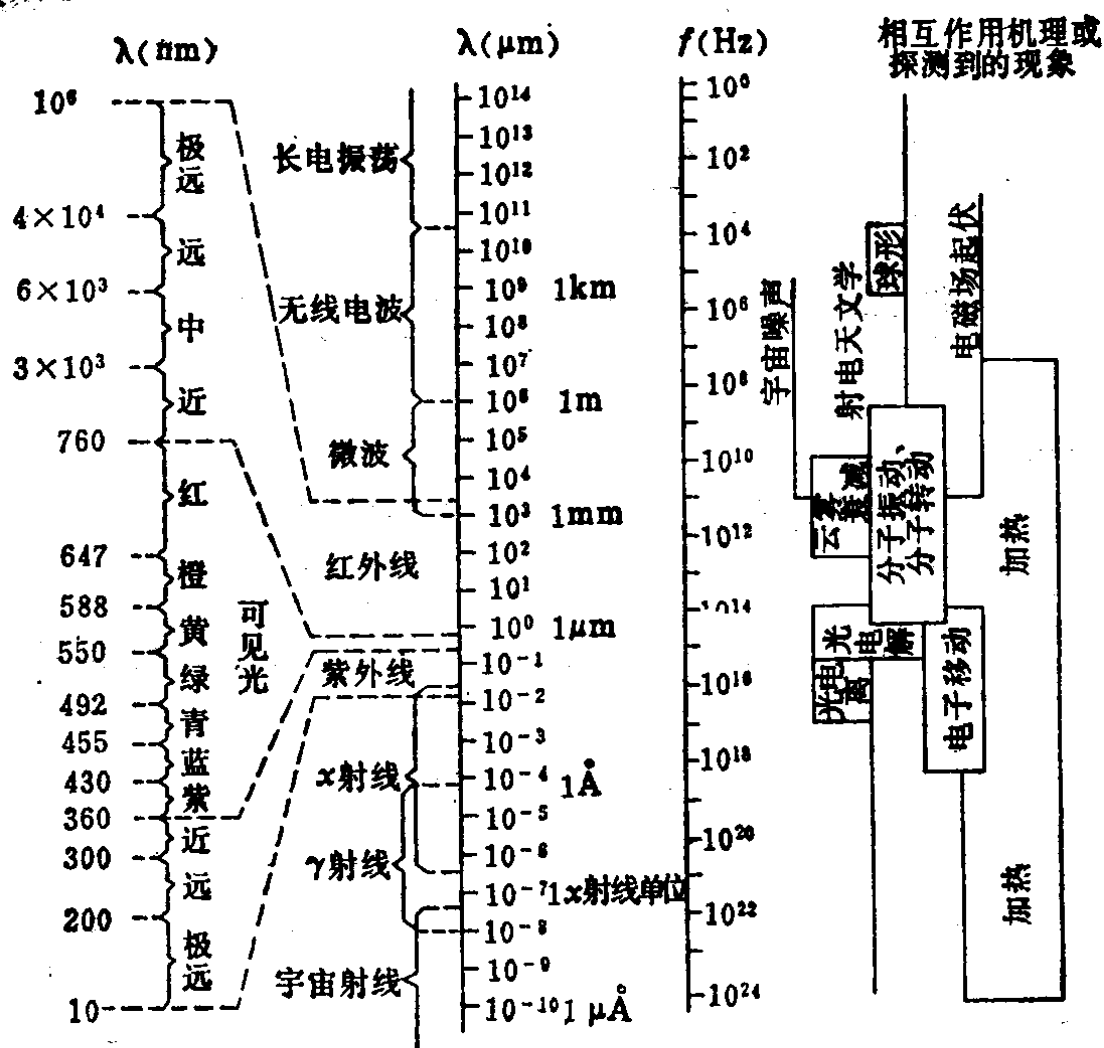


图 1-1 电磁波谱图

究太阳光谱各种单色光的热效应时，发现热效应从紫色光到红色光是逐渐增大的；而且最大的热效应出现在红色光的光谱以外，也就是出现在红外辐射的频谱范围内；这表明红外辐射具有较强的热效应，所以有的人又将红外辐射称为热辐射或热射线。试验表明，波长在0.1~1000μm之间的电磁波被物体吸收时，可以显著地转变为热能。可见，载能电磁波是辐射热传播的主要媒介物。即使在高度真空中，相距很远的物体，也可通过热辐射进行能量传递。例如，太阳和地球相距约一亿五千万公里，但太阳发出的光和热，经过八分钟左

