

红外辐射加热干燥原理与应用

166

红外辐射 加热干燥 原理与应用

糜正瑜 褚治德 等编著

机械工业出版社

548

9

版社

红外辐射加热干燥原理与应用

红外辐射加热干燥原理与应用

糜正瑜 褚治德 等编著



机械工业出版社

16.016

本书围绕红外辐射加热与干燥问题,系统地、全面地论述了传热、传质的基本理论,并通过大量的实验研究探索了规律,进而应用于工程实践。同时也对国内外红外加热干燥争论的焦点问题进行了论述。

本书共分八章,第一、第四章阐述红外辐射及传热基本定律及其加热的应用理论。第二章与第三章详细地介绍了高、中、低温辐射涂料及陶瓷类、玻璃类、金属类及燃气类红外辐射加热器,介绍了红外辐射加热器性能参数的测量及质量监测。第五、第六章阐述了干燥静力学与干燥动力学,较深入地论述了物料所含水分的性质,探索了红外固定床与红外振动流化床恒温与变温(变功率)干燥过程的规律,分析了影响干燥速率的主要因素,为优质、节能、高效地加热与干燥提供了理论基础。也吸收了国外最新烘道的经验,进而在第七章介绍了红外加热干燥的工程应用,提出了具有代表性的高温定向红外辐射烘道。第八章介绍了常温红外辐射材料在水的净化、理疗及陶瓷纤维制品中的应用。

书中引用了大量的国内外文献,本书可供热能利用、汽车、食品、化工、建材、冶金、林产加工、化工机械、工程热物理、环保、理疗、保健及纺织等专业的大学生、研究生及科研和工程技术人员参考。

LIB 50-01

图书在版编目(CIP)数据

红外辐射加热干燥原理与应用/糜正喻,褚治德等编著.

北京:机械工业出版社,1996

ISBN 7-111-05194-7

I. 红… II. ①糜… ②褚… III. 红外线干燥 IV. TQ02
8.6

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第05440号

出版人 马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码 100037)

责任编辑:林春泉 版式设计:李松山

封面设计:王洪流

北京通县马头印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1996年9月第1版第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·10.5印张·250千字

0 001 (1600)册

定价 19 元

《红外辐射加热干燥原理与应用》编辑委员会

主编 糜正瑜 褚治德

编委 (按章节排列)

糜正瑜	夏继余	于宪尧	张海根
张连仲	铁友	侯兰田	李庆书
徐洁浣	诸凯	刘嘉智	褚治德
樊浚广	杨博元	徐焊晨	甄士扬
金雪文	吴玮	景丽珠	王永钧
靳新全	彭秀哲	袁志鸿	陆金德

序 言

“加热”是工农业生产中常见的操作，是一个消耗能量的过程。近二三十年发展起来的红外辐射加热技术与已有的各种加热方法相比，能明显地节约能量，因而受到特别重视。红外辐射加热技术在国内的研究始于70年代，初步应用就得到明显的节能效果，受到政府有关部门的重视。国家经济委员会于1978年7月在上海召开全国性会议，交流经验并向全国推广。此后红外辐射加热技术就在全中国遍地开花。但是它的发展道路并不平坦。可能是由于推广过快，缺乏科学知识准备，出现不少不应有的阻力。例如有些人否认辐射加热的节能作用，甚至否认红外辐射有加热作用。经过二三年的交流讨论和实践，这类缺乏知识的问题总算是克服了。但不久，全国出现伪劣产品的歪风，新成长的红外辐射加热技术受到严重的摧残。在这一领域内工作的科技人员简直无能为力。在这严重的时刻，有一部分科技工作者，凭着他们的事业心和奉献精神，在困难中不灰心丧气，自发地组织了“红外加热技术发展研讨会”。定期交流经验，出版刊物，探讨正确的发展道路。通过几年的努力，特别是国内大环境的改善，到80年代末，红外加热技术走上了健康发展的道路。

这部分科技工作者认识到：红外辐射加热技术虽是几门学科的交叉，也应当逐步形成一个个自成系统的技术学科。应有几门基础课程，有必要的参考资料和设计规范等等。于是他们组织专家分头编写。但是由于出版经费等原因，写作计划不得不半途而废。

我也曾计划写一本科普性质的小册子。也因为同样的原因，延至1992年底，才由复旦大学出版社出版了《红外辐射加热技术》。这是为初入这一领域的读者编写的。前半部分为解释红外辐射加热所必需的物理学知识，后半部分介绍红外加热技术在国内的发展概况。书是出版了，但发行渠道不畅通。

现在这本《红外辐射加热干燥原理与应用》，是一本专业技术书，重点探讨在干燥物料方面应用红外加热技术问题。这本书也是原计划要写的。直到最近由各有关单位及出版社的支持，才得以出版。这本书的许多作者都是国内在这一领域里最有经验的专家。因此，对于本领域内工作的科技人员来说，这是一本极有用的教学用书和参考书。对国内红外加热技术的发展也具有重要的意义。

