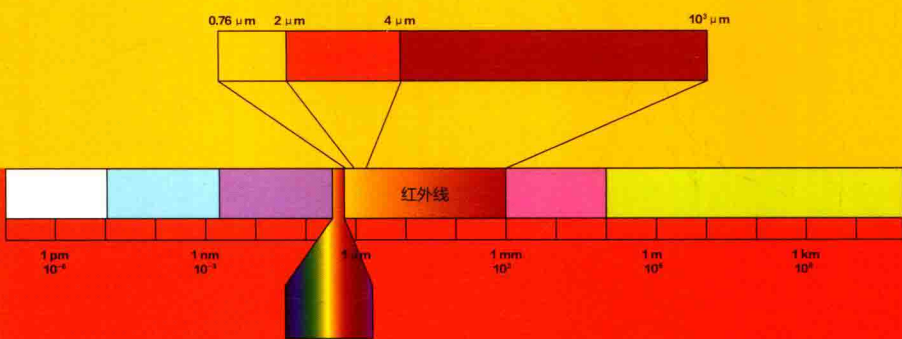




红外辐射加热干燥

理论与工程实践

褚治德 主编
王一建 副主编



化学工业出版社

红外辐射加热干燥

理论与工程实践

褚治德 主 编
王一建 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书阐述了红外干燥中的传热、传质理论以及工程问题，并介绍了大量的红外干燥实验与应用研究。本书分为7篇，共22章。

第1篇阐述了红外辐射加热理论；第2篇介绍了电红外与燃气红外辐射加热器；第3篇介绍了红外热辐射干燥动力学及工程干燥优化温度的选择；第4篇介绍了涂料的红外干燥及薄层涂膜（烤漆）干燥试验研究；第5篇介绍了红外木材干燥，包括其内部水分迁移的理论、实验室实验与工程研究；第6篇介绍了中药饮片热风与红外干燥基础数据实验研究及果蔬干燥研究进展；第7篇介绍了中药饮片、果蔬干燥热风、振动流化、红外辐射、微波药丸干燥机的工程应用与进展。

本书可供食品、建材、林产品加工、中药饮片加工、纺织等专业人员阅读参考，也可作为上述领域的大专院校师生的选修教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

红外辐射加热干燥理论与工程实践/褚治德主编. —北京:
化学工业出版社, 2019. 1
ISBN 978-7-122-33238-7

I. ①红… II. ①褚… III. ①红外线干燥-研究
IV. ①TB45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 255410 号

责任编辑：戴燕红
责任校对：杜杏然

文字编辑：汲永臻
装帧设计：刘丽华

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011）

印 装：三河市延风印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张16½ 字数283千字 2019年6月北京第1版第1次印刷

购书咨询：010-64518888

售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：85.00 元

版权所有 违者必究

京化广临字 2019—06

前言

红外辐射加热技术以其热效率高、无环境污染、保证产品品质等诸多优点而得到人们的关注。由于这些优点，近几十年来，红外辐射加热技术在涂料、塑料加工、汽车制造、食品加工、木材加工、制药、印刷、造纸、纺织印染、医疗卫生、机械制造、化工与电子等领域得到广泛应用，该技术用于干燥可使常规的干燥效率从10%提高到60%~77%。

