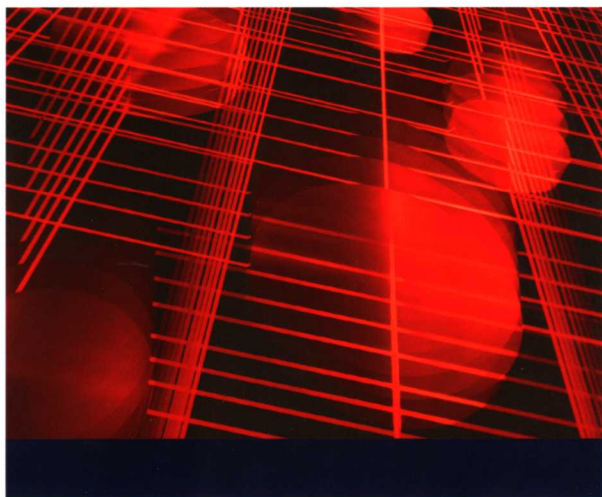


田裕鹏 编著

红外检测与诊断技术



CHEMICAL INDUSTRY PRESS



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

红外检测与诊断技术

田裕鹏 编著



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

· 北 京 ·

本书对用途广泛、发展迅速的红外检测与诊断技术进行了综合论述。在对红外检测诊断技术的红外基础理论、红外辐射测量及其仪器、温度及热传导分析进行介绍的基础上,重点论述了红外热成像检测技术,并结合实例介绍了智能检测诊断技术的一些方法。书中用专门一章论述了光热辐射测量技术。本书最后一章以大量实例介绍了最新的红外检测与诊断技术在电力、石化、冶金、建筑、材料与结构检测、医学等方面的应用,基本覆盖了红外检测与诊断技术的各个方面。本书在介绍有关理论基础的同时,特别注意结合实际应用对红外检测技术进行介绍,实用性强。

本书可供从事红外检测与诊断及相关工作的科研技术人员、大中专院校有关专业的师生及其他相关人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

红外检测与诊断技术/田裕鹏编著. —北京:化学工业出版社, 2006. 3
ISBN 7-5025-8475-7

I. 红… II. 田… III. 红外检测-基本知识
IV. TN21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 026755 号

红外检测与诊断技术

田裕鹏 编著

责任编辑:邢涛

文字编辑:李姿娇

责任校对:郑捷

封面设计:潘峰

*

化学工业出版社 出版发行

材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市昌平振南印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 12 字数 325 千字

2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8475-7

定价: 35.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

前 言

红外技术是涉及红外物理学、红外光电子技术和计算机技术的综合技术科学，以红外辐射的产生、传播、转换和测量为研究内容。由于其特点，红外技术首先在军事上得到重视和应用。随着技术的发展，红外技术逐步从军用向民用转化，广泛应用于工业、农业、医学、交通等各个行业和部门。

红外检测就是以红外辐射的原理为基础，运用红外辐射测量分析方法和技术对设备、材料及其他物体进行测量和检验，进而发展成为红外诊断技术，因此红外检测是红外诊断技术的基础。检测与诊断技术就是了解和掌握被测对象在运行过程中的状态，确定其工作是否正常，以便及早发现故障并针对具体情况采取相应对策，具体分为检测、分析诊断和治理预防三个基本环节，其中，检测是手段，诊断是目的，检测是诊断的基础和前提，诊断是检测的最终结果。

现代化生产中，发生故障的后果往往非常严重，所以如何及时发现故障并进行及时处理显得尤为突出。人们在总结过去经验教训的基础上，提出在运行中或基本不停机的情况下，掌握其运行状态，判定产生故障的部位和原因，从而尽早发现及时处理，保障生产的持续进行，使得传统的预防性检修向预知性状态维修发展。红外检测技术能够以非接触、实时、快速、在线方式获取被测对象的运行状态信息，在生产过程中的产品质量控制、设备在线故障诊断、安全保护以及节约能源等方面发挥着越来越重要的作用，在电力、冶金、石油化工、交通、机械等许多工业部门受到广泛重视，收到了显著的经济效益和社会效益。红外检测技术已不再局限于最初的无损检测的范围，红外检测诊断的应用也越来越广泛，其应用领域之多是其他检测方法所无法比拟的。这是因为温度是设备及运行过程中非常重要的物理量，而红外检测的对象就是与温度密切相关的红外辐射，红外检测的实质是红外测温。

