

# 量热技术 和热物性测定

30509302

陈则韶  
葛新石 编著  
顾毓沁

中国科学技术大学出版社

30509302

TK11  
12

国家教委工程热物理专业教材委员会推荐教材

# 量热技术和热物性测定

陈则韶 葛新石 顾毓沁 编著

HK43/01



C0457111

中国科学技术大学出版社

1990·合肥

## 内 容 简 介

本书系国家教委工程热物理专业教材委员会推荐教材,是编著者在总结国内外先进经验和自身科研成果的基础上写成的。内容分三部分:量热技术部分着重阐明一般量热原理及各类量热计和热流计的工作原理、特点、标定方法和应用;热物性测定部分系统地讨论了一些重要热物性的各种测定方法和推算方法;附录附表部分为热计算和热设计收集了工程中许多重要材料 and 物质的大量热物性数据。

本书兼有教科书和工具书的特点,可作为高等院校工程热物理、热工、动力、化工、建筑、制冷、食品等专业的本科生和研究生的教材,也可作为上述各专业的科技工程人员的参考书。

## 量热技术和热物性测定

陈则韶 葛新石 顾毓沁 编 著

责任编辑:胡升华 封面设计:鲁开疆

\*

中国科学技术大学出版社出版

(安徽省合肥市金寨路96号 邮政编码:230026)

安徽省六安新华印刷厂排版

安徽省金寨县印刷厂印刷

安徽省新华书店发行

\*

开本:787×1092/16 印张:14.5 字数:354千

1990年10月第1版 1990年10月第1次印刷

印数:1—3600册

ISBN7-312-00198-X/O·75 定价:2.90元

## 国家教委工程热物理专业教材委员会

**主任委员：**吕灿仁（天津大学）

**副主任委员：**杨思文（东南大学）

朱文浩（清华大学）

**委 员：**曾丹苓（重庆大学）

钱壬璋（华中理工大学）

蔡仪汉（天津大学）

葛新石（中国科学技术大学）

傅维标（清华大学）

# 序

物质存在的物理形态千姿百态，就其通性常被区分为固、液、气三“态”，本世纪又发现了第四态：“等离子态”。物质的化学结构可以千差万别，特别是现代科学技术的发展使新材料不断涌现。物质永远处于不同层次的运动状态，可有力学的（有序整体运动）、热学的（无序内部运动）、电学的、光学的、声学的，原子核的裂变或者聚变、等等，相应地蕴藏有机械能、热能、化学能、电能、光能、声能、原子能等等。认识自然，就要对自然界的物质性质和自然变化过程有科学的理解。

热物性学所研究的是物质的热物理性质，或者更广义的是物质的热学性质，后者同时包括热物理和热化学性质。这些性质，又可被分为平衡性质和迁移性质，都是物质的固有属性。单值地取决于物质的组分、结构、温度、压力、密度等热状态参量。物质的热状态发生变化时，将对外输出（或吸入）热量或者其他形式的能量。改造自然的新兴技术涉及各种具体的热过程及其控制和所需功能材料的优选，这要用工作介质和材料的热物性进行设计和评价。因此，物质热物性数据的积累对能源开发和节约利用、材料设计和工艺改进、传统工业的更新改造、食物的储存和加工、环境保护、航天技术和生物工程的发展、信息传递以及医学和人体科学的研究都有重要意义。

本书是高校《工程热物理》专业教材编审委员会根据教学需要所规划的教学用书，题材涉及物理显热和以燃烧热为例的化学反应热以及以融解热为例的相变潜热的量热技术，涉及典型热物性如比热、导热系数、导温系数以及热辐射性质的测定方法，还编集了测温的基础知识，全书取名为《量热技术和热物性测定》。作者长期从事教学和热物性测定的研究工作，积累有丰富的心得体会。所以，篇幅虽小，内容充实，富于启发，并且收录了众多的热物性数据资料，可供科技人员工作参考。为此，在全书即将付印之际，爰书数语，乐于为创作简单的介绍。