红外辐射加热技术实现了辐射源光谱与被加热物体吸收光谱的共振，不需加热介质，大大减少了能量损失，提高了热能利用率并减少了污染。红外辐射加热换热有以下4个特点。

① 热辐射的加热特性：加热体1与被加热体2间，物体2获得净热量 $Q_{1.2}$ 与温度的4次方差成正比。

② 热辐射的光谱特性：物体2获得的净热量与加热体的发射光谱 ϵ_1 和被加热物体的吸收光谱 ϵ_2 有关。

③ 热辐射换热相互作用的方向性、距离与形状的关系特性，即角系数 $X_{1.2}$ 特性与系统黑度 ϵ_s 有关。

④ 热辐射换热，物体2获得净热量，与相互作用的换热面积 F_1 、 F_2 有关。

传统的辐射传热学一般只讲述普朗克电磁波理论，而鲜少讲述爱因斯坦的光电效应量子论。随着科技的发展，光电效应论的应用日益普遍，尤其对生物与生命材料、人体皮肤、草药、植物材料、发酵材料、热敏性材料等的吸收光谱。由于在黑体炉或样品炉中高温加热会使材料分解，导致测试有误，因而必须用光电效应量子论得到常温下的傅里叶变换红外吸收光谱。本书阐述了爱因斯坦的光量子论与密立根的实验验证，并介绍了潘建伟世界领跑的“墨子号量子卫星”。

本书的研究内容得到了国家自然科学基金项目4项资助、天津市自然科学基金项目5项资助、国家中医药管理局项目1项资助。笔者所在的研究团队经过20多年的不断努力，搭起了实验台，建起了模拟实验装置，购买了大量的先进仪器及设备，从大量的实验室实验进而步入工厂，进行工程试验验证与创新。本书的研究结果荣获4项国家科学技术进步奖。

本书以视图方式做出供温曲线、木板的多层温度曲线与蒸发面曲线，读者可以一目了然、清晰地看到木材中的水分是如何从内部迁移出来的。供温曲线有升速、恒速与降速段，板内温度曲线也对应应有升速、恒速与降速段，水分的迁移也是很有规律地从不同的层面有条不紊地排出，充分地显示了理想的干燥过程应是能量的供、需相平衡的过程。书中图 13-3~图 13-6 揭示了当供温曲线不优化时，所有的传质均不理想，水分的迁移极不规律。J. 金克普利斯认为由于物料的结构复杂，所以传热传质过程（干燥过程）的机理较其他传质过程要复杂得多。A. C. 金兹布尔格提出：近代干燥学发展的第四阶段是把干燥过程看作能量和物质（水）的综合迁移。中国的张洪沅、丁绪淮、顾毓珍教授在《化学工业过程及设备》一书中指出，固体物料的干燥机理分表面汽化控制与内部扩散控制，并做了详细的论述。但内部扩散控制极为复杂，如何控制？供温与内部扩散控制又存在什么关系？本书以视图的方式进行了清晰的表述，以恒温与变温、恒参数与变参数、单参数与多参数、稳态与非稳态的各种实验探求规律，从实验到工程、从机理到规律。

天津家具七厂红外干燥炉，改造前干燥周期为 85h，而改造后干燥周期为 45h，每脱出 1kg 水耗电 0.96kW·h，平均节电 35.6%，节时 47%，能源利用率为 77%。而普通蒸汽法干燥的干燥周期为 126h，湿蒸汽加热就用 16h。而红外辐射干燥是自蒸湿加热，即刚开始关闭排气孔，干出的水分加热木材自己，16h 后打开排气孔，排出水蒸气，干燥 35h 断电供热，到 45h 干燥完毕，达到供与需的能量平衡。其结果是节能减排、节水，无污染，不要锅炉、不要管道，投资少、占地少，不用锅炉厂房，运行操作费低，干燥质量好，是理想的干燥工艺。这是本书对干燥学、传热传质学、干燥技术的一个创新、发展与贡献。

本书在编写与实验过程中得到了国家自然科学基金委、国家中医药管理局及天津市科委的资助，以及天津大学机械学院和能源与动力工程学科、五源科技院士工作站光电工程研究室、全国红外加热暨红外医学发展研讨会及 80 岁老伴的全力支持。