本书对红外检测与诊断技术中的红外基础理论知识、热传导、

热图像处理及信息融合、红外辐射测量技术等进行了综合论述。在红外检测与诊断技术中，离不开对物体红外辐射的测量和温度变化的分析，往往还需要使被测对象失去热平衡，在动态热变化过程中进行检测。研究温差引起的热量传递就离不开传热分析，传热分析可帮助我们分析有关实验现象，对红外热图像进行合理的解释。红外热成像技术代表了红外技术发展的最新成就，与雷达、电视一起构成当代三大图像传感系统，尤其是焦平面阵列技术的发展，使得红外热成像系统成本下降，红外热成像检测具有分辨率高、形象、直观等一系列其他检测方式无法比拟的优点，红外检测越来越多地以热图像形式给出结果，故书中专设一章介绍了热成像及图像处理技术，并结合图像融合论述了智能检测诊断技术的一些方法。

光热辐射测量技术属于主动式红外无损检测方法，它结合了红外检测、调制激励、信号探测与处理等多方面的技术，具有很广泛的用途，是近年来红外检测诊断发展非常迅速的领域，出现了许多新的理论和技术，如热波成像技术，书中专门用一章进行讨论。由于该章内容所涉及知识较多，所以有些方面可能并不全面。最后本书将红外检测与诊断技术的应用作为一章，以大量实例反映红外检测与诊断技术在电力、石化、冶金、建筑、材料与结构检测、医学等方面的应用，基本覆盖了红外检测与诊断的各个方面。

书中引用了许多红外检测工作者、有关专家和境外公司提供的实例、经验、公开发表的文章、正式出版的图书和非正式出版发表的资料，并得到他们的指教和帮助，在此表示衷心的感谢。

本书由田裕鹏编写。研究生万群、陈煜、成云霞、赵德杰、田晓冬、余德兰、赵莹莹、冯晓伟、吕中产、黄文浩、王珊珊等在本书的实验、数据处理、文字录入、插图制作等方面付出了辛勤的劳动，在此表示感谢。由于编者水平有限，书中难免疏漏之处，敬请读者谅解并予指正。

编著者

2006年1月于南京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 红外辐射与电磁波谱	1
1.1.1 红外辐射的发现	1
1.1.2 电磁波谱	2
1.1.3 红外线的性质	4
1.2 基本辐射定律	5
1.2.1 热与温度	5
1.2.2 黑体模型与基尔霍夫定律	6
1.2.3 普朗克定律	10
1.2.4 维恩位移定律	12
1.2.5 斯蒂芬-玻耳兹曼定律	13
1.2.6 实际物体的辐射定律与发射率	14
1.3 红外辐射的传输	16
1.3.1 红外辐射在大气中的传输	17
1.3.2 红外辐射在介质中的传输	21
1.3.3 光学薄膜概述	25
1.3.4 干涉滤光片	30
1.4 红外检测与诊断技术概述	31
1.4.1 红外技术与红外检测诊断	31
1.4.2 红外检测与诊断的原理	35
1.4.3 红外检测技术的特点	38
1.4.4 红外检测与诊断的基本方法	39
第 2 章 红外检测技术基础	44
2.1 红外辐射度学基础	44