右便可传到地球表面。

红外辐射和所有电磁波一样，是以波的形式在空间直线传播的。它在真空中的传播速度等于波的频率与波长的乘积，即等于光在真空中的传播速度

$$c = \lambda f \quad (1-1)$$

式中 λ ——红外辐射的波长， μm ;

f ——红外辐射的频率， Hz ;

c ——光在真空中的传播速度， $c = 3.0 \times 10^{10} \text{cm/s}$ 。

红外辐射在大气中传播时，由于大气中的气体分子、水蒸汽以及固体微粒、尘埃等物质的吸收和散射作用，使辐射能在传输过程中逐渐衰减。其中水蒸汽对红外辐射的吸收本领最强，它在较宽的波长范围内对红外辐射都有强烈地选择性吸收。如在 $2.7\mu\text{m}$ 、 $6.3\mu\text{m}$ 附近有很强的吸收带， CO_2 主要吸收 $2.7\mu\text{m}$ 、 $4.3\mu\text{m}$ 以及 $15\mu\text{m}$ 附近的红外辐射， O_3 在 $9.6\mu\text{m}$ 处有较强的吸收。此外， CO 在 $4.8\mu\text{m}$ 处， N_2O 在 $4.5\mu\text{m}$ 和 $7.8\mu\text{m}$ 处， CH_4 在 $3.2\mu\text{m}$ 和 $7.6\mu\text{m}$ 处都有明显的吸收作用。另外，大气中的固体或液体悬浮颗粒，如灰尘、烟、雾等会使红外辐射发生强烈散射或吸收，导致红外辐射衰减。空气中对称的双原子分子，如 N_2 、 H_2 、 O_2 不吸收红外辐射，因而不会造成红外辐射在传输过程中衰减。图 1-2 为通过一海里长度的大气透过率曲线。从图中可以看出，红外辐射在通过大气层时被分割成三个波段。只有那些位于吸收带之间的红外辐射，才能透过大气层向远处传播，而处在吸收带之内的红外辐射的这三个波段，即 $2 \sim 2.6\mu\text{m}$ 、 $3 \sim 5\mu\text{m}$ 和 $8 \sim 14\mu\text{m}$ 统称为“大气窗口”。这三个大气窗口对红外技术应用特别重要，因为一般的红外仪器都工作在这三个窗口之内。

表 1-1 一些辐射术语的定义、符号和单位

辐射术语	符号	定 义	单 位
辐 射 能	W	辐射源以电磁波形式所辐射的能量	焦耳(J)
辐射功率	P	辐射能传输的速率, $\frac{\partial W}{\partial t}$	瓦(W)
辐射强度	J	点源在单位立体角内的辐射功率, $\frac{\partial P}{\partial \Omega}$	瓦/球面度 (W/sr)
辐 射 出 射 度	M	辐射源单位面积所发出的 辐 射 功 率, $\frac{\partial P}{\partial A}$	瓦/厘米 ² (W/cm ²)
面 辐 射 强 度	N	面源在单位投影面积, 单位立体角 内的辐射功率, $\partial^2 P / \cos \theta \cdot \partial A \cdot \partial \Omega$	瓦/球面度·厘米 ² (W/sr·cm ²)
辐 照 度	H	入射到接受体表面单位面积上的辐 射 功 率, $\frac{\partial P}{\partial A}$	瓦/厘米 ² (W/cm ²)
光谱辐射 功 率	P_λ	在 λ 附近单位波长间隔内的辐射功 率, $\frac{\partial P}{\partial \lambda}$	瓦/微米 (W/ μ m)
光谱辐射 强 度	J_λ	在 λ 附近单位波长间隔内的辐射强 度, $\frac{\partial J}{\partial \lambda}$	瓦/球面度·微米 (W/sr· μ m)
光谱辐射 出 射 度	M_λ	在 λ 附近单位波长间隔内的辐射出 射度, $\frac{\partial M}{\partial \lambda}$	瓦/厘米 ² ·微米 (W/cm ² · μ m)
光 谱 辐 照 度	H_λ	在 λ 附近单位波长间隔内的 辐 照 度, $\partial H / \partial \lambda$	瓦/厘米 ² ·微米 (W/cm ² · μ m)