参加本书编写的有焦士龙、王德新、杨俊红、钟金环、张凯、李希晖、刘嘉智、王永钧、栾松、宋扬、诸凯等，在此一并感谢！

对书中存在的不足之处，也请读者不吝赐教。

褚治德

2018 年 7 月于天津大学

目录

第 1 篇 红外辐射理论

第 1 章 红外辐射的基本理论	002
1.1 红外辐射的基本概念	002
1.2 普朗克黑体辐射定律	004
1.3 爱因斯坦光电效应量子论	006
1.4 维恩位移定律	009
1.5 斯蒂芬-玻尔兹曼定律	009
1.6 兰贝特定律	012
1.7 基尔霍夫定律	013
第 2 章 表面间的辐射换热	015
2.1 角系数及黑体表面间辐射换热	015
2.2 灰体表面间的辐射换热	019
2.3 辐射与对流换热热流密度的计算	022
2.4 辐射换热热流密度与对流换热热流密度的对比研究—— 节能减排的理论研究	025
第 3 章 国际与国内红外标准、量子学说和分子内部的能级	034
3.1 国际标准红外辐射波长的划分	034
3.2 历史上对红外区波段的划分	035
3.3 红外国家标准与国际标准	036
3.4 量子学说和分子内部的能级	036
3.5 分子的振动机理——红外吸收光谱的产生	038
3.6 红外发射光谱与吸收光谱的测量	040

第 2 篇 电红外与燃气红外辐射加热器

第 4 章 电红外辐射加热器	044
4.1 碳化硅红外辐射加热器	044
4.2 乳白石英红外辐射加热器	045
4.3 镀金石英红外辐射加热器	046
4.4 陶瓷红外辐射加热器	047
4.5 电阻带式红外辐射电加热器	047
4.6 集成式电阻膜红外辐射加热器	050
4.7 高温烧结直热式 YHW 型红外辐射加热器	050
4.8 搪瓷红外辐射加热器	051
4.9 灯形红外辐射加热器	052
第 5 章 燃气红外辐射加热器	054
5.1 表面燃烧式多孔陶瓷板燃气红外辐射加热器	054
5.2 多孔陶瓷板金属网燃气红外辐射加热器	055
5.3 金属网燃气红外辐射加热器	055
5.4 多孔介质燃气红外辐射加热器	056
5.5 非回流式燃气燃烧辐射管红外辐射加热器	057
5.6 回流式燃气燃烧辐射管红外辐射加热器	058
5.7 催化氧化燃气燃烧红外辐射加热器	059

第 3 篇 红外热辐射干燥动力学及工程干燥优化温度的选择

第 6 章 红外热辐射干燥动力学 I ——影响红外干燥速率的内在因素 ..	064
6.1 湿物料与水的相互作用	064
6.2 毛细管多孔胶体材料的吸收光谱	066
6.3 红外辐射的穿透性	068
6.4 毛细管对水分的束缚力	071
6.5 平衡水分和自由水分	073
6.6 木材的纤维饱和点及平衡含水率	074
6.7 典型毛细管多孔胶体结构特点	077
6.8 水同物料的结合能与单位脱水量的能耗	078

第 7 章 红外热辐射干燥动力学 II——影响红外干燥速率的外在因素	081
7.1 国内外干燥理论综述	081
7.2 非稳态红外干燥动力学方程	083
7.3 料层厚度对干燥速率的影响	084
7.4 物料初湿含量对干燥速率的影响	085
第 8 章 干燥工程优化温度的选择	086
8.1 油漆(涂料)干燥的优化温度选择	086
8.2 毛细管多孔胶体干燥的优化温度选择	086
8.3 毛细管多孔体干燥的优化温度选择	087
8.4 新材料干燥的优化温度选择	087
8.5 辐射器温度的优化选择及两实际物体表面间的辐射换热计算	087
第 4 篇 涂料的红外干燥及薄层涂膜(烤漆)干燥试验研究	
第 9 章 涂料的红外辐射	090
9.1 涂膜简介	090
9.2 涂料分类及涂膜生成机理简介	091
9.3 吸收光谱与红外辐射涂料	095
9.4 碳化硅高发射率涂料	097
9.5 三氧化二铁系列高温高发射率涂料	098
第 10 章 红外辐射涂膜烘道	100
10.1 红外辐射桥式烘道简介	100
10.2 红外辐射涂膜烘道设计	101
10.3 高温定向辐射红外干燥开放式烘道	102
10.4 红外辐射与对流涂膜干燥的比较	104
第 11 章 红外辐射加热在涂装工程中的应用	105
11.1 国内外红外辐射薄层烤漆进展	105
11.2 汽车钢圈丙烯酸罩光漆的红外辐射烘烤	105
11.3 辐射加热器与被烤工件的辐射换热与计算	108
11.4 兰胎竹漆器红外辐射烘烤	109
11.5 自行车挡泥板的红外辐射烘烤	112
11.6 红外定向辐射加热胶合板单板干燥	113