王补宣

1990年5月于北京清华大学

# 前 言

本书系工程热物理专业教材委员会推荐教材,并由该委员会委托东南大学孙仁洽教授审订。

这本新教材的诞生蕴藏了近10年之久。由于热物理是对热现象和热过程进行分析、研究、计算和设计的重要基本参数,量热又是热科学和热工实验及热分析的基本内容之一,因此,量热技术和热物性测定在工程热物理学科中占有极重要的地位。在这方面对学生进行培养和训练,能够提高他们从事科学研究和参加工程实践的本领,但这方面教材甚缺。1982年,中国科学技术大学编写了“热物性测量”试用教材,供本科生和研究生之用。1985年本书被列入工程热物理专业教材规划,此后编著者之一(陈则韶)曾在日本作访问研究,并注意收集了国外有关资料和最新成果。本教材是集国内研究成果及编著者自身的经验写成的。

全书共八章,分三部分。第一部分为量热技术,由第二、第三章构成。叙述了热量、热流的一般测量原理和方法,主要介绍了各种量热计的测量原理、结构要点、标定方法和误差分析;同时也对作为量热和热物性测定基础的温度测量作了较全面而扼要的叙述。第二部分为热物性测定,共有五章。自第四章至第八章依次对比热和融解热、燃烧和反应热、导热系数、热扩散率以及热辐射性质等热物性的各种测试方法和测定技术进行系统介绍和分析比较。第三部分为热物性值表,收集了各种材料的大量的热物性数据,以便于查阅。

本书着重于培养学生分析问题和解决问题的能力,因此,在编写方法上注意了研究全过程的逻辑思维训练,即每节的内容或长或短都包括有:研究任务的提出、物理模型的建立、测试计算式的推导、实验方案和装置的设计及误差分析等环节。每章注意逻辑思维的发展与联系。并注意了点面结合、难易结合。

本书编著者的分工如下:顾毓沁——第六、七章(陈则韶作了补充);葛新石——第八章和附表27;陈则韶——第一—第五章和附录与其余附表。全书由陈则韶整理并定稿。

由于编著者的水平有限加之本领域技术日新月异进步,书中的缺点错误及不足之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编著者

1990年3月

# 目 次

|                                   |      |
|-----------------------------------|------|
| 序.....                            | 王补宣  |
| 前言.....                           | (V)  |
| 第一章 绪论.....                       | (1)  |
| 1.1 量热技术和热物性测定的研究范畴.....          | (1)  |
| 1.2 量热技术和热物性测定在生产和科学研究中的重要性.....  | (1)  |
| 1.3 量热技术和热物性测定的简史和发展现状.....       | (2)  |
| 1.4 量热技术和热物性测定作为专业课程的特点和学习方法..... | (3)  |
| 参考文献.....                         | (4)  |
| 第二章 温度测量.....                     | (5)  |
| 2.1 温度测量概述.....                   | (5)  |
| 2.1.1 温标.....                     | (5)  |
| 2.1.2 温度计测头的应有特点.....             | (6)  |
| 2.1.3 温度计分类.....                  | (6)  |
| 2.2 玻璃温度计.....                    | (7)  |
| 2.3 热电偶.....                      | (7)  |
| 2.3.1 热电偶的电路计算.....               | (7)  |
| 2.3.2 热电偶的制作.....                 | (10) |
| 2.3.3 热电偶的分度.....                 | (11) |
| 2.4 电阻温度计.....                    | (11) |
| 2.4.1 铂电阻温度计特性.....               | (11) |
| 2.4.2 铜电阻温度计.....                 | (12) |
| 2.4.3 半导体热敏电阻.....                | (12) |
| 2.4.4 热电阻温度计的误差.....              | (12) |
| 2.5 非接触式温度计.....                  | (13) |
| 2.5.1 高温计的分度.....                 | (13) |
| 2.5.2 光学高温温度计.....                | (13) |
| 2.5.3 双色(比色)高温计.....              | (13) |
| 2.5.4 全辐射高温计.....                 | (14) |
| 2.6 温度测量中的几个问题.....               | (14) |
| 2.6.1 管道内流体平均温度的测量.....           | (14) |
| 2.6.2 测温元件的辐射损失.....              | (15) |
| 2.6.3 固体壁表面温度的测量.....             | (16) |
| 2.6.4 动态温度的测量.....                | (16) |
| 参考文献.....                         | (17) |
| 第三章 量热技术与卡计.....                  | (18) |