从前几年出版技术书籍的经验来看，书虽好，不一定卖得出去。这一方面是由于书籍流通体制有问题；另一方面是气候问题，人们还缺乏读书的积极性。我们认为这些都是暂时现象，更不是决定因素。任何一项工作，只要我们认为它是正确的、有利于我国科技事业的发展，我们就要努力去做。现在出版这本书，也是抱着这个信念。最后，我愿再强调一遍：这是一本有用的、有重要意义的书。

中国科学院院士 汤定元 1995.1.18

目 录

序言

第一章 红外辐射的基本规律	(1)
第一节 基尔霍夫定律	(1)
一、红外辐射	(1)
二、黑体	(2)
三、比辐射率	(2)
四、发射率和吸收率的内在联系	(3)
第二节 斯忒藩-玻耳兹曼定律	(4)
第三节 维恩位移定律	(4)
第四节 普朗克公式	(5)
第二章 红外辐射材料	(7)
第一节 高发射率涂层作用的分析	(7)
一、加热器表面涂覆辐射涂层的作用	(7)
二、在加热炉炉膛内壁涂高发射率涂层的作用	(8)
第二节 影响涂层材料发射率的因素	(9)
一、材料成分对发射率的影响	(10)
二、材料处理工艺对发射率的影响	(11)
三、发射率随波长的变化	(11)
四、发射率随温度的变化	(12)
五、材料结构对发射率的影响	(13)
六、涂层的老化性能	(13)
第三节 中低温红外辐射涂层材料	(14)
一、红外辐射涂料制备及性能	(15)
二、熔射法喷涂红外辐射涂层	(17)
三、红外辐射釉料的制备和涂布	(18)
四、搪瓷类辐射材料制备	(19)
五、陶瓷表面上釉或烧结型红外辐射涂层	(20)
第四节 高温辐射涂料	(20)
一、涂料的配制与涂布	(20)
二、涂层性能	(21)
第三章 红外辐射加热器	(25)
第一节 陶瓷类红外辐射电加热器	(25)
一、旁热式陶瓷红外辐射电加热器	(25)
二、直热式半导体陶瓷红外辐射电加热器	(30)
第二节 玻璃类红外辐射电加热器	(33)
一、概述	(33)
二、乳白石英红外辐射加热器的制造工艺	(34)

三、乳白石英红外辐射加热器的主要性能参数	(35)
四、乳白石英红外加热器的使用方法	(36)
五、乳白石英红外加热器质量的鉴别方法	(36)
第三节 金属类红外辐射电加热器	(37)
一、电阻带红外辐射电加热器	(37)
二、金属管状红外辐射电加热器	(41)
第四节 燃气红外辐射加热器	(44)
一、表面燃烧式燃气辐射器	(45)
二、催化氧化式燃气辐射器	(46)
三、燃气燃烧辐射管	(50)
第五节 红外辐射加热器的性能参数测量及质量监测	(51)
一、发射率测量	(51)
二、电-热辐射转换效率的测量	(52)
三、辐射加热器表面温度的均匀性测量	(53)
第四章 红外辐射加热的应用理论	(55)
第一节 热量传递的基本方式	(55)
一、热传导	(55)
二、热对流	(56)
三、对流换热	(56)
四、热辐射	(57)
第二节 辐射换热计算	(60)
一、黑体表面间的辐射换热	(60)
二、灰体表面间的辐射换热	(61)
第三节 红外辐射换热的优化	(63)
一、提高系统黑度 ϵ_r	(65)
二、合理选用和配置红外辐射加热器	(66)
三、优化控制加热过程	(66)
第五章 干燥静力学	(67)
第一节 湿空气的性质	(68)
一、湿空气	(68)
二、湿空气的状态参数	(68)
第二节 湿空气湿焓图及其应用	(72)
一、湿空气的湿焓图 ($H-I$ 图)	(72)
二、湿空气状态的确定和过程的计算	(72)
三、应用举例	(74)
第三节 干燥过程的物料与热量衡算	(75)
一、湿物料含水量的表示法	(75)
二、物料的水分衡算	(76)
三、物料的热量衡算	(76)
四、干燥炉的热效率	(78)
第六章 干燥动力学	(80)
第一节 物料所含水分的性质	(80)