11.7	木质人造板制品粉末涂装红外辐射加热快速固化技术的 研究与应用	119
11.8	红外辐射技术在纺织行业中的应用	138
11.9	红外辐射技术在塑料加工中的应用	141
11.10	红外辐射在造纸烘干工艺中的实验研究	143

第 5 篇 木材内部水分迁移的理论、实验室实验与工程研究

第 12 章	恒条件与变条件下干燥过程的实验规律	150
12.1	国内外恒条件与变条件下干燥过程实验简述	150
12.2	变条件下的模拟实验方案	150
12.3	升温速率对干燥的影响	152
12.4	升速段增湿对干燥速率的影响	154
12.5	恒速段吹风对干燥速率的影响	155
12.6	降速段降温对干燥速率的影响	156
12.7	间断辐照对干燥动力学的影响	157
第 13 章	木材内部自由水分蒸发(迁移)的理论研究	158
13.1	木材内部自由水分蒸发(迁移)的毛细管理论	158
13.2	木材内部水分蒸发(迁移)的温度应力理论	161
13.3	低温红外木材干燥(内部水分迁移)的蒸发面理论研究	162
13.4	高温红外与高速喷射木材干燥的含水率、板温与自由水分的 蒸发面位置	165
13.5	高温与低温热风干燥木材的含水率、板温与自由水分的 蒸发面位置	166
第 14 章	木材干燥过程的工程现场试验研究	168
14.1	红外辐射干燥炉干燥木材的原理	168
14.2	天津家具七厂的红外木材干燥炉	168
14.3	天津家具七厂的红外木材干燥炉现场测试准备	169
14.4	天津家具七厂的红外木材干燥炉现场测试与分析	170
14.5	天津家具七厂的红外木材干燥炉改进前、后的木板中心层 温度对比曲线	171
14.6	木材干燥指标对比及鉴定	172

第 15 章 我国木材干燥技术的现状与发展前景	174
15.1 我国木材干燥的责任与地位	174
15.2 我国木材干燥技术的现状	174
15.3 我国木材干燥技术的发展与创新	175
15.4 创新技术的基石——干燥理论的基础研究	176
15.5 木材红外干燥小结	178

第 6 篇 中药饮片热风与红外干燥基础数据实验研究及果蔬干燥研究进展

第 16 章 中药资源、中药饮片的加工与干燥进展	180
16.1 中药资源与分类	180
16.2 中药饮片的加工与药性	180
16.3 中药饮片工程干燥简介	181

第 17 章 中药饮片热风干燥基础数据实验研究	183
17.1 实验装置及测试仪器	183
17.2 实验方案与测点分布	184
17.3 27 种饮片热风干燥基础数据实验研究	185
17.4 影响饮片热风干燥质量的主要因素	194

第 18 章 中药饮片红外干燥工业生产基础数据实验研究	200
18.1 实验装置与测温点分布	200
18.2 辐射器的发射率及饮片吸收率	200
18.3 中药饮片红外辐射干燥换热的四大特性	202
18.4 辐射板温度对干球温度及干燥速率的影响	202
18.5 辐射板温度与干球温度、干燥速率的关系	203
18.6 炉内红外空间电功率密度对干燥速率的影响	205
18.7 饮片料层厚度对红外干燥过程的影响	206
18.8 辐射板的优化布置方案	207
18.9 27 种饮片工业生产红外干燥基本实验研究	208