|                       |      |
|-----------------------|------|
| 3.1 概述                | (18) |
| 3.1.1 热量单位和能量级        | (18) |
| 3.1.2 热量测量的一般原理       | (9)  |
| 3.1.3 标准物质            | (20) |
| 3.1.4 卡计选型和设计要点       | (23) |
| 3.2 热平衡型卡计            | (21) |
| 3.2.1 等温型卡计(冰卡计)      | (21) |
| 3.2.2 等温壁型卡计(液液卡计)    | (22) |
| 3.2.3 铜卡计             | (23) |
| 3.2.4 绝热型卡计           | (23) |
| 3.3 传导型热流计            | (25) |
| 3.3.1 箱型热流计           | (25) |
| 3.3.2 湿卷式热流卡计         | (29) |
| 3.4 辐射型热流计            | (33) |
| 3.4.1 稳态辐射热流计         | (33) |
| 3.4.2 瞬态辐射热流计         | (36) |
| 3.4.3 辐射热流计的标定        | (36) |
| 3.5 热相似型卡计            | (37) |
| 参考文献                  | (37) |
| 第四章 比热和融解热的测定         | (39) |
| 4.1 概述                | (39) |
| 4.1.1 真比热、平均比热        | (39) |
| 4.1.2 比热的理论计算         | (40) |
| 4.1.3 融解热             | (42) |
| 4.1.4 比热测定法的分类        | (42) |
| 4.2 冷却法(投下法)          | (43) |
| 4.3 绝热卡计加热法           | (44) |
| 4.3.1 定热量加热法(Nernst法) | (44) |
| 4.3.2 连续加热准稳态法        | (45) |
| 4.4 定常流量加热法           | (48) |
| 4.5 热相似连续加热法          | (49) |
| 4.6 热损相消加热法           | (50) |
| 4.7 其他方法              | (51) |
| 4.7.1 容积变化法测液体比热      | (51) |
| 4.7.2 脉冲加热法           | (52) |
| 4.8 融解潜热的测定           | (52) |
| 4.8.1 基本方程            | (52) |
| 4.8.2 投下冷却法           | (53) |
| 4.8.3 连续加热绝热法         | (53) |
| 4.8.4 差示温度分析法(DTA)    | (55) |
| 4.8.5 示差扫描量热计(DSC)    | (60) |
| 参考文献                  | (61) |
| 第五章 燃烧热和其他反应热的测定      | (63) |

|                       |      |
|-----------------------|------|
| <b>5.1 概述</b>         | (63) |
| 5.1.1 反应热             | (63) |
| 5.1.2 生成热             | (63) |
| 5.1.3 燃烧热             | (63) |
| 5.1.4 反应热的计算          | (64) |
| 5.1.5 燃烧热的近似计算        | (64) |
| 5.1.6 反应热的种类和特征       | (65) |
| <b>5.2 燃烧热的测定</b>     | (65) |
| 5.2.1 燃烧卡计            | (65) |
| 5.2.2 氧弹卡计            | (66) |
| 5.2.3 量水反应热卡计         | (66) |
| <b>5.3 其他反应热测定简介</b>  | (66) |
| <b>参考文献</b>           | (67) |
| <b>第六章 导热系数的测定</b>    | (69) |
| <b>6.1 概述</b>         | (69) |
| 6.1.1 付立叶导热定律、导热系数    | (69) |
| 6.1.2 测量导热系数的基本原理     | (69) |
| 6.1.3 测量方法的分类         | (70) |
| 6.1.4 标准参考材料          | (72) |
| <b>6.2 稳态法</b>        | (72) |
| 6.2.1 纵向导流法           | (72) |
| 6.2.2 径向热流法           | (74) |
| 6.2.3 多层同心圆柱法         | (75) |
| 6.2.4 直接通电法           | (76) |
| 6.2.5 热比较器法           | (79) |
| <b>6.3 非稳态法</b>       | (79) |
| 6.3.1 瞬态热流法           | (79) |
| 6.3.2 热探针法            | (80) |
| <b>6.4 导热系数的推算</b>    | (81) |
| 6.4.1 气体导热系数的推算       | (81) |
| 6.4.2 液体导热系数的推算       | (82) |
| 6.4.3 固体导热系数的推算       | (84) |
| <b>参考文献</b>           | (86) |
| <b>第七章 热扩散率的测定</b>    | (87) |
| <b>7.1 概述</b>         | (87) |
| 7.1.1 热扩散率的概念         | (87) |
| 7.1.2 测量热扩散率的方法       | (88) |
| <b>7.2 周期热流法</b>      | (89) |
| 7.2.1 长杆状试样           | (88) |
| 7.2.2 平板状(或薄膜)试样      | (91) |
| <b>7.3 瞬态热流法(闪光法)</b> | (93) |

