

材料科学及测试技术丛书

高温测量

原理与应用

朱麟章 编著

科学出版社

材料科学及测试技术丛书

高温测量

原理与应用

朱麟章 编著

科学出版社

1991

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书着重讲述高温测量的原理与应用。在较全面地介绍普通热电偶的基础上,对用于高温测量的裸露热电偶、铠装热电偶和表面测温热电偶等做了详细的论述;在阐明热辐射的基本原理以及辐射、光学高温计的基础上,对双色、三色光电高温计,部分辐射温度计,扫描温度计和创造近黑体的测温条件等做了较充分的叙述,对热工计量与能源管理所需要的热流计与火焰黑度计也做了介绍。

本书内容较新而全面,适于高等院校及中等专业学校自动化仪表与热工类专业作教材或教学参考书,对从事自动化仪表、热工测量、材料制备与处理、能源计量与管理等工作的工程技术人员也是一本有益的参考书。

材料科学及测试技术丛书

高 温 测 量

原理与应用

朱麟章 编著

责任编辑 杨家福 何舒民

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1991年11月第一版 开本: 787×1092 1/32

1991年11月第一次印刷 印张: 20 3/4

印数: 0001—1600 字数: 472 000

ISBN 7-03-002285-8/TH·16

定价: 19.20 元

材料科学及测试技术丛书

编辑委员会

主 编: 严东生

副 主 编: 柯 俊 颜鸣皋

编辑委员: 冯 端 刘嘉禾 孙珍宝 师昌绪
许顺生 肖纪美 沈华生 李恒德
吴人洁 范 棠 柯 成 徐祖耀
钱人元 殷之文 郭可信 郭慕孙
章守华 葛庭燧 程继健

材料科学及测试技术丛书

出版说明

材料科学是现代科学技术的基础，是属于全局性的重要科学技术领域。由于许多材料的局限性会影响国民经济和国防现代化的进程，因此，为了提高我国材料科研工作的理论水平和材料生产的技术水平，为各个部门提供充足和优质的材料，我们出版了这套材料科学及测试技术丛书。本丛书分为材料科学与测试技术两部分。材料科学部分主要介绍金属、非金属材料及其他新型材料的研究成果、原理与理论；测试技术部分主要介绍上述材料的微观组织与结构及其观测技术，也介绍有关性能测试和过程机理。我们力求本丛书能反映我国材料科学研究工作者和材料工程技术人员的实践经验与成就，以及他们在发展材料科学与技术方面的见解，同时也反映国外的最新经验和成果。读者对象为从事材料科学的科研工作者和从事材料测试的工程技术人员以及高等院校的有关专业师生。

我们不仅期望本丛书能对我国的材料科学与技术的发展起到一定的推动作用，并且希望它对材料科学与技术领域内的科技工作者有所启发，从而进一步写出反映我国科学技术水平和发展方向的专著，以满足广大读者的需要。

材料科学及测试技术
丛书编辑委员会

科学出版社

材料科学及测试技术丛书

金属材料热力学	徐祖耀著	1.80 元
电子衍射图在晶体学中的应用	郭可信等编著	2.55 元
马氏体相变与马氏体	徐祖耀著	2.30 元
现代功能材料导论	温树林编著	2.00 元
钢中的非金属夹杂物	李代钟编著	1.95 元
高分辨电子显微学在固体科学中的应用		
	郭可信等主编	3.60 元
X射线衍射学进展	许顺生主编	2.70 元
金属的超塑性	何景素等编著	2.45 元
高空间分辨分析电子显微学	朱静等编著	3.10 元
陶瓷材料的力学性能	张清纯编著	3.00 元
金属高温疲劳	何晋瑞主编	2.80 元
材料结构科学 上册	温树林编著	3.70 元
材料结构科学 下册	温树林编著	9.30 元

前 言

高温测量,一般是指铈凝固点(630.74°C)以上的温度测量。因为在此温度以上只能采用热电偶高温计或辐射式高温计进行测量,而不能再用比较准确的铂电阻或其他温度计。这种划分虽无定论,但就温度计本身所适应的温度范围来看还是比较合理的。本书也以此为准,介绍热电偶与辐射式两类高温计,即所谓接触法与不接触法两大类测温仪表。本书的重点在于阐明高温测量的原理与特点,并对应用中的实际技术问题进行必要的讨论。由于高温计也适于中、低温测量,因此书中也涉及到一些中、低温测量的问题。由于篇幅所限,本书未介绍温度显示记录仪表。