2.1.1	基本辐射量	45
2.1.2	光谱辐射量	48
2.1.3	光子辐射量	49
2.1.4	朗伯 (Lambert) 余弦定律	49
2.2	红外系统概述	52
2.2.1	红外系统的基本结构	52
2.2.2	红外光学系统	53
2.2.3	辐射调制与调制盘	60
2.3	红外探测器	62
2.3.1	概述	63
2.3.2	红外探测器的特性参数	64
2.3.3	噪声	67
2.3.4	热探测器	71
2.3.5	光子探测器	77
2.3.6	红外探测器制冷	84
2.4	常用红外检测仪器设备	87
2.4.1	红外辐射计	87
2.4.2	红外测温仪	91
2.4.3	红外行扫描仪	95
2.4.4	红外热电视	96
2.4.5	红外热像仪	98
2.4.6	红外光谱分析仪	99
第3章	红外检测诊断中的传热分析	103
3.1	热传导的基本定律	103
3.1.1	温度场和温度梯度	103
3.1.2	基本热量传递定律	105
3.1.3	传热分析的电路模拟解法	110
3.2	导热基本定律及稳态导热	112
3.2.1	导热微分方程式及其定解条件	112
3.2.2	通过具有确定边界条件的无限大平板的稳态导热 ...	116
3.2.3	复合结构导热	118

3.2.4	通过圆筒壁的导热	121
3.2.5	具有内热源的稳态导热问题	123
3.2.6	毕奥数和傅里叶数	124
3.3	非稳态导热问题	125
3.3.1	非稳态导热的集总参数分析法	126
3.3.2	半无限大物体的非稳态导热	128
3.3.3	一维非稳态导热的电模拟解法	130
3.4	导热问题的数值解法基础	132
3.4.1	概述	132
3.4.2	稳态导热问题的数值分析方法	135
3.4.3	多维非稳态导热问题的求解	137
第4章	热成像与图像处理分析	144
4.1	热图像与热成像技术	144
4.1.1	热图像	144
4.1.2	热像仪	145
4.1.3	光机扫描红外热像仪	152
4.1.4	凝视式热像仪	157
4.2	数字图像处理基础	162
4.2.1	图像与数字图像处理	162
4.2.2	图像的视觉基础	167
4.2.3	光度学和色度学简介	170
4.3	图像增强	174
4.3.1	灰度修正	175
4.3.2	图像的频率域增强	179
4.3.3	图像的同态增波增强	182
4.3.4	空间滤波增强	186
4.3.5	伪彩色增强	197
4.4	图像的分割与图像分析	200
4.4.1	概述	200
4.4.2	图像阈值分割	201
4.4.3	基于边缘检测的图像分割	208

4.4.4	图像特征及特征提取	214
4.5	信息融合与检测诊断技术	217
4.5.1	信息融合概述	217
4.5.2	图像融合	219
4.5.3	检测诊断技术中的信息处理方法	230
4.5.4	信息融合技术在检测诊断中的应用	236
第5章	光热辐射测量技术	246
5.1	概述	246
5.1.1	光热效应与光热辐射测量原理	248
5.1.2	光热辐射测量的类型	251
5.1.3	光热辐射测量的一般实验形式	254
5.2	热波理论	257
5.2.1	热波导论	257
5.2.2	热波反问题	261
5.3	脉冲光热辐射测量技术	265
5.3.1	脉冲光热辐射测量方法	265
5.3.2	脉冲光热辐射测量数据处理	267
5.3.3	脉冲相位光热辐射测量技术	276
5.4	其他光热辐射测量技术	282
5.4.1	调制辐射测量技术	282
5.4.2	阶跃光热辐射测量技术	287
5.4.3	振动(超声)激励辐射测量技术	290
5.4.4	热层析摄影术	291
5.4.5	光热偏转测量技术	292
第6章	红外检测与诊断技术的应用	296
6.1	概述	296
6.1.1	红外技术的应用	296
6.1.2	红外检测与诊断技术的应用	298
6.1.3	实际红外检测诊断中的问题	300
6.2	电力设备的红外检测与诊断	303
6.2.1	电力设备的故障与检测分析方法	304