|                                                                 |              |
|-----------------------------------------------------------------|--------------|
| 7.4 平面热源法                                                       | (87)         |
| 7.5 过渡态平板法                                                      | (88)         |
| 参考文献                                                            | (90)         |
| <b>第八章 热辐射性质的测定</b>                                             | <b>(100)</b> |
| 8.1 引言                                                          | (100)        |
| 8.2 热辐射性质的内容及其定义                                                | (140)        |
| 8.2.1 发射率                                                       | (100)        |
| 8.2.2 吸收率                                                       | (101)        |
| 8.2.3 反射率                                                       | (102)        |
| 8.2.4 透过率                                                       | (105)        |
| 8.3 发射率的测定                                                      | (106)        |
| 8.3.1 光谱法向、定向发射率 $\epsilon_{1,\lambda}$ , $\epsilon_{1,\theta}$ | (106)        |
| 8.3.2 全波长法向发射率 $\epsilon_n$                                     | (109)        |
| 8.3.3 全波长半球向发射率 $\epsilon_h$                                    | (110)        |
| 8.3.4 发射率的快速检测                                                  | (114)        |
| 8.4 反射率的测定                                                      | (115)        |
| 8.4.1 积分球法                                                      | (115)        |
| 8.4.2 半球镜法及聚球镜法                                                 | (118)        |
| 8.5 吸收率的测定                                                      | (119)        |
| 8.6 透过率的测定                                                      | (120)        |
| 参考文献                                                            | (120)        |
| <b>附录</b>                                                       | <b>(122)</b> |
| 附录1 湿空气的热物性值                                                    | (122)        |
| 附录2 海水的热物性值                                                     | (124)        |
| 附录3 主要气体的扩散系数                                                   | (125)        |
| <b>附表</b>                                                       | <b>(128)</b> |
| 附表1 几种标准物质的比热与焓值                                                | (128)        |
| 附表2 在1个大气压下 $\alpha$ 相三氧化二铝的比热和焓                                | (130)        |
| 附表3 常压(101.325kPa)下气体的物性值                                       | (132)        |
| 附表4 几种防冻液的热物性值                                                  | (137)        |
| 附表5 主要物质的基本性质                                                   | (139)        |
| 附表6 纯金属的物性值                                                     | (142)        |
| 附表7 合金的物性值                                                      | (149)        |
| 附表8 固体的物性值                                                      | (156)        |
| 附表9 液体金属的物性值                                                    | (166)        |
| 附表10 熔融盐的物性值                                                    | (168)        |
| 附表11 常压下液体的物性值                                                  | (171)        |
| 附表12 水(轻水)的物性值                                                  | (181)        |
| 附表13 重水的热物性值                                                    | (186)        |
| 附表14 氢的热物性值                                                     | (187)        |
| 附表15 二氧化碳的热物性值                                                  | (189)        |
| 附表16 主要惰性气体的热物性值                                                | (190)        |
| 附表17 氢的热物性值                                                     | (194)        |
| 附表18 氮的热物性值                                                     | (196)        |

|      |                     |         |
|------|---------------------|---------|
| 附表19 | 氧的热物性值.....         | ( 197 ) |
| 附表20 | 主要的卤素的热物性值.....     | ( 199 ) |
| 附表21 | 甲烷的热物性值.....        | ( 200 ) |
| 附表22 | 乙烷和丙烷的热物性值.....     | ( 212 ) |
| 附表23 | 丙烷和丁烷的热物性值.....     | ( 213 ) |
| 附表24 | 氟里昂类物质的热物性值.....    | ( 215 ) |
| 附表25 | 主要的有机溶剂的热物性值.....   | ( 216 ) |
| 附表26 | 空气的热物性值.....        | ( 218 ) |
| 附表27 | 一些重要工程材料的热辐射性质..... | ( 214 ) |