一、水与物料的结合方式	(80)
二、毛细管对水分的束缚力	(81)
三、平衡水分和自由水分	(82)
四、木材的纤维饱和点及平衡含水率	(83)
第二节 恒温条件下干燥过程的实验规律	(85)
一、干燥实验装置及测试系统	(85)
二、干燥曲线及干燥温度曲线	(86)
三、干燥速率曲线	(87)
四、恒温条件下高温辐射对木材的作用	(88)
五、恒温条件下中温辐射对木材的作用	(89)
六、亮辐射与暗辐射干燥木材的传热对比实验	(89)
第三节 影响干燥速率的外在因素	(90)
一、非稳态干燥动力学方程	(90)
二、对流传热传质系数的分析	(91)
三、影响干燥速率的外在因素的分析	(93)
第四节 影响物料内部传热传质的主要因素	(93)
一、典型毛细管多孔胶体的结构特点	(93)
二、毛细管多孔胶体内部水分的迁移	(95)
三、水同物料的结合能与单位脱水量的能耗	(97)
四、毛细管多孔胶体材料的吸收光谱	(99)
五、红外辐射的穿透性	(101)
第五节 变温条件下干燥过程的实验规律	(103)
一、升温速率对干燥的影响	(104)
二、升速段增湿对干燥的影响	(106)
三、恒速段吹风对干燥的影响	(107)
四、降速段降温对干燥的影响	(107)
五、间断辐照对干燥动力学的影响	(108)
第六节 红外辐射振动流化干燥的实验研究	(108)
一、振动流化床的基本特性	(109)
二、中草药及粮食的红外辐射振动流化实验研究	(110)
第七章 红外加热干燥的工程应用	(115)
第一节 油漆烘干原理与桥式烘道	(116)
一、油漆烘干原理	(116)
二、桥式烘道	(117)
三、烘道测试	(119)
第二节 高中温定向辐射加热胶合板单板干燥机	(120)
一、单板的吸收特性及红外辐射器的选择	(120)
二、模拟实验与设计	(121)
三、现场测试与分析	(123)
四、红外单板干燥机与其他单板干燥机性能对比	(123)
第三节 菱镁矿球团脱水实验及烘道设计	(124)
一、菱镁矿球干燥动力学实验研究	(124)
二、菱镁矿球的烘道设计	(127)

第四节 高温定向强辐射开放式烘道	(128)
一、开放式烘道简介	(128)
二、开放式烘道特点	(128)
第五节 红外辐射干燥炉干燥木板原理及测试	(129)
一、红外辐射干燥炉干燥木板原理	(129)
二、木板红外干燥炉现场测试与分析	(130)
第六节 结束语	(131)
一、关于“匹配”问题	(131)
二、关于木材的红外与热风联合干燥问题	(134)
三、关于红外辐射干燥不适用木材的问题	(134)
四、关于红外辐射不能干燥堆材问题	(134)
五、关于热风大型木材干燥炉改为红外干燥炉问题	(135)
六、红外辐射加热干燥的其他应用	(135)
第八章 常温红外辐射材料及其应用	(136)
第一节 长波红外陶瓷材料	(136)
一、长波红外陶瓷的基本物系	(136)
二、长波红外陶瓷粉料的质量指标	(137)
三、长波红外陶瓷粉的制造工艺	(137)
四、影响红外陶瓷发射率的工艺因素	(138)
第二节 红外陶瓷材料在纤维制品中的应用	(138)
一、红外陶瓷纤维制品的制造方式	(138)
二、红外陶瓷纤维制品的医疗保健作用	(138)
三、红外陶瓷纤维制品的保暖作用	(139)
第三节 红外陶瓷材料对水的作用与应用	(140)
一、水的结构	(140)
二、红外陶瓷对水的作用	(140)
三、红外陶瓷对食品、植物等的应用效果	(140)
四、红外陶瓷水质处理器	(141)
五、应用举例	(141)
附录 A、金属的性质	(143)
附录 B、某些非金属材料性质	(145)
附录 C、温度为 t 时, 各种材料表面法向发射率 ϵ_n 和全发射率 ϵ	(146)
附录 D、饱和水与饱和水蒸气的热力性质表 (按温度排列)	(147)
附录 E、饱和水与饱和水蒸气的热力性质表 (按压力排列)	(149)
附录 F、单位/产品介绍	(152)
天津大学热能工程系/红外干燥机 (炉)	
锦州师范学院化学系/JS-2 红外涂料与 95 玻璃复合体	
上海搪瓷二厂/搪瓷红外电加热器	
长春市兴隆喷漆烤漆设备厂/汽车喷漆烤漆房	
中国科学院新乡科学仪器研制中心/直热式红外辐射元件	
嘉兴市新丰电瓷厂/TIR-半导体陶瓷电热远红外辐射元件	
编后	(155)
参考文献	(156)

第一章 红外辐射的基本规律

第一节 基尔霍夫定律

一、红外辐射

红外辐射是指波长范围介于可见光和微波之间,即 $0.75\sim 1000\mu\text{m}$ 的电磁辐射,从光谱图上看,它正好位于红光之外,因而被称为红外辐射。

