

温度计量测试丛书(十二)

特殊条件下的 温度测量

TE SHU TIAO JIAN XIA DE WEN DU CE LIANG

张立儒 等 编著
秦永烈 审

中国计量出版社

温度计量测试丛书 (十二)

特殊条件下的 温度测量

张立儒等 编著 秦永烈 审

中国计量出版社

内 容 提 要

本书主要阐述特殊条件下的温度测量方法及其仪表。所谓特殊条件下的温度系指高温强浸蚀性介质的温度、火焰温度、等离子体温度、气流的温度、强电磁场下的温度、高温盐浴炉的温度以及核辐照环境下的温度等。

本书可供温度计量测试、材料、热物理、冶金、化工及医疗等部门的科技人员参考，也可作为大专院校有关专业选修课的参考书。

温度计量测试丛书 (十二)

特殊条件下的温度测量

张立儒等 编著 潘永烈 审

责任编辑 袁德昕

中国计量出版社出版

北京和平门内大街112号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本 787×1092/32

印张 9 字数 200 千字

1987年9月第1版

1987年9月第1次印刷

印数 1—9000

定价 2.15 元

统一书号 15210·764

ISBN 7-5026-0011-6/TB·11

温度计量测试丛书编委会

主任委员 王良楣

副主任委员 凌善康

委员 (以姓氏笔划为序)

石质彦 师克宽 朱国柱

陈锡光 陈守仁 汪时雍

张立儒 周本濂 赵 琪

崔均哲 秦永烈 奚绪昕

戴乐山

前 言

本丛书是根据中国计量出版社关于按学科分类组编丛书的总体规划和统一安排，在中国计量测试学会的热情关怀和实际支持下，由温度计量测试丛书编辑委员会组织编写的。

党的“十二大”确定了到本世纪末力争使我国工农业总产值翻两番的宏伟目标，并决定把农业、能源、交通、教育、科学作为经济发展的战略重点。计量是现代化建设中一项必不可少的技术基础，在计量测试科学领域中，温度的计量与测试又是一个很重要的方面。温度是一个基本的物理量，它与其他许多物理参数有着密切的关系，因而在工农业生产、科学研究和日常生活中，都离不开温度的准确测量和精密控制。广泛传播温度及温度测量仪表的基本知识，介绍国内外测温技术的先进经验，交流各项成果，培养技术人才，促进各项工作，为实现社会主义现代化创造条件，这就是组编本丛书的宗旨。

应该看到，目前，在基层企业中，受过计量测试训练的技术人员严重不足，很多职工渴望增长专业知识和提高操作技能，尤其是近年来，大批青年技术人员参加工作，这是发展计量测试科学的一支新生力量，但是他们深感知识不足，迫切需要系统地学习一些计量基础知识，熟悉各类仪器仪表的原理、特性、检定和使用方法，以便更快地掌握专业技术，提高生产效率。这套丛书主要是针对这部分人员编写的，当然也可作为温度计量短训班的教材及有关学校师生工程技术人员和科研工作者的参考书。

本丛书计划分成 16 分册，每一分册独立地、深入浅出地加以阐述，将陆续与读者见面。本丛书在组编过程中得到广大计量工作者和工矿企业技术人员的关心与支持，在此一并致谢。丛书编委会热忱地期望我国广大科学工作者共同促进本丛书的编辑出版工作，为我国早日实现社会主义现代化贡献力量。

限于我们的经验和水平，本丛书可能存在不少缺点和错误，恳请广大读者批评指正。

温度计量测试丛书编辑委员会

序 言

本书主要讲述特殊条件下的温度测量方法及其仪表。特殊条件下的温度测量（今后简称特殊测温）是指那些测量条件相当恶劣，一般不能直接选用定型仪表来实现的温度测量。本书在这里使用“特殊”一词纯系为了区别于一般测温，别无其它目的。

譬如，强电磁场下物体的温度测量，就不宜使用常规的热电偶或电阻温度计，因为它们都具有金属部件，而处于强电磁场下的金属与电磁场耦合，不仅会引起很大的电磁干扰，而且金属内感生的电流还会造成很大的欧姆热误差。从另一方面来看，上述感生电流所形成的新磁场会造成原电磁场的畸变。所以说，强电磁场下的温度测量属特殊测温范畴。另外，强浸蚀性介质的温度测量也属特殊测温之列。这是因为在测量过程中，这类介质会对传感器产生严重的物理或化学损伤，其测量条件是相当苛刻的。凡此种种，在范围广大的温度测量领域中，属“特殊”者实在太多，限于作者的学识和本书的篇幅，只能把生产和科学实验中遇到较多的特殊测温问题归纳为几大类加以介绍，在每一类中除讲述一些共性问题外，还尽可能地辅以具体应用实例。