第 19 章 槟榔的红外辐射振动流化干燥实验研究	218
19.1 槟榔的红外辐射螺旋振动流化干燥动力学研究	218
19.2 槟榔在固定床中的基本干燥规律	220

第 20 章 红外辐射加热技术在果蔬脱水干燥中的应用研究	222
20.1 概述	222

20.2	果蔬脱水红外辐射加热干燥原理与数学模型·····	222
20.3	红外辐射加热技术在果蔬干燥中的应用研究·····	225
20.4	特征远红外技术用于果蔬干制的研究·····	228
20.5	结论·····	231

第 7 篇 中药饮片、果蔬干燥热风、振动流化、红外辐射、微波药丸干燥机的工程应用与进展

第 21 章	中药饮片、果蔬干燥热风、振动流化、红外辐射、微波药丸干燥机的工程应用·····	234
21.1	热风对流干燥机·····	234
21.2	水平槽型、圆环式振动流化干燥机·····	236
21.3	红外辐射加热螺旋与远红外振动式流化干燥机·····	238
21.4	微波药丸干燥杀菌机·····	239
第 22 章	中药饮片、果蔬干燥机工程进展·····	241
22.1	回转转筒干燥机·····	241
22.2	三环转筒干燥机简介·····	242
22.3	三环转筒干燥机的特点·····	242
22.4	三环转筒干燥机的主要干燥指标与 各种干燥机(炉)主要指标对比·····	244
22.5	三环转筒干燥机的干燥动力学分析·····	245
22.6	充分利用高品位的能量·····	246
符号说明	·····	249
参考文献	·····	250

第 1 篇

红外辐射理论

第 1 章 红外辐射的基本理论

第 2 章 表面间的辐射换热

第 3 章 国际与国内红外标准、量子学说和分子内部的能级

第 1 章

红外辐射的基本理论

1.1 红外辐射的基本概念

能量以电磁波或光子的形式发射传递的方式称为辐射。电磁辐射遵循横波传播定律，所谓横波就是振动方向垂直于传播方向的波动。图 1-1 为电磁辐射波谱及产生的机理。电磁波的波长范围很宽，短波有 γ 射线、X 射线和紫外线，这主要是高能物理学家和核工程师所感兴趣的部分，它是靠放射性裂变与电子轰击产生的；而长波的微波与无线电波则为电气工程师所关心，是靠电子回路的放大振荡产生的。波长从 $0.76\mu\text{m}$ 至 $100\mu\text{m}$ 的电磁波谱称为红外线，是由固体中的分子振动或晶格振动或固体中束缚电子的迁移产生的。