6.2.2	电力设备红外检测与诊断实例	307
6.2.3	国家电力行业红外诊断技术的应用标准	314
6.3	石油化工设备的红外诊断	317
6.3.1	石化设备故障与检测分析方法	317
6.3.2	石化设备红外检测与诊断实例	319
6.4	工业热设备及建筑物红外诊断与评价	327
6.4.1	工业热设备红外检测与诊断方法	327
6.4.2	建筑物外墙饰面及施工质量的红外检测	331
6.4.3	红外技术在房屋诊断与建筑保温评价中的应用	338
6.5	材料与构件的红外无损检测	341
6.5.1	红外无损检测的原理	341
6.5.2	金属材料与构件的红外检测	342
6.5.3	复合材料与构件的红外无损检测	346
6.5.4	材料热物理性质的测量	352
6.6	其他应用	354
6.6.1	电子线路板的红外检测与诊断	354
6.6.2	红外技术在空气动力学研究中的应用	357
6.6.3	红外检测与诊断在医学上的应用	360
6.6.4	压力容器热弹性红外检测技术	365
	参考文献	368

第 1 章 绪 论

本章首先介绍什么是红外辐射,对红外线、黑体等与红外辐射有关的概念及其物理意义进行了讨论,给出红外辐射所遵循的基本辐射定律,并简单介绍了红外辐射的传输,是红外检测与诊断技术的物理基础。

1.1 红外辐射与电磁波谱

1.1.1 红外辐射的发现

1672 年,牛顿使用分光棱镜就把太阳光(白光)分解为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等各种单色光,发现太阳光(白光)是由各种颜色的光复合而成,做出了“单色光在性质上比白色光更简单”的著名结论。1800 年,德国天文学家 F. W. 赫胥尔(Frederik William Herschel)发现了红外线的存在。赫胥尔为了在观察太阳时保护眼睛,用分光棱镜将太阳光分解成彩色光谱,然后用温度计测量光谱中各种颜色的温度,为了与环境温度进行比较,他在彩色光带附近放几支温度计来测定周围环境温度。实验中,赫胥尔偶然发现一个奇怪的现象:放在光带红光外的一支温度计,比室内其他温度计的指示数值高。经过反复实验,这个所谓热量最多的高温区,总是位于光带最边缘处红光的外面,那里并没有可见光的辐射。这一实验“意外”地导致了红外辐射的发现。其实,在这之前就有人做过同样的实验,但赫胥尔是第一个注意并发现这一现象的人。

赫胥尔称他发现的这种辐射为“不可见光线”或“热线”。赫胥尔的发现说明:太阳发出的辐射中除可见光线外,还有一种人眼

看不见的“不可见光线”，这种“不可见光线”位于红色光外侧，并且与可见光有相同的性质。“不可见”实际上是针对人眼而言的，因为不同类别的生物其可见辐射频带范围是不同的，如牛对红色是色盲，斗牛士的红披肩在牛眼里是漆黑一片；而蛇对上述“不可见光线”却很敏感，所以蛇可以在夜晚准确地捕捉到目标。现在我们称这种不可见光线为“红外辐射”或“红外线”，它实际上也是一种电磁振荡，其性质和我们熟悉的可见光及无线电波完全一样，如红外辐射也符合反射和透射定律，另外，用水银温度计可以定量对它进行测量。在不同物质中红外辐射的传输是不同的，如盐(NaCl)是良好的红外透射体。

1.1.2 电磁波谱

已知的电磁波谱如图 1-1 所示。电磁辐射都具有以下共同特点：电磁辐射都以横波形式进行传播，即电磁波的振动方向与传播方向垂直；电磁辐射在真空中的传播速度相同，都等于光在真空中的传播速度；电磁辐射的传输并不需要介质。有两种描述电磁辐射的方法，一种是用光子的概念，光子是静止时质量为零并具有离散能量的能量子；另一种是把电磁辐射看作是具有一定频率的电磁波动，这就是所谓的波粒二象性。