全书共分六章，内容有：高温强浸蚀性介质的温度测量，火焰温度及等离子体温度的测量，气流的温度测量，强电磁场下的温度测量和物体带电部位的温度测量，核辐照环境下的温度测量及物体的温度分布测量等。其中，第一章第六节由黄强华工程师编写，第二章第六至第九节由韦福水讲

师编写，第五章由冯亚福工程师编写，第六章第三节由杨应槐工程师编写。

需要说明的是：物体表面温度测量是在生产和科学实验中遇到较多的一类特殊测温问题，在本丛书中另有分册（第11分册）介绍，故未编入本书。随着低温应用技术的发展，有关低温测量问题日益受到人们的重视，此部分内容在本丛书第13分册中有所介绍。关于高温、极大极小目标、运动目标、远方目标等的温度测量原理及其仪表，读者可参见本书第7分册。

特殊测温涉及的基础知识很多，作者写此书时认为读者已具备了中等或中等以上的物理、数学、电子学的知识，掌握了常规的测温方法及仪表。尽管如此，为了便于广大读者阅读，本书还是侧重于物理概念的阐述，尽量避免繁琐的数学推导过程，并且在第一章开头，首先着重介绍了光学测温法和声学测温法的原理及测量方案，以及热电偶测温法的特殊应用，因而作者相信，就是对于基础较差的读者，也能从这些详述的材料中有所裨益。

本书在编写过程中得到了中国计量测试学会温度专业委员会同事们的鼓励和支持，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，加之特殊测温涉及的基础知识和不同专业内容较多，书中如有不妥和错误之处，望读者批评指正。

张立儒 1986.9

目 录

第一章 高温强浸蚀性介质的温度测量	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 光学测温法	(2)
一、基本知识	(3)
二、测温方案	(8)
第三节 热电偶测温法	(22)
第四节 声学测温法	(28)
一、基本知识	(29)
二、用超声波温度计测量高温浸蚀性气体的温度	(36)
三、用细线超声波温度计测量高温浸蚀性介质的温度	(38)
第五节 应用举例之一——转炉钢水温度测量	(43)
一、概述	(43)
二、钢水温度点测	(44)
三、钢水温度连测	(52)
第六节 应用举例之二——高温盐浴炉的温度 测量	(59)
一、概述	(59)
二、用铂铑 10-铂热电偶测量盐浴炉温度	(60)
三、用辐射高温计测量盐浴炉温度	(63)
四、采用插入式光电高温计测量盐浴炉温度	(66)
参考文献	(71)
第二章 火焰温度及等离子体温度的测量	(72)
第一节 概述	(72)
第二节 一般光学测温法——发光火焰的温度测量	(74)
一、测温原理	(75)
二、火焰辐射率的测试方法	(76)

三、测温方案	(78)
第三节 谱线反转法——透明火焰的温度测量	(81)
一、基本知识	(81)
二、测温原理	(90)
三、测温方案	(93)
四、影响测温准确度的因素	(95)
第四节 亮度均匀法	(96)
第五节 辐射吸收法	(98)
一、测温原理	(98)
二、测温方案	(100)
三、应用特点	(103)
第六节 谱线绝对强度法	(103)
一、测温原理	(104)
二、测温方案	(108)
三、影响测量准确度的因素	(110)
四、测定氦等离子焰流的温度分布举例	(111)
第七节 谱线相对强度法	(113)
一、测温原理	(113)
二、测温方案	(118)
第八节 谱线加宽法	(120)
一、根据谱线的多普勒加宽效应测定等离子体的 温度	(121)
二、根据氢的 H_β 线斯塔克加宽效应测定等离子 体的温度	(122)
第九节 激光干涉法	(124)
一、测温原理	(124)
二、测温方案	(126)
三、干涉条纹的解调	(129)
参考文献	(130)
第三章 气流温度测量	(132)
第一节 概述	(132)

第二节 低速气流的温度测量	(134)
一、提高测量准确度的措施	(134)
二、用抽气式热电偶测量低速气流温度	(142)
三、用组合热电偶测量低速气流温度	(146)
第三节 高速气流的温度测量	(148)
一、测量中存在的主要问题	(148)
二、气流的静温、动温、总温及有效温度的概念	(149)
三、复温系数及速度误差	(151)
四、用总温热电偶测量高速气流温度	(155)
五、复温系数的测试方法	(157)
第四节 高温气流的温度测量——热电偶动态 测温法	(159)
一、动态测温法原理	(160)
二、动态法测温误差分析	(162)
三、热电偶动态测温仪简介	(164)
参考文献	(166)
第四章 强电磁场下的温度测量及物体带电部位的 温度测量	(168)
第一节 概述	(168)
第二节 导体、半导体和介质材料在电磁场中 产生的各种效应	(170)
一、导体中的感应电动势	(170)
二、载流导体中的集肤效应以及处于交变磁场中导 体的涡流效应和欧姆热效应	(171)
三、交变电场中介质和半导体的热效应	(173)
四、高频电磁场中的导体、介质和半导体的热效应	(175)
第三节 用热电偶、热电阻测量高频电磁场下 的温度	(176)
第四节 新型无扰测温传感器	(179)
一、热敏电阻-高阻导线温度传感器	(179)
二、液晶-光导纤维温度传感器	(182)

