

红外辐射测温 理论与技术

高魁明 谢 植 著

东北工学院出版社

红外辐射测温理论与技术

高魁明 谢植 著

东北工学院出版社出版 辽宁省新华书店发行
(沈阳·南湖) 沈阳市第三印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 9.5 字数: 213千字
1989年3月第1版 1989年3月第1次印刷
印数: 1—1000册

责任编辑: 陈信基 王金邦 封面设计: 郭承宗
责任校对: 杨红

ISBN: 7-81008-116-X/TH·19

定价: 2.10元

前 言

本书是在红外辐射理论的基础上综合了作者从1978年以来的科研成果和撰写的论文,以及国内外辐射测温技术编著而成。

全书共有六章和一篇附录,分别为红外辐射,工业黑体辐射源,黑体空腔有效发射率分布,黑体空腔积分发射率和有效温度,辐射测温仪表,红外辐射测温技术及红外探测器。

本书在出版之前曾多次作为工业自动化仪表专业和热能系的部分研究生“红外辐射测温技术”课程的教材。

学习本课程的部分研究生协助进行了大量计算和测试试验,在此一并表示感谢。由于水平所限,无论在体系、内容和编写方法上都可能存在许多缺点和错误,希望读者批评指正。

符 号 表

C	电磁波的传播速率
γ	光频率
λ	电磁波的波长
α	吸收率
ρ	反射率
τ	透过率
E_{λ}	单色辐射功率
E_b	黑体辐射功率
C_1	普朗克第一常数
C_2	普朗克第二常数
T	绝对温度
E	辐射功率
$E_{b\lambda}$	黑体单色辐射功率
C_b	黑体辐射常数
σ	斯蒂芬-波尔茨曼常数
I	辐射强度
A	面积
ω	立体角
q	单位时间单位面积换热量
Q	单位时间换热量
ε	发射率
d^2F	两微元面间辐射换热角系数

dF 微元面对有限面之间或有限面对微元面之间辐射换热角系数
 F 所有有限面之间辐射换热角系数
 ε 有效发射率
 ε_{eff} 有效发射率
 ε^* 积分发射率
 T_e 有效温度
 K 不等温系数
 T_F 辐射温度
 α 放热系数
 N_0 努谢尔准则
 G_r 葛拉晓夫准则
 P_r 普朗特准则

内 容 提 要

本书是作者多年来从事红外辐射测温理论与技术研究的著作,已多次用为工业自动化仪表专业的研究生教材。书中主要包括:红外辐射理论,工业黑体辐射源,黑体空腔有效发射率分布的计算方法,黑体空腔积分发射率的计算,有效温度计算,各种典型辐射温度计以及红外辐射测温技术等。

本书对各种工业用黑体辐射源的设计、制做原则和必要的参数计算都作了详细地叙述,对从事辐射测温的工程技术人员、大专院校师生和科技研究人员均有参考价值。

目 录

绪 言	1
第一章 红外辐射	3
第一节 红外辐射的一般概念	3
第二节 热辐射的基本定律	6
第三节 实际辐射表面和基尔霍夫定律	14
第四节 组成封闭空间两物体的辐射换热	21
第五节 气体辐射和吸收	25
第六节 辐射换热角系数	28
第二章 工业黑体辐射源	45
第一节 密闭等温空腔的辐射特性	45
第二节 黑体辐射源的结构原理	47
第三节 中温黑体炉举例	49
第四节 重力式热管黑体辐射源	59
第五节 典型黑体空腔有效发射率分布的 计算结果	65
第六节 重力式热管大面积蜂窝黑体	69
第三章 黑体空腔有效发射率分布	82
第一节 概述	82
第二节 多次反射理论	84

第三节	积分方程理论	95
第四节	微元环对同轴全照区圆盘角系数	110
第五节	多次反射理论与积分方程理论的统一	112
第四章	黑体空腔积分发射率和有效温度	117
第一节	黑体空腔理论的最近发展	117
第二节	黑体空腔积分发射率	119
第三节	微元环对同轴圆盘半照区角系数	126
第四节	积分发射率特性	140
第五节	黑体空腔有效温度	153
第六节	黑体空腔不等温系数	161
第七节	黑体空腔的辐射特性和品质特性	172
第五章	辐射测温仪表	178
第一节	概述	178
第二节	全辐射高温计	179
第三节	硅光电池光电高温计	183
第四节	光电比色温度计	189
第五节	前置反射器辐射温度计	193
第六章	辐射测温技术	209
第一节	红外辐射测温中的几种干扰	209
第二节	热轧钢材表面温度的测量	219
第三节	焦炉炉壁、连铸板坯温度的测量	223
第四节	连续退火炉内移动钢板温度的测量	226
第五节	温度和发射率同时测量法	230
第六节	在线黑度的测量	235