热电偶用于高温测量的困难,一是要求热电极材料不但能承受所感测的温度,而且还能在高温下具有良好的理化性能;二是要求高温耐火材料不但能在所承受的高温下保持足够的结构强度,而且还特别要保持良好的电绝缘性能。就目前情况来看,测量高温的主要手段仍是采用热电偶,因此书中对测量高温的裸露热电偶、铠装热电偶、表面热电偶以及钢水测温热电偶等做了较多的叙述。在介绍气流温度检测时,不但对总温热电偶做了必要的理论与应用分析,而且对组装热电偶、动态测温法与音速热电偶也做了较多的阐述,因为这些方法在配用微型计算机时会显示出它们的特殊作用。

采用不接触测温法测温的主要困难是被测温物体的辐射率的自动校正问题。人们为寻求自动校正辐射率的方法已进行了大量的研究,但至今尚无一种公认的妥善的方法。虽然双

色、三色及多色光电高温计和部分或选择辐射红外辐射温度计对解决辐射率的自动校正问题有一些帮助，但仍受到使用条件的限制，而人们在设法创造近黑体测温条件方面所做的工作则算是较为成功的。这些在本书中都做了必要的分析和介绍。热工与能源管理对火焰热流与黑度的测量要求日益高涨，尽管这些测量属于动态测温范围，本书也做了相应的介绍。

高温测量目前正处在积极开发研究之中，本书对凡是不适于工程应用的或者尚未进入实用或试用阶段的技术均未涉及。

在本书编写过程中，得到不少同行专家、教授与工程技术人员的关心和支持，不少仪表厂热情提供了资料，清华大学的王家桢教授审阅了全稿并提出了不少宝贵意见，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者学识水平和经验的不足，书中难免有欠妥与错误之处，恳切希望读者批评指正。

目 录

前 言

第一篇 引 论

第一章 温度与温标	1
§ 1.1 温度	1
§ 1.2 温标	5
第二章 温度测量与测量误差	41
§ 2.1 温度测量仪表类别	41
§ 2.2 温度测量误差	44
§ 2.3 仪表的特性	55

第二篇 热电高温计

第三章 普通热电偶	60
§ 3.1 热电效应	60
§ 3.2 热电极材料与热电偶测温回路	73
§ 3.3 普通热电偶	83
§ 3.4 热电偶的静态特性与分度表	99
§ 3.5 热电偶测温应注意的技术问题	103
第四章 特殊形式的热电偶	117
§ 4.1 铠装热电偶	117
§ 4.2 表面测温热电偶	124
§ 4.3 熔融金属与熔渣测温热电偶	135
§ 4.4 热电高温计的测温误差	144

第三篇 测量气流温度的热电偶

第五章 流动气体温度测量特点	155
§ 5.1 热系统的状态与状态参数	155
§ 5.2 气体流动的基本规律	158
§ 5.3 气流温度及温度恢复系数	164
第六章 裸露热电偶	181
§ 6.1 裸露热电偶的换热特性	181
§ 6.2 裸露热电偶测量气流温度的误差	199
§ 6.3 瞬态温度测量	217
§ 6.4 组装热电偶	236
第七章 抽气热电偶	260
§ 7.1 抽气热电偶的一般结构	260
§ 7.2 遮热罩	263
§ 7.3 抽气热电偶的效率	269
§ 7.4 抽气组装热电偶	294
第八章 音速热电偶	299
§ 8.1 定熵流动的基本特性	300
§ 8.2 临界参数及计算	307
§ 8.3 音速热电偶	314

第四篇 动态测温与热流测量

第九章 动态测温热电偶	332
§ 9.1 动态测温原理	332
§ 9.2 动态热电偶	335
§ 9.3 动态测温法的数值计算	339
§ 9.4 动态测温误差	357
第十章 热流测量	362
§ 10.1 导热式热流计	362
§ 10.2 辐射式热流计	381