# 第一章 绪 论

## 1.1 量热技术和热物性测定的研究范畴

量热技术和热物性测定主要研究的对象,是各种热变化过程的热量的测量方法和各种物质的热物性值的测定方法。

热量是一个过程的物理量,所以热量可以用产生热变化的过程的名称来命名。产生热变化的过程有两大类,一类是物质的分子构成发生变化;另一类是物质的物理状态发生改变。前者产生的热量,称化学反应热,后者产生的热量,称状态变化热。细分之,化学反应热又可分为吸热反应热和放热反应热,具体而言,又有燃烧热、生成热、中和热、混合热、重合缩合热、水解热、溶解热、稀释热、结晶化热、浸润热、吸附热、脱附热、代谢热、增殖热、呼吸热、发酵热和结合分解热等。物理状态变化热,又可分为显热和相变潜热。“显热”指伴随有温度的变化,是显现的热量,而相变潜热是相变时无温度变化,固体融解为液体所吸进的热量,成为潜伏在液体中的热量,当液体凝固时将全部释放出来。相变热又可有融解热(凝固热),蒸发热(凝结热)和升华热等。

各种化学反应热的大小及其发热速率,是与参与反应的物质和生成物质的种类,以及反应过程的环境或条件(压力、温度、浓度)有关。探索和建立这种反应热与参与物、生成物及反应条件之间的关系和规律,需要对各种不同的热变化过程进行精确的热量测量。有温差存在,就有热量的传递与扩散;有物质的物理状态的改变,就有物质与外界的热量交换。寻求和揭示这种热量的输运和交换的规律,需要对各种输运和交换过程的热量变动进行测量。量热技术就是从共性的角度,研究反应热、输运热是如何测量的,以及如何更准确、更简便地测量的。具体而言,量热技术包括温度测量技术,卡计(量热计)设计和使用技术,热流计设计和使用技术。

热物性测定是以量热技术为基础,研究各种热物性的测定方法及其装置的设计和误差分析。热物性测定是为揭示物质的载热能力和热输运能力的目标服务的。材料的热物性至少包括有:密度、比热、导热系数、热扩散率、融解热、热膨胀系数、粘度、表面发射率和吸收率、熔点、沸点等。这些热物性值并非都能在手册中查到,许多场合,特别是新材料,需要自己动手去测量。本书比较系统地介绍了比热、融解热、反应热、燃烧热、导热系数、热扩散率、发射率、吸收率和透过率等热物性值的测定。

## 1.2 量热技术和热物性测定在生产和科学研究中的重要性

量热技术和热物性测定在生产和科学研究中的重要性,可以从普遍性、基础性、开拓性和经济性四个方面来认识。

### 1)普遍性

量热技术和热物性测定,是一门应用极广的技术<sup>[1, 2]</sup>。无论在现代工业赖以生存和发展的能源动力工程中,还是在新兴技术领域,或是在人类的衣食住行中,都可以看到这门技术所发挥的巨大作用。例如,热电厂和各种动力机的热效率的测定,燃烧工况的分析,锅炉、各种热交换器的效率测定与评价,蒸汽热水管道的保温与热损测定,工厂的热平衡测试与能量流向图的绘制,冶金炉、电炉的节能、铸造中的传热与铸件品质的提高;机械工业中的热处理与机制加工中的热变形,运转部件的热输出;建筑中的热应力、墙壁热损失;化工中的各种反应过程的热变化、反应釜和热交换器的热交换;电力运输中的输电母线、变压器、电缆的散热;电子元件、电子计算机的散热;石油的热采技术,寒冷地区的石油运输,炼制;衣服的保温、防辐射性能的研究;温棚技术、水果保鲜、谷物储存、食品加工、烹调、冷冻、住房的调温;航天技术中火箭的发射、卫星的回收等等,无不有热问题存在,无不要用到热测试技术。目前,在生物工程、生命科学、人体科学的研究中,也用到了这门技术。因此可以说,量热技术和热物性测定,是一门应用性极广的技术,在人类所及的各种生产过程和科学研究中,都有用武之地,都能找到研究课题。

### 2) 基础性

基础性有三个方: i) 量热技术是一切与热有关的实验和监测的技术基础; ii) 热物性值是一切热设计和研究具体热过程的基本参数; iii) 量热技术和热物性测定, 是工程热物理系本科生和研究生的技术基础课。