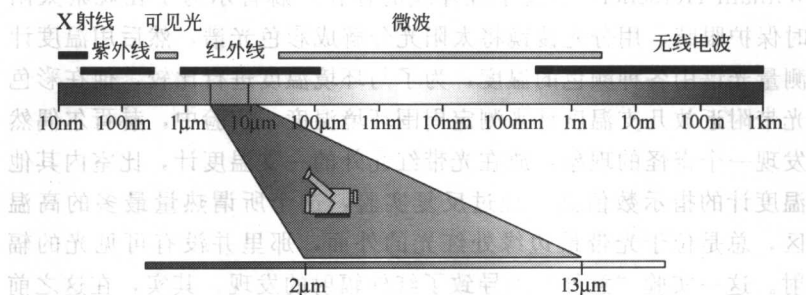


图 1-1 已知的电磁波谱

按波动性来说，电磁辐射的差别在于频率不同。频率是指单位时间内通过一点的波的个数，用 ν 表示，单位是每秒分之一，称为

赫兹。光在真空中的传播速度为 $c=2.998 \times 10^{10} \text{ cm/s}$, $c=\lambda\nu$, λ 为波长, 指波在传播方向上得到的任意最近两个相同相位点间的距离。波长的单位通常可取为微米 (μm , $1\mu\text{m}=10^{-6} \text{ m}$)、纳米 (nm , $1\text{nm}=10^{-9} \text{ m}$) 或埃 ($\text{\AA}$, $1\text{\AA}=10^{-10} \text{ m}$)。

按粒子性来说, 电磁辐射具有能量, 由一个个被称为“量子”或光子的粒子所携带, 每个光子的能量为 $\epsilon=h\nu$, 单位常用电子伏特 (eV) 表示, 式中, h 为普朗克常数。上述公式实际上也表示出了粒子性与波动性之间是有联系的。

整个电磁波谱按波长的不同, 可划分为不同的波段: 从最高频的宇宙射线 (10^{23} Hz) 和 γ 射线、X 射线、紫外辐射、可见光、红外辐射、微波、无线电波到最低频的声波振荡 (10 Hz)。正是由于电磁波间有着频率的差别, 使得电磁波的产生以及电磁波与不同物质的相互作用都有很大差别, 进而可将电磁波划分成以下三个组成部分。

(1) 高频区 其中包括 X 射线、 γ 射线和宇宙射线。它们是利用带电粒子轰击某些物质产生跃迁和衰变而产生的。这些辐射的特点是它们的量子能量高, 当它们与物质相互作用时, 更多地表现为粒子性。

(2) 长波区 其中包括长电振荡、无线电波和微波等较低频率的辐射。它们由电子束管配合电容、电感的阻容电路来产生。它们与物质间的相互作用更多地表现为波动性。

(3) 中间区 其中包括红外辐射、可见光与紫外辐射。这部分辐射产生于原子和分子的运动, 在红外区辐射主要产生于分子的转动和振动, 而在可见光与紫外区辐射主要产生于电子在原子场中的跃迁。这部分辐射统称为光辐射, 这些辐射在与物质的相互作用中, 显示出波动和粒子双重性。另外不同物质的粒子运动情况不同, 而每一种粒子均会产生其特有的辐射谱线, 可以用来确定物质的成分, 这也正是光谱学的物理基础。虽然红外光谱不是本书所要讲述的主要内容, 但它是红外检测技术应用非常活跃和广泛的一个方面, 是红外检测的重要应用领域。

1.1.3 红外线的性质

从电磁波谱可以看到, 红外波谱在电磁波谱中分布在微波和可见光之间, 其波长约在 $0.75 \sim 1000 \mu\text{m}$ 之间, 因位于可见光谱红光区之外, 所以俗称为红外线。可见光波长约在 $0.4 \sim 0.75 \mu\text{m}$ 之间, 跨过一个倍频程, 而红外光谱区则跨过十个倍频程, 因此, 红外光谱区比可见光谱区含有更丰富的内容。