第七节	用非接触法测量表面全热流的试验·····	245
第八节	热象仪在冶金工业中的应用·····	251
第九节	用辐射温度计连续测量铁水温度的技术··	260
附录	红外探测器·····	268
附第一节	红外探测器的一般概念·····	268
附第二节	光电效应·····	275
附第三节	光电导探测器·····	277
附第四节	光生伏特型探测器·····	287

绪 言

温度是确定物质状态的参数之一，在许多工业中温度信息的获得具有很重要的意义。

温度测量的方法大致可区分为两大类——接触法测温和非接触法测温。在接触法测温中热电偶和电阻温度计应用最为广泛，非接触法测温目前仍以辐射测温法为主。

在过去相当长的时间里，辐射测温法的可靠性和抗干扰性能都不太高，且测量温度范围往往仅限于较高的温度。但在近二十多年，由于电子技术的飞快发展，半导体材料的进步，已推动了辐射温度计的发展。例如，1962年英国LAND公司研制成功以硅光电池为探测器的窄波段辐射温度计。此后，以其他各种红外探测器为接收元件的高性能辐射温度计也相继出现。因而从六十年代初以来各种辐射温度计在工业上尤其在钢铁工业中的应用其数量就逐渐增加了。

辐射温度计具有响应速度快和分辨率高等优点。对于一些旋转物体、移动物体、热容量较小的物体和腐蚀性较强的物体，在采用接触法测温不可能的条件下，辐射测温法被广泛应用着。

利用辐射测温法要对于以下问题应予以注意：

(1) 一般辐射温度计都只能测得亮度温度或辐射温度，由于一般被测物体发射率都小于1，所以不能测得真温度。欲求得真温度必须在线测得被测对象的发射率，对测量值进行修正。

(2) 在现场测量中经常存在有外来光的干扰(外部热源)和光路中的干扰(水蒸气、尘埃等),必须消除这些干扰,才能实现正确的测量。近二十年来在这方面已经积累了一些防外来光干扰和光路中干扰的经验。

(3) 被测表面发射率往往在一定范围内变化,这是辐射测温中需要解决的一个难题。

(4) 辐射温度计应适时用黑体炉检定或校验以维持足够的测量精度。

测量是人类认识事物本质所不可缺少的手段,通过测量和试验能使人们对事物获得定量的概念和发现事物的规律性。在人类的一切活动领域中,如科学实验、生产活动都离不开测量,没有测量也就没有科学。辐射测温技术正是人们认识科学规律、生产规律不可缺少的重要测量手段之一。

本书共分六章,它们是红外辐射,工业黑体辐射源,黑体空腔有效发射率分布,黑体空腔积分发射率和有效温度,辐射测温度仪表和辐射测温技术。考虑到红外探测器中的光子探测器部分是近代新发展起来的红外辐射探测器件,它与各种红外辐射温度计的性能密切相关,所以把这部分内容收集在本书附录中。黑体辐射源是检定各种红外辐射温度计的标准装置,它的重要技术参数——有效发射率分布等在计量技术规程中要求必须进行理论计算。为此本书较详细地介绍了中、低温领域的工业黑体炉及其各种理论计算和分析的方法。

第一章 红外辐射

第一节 红外辐射的一般概念

任何物体都会以电磁波的形式向外发射出能量，这种能量叫做辐射能。如太阳光线、热辐射、无线电波和 x 射线等都属于这种能量的特殊形式，它们的形式虽然不同，但自然本质是相同的。通常按它们的电磁波的波长或频率排列其位置，来说明这些辐射。图1-1表示出，各种辐射能按波

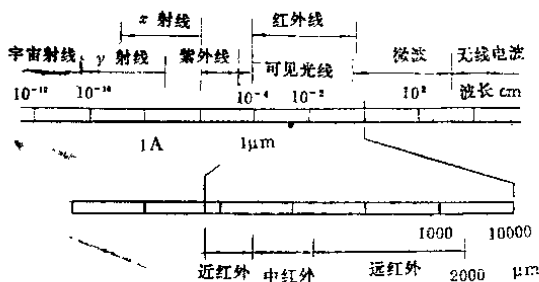


图1-1 各种辐射能按波长分布的情况

长分布的情况。所有的辐射都遵守同样的反射和折射定律，传播的速度都等于光速。彼此的差别是波长和频率不同，不同波长范围的辐射，其性质有很大差异。由于电磁波是以光速在空间传播的，所以它与波长和频率存在以下关系：