三、荧光-光导纤维温度传感器	(189)
四、砷化镓-光导纤维温度传感器	(194)
五、单模光导纤维温度传感器	(195)
第五节 无扰温度传感器应用举例	(198)
第六节 工业电气设备带电部位的温度测量	(202)
参考文献	(205)
第五章 核辐照环境下的温度测量	(207)
第一节 概述	(207)
第二节 辐照损伤及核辐照环境下影响测温的主要因素	(208)
一、辐照损伤	(208)
二、嬗变对测温的影响	(208)
三、晶体缺陷对测温的影响	(210)
四、 γ 发热对测温的影响	(212)
第三节 测温元件的选择	(212)
一、测温元件的选取原则	(212)
二、工业用温度计在核辐照环境下测温存在的问题	(213)
三、金属套管热电偶在核环境中的使用	(215)
第四节 测量电缆和测量仪器的选用	(218)
一、测量电缆的选用	(218)
二、测量仪器的选用	(220)
第五节 应用举例——核反应堆的温度测量	(220)
一、核反应堆	(220)
二、反应堆温度测量的重要意义	(223)
三、反应堆对温度测量的特殊要求	(223)
四、反应堆中测温的主要项目及内容	(224)
参考文献	(232)
第六章 物体的温度分布测量	(233)
第一节 概述	(233)
第二节 扫描式光电高温计	(236)
一、扫描装置的工作原理及其结构	(236)

二、扫描式光电高温计应用举例	(243)
第三节 热象仪	(245)
一、热象仪的特点	(245)
二、热象仪及其组成	(247)
三、热象仪的主要技术参数及其检验方法	(260)
四、热象仪测量结果的读取方法	(265)
五、影响热象仪测量精度的因素	(265)
六、热象仪应用举例	(269)
参考文献	(274)

第一章 高温强浸蚀性介质的温度测量

第一节 概 述

高温强浸蚀性介质的温度测量在工程技术领域中并不少见，象各类高温燃煤、燃油系统以及各种高温窑炉（包括玻璃窑、陶瓷材料烧结窑和珍珠岩窑等），它们的温度测量除遇到高温外，还会遇到诸如氧、硫、焦油等对感温元件的腐蚀作用。再如，机械加工行业中热处理用的高温盐浴炉的温度测量，遇到的是高温和氯离子的强腐蚀作用。重工业的基础，冶炼行业中的各种高温冶炼炉，特别是氧气顶吹转炉的温度测量条件更加苛刻，炉内温度高达 1700°C ，钢水和钢渣具有极强的冲刷力和腐蚀性。在化工、石油、轻纺等行业中进行温度测量时，则常会遇到各种酸、碱的腐蚀。总之，各行各业都会或多或少地遇到这类测量任务，但遗憾的是，至今在许多情况下这些测温仍然是一个难于解决但又急待解决的技术问题。

在高温强浸蚀性介质中测量温度，感温元件除要经受高温的物理损伤之外，还要遭受化学损伤。所谓物理损伤是指用以制作感温元件的材料在高温下它的许多物理性质要发生变化，譬如变软、变形、变脆、内应力增大以及用来度量温度的热电特性、热电阻特性等变得不再象温度低时那样稳定。所谓化学损伤，主要是指各种氧化、还原作用引起的元件材料的损坏和变质，以及某些化学物质对元件引起的腐蚀作用。

在高温强浸蚀性介质中测量温度，为了保护感温元件免

遭物理、化学损伤，通常在感温元件外都加有足够厚的能够耐一定高温和腐蚀的保护套管，因此，研究高质量的保护套管就成为解决好这一测量任务的重要课题之一。但是至今在这一领域中还找不到理想的保护套管材料，以致感温元件使用寿命短，常需更换，既浪费生产时间又耗费资金，特别是由于测不到连续的、稳定的温度值，这就必然会影响到产品的质量。还有，为了抵抗高温浸蚀，保护套管不得不做得很厚，而且多用陶瓷材料来制作，由于陶瓷材料传热性差，再加上壁厚，使得感温元件不能及时反应被测的真实温度，如果用这样的信号不加处理的去控制生产，必然会产生错误的结果。以上所说的都是采用接触测温法所遇到的问题，对非接触测温法在这一领域中的应用，人们抱有极大的期望，但同样也遇到了一些难于克服的困难。