红外光谱的长波段与毫米波的短波段有一个重叠区, 所以对这一部分电磁辐射可以用两种称呼, 或称为红外与毫米波。

在红外技术领域中, 为了便于研究不同波长的红外辐射的性质, 通常进一步将红外辐射波段按波长分为近红外 ($0.75 \sim 3 \mu\text{m}$)、中红外 ($3 \sim 6 \mu\text{m}$)、远红外 ($6 \sim 15 \mu\text{m}$)、极远红外 ($15 \sim 1000 \mu\text{m}$), 见表 1-1。在以上划分方法中, 每一个波段都对应有不同红外探测器的工作波段, 也考虑了红外辐射在地球大气层中的传播特性, 例如, 三个波段中每一个波段都包含一个大气窗口。

表 1-1 红外辐射波段

名称	波长范围/ μm	简称	名称	波长范围/ μm	简称
近红外	$0.75 \sim 3$	NIR	远红外	$6 \sim 15$	FIR
中红外	$3 \sim 6$	MIR	极远红外	$15 \sim 1000$	XIR

根据研究领域的不同, 红外光谱的划分方法也不相同, 如在光谱学中就有不同的划分方法。

红外辐射是自然界存在的一种最为广泛的电磁辐射, 任何物体在常规环境下都会产生自身的分子和原子的无规则运动, 并不停地辐射出红外能量。分子和原子的运动愈剧烈, 辐射的能量愈大, 反之, 辐射的能量愈小。

红外辐射除了具有电磁辐射的一般性质外, 还具有一些与可见光不同的独有特性:

① 红外线对人的眼睛不敏感, 所以必须用对红外线敏感的红外探测器才能接收到。因为红外线对人的眼睛是不可见的, 所以人们对它没有像对可见光一样的直接感受, 也正因为这一点, 红外技

术在军事上具有特殊的用途。

② 红外线的量子能量比可见光的小，例如 $10\mu\text{m}$ 波长的红外光子的能量大约是可见光光子能量的 $1/20$ 。

③ 红外线的热效应比可见光要强得多。

④ 红外线更易被物质所吸收，但对于薄雾来说，长波红外线更容易通过。

1.2 基本辐射定律

1.2.1 热与温度

科学研究表明，热与组成物质的原子、分子的运动密切相关，原子、分子的无规则运动越剧烈，物体表现就越热，反之，物体越冷。所以将组成物质的原子、分子的无规则运动称为热运动，它是物质运动的最基本形式之一。红外辐射以及其他光辐射与组成物质的原子、分子的运动密切相关，物体越热表明其发射的红外辐射越强。

为了科学地反映物体冷热的程度，建立了温度的概念。温度是反映物体冷热程度的物理量。温度这一物理量在宏观上对粒子运动的剧烈程度进行了描述，温度越高表明组成物体的粒子运动越剧烈，反之则相反。所以当粒子处于静止状态时，物体温度处于绝对零度，物体不会向外发出辐射。

理论和实验研究表明，任何温度高于绝对零度的物体，都向外发出辐射，并且绝大多数处于常温状态的物体的辐射峰值恰好在红外波段，所以红外线的热效应比可见光要强得多。自然界普遍存在着红外辐射，只不过我们的眼睛无法看到。红外辐射的发现也与热密切相关，因此红外辐射又称为热辐射。

为了定量确定温度，引入了温标。所谓温标就是温度的数量表示，是物体冷热程度的客观表示。目前常用的有三种温标：开氏温标 (Kelvin, K)、摄氏温标 (Celsius, $^{\circ}\text{C}$)、华氏温标 (Fahrenheit, $^{\circ}\text{F}$)。三种温标之间的关系如图 1-2 和表 1-2 所示。