续表

辐射术语	符号	定 义	单 位
比辐射率	ϵ	同一温度下, 物体的辐射出射度与黑体的辐射出射度之比	—
辐 射 吸 收 率	α	物体吸收的辐射功率与入射的辐射功率之比	—
辐 射 反 射 率	ρ	物体反射的辐射功率与入射的辐射功率之比	—
辐 射 透 过 率	τ	物体透过的辐射功率与入射的辐射功率之比	—
单色比辐 射 率	ϵ_λ	在波长 λ 处物体的辐射出射度与黑体的辐射出射度之比	—

二、红外辐射的技术术语

辐射术语在不同的书籍上使用的名称和符号各不相同。本书采用有关专业书籍和计量部门所推荐的技术术语，其定义、符号和单位列于表1-1中。

三、红外辐射源

既然任何物体，当其温度高于绝对零度时，都有红外线向周围空间辐射出来。那么，所有物体在一定条件下，都可以当作红外辐射源。

根据辐射源几何尺寸的大小，距探测器的远近，又分为点源和面源(扩展源)；但同一个辐射源，在不同的场合，既可以是点源，也可以是面源。如一架喷气飞机,当它在10km以外时，它是一个有效的点源；而在10m以内时，它就呈现为一个面源。在一般的情况下，我们把充满红外光学系统瞬

时视场的大面积辐射源叫做面源，而将没有充满红外光学系统瞬时视场的小面源叫做点源。

理想的点源被认为是没有面积的几何点，如图1-3所示。其辐射强度 J 是点源在某一指定方向，单位立体角内发射的辐射功率，即

$$J = \frac{\partial P}{\partial \Omega} \quad (1-2)$$

所以，点源的辐射强度 J 仅与方向有关，而与源面积无关。

在图1-3中，设点源的辐射强度为 J ，它与被照面上 X 处的圆面积 dA 的距离为 l ，圆面积 dA 的法线 n 与 l 的夹角为 θ ，则 dA 接收到的辐射功率为

$$dP = J d\Omega = J \frac{dA \cos \theta}{l^2} \quad (1-3)$$

故点源在被照面上 X 处所产生的辐照度与点源的辐射强度和被照面法线的夹角的余弦的积成正比，与它们之间的距离平方成反比。

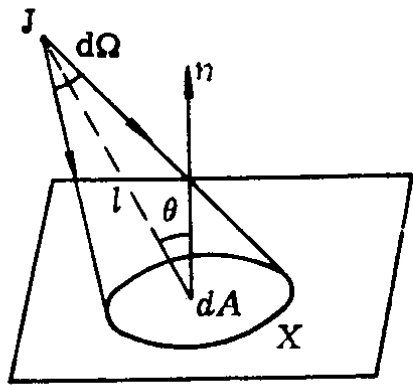


图 1-3 点源

对于面源，它的面辐射强度为

$$N = \lim_{\substack{\Delta A \rightarrow 0 \\ \Delta \Omega \rightarrow 0}} \left(\frac{\Delta^2 P}{\cos \theta \cdot \Delta A \cdot \Delta \Omega} \right) = \frac{\partial^2 P}{\cos \theta \cdot \partial A \cdot \partial \Omega} \quad (1-4)$$

可见，面辐射强度 N 与被照面在面源表面上的位置、方向及面源的面积 ΔA 有关。

面源单位面积发射的辐射出射度为

$$M = \frac{dP}{\partial A} = \int_{\text{半球}} N \cos \theta d\Omega \quad (1-5)$$