例如用辐射法测量温度，只能测得物体的表面温度，而且它的测量结果与被测物体的表面辐射率有关，还要受仪表与被测物体之间存在的诸如杂散光、灰尘、烟雾、水蒸气等影响；用一般超声法测量温度时，其测量结果与被测物体的性质及组成或状况等有关。总之，测温技术已经影响到生产的进一步发展，测量工作者的任务是改进、提高现有的测温手段和寻求新的测温原理和方法。

本章除介绍常规应用的光学测温法和热电偶测温法在这一领域中的特殊应用外，还将着重介绍近十几年发展起来的、并在某些场合得到较好应用效果的超声细线测温法，以及窥测管-辐射测温法。本章最后两节为应用举例，在此举的是比较典型的高温盐浴炉测温 and 转炉钢水测温。

第二节 光学测温法

测量高温强浸蚀性介质的温度最好用非接触测温法，例

如用光学测温法、声学测温法、或激光测温法。这样可把感温元件与被测介质隔开一定距离免遭其侵害，因此，发展非接触测温法在这一特殊领域中的应用是极其重要的。

非接触测温法中应用最多的要算光学测温法，常用的测温仪器有光学高温计、亮度式光电高温计、辐射式高温计以及比色式高温计。关于光学测温法及光学式测温仪器另有专册介绍，本节只讲述光学测温在高温强浸蚀性介质中的应用。鉴于光学测温法不仅在本章中用到，而且在以后几章也常用到，为了便于读者阅读本书，因此在讲述光学测温法之前，先对光学测温的基础知识作一简述。

一、基 本 知 识

(一) 物理基础

我们知道这样一个自然现象，物体在绝对零度以上都时时刻刻向外发射热辐射能，反之，任何一个物体也都有吸收其它物体投射给他的热辐射能的本领。譬如，我们走近炉子时，立刻就会感受到炉子发射出的热辐射能，其实炉子在向外发射热辐射能的同时也在吸收其周围物体向它投射来的热辐射能。可以想象到，如果在火炉旁边放上一个温度更高的物体，那么，火炉壁会因为吸收了这个物体投射来的热辐射能而变得温度更高。热辐射能仅是物体向外发射的总的辐射能的一部分，物体受热后，其体内电子受到激励而产生能级跃迁，伴随而来的是以电磁波动的形式向外释放能量，上述释放出的能量包括 γ 射线、伦琴射线、紫外线、可见光、红外线和各种无线电波，其中只有波长从 $0.4\mu\text{m}$ 到 $0.8\mu\text{m}$ 左右的可见光和波长从 $0.8\mu\text{m}$ 到 $1000\mu\text{m}$ 左右的红外线遇到物体后能被物体吸收，并转化成热能，使该物体温度升高，所以我们又称 $0.4\mu\text{m}$ 到 $1000\mu\text{m}$ 的射线为热射线，并

把这些热射线的传播过程称为热辐射。由于热辐射能的大小与温度有关，因此只要我们能够测得物体发出的热辐射能，就可以得知该物体的温度。

热射线投落到物体上后，总是部分被反射，部分被吸收，甚至还可能有部分穿过去；被反射的百分数称为反射率，被吸收的百分数称为吸收率，被透过的百分数称为透过率，并有

$$A + \rho + \tau = 1 \quad (1-1)$$

式中， A ——物体的吸收率；

ρ ——物体的反射率；

τ ——物体的透过率。

A 、 ρ 和 τ 与物体种类、性质、物态、表面状况和温度等因素有关，当然也和射线的波长及方向有关，但三者之和为1。

对绝大多数工程材料，如金属、耐火材料和木料等都不让热射线穿透，因此对多数工程材料而言， $\tau = 0$ ，并有

$$A + \rho = 1 \quad (1-2)$$

或 $A = 1 - \rho \quad (1-3)$

式(1-3)表明，物体的吸收率仅仅取决于反射率。因此，物体表面状况对吸收率的影响极大，一般讲，物体表面越粗糙、越黑，其吸收率越大。根据吸收率不同，物体可分为绝对黑体、灰体、选择体、镜体和透明体。绝对黑体的吸收率等于1，它能吸收投射给它的全部辐射能，灰体和选择体的吸收率都小于1，但是灰体的吸收率与波长无关，而选择体的吸收率是波长的函数。镜体和透明体的吸收率都等于零，镜体能百分之百的反射投射给它的辐射能，而透明体能百分之百的透过投射给它的辐射能。

如果某物体与其周围物体之间仅以辐射换热方式交换能