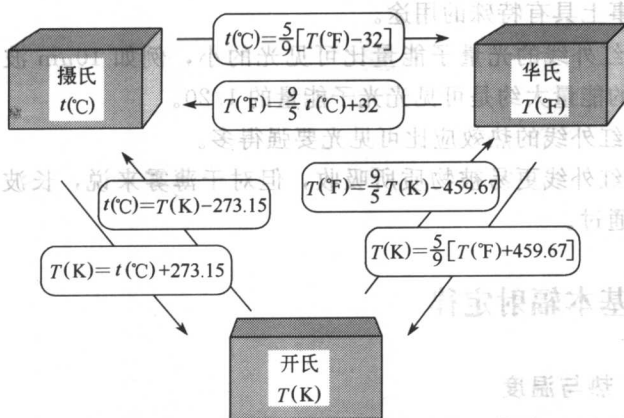


图 1-2 三种温标之间的关系

表 1-2 三种温标

名称	符号	单位	说 明
摄氏温标	t 或 θ	$^{\circ}\text{C}$	目前世界上最常用的温标
开氏温标	T	K	基于物理规律,是目前科学领域最常用的温标
华氏温标	T	$^{\circ}\text{F}$	在美国广泛使用, 0°F 是盐和冰混合物的温度,而 100°F 是人的温度,等于摄氏温标的 37°C

水的三相点温度(即水、冰和水蒸气同时存在的温度)为 0°C 。水的三相点温度是第一个温度度量衡的基础,但是由于测量费用太高且太复杂,国际温度度量衡建议用一组纯物质(如金)的凝固点温度代替水的三相点温度作为基准。图 1-3 给出了一些特殊温度。

开氏温标中的零度为绝对零度,相当于摄氏温标的 -273.15°C (一般近似认为是 -273°C)。理论上讲,在绝对零度物体的分子、原子的无规则运动就停止了。

1.2.2 黑体模型与基尔霍夫定律

19 世纪后半期,物理学家一直在试图解释热辐射体的光谱能量分布。1860 年,基尔霍夫(Kirchhoff)在研究辐射传输的过程中发现:在任一给定的温度下,辐射通量密度和吸收率之比,对任

何材料都是常数。用一句精练的话表达，即“好的吸收体也是好的辐射体”。基尔霍夫还提出用“黑体”这个词来说明能吸收所有方向和波长入射辐射全部能量的物体。显然黑体只是一种理想化的概念，自然界中并不存在真正的黑体。

从能量守恒角度很容易理解基尔霍夫定律。根据热平衡原理，在一个密闭的真空腔中放置物体 A，腔与外界没有能量交换，由于腔是真空的，物体之间只有通过辐射相互交换能量。最后达到热平衡状态，

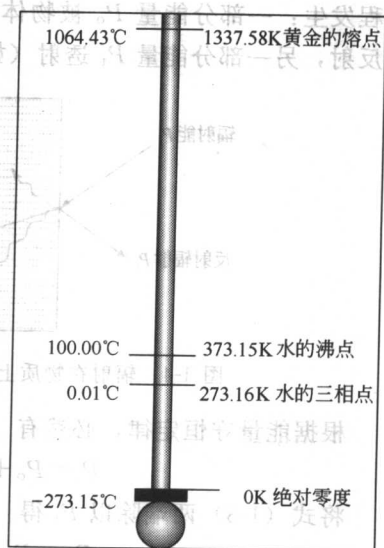


图 1-3 特殊温度点

处于相同的温度之下，此时物体单位时间内辐射的能量恰好等于它吸收的能量。由此可见，在热平衡下，辐射较大的物体，其吸收也较大，反之亦然。基尔霍夫定律指出：物体的辐射出射度 W 与吸收率 α 的比值与物体性质无关，即

$$\frac{W}{\alpha} = f(T) \quad (1-1)$$

基尔霍夫定律对所有波长的全辐射是正确的，对波长为 λ 的任意单一辐射也是正确的，即

$$\frac{W(\lambda, T)}{\alpha(\lambda, T)} = f(\lambda, T) \quad (1-2)$$

所以，热平衡条件下，在给定温度下，对某一波长来说，所有物体的发射本领和吸收本领的比值与物体自身的性质无关，它对于一切物体都是恒量。即 $W(\lambda, T)/\alpha(\lambda, T)$ 对所有物体来说，都是波长和温度的普适函数。

实际上，当一定的辐射能 P_i 入射到一个物体表面时，有三种