面源在与它相距 l 处的被照面上产生的辐照度为

$$H = N \cos \theta \cdot \Delta A \frac{\cos \theta'}{l^2} = N \cos \theta' \cdot \Delta \Omega' \quad (1-6)$$

式中 ΔA ——小面源的表面积;

θ ——面源表面法线 n 与 l 的夹角;

θ' ——被照表面法线 n' 与 l 的夹角;

$\Delta \Omega'$ ——是小面源 ΔA 对被照面所张的小立体角,

$$\Delta \Omega' = \frac{\Delta A \cos \theta}{l^2}.$$

对于一般辐射体, 求 M 与 N 的关系, 必须先确定 N 与 θ 的关系。

如果辐射体是理想的漫辐射体, 它的面辐射强度 N 是一个与方向无关的常量, 所以

$$M = N \int_{\text{半球}} \cos \theta d\Omega = \pi N \quad (1-7)$$

利用式 (1-7), 很容易由 M 求出 N 来。

理想的漫辐射体也叫做朗伯辐射体。实际上理想的漫辐射体是不存在的, 但许多辐射体在一定角度范围内, 如绝缘体: θ 在 60° 以内; 导体: θ 在 50° 以内, 在工程计算中都可近似看成朗伯辐射体。空腔辐射器就是比较满意的朗伯辐射体。

第二节 黑体辐射

一、黑体炉

黑体辐射是十九世纪末叶物理学家们研究得最多的问题之一。1860年，基尔霍夫提出了他的著名定律：好的吸收体也是好的辐射体，还指出：黑体是能够吸收全部入射辐射的物体，因此黑体必然是最理想的辐射体。然而，在大自然界中，理想的辐射体是不存在的。为了研究黑体辐射，人们只能用空腔开孔的容器来模拟黑体辐射，黑体炉就是人造的黑体模拟器。

黑体炉是广泛用来校准红外仪器的设备。黑体炉模拟黑体辐射的精确程度，称为有效比辐射率。黑体炉的有效比辐射率数值的大小与制作黑体炉的腔体形状、材料性质、开孔大小以及腔体热平衡状态有关，其结构如图1-4所示。