### 3) 开拓性

开拓性是指应用量热技术和热物性测定技术,可以在很多研究领域,做出开拓性的成果。例如,历史上,用量热技术曾精确测定出热功当量,为推动热力学的发展作出了开拓性的成果;各种工质的热物性值的精确测定,又为各种热机的合理设计开辟了道路;付立叶的导热定律、牛顿的热交换定律的诞生莫不是以热实验为前导。今天对物质的认识,也还借助于热分析。新材料的开辟,对生命的认识,细胞生存时热交换的奥秘也有待于这门技术与其他技术配合去发掘。因此,掌握好这门技术,对于从事科学探索是十分有益的。

### 4) 经济性

掌握量热技术和热物性测定这门技术,并应用于生产和科学研究的各个过程,将在节约能源、提高设备热效率和发掘新材料,认识新领域方面带来大的经济效益。

## 1.3 量热技术和热物性测定的简史和发展现状

量热技术和热物性测定的发生、发展与生产和科学技术的发展密切相连,同时它的成果又促进了生产和科学技术的发展。虽然人类在同自然界的斗争中早就知道了冷热,用自身的感觉器官,如手、舌、皮肤等也能判别物体的冷热程度,并能用摩擦的方法生热取火。在物性的认识方面,也知道用棉花御寒,取铜铁做炊具等。但是,量热技术和热物性测定的真正诞生和发展却是18世纪中期以后的事。那时欧洲城市中工场手工业发展很快,生产实现了专门分工和资本主义制度下的集体生产,商品经济发展起来,促进了航海和贸易的巨大发展。发展生产力,迫切需要动力机。1763—1784年间,英国瓦特发明了蒸汽机。蒸汽机的发明和应用,使生产力得到很大提高,又刺激和推动了量热技术和水—水蒸气的热物性测定技术的发展,从此有了系统的量热技术和热物性测定技术。同时,热力学也被建立和发展。热力

学的理论研究,需要实验验证,这又促进了量热技术和热物性测定技术的发展。1824年卡诺提出了卡诺定理与卡诺循环,已经有热和热效率的测定。1840—1851年间,焦耳作过多种多样实验,测定了热功当量。焦耳的各种量热的精确实验,给能量守恒定律提供了坚实的实验基础。为了纪念焦耳在量热方面作出的杰出贡献,国际上通用“焦耳”来作热量的单位。在热力学第一定律中,凝聚了量热技术的结晶。传热学的传导、对流、辐射三大热交换定律,其诞生和发展更离不开量热技术和热物性值。传热学又为量热技术和热物性测定提供了理论基础。

随着生产和科学技术发展的需要,量热技术和热物性测定被带到不同领域。冶金的发展把测试从常温扩展到高温;制冷的需要又把测试推到低温。作为量热技术的一个应用技术——“热分析”技术,不仅成为化学分析的一个重要方法,也是多学科通用性的技术。

量热技术和热物性测定由于在生产和科学研究中有重要作用,所以受到了世界各国越来越多的重视,有关国际性和国家性学术组织已相当多。有关量热技术方面,国际上设有作为IUPAC的物理化学部分科的热化学和热力学委员会和热分析协会。许多国家成立有专业性委员会。我国也于1979年成立了中国化学会物理化学委员会之溶液化学—热力学—热化学—热分析专业组(CTTT)。美国在热测定上最为活跃,在第二次世界大战后,就召开了全国性卡计会议,以后每年一次。美国在这方面做了许多工作,例如建立温度标准、测定高温与低温的物性,研制了标准卡计(冰卡计)、实现测试自动化、数据编集等。苏联以表面化学的热研究居长,英国在反应卡计上有建树,日本侧重于DTA的开发使用。

有关热物性测定的国际学术性组织有三个,一个是以美国、加拿大为中心的ICTP,另一个是以英国和欧洲共同体为中心的ETPC,再一个是以中国和日本为中心的亚洲地区国际热物性学术委员会ATPC。美国的普度大学出版了13卷热物性专集,简称TPRC。日本也出版了流体热物性集等。目前热物性值的测定方法是从稳态转向瞬态,从单功能发展成为多功能,温域移向低温和高温,测试内容已涉及到人体、生物。

## 1.4 量热技术和热物性测定作为专业课程的特点和学习方法

本书主要培养学生独立从事热量测量的实验能力。它以传热学、误差理论作指导,以热物理量量测为技术基础。本书每一章节都象一个个独立的研究课题,许多章节叙述有完整的研究过程,并较多地结合实际因素进行综合分析,旨在加强培养学生解决问题、分析问题的能力。它前接传热学、工程热力学、热物理量量测,后续毕业实践课,是工程热物理系,热能动力系本科生和硕士生毕业前的技术基础课,也可以看作是参加生产和科研前的技术训练课。