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

式中 c —电磁波的传播速率, m/s, 在真空中

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

v —频率, 1/s

λ —电磁波的波长, m, 其常用单位是 μm ,

$$1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$$

波长在 $0.38 \sim 0.76 \mu\text{m}$ 范围内的电磁波属于可见光线, 波长比 $0.38 \mu\text{m}$ 短的电磁波分别为紫外线、 x 射线和 γ 射线等。波长在 $0.76 \sim 1000 \mu\text{m}$ 之间的电磁波称为红外线, 波长更长的电磁波称为微波和无线电波。波长在 $0.1 \sim 40 \mu\text{m}$ 范围内的电磁波 (包括可见光和红外线的短波部分) 热效应最显著, 所以把这部分波长的电磁波称为热射线或热辐射。红外线范围内的电磁波还可按波长的不同划分为近红外、中红外和远红外三部分。

图 1-2 表示, 当辐射能投射到物体表面上时, 在一般情况下, 其中一部分被物体吸收, 一部分被反射, 另一部分可以透过物体。假设外界投射到物体表面上的总能量为 Q_0 , 被吸收了 Q_a , 反射了 Q_p , 透过 Q_r 。

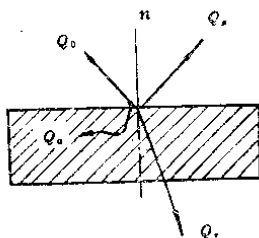


图1-2 入射辐射能量分布

根据能量守恒定律得:

$$Q_0 = Q_a + Q_p + Q_r$$

等式两端除以 Q_0 , 则

$$\frac{Q_a}{Q_0} + \frac{Q_p}{Q_0} + \frac{Q_r}{Q_0} = 1$$

其中各个能量百分数 Q_{α}/Q_0 , Q_{ρ}/Q_0 和 Q_{τ}/Q_0 分别称为该物体的吸收率、反射率和透过率, 并依次用 α , ρ 和 τ 表示。因此, 上式可写成

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (1-2)$$

实际上大多数工程材料, 如砖石、钢铁等都不透过辐射能, 即透过率 $\tau=0$, 因此

$$\alpha + \rho = 1$$

可见, 对于不透过辐射能的物体而言, 若吸收能力大, 其反射本领就小; 反之吸收能力小, 其反射本领就大。

实验证明, 气体对于辐射能几乎不能反射, 可认为它的反射率 $\rho=0$, 因而

$$\alpha + \tau = 1$$

可见, 吸收本领大的气体, 其透过能力就差。

当辐射线投到物体表面上的时候, 可以观察到两种反射现象。如图1-3所示, 如果入射角等于反射角, 那么这种反射被称之为镜面反射; 另一种情况是, 平行的入射光被反射以后沿各个方向均匀分布, 这种反射称为漫反射。应当注意, 镜面反射对观察者能够给出辐射源的一个镜象。实际表面既不是镜面反射也不是均匀的漫反射。一个普通的镜子,

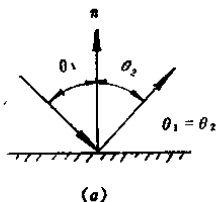
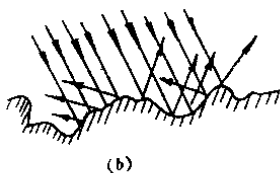


图1-3 (a) 镜面反射



(b) 漫反射

对于可见光来说很接近于完全的镜面反射，但是对整个热辐射波段，就不一定是镜面反射。通常，粗糙表面表现的漫反射特性要比高度抛光的表面好；同样，一个抛光表面比粗糙表面更接近于镜面反射。

当物体全部吸收投射到其表面上的辐射能，即 $Q_a = Q_0$ 时，则 $\alpha = 1$ ， $\rho = \tau = 0$ 。这样的物体称为绝对黑体，简称黑体。

当物体将投射到它表面上的辐射能全部反射出去，即 $Q_p = Q_0$ ，则 $\rho = 1$ ， $\alpha = \tau = 0$ 。这种物体称为绝对白体，简称白体。