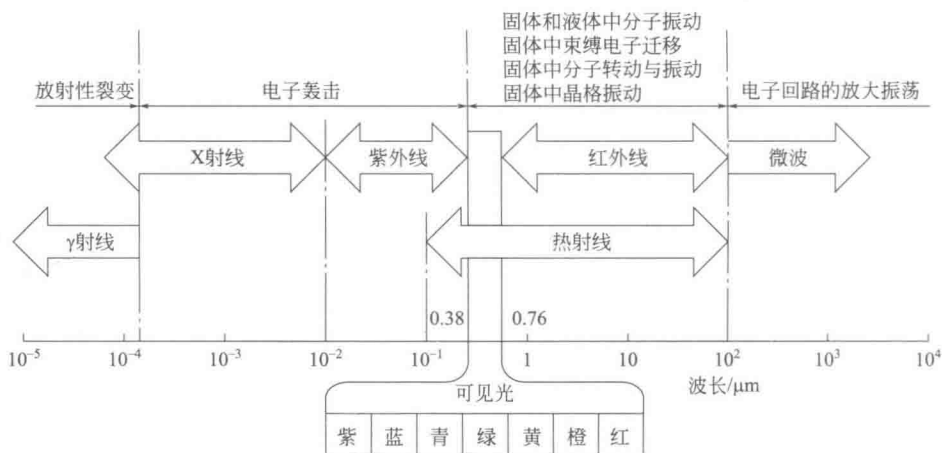


图 1-1 电磁辐射波谱及产生的机理

红外线是怎样发现的呢？1676 年，牛顿用玻璃做的三棱镜发现了可见光谱有 7 色，即红、橙、黄、绿、青、蓝、紫。1800 年，Herschel（赫舍尔）想测量这 7 种光中到底有多少热量，在 7 种色带上分别放上 1 支水银温度计，同

时将1支没有用的温度计放在靠近红区的外部,他偶然发现这支在暗处的温度计升温特别高,因它位于可见光红区的外部,因而得名红外线。

红外辐射的真实性质及其传递机理,人们至今还没有完全搞清楚。麦克斯韦根据电磁场结构理论提出了电磁波动说,认为辐射的能量是由电磁波传送的。20世纪初,以爱因斯坦和玻尔为代表,提出了光量子论,认为光对物质的主要影响是光电效应。光电效应定律为:

$$E = h\nu \quad (1-1)$$

式中, E 为一个光子的能量, J; h 为普朗克常数, $h = 6.624 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; ν 为光子的频率, s^{-1} 。

这一理论在光电子发射、光子探测器方面均得到了应用。热像仪中的光子探测器就是通过光电效应将光子转换为电信号,此电信号的数值单位称为热值(IU),而热值又与辐射温度相关,因而可用热像仪测试物体表面的温度场。因为无论用电磁波动说还是光量子论的任何一种,都未能全部解释清楚所有实验观察到的结果,但是辐射能的传递可以依靠电磁波或光子能量发射,这已被证实,因此,人们称辐射具有双重性,即电磁波与光子的特性。

所有的电磁波和光子发射都是以光速传播的。真空中的光速为 $C_0 = 2.9977 \times 10^{10} \text{ m/s}$,常被取作 $3 \times 10^{10} \text{ m/s}$ 。其他介质中的光速都比真空中的小,可用介质的折射系数 n 求出,即 $C = C_0/n$,气体中的 $n \approx 1$,因此,在气体中波速亦被取为 $3 \times 10^{10} \text{ m/s}$ 。不同的单色光必定具有不同的波长,波长比频率容易测准,所以测试物体的发射率或吸收率的红外光谱仪其横坐标均以波长(或波数)表示。但出现折射时,射线从一种介质进入另一介质,频率不变,而光速与波长将发生改变,因此,辐射具有典型的波性质。波长和频率之间的关系为:

$$C = \lambda\nu \quad (1-2)$$

式中, C 为光速, m/s ; ν 为频率, s^{-1} ; λ 为波长, m 。

辐射亦称为光学辐射,因而有关光的投射、反射、折射的概念和规律,同样适用于热辐射。图1-2为投射到物体上的辐射能的分配。辐射热流 Q_E 投射到物体2上,一部分 Q_A 被吸收,使物体升温,一部分 Q_R 被反射,还有一部分 Q_T 被透射。这种吸收、反射、透射份额的大小由物质的性质所决定,称为该物体对外来辐射

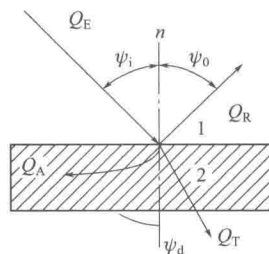


图1-2 投射到物体上的辐射能的分配

能流的吸收率 A 、反射率 R 和透过率 T ，即：

$$A = \frac{Q_A}{Q_E}; \quad R = \frac{Q_R}{Q_E}; \quad T = \frac{Q_T}{Q_E} \quad (1-3)$$