红外辐射和可见光在本质上是同一个物质,即电磁波,只是它们各自的波长范围不同而已。因此,凡可见光所具有的基本属性,红外辐射也具有。例如,它们都可以在均匀介质中沿着直线传播;在两种不同介质的交界面上会受到界面的反射和折射;在不均匀介质中传播时,会受到散射;在一定条件下会产生干涉、衍射和偏振;它们在真空介质中的传播速度等于光速。

红外辐射不同于可见光的特点之一是它的不可见性。人眼的视觉细胞只敏感可见光,因而无法观察到红外辐射。红外辐射的另外一个特点是它和物质分子的热运动有着内在的密切联系。几乎所有的物体都在不断地发射红外辐射,同时也不断地从外界吸收红外辐射。这是因为构成物质的原子和分子皆由带电粒子组成,绝大多数物质的分子在做热运动时都会发射电磁波,而且分子热运动的频率正好落在红外范围,因而发射的电磁波主要就是红外辐射。反过来,当一定频率的红外辐射照射到物体上,且红外辐射的频率和物体分子热运动的频率相一致时,红外辐射会很快被分子吸收而转化为分子的热运动。从物理学上讲,红外辐射加热和干燥就是围绕着发射和吸收红外辐射这两个过程进行的。当然,物料内部的干燥过程还是十分复杂的,将在第六章详述。本章的主要目的是让读者从一开始就对红外辐射的基本物理规律有所了解。

如前所述,红外辐射的波长范围很宽,最长的波长和最短的波长之间跨越了三个数量级。但实际应用时,针对某一个具体对象,往往只利用其中某一段波长范围就可以了。所以为了方便起见,人们把整个红外波段划分为若干个分波段。例如分为近红外(指靠近可见光的那一段红外辐射)、远红外(指靠近微波的那一段红外辐射)和中红外(指介于近红外与远红外之间的那一段红外辐射)。有的把波段划分得再细一些,例如在远红外波段以外再增加一个极远红外。实际上,由于使用者的习惯不同,各人所划分的波段并没有一定的联系,也没有统一的标准,为了避免混淆,除了另有约定外,一般应指明具体的辐射波长范围。

红外加热干燥的历史就工业应用而言,最早可以追溯到本世纪 20 年代末和 30 年代初。那时使用的红外辐射源是一种特制的真空白炽灯,叫做“红外灯”。这是一种近红外辐射源,体积比一般照明用的钨丝灯泡大,在它的内壁上涂有水银反射层,使它所发出的近红外辐射能比较集中地照射到被加热物体上。红外灯的钨丝温度比普通钨丝灯泡低,这样,它所发出的红外辐射成分就比普通灯泡多,而可见光成分相对减少,因此被称作红外灯。红外灯最早应用于汽车工业中,对汽车油漆进行烘烤。后来也被应用于实验室和医院。

由于红外灯玻璃外壳的阻挡,波长较长的红外辐射无法透过玻璃,使得早期的红外辐射加热和干燥局限于 $1\mu\text{m}$ 左右的波长,大大地限制了能源的利用。到了 70 年代,这种情况有了很大的改变,人们突破了真空型器件,制成了各种能够发射长波红外辐射的红外辐射加热器(被称为远红外辐射加热器),使红外辐射加热和干燥达到了一个新的水平。现在,这种新型的加热器层出不穷,应用也有了新的发展。这里要说明一点,所谓的“远红外加热”是相对于早期的近红外加热而言,实际上就是长波红外辐射加热。从物理学上讲,都是涉及到红外辐射的发射和吸收的问题,因此,在本书(特别是涉及基础理论时)的讨论中不专门区分近红外和远红外。

二、黑体

经验告诉我们,物体的温度愈高,往往它所发出的热量也愈多。然而,我们也发现有这样的情况:相同温度的同一物体可以发出不同的热量,具体地说,同一个物体经过不同的表面处理,在同一温度下可以发出不同的热量。以上两种情况说明,物体发出的热辐射功率除了和它本身的温度有关外,还与它的热辐射本领有关。

为了确定各种物体的热辐射本领,我们采取一种相对比较的办法。先找出一种物体,这种物体应该在任何波长、任何温度下都具有最大的热辐射本领。其他物体的热辐射本领均通过和它的比较来确定。这样的物体是理想的辐射体。根据经验,黑色的物体的热辐射本领最大。因此,我们就把上述的理想辐射体称为“黑体”,有时也称为“理想黑体”。

理想黑体严格地说的不存在,因为这只是一个理想的概念。但是,我们有办法做出十分接近于理想黑体的辐射体,这种辐射体就是实验室里使用的黑体炉,也称黑体。制作高精度的黑体是一项专门的技术。由于黑体可以在实验室里制作出来,所以引进黑体的概念是有实际意义的。它的好处在于可以脱开实际物体来讨论红外辐射的物理规律,而这就是人们常说的黑体辐射规律。尽管实际物体是千变万化的,但黑体辐射规律是唯一的,只要掌握这唯一的规律,再通过比较,就可以得到各种实际物体的红外辐射规律。同样的道理,由于黑体辐射规律的唯一性,黑体常被用作作为一种标准辐射源。