§ 10.3 热流计的检定.....	384
--------------------	-----

第五篇 不接触温度测量

第十一章 热辐射的基本概念.....	387
§ 11.1 辐射光谱.....	387
§ 11.2 辐射换热定律.....	390
§ 11.3 温度测量中的辐射换热问题.....	396
第十二章 全辐射高温计.....	405
§ 12.1 工作原理与结构.....	405
§ 12.2 辐射高温计的光学系统.....	412
§ 12.3 全辐射高温计的分度.....	417
§ 12.4 全辐射高温计的应用技术.....	421
§ 12.5 火焰辐射计——火焰黑度测量.....	433
第十三章 光学高温计.....	441
§ 13.1 工作原理.....	441
§ 13.2 光学高温计的分度.....	448
§ 13.3 黑体辐射源.....	458
§ 13.4 光学高温计的分度误差.....	469
§ 13.5 光学高温计的特点与应用技术.....	475
第十四章 光电高温计.....	481
§ 14.1 亮度光电高温计.....	481
§ 14.2 比色光电高温计.....	486
§ 14.3 标准光电高温计.....	495
§ 14.4 光纤光电高温计.....	499
第十五章 红外温度计.....	513
§ 15.1 概述.....	513
§ 15.2 红外光敏器件.....	529
§ 15.3 红外温度计.....	546
第十六章 扫描温度仪.....	556
§ 16.1 概述.....	556

§ 16.2	光机扫描温度计.....	564
§ 16.3	电子扫描温度计.....	586
§ 16.4	光纤扫描温度计.....	601
附录.....		605
参考文献.....		648

第一篇 引 论

第一章 温度与温标

§ 1.1 温 度

温度是表征物体冷热程度的物理量。根据分子运动理论，温度是分子平均动能的量度，即

$$BT = \frac{mv^2}{2} \quad (1.1)$$

式中：B——比例常数；

$\frac{mv^2}{2}$ ——分子的平均动能；

T——热力学温度。

分子平均动能无论因何缘故增大时，物体的温度升高，相反则降低。对于气体状物体，根据力学理论，运动分子的平均能量E与气体温度的关系可以表示为

$$E = \frac{2}{3} kT \quad (1.2)$$

式中：k——玻耳兹曼常数，

$$k = (1.38044 \pm 0.00007) \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$= (8.6167 \pm 0.0004) \times 10^{-5} \text{ eV/K}$$

分子间运动能量的分布可表示为

$$\frac{\Delta N}{N} = 2 \sqrt{\frac{E}{\pi(kT)^3}} \cdot \Delta E \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (1.3)$$

式中： N ——单位体积内的分子总数；

E ——决定于分子运动速度的能量；

ΔN ——在 $E + \Delta E$ 能量间隔内的分子数。

气体、液体与固体分子的旋进运动与振动运动所具有的动能和位能都遵守这一定理，所以物体分子的动能与位能的平均值与温度的高低密切相关。虽然在某一温度下个别分子的能量与分子的平均能量有所不同，但是温度是大多数分子能量的统计平均值。

被激励的分子或原子的浓度与气体温度的关系决定于比值：

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{m_1}{m_2} \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon}{kT}\right) \quad (1.4)$$

式中： N_1 ——被激励分子或原子的浓度；

N_2 ——未激励分子或原子的浓度；

m_1 ——被激励分子的统计质量；

m_2 ——未激励分子的统计质量；

ε ——激励能或离子化能。

强烈的化学反应或原子与核反应，伴随着快速释放的巨大能量，且在运动分子或原子之间能量分布多样化，此时再采用式(1.1)，(1.2)与式(1.3)来表示已没有意义。多样化的能量分布称为不均重，在不均重的物体中不同运动形态的能量平均值等于物体的温度值。但在反映末期的较长时间内，物体也会进入热力学平衡，符合按自由度平衡分配能量的原则，所以分子和原子运动现象与热力学温度也是密切相关的，上述分析方法仍适用。

在研究高温火焰时，采用“电子温度”表示火焰中的电流，这种能量流一般用电子伏特(eV)表示。以 $kT_e = 1\text{eV}$ ，则得电子温度

$$T_e = \frac{1\text{eV}}{k} = \frac{1\text{eV}}{8.6167 \times 10^{-5}\text{eV/K}} = 11605\text{K}$$

即 1 电子温度等于热力学温度 11 605K。

能量多样化分布是由于原子过程的不同。原子处于某一状态视其所接受的各种可能过程而定，如受激或复合辐射、光致激发或电离、电子碰撞激发或电离、重粒子碰撞激发等过程。

因为温度所反映的是动能，亦即物体的质点移动的速度，所以在自然界必然存在温度的上限。实际上理论已证明，物体质点运动速度不可能超过光速。计算表明自然界的上限温度约为 10^{12}K ，即任何温度过程都在 $0—10^{12}\text{K}$ 温度范围内。