根据能量守恒定律，则：

$$A + R + T = 1 \quad (1-4)$$

从物理意义上看， A 、 R 、 T 每个量只能在 $0 \sim 1$ 的范围内变化。被反射和透射的辐射能流除部分被空间介质沿途吸收外，又将落在周围其他物体上，依次被吸收。由此可见，自然界中每一个物体在不断地向空间发射辐射能的同时，又在不断地吸收来自周围其他物体的辐射能。辐射与吸收的综合结果即为辐射换热，这种相互作用的概念十分重要。

物体之间不发生相对位移，只依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递称为导热。而冷、热流体相互掺混或流体内部因有温差产生流体的流动换热称为对流换热。可见，无论是导热还是对流换热均需有介质传递能量。而热辐射可以在真空中传递能量，且辐射能仅与温度的 4 次方成正比，而不是像导热与对流那样是与温度的 1 次方成正比，这也是辐射传热的另一特点。

1.2 普朗克黑体辐射定律

自然界中并不存在绝对黑体，像黑丝绒和烟黑的吸收率也只有 0.96，但是可以用人工方法制作绝对黑体模型，见图 1-3。孔径越小，其吸收率越接近于 1。各种物体的辐射能力以“黑体”为最大。人造黑体空腔常做成圆柱形，并且底部呈锥形，如图 1-3 (b) 所示，以防止外界射线直射到底面而反射回出口，黑体炉就是这样制成的。在理论研究与工程测试中，均是以黑体炉的发射能量为基准来对比测试得到其他材料的发射率。在研究辐射换热问题时最常用的一个表明物体辐射能力的参量就是辐射力 E (emissive power)，它表示某一温度的表面在单位时间、单位面积向半球空间所有方向发射的全部波长的

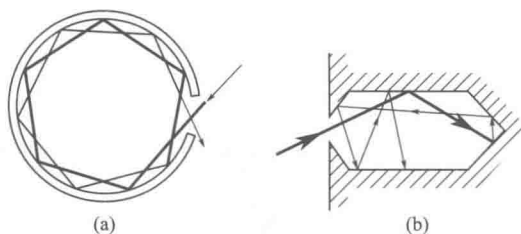


图 1-3 人造黑体模型

辐射能的总量，它的常用单位是 W/m^2 ，亦被称为全辐射力或总辐射力，如指某一波长范围的则称单色辐射力 E_λ ，黑体的单色辐射力为 $E_{\text{b}\lambda}$ 。

普朗克定律揭示了黑体辐射能按波长的分布规律，即给出了黑体单色辐射力的形式。根据量子理论得到普朗克定律的数学式：

$$E_{\text{b}\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/(\lambda T)} - 1} \quad (\text{W}/\text{m}^3) \quad (1-5)$$

式中， λ 为波长， μm ； T 为黑体热力学温度，K； e 为自然对数的底； C_1 为常数，其值为 $3.743 \times 10^{-16} \text{W} \cdot \text{m}^2$ ； C_2 为常数，其值为 $1.4387 \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{K}$ 。

图 1-4 为普朗克定律的图示，纵坐标 $E_{\text{b}\lambda}$ 为单色辐射力 [W/m^3 或 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$]，横坐标为波长 (μm)，从该图中可以看出以下问题。