如果投射在物体上的辐射能全部被透过即 $Q_\tau = Q_0$ ，则 $\tau = 1$ ， $\alpha = \rho = 0$ 。这种物体称为绝对透明体或称透热体。

实际上自然界中并不存在绝对黑体，绝对白体或绝对透明体，它们只是实际物体热辐射性能的极限情况。

第二节 热辐射的基本定律

为了从数量上表示物体的辐射能力，需要引入一个物理量——辐射功率，用 E 表示。所谓辐射功率是指在单位时间内从单位表面上向半球空间各方向发射的全部波长的总辐射能量，单位是 W/m^2 ，如果把在波长 λ 至 $\lambda + \Delta\lambda$ 范围内的辐射功率用 ΔE 表示，则可用下式给出单色辐射功率 E_λ 的定义：

$$\lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta\lambda} = \frac{dE}{d\lambda} = E_\lambda, \quad W/(m^2 \cdot \mu m) \quad (1-3)$$

所谓单色辐射功率，就是在单位时间内从单位表面上向半球空间所有方向发射的某特定波长的单位波长宽度内的

能量。辐射功率和单色辐射功率存在如下关系：

$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda, \quad W/m^2 \quad (1-4)$$

以后在表明黑体的辐射功率和单色辐射功率时，下标都用角码 b 注明，即 E_b 和 $E_{b\lambda}$ 。

一、普朗克定律

1900年，普朗克根据量子统计理论导出了黑体在不同温度下单色辐射功率 $E_{b\lambda}$ 随波长 λ 的分布规律，即所谓普朗克定律，并表示为

$$E_{b\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)}, \quad (W/m^2 \cdot \mu m) \quad (1-5)$$

式中 λ ——波长， μm

T ——黑体的热力学温度，K

C_1 ——普朗克第一常数，其值为

$$3.743 \times 10^8 \quad W \cdot \mu m^4 / m^2$$

C_2 ——普朗克第二常数，其值为

$$1.4388 \times 10^4 \quad \mu m \cdot K$$

把式(1-5)中黑体单色辐射功率 $E_{b\lambda}$ 与热力学温度 T 和波长 λ 的关系以图线表示，则可以更清楚地显示不同温度下黑体单色辐射功率按波长分布的情况，如图1-4所示。从图中可以看出，在同一温度下黑体单色辐射功率 $E_{b\lambda}$ 随波长 λ 变化很大，当 $\lambda=0$ 时， $E_{b\lambda}=0$ ；接着 $E_{b\lambda}$ 随波长的增加而增加，当波长增加至某一数值 λ_m 时，单色辐射功率达到最大值；过了最大值以后 $E_{b\lambda}$ 又随波长的增大而减小，直至当 $\lambda \rightarrow \infty$ 时 $E_{b\lambda}$ 值又重新变到零。从图中还可以看出，温度越

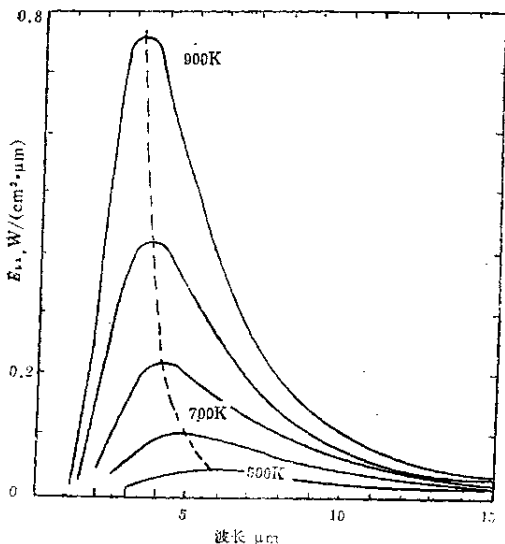


图1-4 各种温度下黑体单色辐射功率与波长的关系

高，单色辐射功率越强；同时单色辐射功率的最大值随波长的增大向短波方向移动。对应于单色辐射功率最大值的波长 λ_m 与该黑体的热力学温度 T 存在如下关系：

$$\lambda_m T = 2897.8 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (1-6)$$

式 (1-6) 所表达的关系称为维恩位移定律。在实际生产中，例如钢坯加热，在 500°C 以下我们觉察不到钢坯颜色的变化，但随着钢坯温度的不断升高，钢坯将相继呈现暗