三、比辐射率

可以用一个定量的概念来描述物体发出的热辐射功率,这个概念叫做辐射出射度(Radiant exitance),简称辐出度(又称辐射发射量),定义为:物体单位表面积发射到整个半球空间的辐射功率。它以 W/m^2 为单位,通常用字母 M 来表示。在传热学中称为辐射力(Emissive power),全称为半球向总辐射力,用字母 E 来表示。

有了辐出度的概念,我们就可以定量地描述物体的热辐射本领,或热辐射效率,记为 ϵ 。显然, ϵ 应该是物体的辐出度和同一温度下黑体的辐出度之比。

$$\epsilon = \frac{M}{M_b}$$

或按传热学习惯写为

$$\epsilon = \frac{E}{E_b} \quad (1-1)$$

式中 M_b 或 E_b ——黑体的辐出度。

ϵ 被称作为“比辐射率”或“发射率”,有时也叫做“黑度”或“黑度系数”。它是一个无量纲的系数,它的大小反映了物体相对于黑体的热辐射本领。从式(1-1)可见,黑体的比辐

射率等于 1，实际物体的比辐射率总是小于 1。

如果考虑比辐射率的波长分布，则定义分谱比辐射率：

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{M_{\lambda}}{M_{b\lambda}}$$

或

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{E_{\lambda}}{E_{b\lambda}} \quad (1-2)$$

式中 ϵ_{λ} —— 分谱比辐射率（光谱发射率）；

M_{λ} 或 E_{λ} —— 物体的分谱辐出度（光谱辐出度或单色辐射力）（ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$ ）；

$M_{b\lambda}$ 或 $E_{b\lambda}$ —— 同一温度下黑体的分谱辐出度（或单色辐射力）。

M_{λ} 、 E_{λ} 表示在波长 λ 至 $\lambda + \Delta\lambda$ 小间隔内物体单位面积向半球空间发射的辐射功率，称为物体的分谱辐出度；或光谱辐出度；或单色辐射力。

对于黑体， $\epsilon = \epsilon_{\lambda} = 1$ 。对于非黑体， $\epsilon < 1$ ， $\epsilon_{\lambda} < 1$ ；其中对于灰体， $\epsilon = \epsilon_{\lambda} < 1$ ；对于选择性辐射体， $\epsilon_{\lambda} < 1$ 且随波长而变。

物体的比辐射率与其材料种类、结构、物理与化学性质、物体表面状态以及它的温度有关。分谱比辐射率则还与波长有关。物体的比辐射率与其表面状态有很密切的关系。例如，抛光过的金属，其比辐射率是很小的，但金属表面经过氧化却可以使它的比辐射率显著增大，两者相比可以差几倍甚至 20 倍。这是因为对于不透明的物体，体内的辐射几乎无法透到体外，物体的热辐射本领主要取决于表面的性质。凭着这一特性，人们研制出一种又一种性能优异的高辐射涂料（或基料），覆盖在各种类型的加热器上，形成高辐射加热器。

四、发射率和吸收率的内在联系

前面已经提到，物体发射辐射和吸收辐射都和分子的热运动有关，它们共同的物理基础都是分子的热运动，因而，发射和吸收是同一个物理机制的两个不同的表现方面。由此可以推断，物体的辐射本领和吸收本领应该是一致的。辐射本领强，吸收本领也强，反之亦然。这已被实验所证明，是一条重要的物理规律，即基尔霍夫定律：对于一定的辐射波长，物体的辐射本领和它在同一温度下的吸收本领成正比。

为了定量地描述基尔霍夫定律，我们还得引进一个能够反映吸收本领的物理量，这就是物体的吸收率 A ，它表示被物体吸收的辐射功率 P_a 和入射到物体表面的总的辐射功率 P_e 之比， A 是一个无量纲的系数， $A=1$ 表示入射辐射全部被物体吸收，对应于吸收本领最大的情况； $A=0$ 表示物体没有吸收，对应于吸收本领最小的情况。当辐射与吸收体系处于平衡条件时有如下的关系式：

$$A = \frac{P_a}{P_e} \quad (1-3)$$

有了描述物体热辐射本领的物理量 ϵ 和描述物体吸收本领的物理量 A ，我们就可以写出基尔霍夫定律的定量描述公式：

$$\epsilon = A \quad (1-4)$$

用热力学第二定律还可以导出基尔霍夫定律的如下表达式：

$$M \propto A \quad \text{或} \quad E \propto A \quad (1-5)$$

及

$$\frac{M}{A} = M_b \quad \text{或} \quad \frac{E}{A} = E_b \quad (1-6)$$

比较式 (1-6) 和 (1-1)，即可得出式 (1-4)。可见，基尔霍夫定律既是经验定律。也是热力学

学第二定律导出的结果,因而具有普遍的意义。

第二节 斯忒藩-玻耳兹曼定律

实验表明,黑体发射的热辐射的总功率同它自身的温度有明确的一一对应关系,这个关系被总结成为物理定律,就是斯忒藩-玻耳兹曼定律。

斯忒藩-玻耳兹曼定律的描述如下:

黑体单位表面积向整个半球空间发射的热辐射总功率与其自身绝对温度的4次方成正比。即:

$$M_b = \sigma T^4 \quad \text{或} \quad E_b = \sigma T^4 \quad (1-7)$$

式中 σ ——斯忒藩-玻耳兹曼常数, $\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;

T ——黑体的热力学温度,或绝对温度。

或写为

$$M_b = C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad \text{或} \quad E_b = C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (1-8)$$

式中 C_0 ——黑体辐射常数, $C_0 = 5.67 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

T 与摄氏温度 t 之间有如下关系:

$$T(\text{K}) = t(\text{C}) + 273.15 \quad (1-9)$$

热力学温标又称开氏温标,它和摄氏温标具有相同的分度,但零点的取值不同,两者相差一个常数。开氏温标的零点值取在摄氏温标的 -273.15C 处。由于这个温度是所有物体的最低极限温度,所以开氏温标中不存在负温度值。

斯忒藩-玻耳兹曼定律给出了黑体辐射总功率和黑体绝对温度之间的关系,数学表达式直接明了,在实际应用中非常有用。从式(1-7)可以看出,温度对辐射功率的影响很大。同时,根据温度和辐射功率之间一一对应的关系,可以通过测量辐射功率来求得黑体的温度值。这就是红外辐射测温方法的物理基础。

对于实际物体,由式(1-1), (1-7)得:

$$M = \epsilon M_b = \epsilon \sigma T^4, \text{或} E = \epsilon E_b = \epsilon \sigma T^4 \quad (1-10)$$

公式(1-10)和(1-7)相比,多了一个 ϵ 因子,这使得辐射功率和温度之间的关系变得复杂起来。对于辐射加热器来说,仅仅控制温度已经显得不够了,必须计入比辐射率的影响。在诸多加热器新产品开发中,人们就是围绕辐射材料的比辐射率在做工作,希望制作出比辐射率高、分谱比辐射率符合实际要求、性能稳定的各种辐射材料。对于红外测温来说,仅仅测量辐射功率已经不能唯一地确定出物体温度,为了消除 ϵ 的影响,人们提出了种种方法,相应地研制出各种各样的红外测温仪器。

第三节 维恩位移定律

黑体辐射是非相干辐射。黑体发出的辐射分布在一个很广的光谱范围内,形成一个连续的辐射谱。我们可以用仪器测出各个波长下的分谱辐射功率,并且发现,不管是在哪一个黑体温度下,这个连续的辐射功率谱中,只有一个波长下的辐射是最强的。我们把这个最强的

辐射称为峰值辐射,把出现峰值辐射的那个波长称为峰值辐射波长。维恩位移定律是反映黑体温度 T 与这个温度下黑体峰值辐射波长 λ_m 之间关系的实验定律。它可用下列公式表示:

$$\lambda_m T = C$$

其中 C 为常数,可由实验测定。通常取 $C \approx 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$,相应地, λ_m 取 μm 为单位, T 取热力学温度。或写成:

$$\lambda_m = C/T \quad (1-11)$$

显见, λ_m 和 T 成反比关系。即峰值辐射波长 λ_m 随着温度 T 的上升而缩短,也就是,峰值位置向短波方向移动。反之,温度下降,峰值位置向长波方向移动。这就是位移定律的含义。

在实际应用中,往往需要知道辐射源的最强的辐射发生在什么波长,在这种情况下,利用维恩位移定律可以方便而准确地给出答案。因此,这条定律既简单又重要。

第四节 普朗克公式

黑体辐射的规律全部包含在它的辐射谱中,所以,描述黑体辐射谱的理论公式是有关黑体辐射的最重要的公式。这个公式是由普朗克在采用了能量量化的假设后推导出来的,不但对于黑体辐射,而且对于理论物理的发展都是十分有意义的。

普朗克公式给出的是黑体辐射功率按波长的分布,也就是分谱辐射出射度。它的一种表示式如下:

$$M_{\lambda} \text{ 或 } E_{\lambda} = \frac{1}{\lambda^5} \frac{2\pi c^2 h}{e^{hc/\lambda T} - 1} \quad (1-12)$$

式中 λ ——电磁辐射波长;

c ——光在真空中的传播速度; $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$;

h ——普朗克常数, $h = 6.6256 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$;