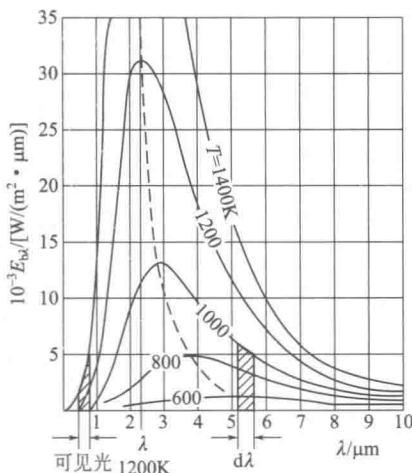


图 1-4 普朗克定律的图示

① 对某一确定的波长，热力学温度高时其单色辐射力亦大，且随温度的升高其峰值向短波移动（见虚线）。

② 每条曲线下的面积表示相应温度的黑体辐射力 E_b ， E_b 与 $E_{\text{b}\lambda}$ 的关系为：

$$E_b = \int_0^{\infty} E_{\text{b}\lambda} d\lambda \quad (\text{W}/\text{m}^3) \quad (1-6)$$

③ 对 $d\lambda$ 波长发射的黑体辐射力而言，已在图中用阴影面积示出。如图 1-4 中 $T=1000\text{K}$ 、 $d\lambda=5.6-5.2=0.4$ (μm) 中的阴影与 $T=1400\text{K}$ 及 $T=1200\text{K}$ 在可见光区 $d\lambda=0.76-0.38=0.38$ (μm) 的阴影。由此可见，可见光的黑体辐射力与红外区相比所占的百分比实在甚小。

④ 由该图还可知，红外热辐射只有波长为 $0.76 \sim 25\mu\text{m}$ 才有实际意义，

若波长太长，其单色辐射力太小，已无工程意义。

1.3 爱因斯坦光电效应量子论

1.3.1 爱因斯坦(A. Einstein)光电效应量子论概述

爱因斯坦在普朗克假设的基础上提出了光电效应的解释，他认为光不仅在发射和吸收过程中是以 $h\omega$ 为单位一份一份地进行的，而且在传播过程中也是一份一份地存在着的，他称此最小能量单位为光量子，即后来所谓的光子。根据爱因斯坦理论，当光照射到金属表面时，光子和金属表面的电子直接发生作用，逸出金属表面的电子能量符合下面的方程，即爱因斯坦方程：

$$\frac{1}{2}mv_r^2 = h\omega - W \quad (1-7)$$

式中， m 为电子的静止质量； $\frac{1}{2}mv_r^2$ 为光电子最大动能； h 为普朗克常数值； ω 为光的角频率； W 为逸出功，它和金属材料有关。

这个方程经密立根 (R. Milikan) 长达 10 年的精心实验验证，证明它在各个方面都与实验精确符合。各个方面包括红外辐射的长波段与短波段，也包括紫外段。长期以来，前人也有很多理论，如以太论、微粒子论、电磁波论等，但都有不足之处。而爱因斯坦简洁明了地解释了光电效应理论和实验现象。如式 (1-7) 中，当光的角频率低于 $\omega_0 = W/h$ 时，光电子的最大初动能将成为负值，这是不可能的，这就说明存在红线频率的原因，即红外线端出现了问题。而在经典的物理学中，这是无法理解的。根据爱因斯坦的相对论：光子以光速、以量子的能量 e_r 前进，则 e_r 为：

$$e_r = h\nu_r = mc_r^2 \quad (1-8)$$

式中， m 为光子质量； ν_r 为光子频率， s^{-1} ； h 为普朗克常数值，取 $6.624 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ ，普朗克常数这么小的数值也被密立根实验所证实。

光子也应有质量， $m = h\nu_r/c_r^2$ ，动量为 $mc_r = h\nu_r/c_r$ 。光子撞击表面引起单位时间的动量的改变，将产生“辐射压力”。

1900 年，普朗克提出他的定律后，有 4 年时间他过着风雨飘摇的生活。1905 年，瑞士专利局的一位职员爱因斯坦发表了一个大胆的重大声明，即光电效应理论，使普朗克日渐衰颓的发现重获新生。4 年后，爱因斯坦从专利局被调到苏黎世大学的教学行列中。爱因斯坦提出光子的不连续性，像一个粒子，即所谓的光子，即光电效应理论。该理论即是光电池、有声电影、电视、