本书的内容主要分三部分,第一部分为量热技术;第二部分为热物性测定;第三部分为热物性值表。

量热技术是构成一切热实验的技术基础,主要内容包括温度测量和热量测量。温度测量在热物理量量测中已作过介绍,但热物性测定的误差,很大部分是由温度测量误差带来的,所以本书为减少热物性的测定误差,不得不在第二章中再次对温度计的使用以及温度测量中容易被忽视又容易产生误差的问题进行简单介绍,以期读者在有关温度测量方面加以注意。第三章为量热技术,主要介绍热量测量的一般方法,以及各种类型卡计的设计原理。

热物性测定分五章讲授,自第四章至第八章,依次介绍比热、反应热与燃烧热、导热系数、热扩散率和热辐射性质的测定。热物性测定有二方面内容,一是热物性测定方法,另一是测试技术,本书对这两方面内容都将涉及,对前者是普遍性地介绍,扩大广度知识,对后者采用典型举例性介绍,加深纵向知识。由于可直接测定的物理量只是温度、时间、长度、质量、电流、电压等,热物性值是间接测量,因此热物性测定就比较复杂。热物性测定方法的研究,就是通过建立适当的物理模型,根据传热理论,进行数学分析,导出待测热物性量与可直接测量之间的关系式,并借助误差分析,指导改进实验方案的设计和提高了测定值的精度。测试技术侧重于实验装置的建立。

本书的第三部分是物性值表和附录,供工程设计和仪器标定时参考。

总的来说,本书的教学与学习要注意三性,即知识性、思想性和实践性。知识性是要求在理论方面了解各种测定方法的原理,能熟练进行误差分析;在基本技能方面,能掌握温度和热量的正确测量方法。思想性是指培养独立分析问题和解决问题的能力而言。实践性在于强调培养实验装置设计和实际操作能力。因此,学习每一章都应当注意怎样提出问题,怎样建立物理模型,怎样实现实验方案,怎样再揭示矛盾去深化问题的研究,并要求参加一个实验,以实际操作作为锻炼。学习时采用点面、易难、理实三结合方法。

#### 参 考 文 献

- (1) 吴同庚,无机材料热物性学·上海科技出版社,1981;序言(王朴宣撰)。
- (2) 吴同庚,王梅华编译,固体热物理性质导论——理论和测量,北京:中国计量出版社,1987。

## 第二章 温 度 测 量

### 2.1 温度测量概述

温度是表示物体冷热程度的物理量,从分子论的观点来看,它是物体分子运动平均动能大小的标志。为了确定物体的加热或冷却状态,必须测定物体的温度。人类的生活、生产和科学实验都与温度有密切的关系。热量的测量和热物性的测定,更是以温度测量为基础。温度测量的精度直接影响了热量和热物性的测量精度。因此,掌握正确的温度测量技术是十分重要的。

温度测量远比电流、质量的测量困难得多,误差也大得多,它虽然是一门老学科,但仍然相当落后,处处遇到新问题。由于热量传播有三种方式,以及被测对象的复杂性和多样性,构成了温度测量的复杂性和产生误差原因的多样性。因此,不具备温度测量的基本知识,就难以精确地测量温度。

在温度测量中,各种温度计的原理和使用法属于基本知识;而在复杂环境中对温度的正确测量方法及对温度测量值的误差修正法则属于温度测量技术。

#### 2.1.1 温标

温度的度量要有参照基准,或者说它需要一种标尺,即温标。温标的决定原则最早是由牛顿提出的。他考虑到温标复制的可能,提出了以一种(或两种)单纯物质的两个相变点之间的温差作为1。基于这种思想,以 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 和冰的混和物的温度为0,以人体温度为100,建立了华氏温标,用符号 $^{\circ}\text{F}$ 表示。以水的熔点为0,水的沸点为100,建立了摄氏温标,用符号 $^{\circ}\text{C}$ 表示。两种温标 $^{\circ}\text{C}$ 和 $^{\circ}\text{F}$ 之间的换算关系为:

$$^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} (^{\circ}\text{F} - 32) \quad (2.1)$$