ν ——电磁辐射频率;

k ——玻耳兹曼常数, $k = 1.380658 \times 10^{-23} \text{ J/K}$;

T ——黑体的热力学温度。

把各常数值代入式 (1-12), 可得到普朗克公式的另外一种表达形式:

$$M_{\lambda} \text{ 或 } E_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad (\text{W/m}^2) \quad (1-13)$$

式中 C_1 ——第一辐射常数, $C_1 = 2\pi h c^2 = 3.743 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$;

C_2 ——第二辐射常数, $C_2 = hc/k = 1.4387 \times 10^{-2} \text{ mK}$ 。

公式 (1-12)、(1-13) 给出了任意温度的黑体在任意波长下的辐射功率,因而是对黑体辐射的最细致的描述。从普朗克公式可以求出某一波长范围内的黑体辐射功率。例如, $\lambda_1 \rightarrow \lambda_2$ 波长范围内的黑体辐射功率为

$$\begin{aligned} M_{\lambda_1 \rightarrow \lambda_2} \text{ 或 } E_{\lambda_1 \rightarrow \lambda_2} &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda} d\lambda \\ &= 2\pi h c^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{d\lambda}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda T} - 1)} \end{aligned} \quad (1-14)$$

上式是实际工作中很有用的公式。常用温度和常用波段下的黑体辐射功率数值已经有人算出,

并编成专门的数据表供人使用。

由式 (1-14) 可以导出黑体的辐出度 M_b ，以及有关黑体的几个经验定律。

图 1-1 是按照普朗克公式画出的黑体分谱辐出度曲线。从这些曲线，我们可以形象地看出前面几个有关黑体辐射的经验定律的概貌。

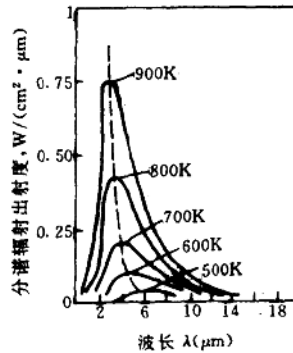


图 1-1 黑体分谱辐出度曲线

第二章 红外辐射材料

制造红外辐射加热器, 辐射材料是关键, 尤其是高发射率的涂层材料。早期使用的红外线灯泡主要发射近红外辐射, 采用的辐射材料是金属钨丝。本世纪 60 年代使用的金属电热管的表面一般涂覆低发射率铝粉漆, 至于陶瓷加热器, 由于粘土成分复杂, 以致影响到它的辐射性能。到了 70 年代中期, 人们才开始系统地研究和发展红外辐射材料, 并取得突破。

第一节 高发射率涂层作用的分析

长期以来, 在加热器表面涂覆高发射率辐射涂层被认为是提高加热器辐射性能的一个重要手段。它常在下列两种情况下被采用: ①在红外加热器需要增强辐射的表面上涂覆高发射率涂层(最好同时在其他表面上涂低发射率涂层)。②在火焰加热炉或电加热炉的炉膛内壁涂覆高发射率涂层。

一、加热器表面涂覆辐射涂层的作用

(一) 发射率对加热器表面温度的影响

以电加热器为例, 在同等功率输入时, 若没有非热形式的能量损耗, 则其总发热量是一定的, 它不随加热器的种类、结构而异, 正因为如此, 在同等功率输入的前提下, 加热器表面发射率 ϵ 值的提高, 必将导致其表面温度下降, 关于这一点可以证明如下:

设加热器的总发热量为 Q_{Σ} , 蓄热量为 $Q_{\text{蓄}}$, 通过辐射、对流和传导向环境散热量分别为 $Q_{\text{辐}}$ 、 $Q_{\text{对}}$ 和 $Q_{\text{传}}$, 根据能量守恒定律有

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{蓄}} + Q_{\text{辐}} + Q_{\text{对}} + Q_{\text{传}} \quad (2-1)$$

对于一般加热器, 在实际使用过程中以传导形式释放的热量很小, 因此近似有

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{蓄}} + Q_{\text{辐}} + Q_{\text{对}} \quad (2-2)$$

在升温过程中, $Q_{\text{蓄}}$ 、 $Q_{\text{辐}}$ 和 $Q_{\text{对}}$ 均随着加热器的表面温度的变化而变化, 但当输入功率一定时, 三者之和始终为定值。一旦加热器与周围环境达到热平衡, 则 $Q_{\text{蓄}}$ 、 $Q_{\text{辐}}$ 和 $Q_{\text{对}}$ 分别趋于某个定值。

设加热器从常温通电加热, 其质量为 M , 平均热容为 C , 发射率为 ϵ , 表面温度为 T , 对流为自然对流, 周围环境温度为 T_0 。并保持不变, 则

$$Q_{\text{蓄}} = MC(T - T_0) \quad (2-3)$$

$$Q_{\text{辐}} = \sigma \epsilon A (T^4 - T_0^4) \quad (2-4)$$

$$Q_{\text{对}} = KA(T - T_0)^{1.25} \quad (2-5)$$

式中 σ ——斯忒藩-玻耳兹曼常数;