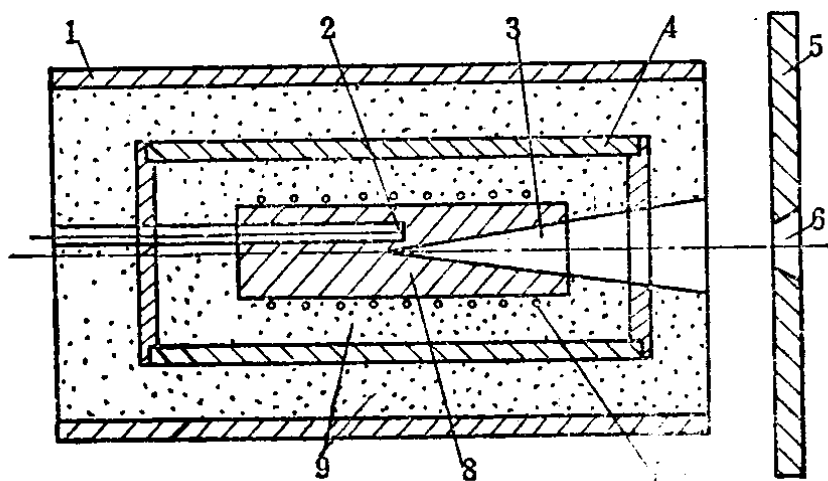


图 1-4 黑体炉结构示意图

- 1—酚醛套管；2—铂电阻温度计；3—黑体腔；4—铜热屏蔽；5—限制
光栏盘；6—限制光栏孔；7—加热线圈；8—黑体腔芯；
9—石棉和硅酸盐水泥

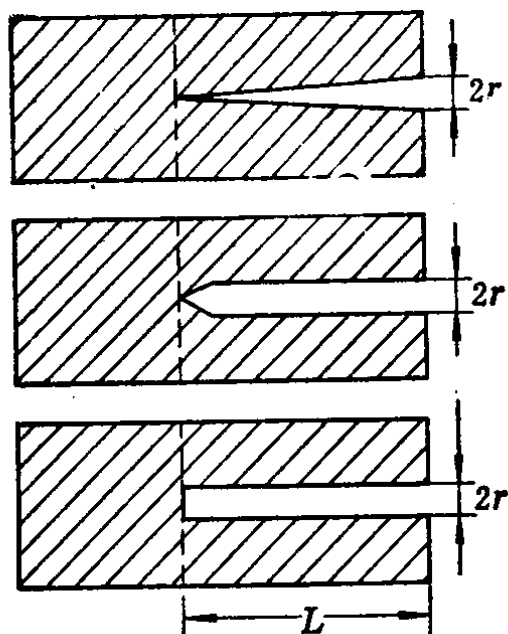


图 1-5 黑体腔简图

腔体形状对黑体炉辐射性能影响较大。相同的炉芯材料采用不同的腔体形状，其有效比辐射率各不相同。图 1-5 为几种常用的腔体形状，其中球形腔体的有效比辐射率最高，但加工制作困难，而且不易加热均匀。实际应用中多采用锥形腔体，只要保证 L/r 的值大于或等于 6，就能呈现良好的腔体效应； L/r 的值越大，腔体效应越明显。由于腔体效应的影响，黑体炉的有效比辐射率总是高于腔体芯料的比辐射率。

由上述腔体形状制作的黑体炉，其有效比辐射率 ε_0 可用下式进行计算

$$\varepsilon_0 = \varepsilon'_0 (1 + K) \quad (1-8)$$

其中 $K = (1 - \varepsilon)(S_1/S - S_1/S_0)$;

$$\varepsilon'_0 = \varepsilon / [\varepsilon(1 - S_1/S) + S_1/S]$$

式中 ε —— 黑体炉芯料的比辐射率;

s_1 —— 直径为 $2r$ 的空腔孔口的面积, cm^2 ;

S —— 空腔内壁的表面积, cm^2 ;

S_0 —— 直径等于腔体深度 (从开口处的平面到腔体最深点) 的等效球体的表面积, cm^2 。

制作黑体炉的腔体材料最好选用导热系数高，有良好的抗氧化性能，氧化膜不易脱落，比辐射率较高，加工制造容易的材料。镍铬不锈钢氧化以后比辐射率较高，而且氧化膜

很稳定，传热快，加工制作也不难，是较好的腔体材料。制作高温（1400K以上）黑体炉，腔体材料应选用高温石墨或陶瓷材料。

为保证腔体加热均匀，电阻丝的绕制间隔要分布合理。一般可在腔体开口端绕得密一些以补偿开口端热量损失，减小腔体的温度梯度。电阻丝的内外都要垫好绝缘材料，防止漏电伤人。由石棉和硅酸盐水泥组成的保温绝热材料应填满压实，以利腔体温度恒稳。黑体炉温度测量是用经过精确校准的热电偶或铂电阻温度计进行。埋设测温热电偶的孔不能与黑体腔相通，以免热量流失。恒温控制用温度自动控制仪，可调整加热电阻丝的电流达到自动控制温度的目的。

为避免炉体辐射对测量产生影响，可在腔体开口端放置隔热限制光栏。限制光栏的温度应与室温保持平衡，光栏孔的直径应小于腔体开口直径 $2r$ 。这样，当红外探测器对准黑体孔时，所接收的辐射功率仅为腔体和限制光栏的辐射功率，从而避免了炉体辐射对测量的影响。

黑体炉用在实验室校准红外仪器，是很必要的。但在现场使用时很不方便，而且黑体孔小，不能充满红外系统的通光口径。在实际使用时，往往需要辐射面积较大的黑体作为面状温度参考源，并将其附在红外仪器上，作为相对校正用。面状温度参考源的比辐射率不如黑体炉高；但它面积大，在与扫描镜靠近时能充满扫描镜视场，可作实时标定。图1-6是几种面状温度参考源的几何形状及其辐射特性，其中以表面具有六方形漏斗状结构的小空腔辐射器阵列（蜂窝状结构）的效果为最好，其比辐射率 ε 可达 0.998 ± 0.002 。

二、黑体辐射定律

1. 普朗克定律