在按卡诺循环工作的热机中,工质在温度 $T_1$ 时吸收热量 $Q_1$ ,在温度 $T_2$ 时放出热量 $Q_2$ ,则有

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1}$$

的关系,开尔文以此关系建立了只用一个温度为基点而能确定其他温度的热力学温标。这种温标的可取之处在于决定温度方法与工质本身的种类和性质无关,避免了分度的任意性。卡诺循环是理想化的,因此这种温标也仅是理想目标而已。实际上,热力学温标的实施是通过理想气体的关系式

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

表达的。热力学温标符号为 $T$ ,单位为开尔文( $\text{K}$ )。规定水的三相点的温度为 $273.16 \text{ K}$ 或 $0.01^{\circ}\text{C}$ 的热力学温标叫绝对温标。绝对温标( $T$ )与摄氏温标( $t$ )的关系为

$$T = t + 273.15.$$

(2.2)

为了使温标得以实施和复现，国际上规定了温标定值点并先后进行多次修订。1990年新国际温标（ITS-90）已于90年元旦开始实施，取代了1968年国际实用温标（IPTS-68）和1976年的暂定温标。该温标有17个定义基准点（见表2.1）。表中有几点有双重定义法，二者有同等效力。它与IPTS-68的主要区别点在于：a)把最低温度延伸到0.65K；b)废止了用热电偶做标准温度计；c)把白金电阻温度计的使用上限提高到960℃；d)把辐射温度计的标准下限下降到960℃。此外分度上也有一些差别。〔1〕

表 2.1 1990 年 国 际 温 标 定 基 准 点 (ITS-90)

| 序 号 | 温 度        | 物 质                    | 状 态    | 备 注                      |
|-----|------------|------------------------|--------|--------------------------|
| 1   | 3 ~ 5 K    | 氦(He)                  | 沸点     |                          |
| 2   | 13.8033 K  | 平衡氢(e-H <sub>2</sub> ) | 三相点    | 含有自然的钷同位素                |
| 3   | 约17 K      | 平衡氢(e-H <sub>2</sub> ) | 低压沸点   | P=3330.6牛/米 <sup>2</sup> |
|     |            | 氦(He)                  | 气体温度计点 |                          |
| 4   | 约20.3 K    | 平衡氢(e-H <sub>2</sub> ) | 沸点     |                          |
|     |            | 氦(He)                  | 气体温度计点 |                          |
| 5   | 24.5561 K  | 氖(Ne)                  | 三相点    |                          |
| 6   | 54.3584 K  | 氧(O <sub>2</sub> )     | 三相点    |                          |
| 7   | 83.8058 K  | 氩(Ar)                  | 三相点    |                          |
| 8   | 234.3156 K | 汞(Hg)                  | 三相点    |                          |
| 9   | 273.16 K   | 水(H <sub>2</sub> O)    | 三相点    |                          |
| 10  | 29.7640 ℃  | 铟(In)                  | 凝固点    |                          |
| 11  | 150.385 ℃  | 锡(Sn)                  | 凝固点    |                          |
| 12  | 231.928 ℃  | 锌(Zn)                  | 凝固点    |                          |
| 13  | 419.527 ℃  | 铝(Al)                  | 凝固点    |                          |
| 14  | 660.323 ℃  | 银(Ag)                  | 凝固点    |                          |
| 15  | 961.78 ℃   | 金(Au)                  | 凝固点    |                          |
| 16  | 1064.18 ℃  | 铜(Cu)                  | 凝固点    |                          |
| 17  | 1334.82 ℃  |                        |        |                          |

### 2.1.2 温度计测头的应有特点

被选作温度计的测头应有如下特点：

- 1) 物性随温度变化的特性有良好的再现性；
- 2) 物性随温度的变化量大且易于测定，变化量虽小，但能进行精密测量；
- 3) 在测定范围内物性变化应当有规则，最好呈线性关系；
- 4) 物性受温度以外的因素影响时，变化不敏感，或能被修正。

基于以上原则，随着不同的测温需要，发明了种种温度计。

### 2.1.3 温度计分类

温度计按温度测头是否必须与被测介质接触来划分，可分作接触式和非接触式两大类。前者，在测温时必须达到温度平衡才能准确测量；后者只要与辐射强度或亮度平衡即可。后者适合测定高温和动态温度。温度计还可以按测头所用的测温原理和测头的材料来划分与命名。各常用主要温度计分类及其应用范围列于表2.2。