A ——加热器表面积;

K ——自然对流放热系数, 对于垂直平面, $K=2.2$ 。

$$Q_{\text{蓄}} + Q_{\text{辐}} + Q_{\text{对}} = \text{常数}$$

故

$$dQ_{\text{蓄}} + dQ_{\text{辐}} + dQ_{\text{对}} = 0$$

$$\text{即} \quad MCdT + \sigma\epsilon A 4T^3 dT + \sigma A (T^4 - T_0^4) d\epsilon + 1.25KA (T - T_0)^{0.25} dT = 0$$

$$\text{所以} \quad dT = - \frac{\sigma A (T^4 - T_0^4)}{MC + 4\sigma\epsilon AT^3 + 1.25KA(T - T_0)^{0.25}} d\epsilon \quad (2-6)$$

由此可见, 只要 $d\epsilon > 0$, 则 $dT < 0$ 。

这表明在同等功率输入下, 发射率 ϵ 的提高, 必然引起加热器表面温度的降低, 且发射率提高得愈多, 则温度降得愈低。

(二) 发射率对加热器发射辐射能的影响

虽然辐射能 Q_{rad} 与加热器表面的温度 T 的四次方成正比, 当加热器的发射率提高后, 表面温度降低, 似乎其发射辐射的强度会降低, 但由于辐射能 Q_{rad} 又是发射率 ϵ 的函数, 会随 ϵ 值的提高而增强, 所以究竟降低还是增强, 取决于哪一个因子起主导作用, 从下式

$$\begin{aligned} dQ_{\text{rad}} &= 4\sigma\epsilon AT^3 dT + \sigma A (T^4 - T_0^4) d\epsilon \\ &= \sigma A (T^4 - T_0^4) \frac{MC + 1.25KA(T - T_0)^{0.25}}{MC + 4\sigma\epsilon AT^3 + 1.25KA(T - T_0)^{0.25}} d\epsilon \end{aligned} \quad (2-7)$$

可见, 只要 $d\epsilon > 0$, 则 $dQ_{\text{rad}} > 0$ 。

这说明发射率的提高, 使辐射能在总的热量传递过程中所占的比例提高了, 也就是说提高了电热辐射能的转换效率。同时, 加热器表面温度降低, 使辐射能谱比采用低发射率涂层时向长波偏移, 这样, 更提高了电-长波热辐射能的转换效率。

曾用商品金属电热管 (表面涂层为铝粉漆, 400℃时, 法向全发射率为 0.45) 做试验。将镍铬-镍铝温差电偶埋于金属管中段壁上, 使电功率稳定在 124W, 在管壁上涂覆 HK-6 涂层 (400℃时法向全发射率为 0.89), 测试管壁的温度变化, 并用 LW-1 激光功率计测试辐射功率。测试表明, 用高发射率涂层替代低发射率涂层后, 管壁温度降低 54℃, 辐射功率却提高了。

二、在加热炉炉膛内壁涂高发射率涂层的作用

不论是电加热炉, 燃气加热炉还是油炉, 在炉膛内壁涂高发射率涂层后均有取得节能效果的例子。这些炉子的炉壁通常是由粘土质耐火砖砌成, 或在内表面粘贴有陶瓷纤维毡保温材料。粘土质耐火材料和硅酸铝陶瓷纤维的发射率值都比较低。

投射在炉内工件 r 上的辐射由几部分叠加组成, 第一是直接来自加热器或焰烟的辐射 Q_r ; 第二是加热器或焰烟辐射经炉壁反射后投射到工件上的辐射 Q_{ref} ; 第三是炉壁本身发射的辐射 Q_w 。

为简化讨论, 设第二、第三部分辐射能够全部投射到工件上, 则投射在工件上的总辐射能量 Q 是

$$Q = Q_r + Q_{\text{ref}} + Q_w \quad (2-8)$$

其能谱为

$$Q(\lambda) = Q_r(\lambda) + Q_{\text{ref}}(\lambda) + Q_w(\lambda) \quad (2-9)$$

工件吸收的辐射 Q_r 为

$$Q_r = \alpha_r (Q_r + Q_{\text{ref}} + Q_w) \quad (2-10)$$

吸收率为

$$\alpha_r = \frac{\int_0^\infty \alpha_r(\lambda) [Q_r(\lambda) + Q_{\text{ref}}(\lambda) + Q_w(\lambda)] d\lambda}{\int_0^\infty [Q_r(\lambda) + Q_{\text{ref}}(\lambda) + Q_w(\lambda)] d\lambda} \quad (2-11)$$