很多物理量的测定是由测量值与实际值之比确定的，即所谓单位测量，而温度测量则不是这样的。不同温度的物体有不同的能量组成及不同的物理性质，所以温度不能采用单位测量，1 度只不过是表示温度标尺上的位置而已，因为它是通过其他方法定义的，而与所测物体的能量及物理特性并无直接关系。

温度作为一个状态参数，它的变化必然引起气体压力及容积等状态参数的变化。温度是能量跃迁的反应，必然导致声、光、电及磁等特性变化。正是这些变化反映出了温度的不同，我们根据这些变化做成了各种各样的温度计。

热力学第零定律告诉我们，在两个热力学系统中，如果每一个都与第三个系统处于热平衡状态，则它们彼此之间都处于热平衡状态。就是说一切处于热平衡的系统都具有相同的温度。用手抚摸物体会感到有冷有热，用眼识别火候会感到暗淡微红的温度较低，光亮耀眼的温度高。这些接触与不接触的比较冷热程度的方法，至今仍有效地应用着。无论是用直接或间接比较法测量温度的温度计都是以能(热)量平衡的原

理为基础设计制作的。

原来,任何宏观系统总有倾向于平衡的趋势,系统平衡的程度决定于构成此系统中各子系统的总熵^[1]。子系统之间的相互作用,必将引起表征各系统宏观量的变化。例如在温度测量中温度计与被测物体相互接触,在周围环境条件不变情况下,每一物体平均能量的增量 $d\bar{\epsilon}$ 与该物体熵的增量 dS 成正比,即

$$d\bar{\epsilon} = T dS \quad (1.5)$$

熵是表示平衡的状态参数,在系统平衡过程中,熵的变化只决定于初始状态及最终状态,而与过程进行的方式无关。随着能量由热物体向冷物体的转移逐渐趋近平衡,熵亦逐渐增加,到达平衡时熵具有最大值。这时,温度可定义为

$$T = \frac{d\bar{\epsilon}}{dS} \quad (1.6)$$

只要两物体的温度 T_A 及 T_B 不相等,系统就不可能平衡,在 $T_A > T_B$ 的情况下,物体 A 就把能量传给 B ,相反就由物体 B 传给物体 A ,这种传递是靠分子间微观力的作用进行的,用这种方法传递的能量通常称为“热量”(dQ),因此温度也可定义为

$$T = \frac{dQ}{dS} \text{ 或 } dQ = T dS \quad (1.7)$$

显然,不应该把热量视为能量的一种形态,而只是传递能量的一种微观方式。假定传递的热量极小,则两个物体的温度可以认为保持不变,对物体 A 而言,热的传导引起熵的变化为

$$S_{2A} - S_{1A} = - \frac{q}{T_A}$$

对物体 B 而言,熵的变化为

$$S_{2B} - S_{1B} = \frac{q}{T_B}$$

则系统熵的总变化为上述两个变化之和

$$\begin{aligned} S_{2A} - S_{1A} + S_{2B} - S_{1B} &= \frac{q}{T_B} - \frac{q}{T_A} \\ &= \frac{q(T_A - T_B)}{T_A T_B} \end{aligned} \quad (1.8)$$

前已假定 $T_A > T_B$ ，则上式右端大于零，所以左端也必然大于零，即 $(S_{2A} + S_{2B}) - (S_{1A} + S_{1B}) > 0$ 。换言之，在隔离系统中，熵是随着热量传递而增加的，当系统处于不平衡的热系统中，必然存在热量传递，这个系统的温度是不确定的。当系统处于平衡时，系统中物体之间的温度相等，这就是温度测量的基础，即借助于一种具有经标定的温度标尺的量具与被测物体相比较而测定温度，这种具有温度标尺的量具就是各式各样的温度计，而温度计上的标尺则是随着生产及科学技术的发展逐步建立和完善起来的。

§1.2 温 标

1.2.1 经验温标

以数表示温度的标尺简称温标。它应具有通用性与准确再现性，使在不同地区或不同场合下测量相同的温度具有同等的量值。这就要求用作测量的物质具有某种反映温度变化的特殊性能，并且便于对这种变化赋予温度的量值——温度分度。水银或酒精有随温度升降而涨缩的线性关系，利用它可做成玻璃管液柱式温度计，并选取纯水在一个大气压下结冰的温度(冰点)及水在沸腾时的温度(沸点)为两个定义温度的固定点，给这两个固定点以一定的数值，由此提出了不同的经验温标。

早在 1552 年底，伽利略在一端带橡皮球的玻璃管中充以