

温度计量测试丛书(十一)

表面温度测量

BIAOMIAN WENDU CELIANG

秦永烈 编著
师克宽 审

中国计量出版社

温度计量测试丛书（十一）

《表面温度测量》

中国计量出版社

内 容 提 要

本书系“温度计量测试丛书”的一个分册，但从其内容来讲，它也可作为有关固体表面温度测量的专著。全书共分八章，系统地阐述测量固体表面温度的各种传感器和测量仪表的测温原理，结构，测试方法，数据处理和误差分析，以及表面温度计的检定装置和检定方法的现状及其存在的问题等。

本书可供从事温度计量、测试以及热物性测试工作者使用，也可供大专院校有关专业师生参考。

温度计量测试丛书 (十一)

表面温度测量

秦永烈 编著

师克宽 审

责任编辑 窦绪昕

*

中国计量出版社出版

北京和平里11区7号

河北省三河县潮河印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本787×1092/32 印张9.625字数214千字

1989年12月第1版 1989年12月第1次印刷

印数1—10000

ISBN 7-5026-0258-5/TB·212

定价 4.30元

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	窦绪昕
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，它与其它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，培养技术人材，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，将陆续出版与读者见面。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

在工业生产和科学研究工作中，为了测试某些参数和保证产品质量，常常需要测量固体内部或表面的温度。例如在轧钢过程中测量钢板的表面温度；在塑料、橡胶生产中测量滚筒的表面温度；在材料热物性参数测试中测量样品的温度等等。测量固体表面温度的场合几乎可与测量液体及气体温度的场合相比拟，也可以说三者一起构成了整个物质世界的温度测量。

中国计量出版社组织编写的《温度计量测试丛书》将固体表面温度测量列为一个分册予以出版，也足以表明固体表面温度测量的重要性。

本书内容主要介绍测量固体表面温度的各种传感器和测量仪表的工作原理、结构及误差分析；检定装置和检定方法以及目前存在的问题等。

讨论表面温度传感器，检定装置及测试方法等将牵涉到一些物理基础知识和某些基础技术，如热管、光纤传感技术等，因此书中也对这些内容作了适当的介绍。本书第七、八两章介绍不同工况、不同对象的表面温度测量方法，这是因为表面温度测量的准确度受现场工况及被测对象的影响很大，往往必须根据现场测试条件采取相应措施才能测得准确的数值，但是由于表面温度测量误差分析复杂，加之检定装置和检定方法又尚无统一的标准，而影响测量结果的因素又非常多，因此很难达到高的准确度。

作者在编写本书时进行了一些调研，参阅了较多的文献资料，也综合编入了一些个人多年从事表面温度测量的研究成果。

本书第五、六两章的初稿是由顾丽芳同志撰写的，她还对本书体系及写法提出过不少意见，在此表示感谢。

作者尤其应感谢中国计量测试学会温度专业委员会的同事们在本书编写过程中给予的鼓励和支持，以及中国计量出版社的大力协助，清华大学师克宽教授对全书作了仔细审阅，提出了许多宝贵意见，也在此表示衷心的感谢。

还要感谢所有提供参考文献的作者及在本书编写过程中给予过帮助的同事们。

由于作者水平有限，加上本书在内容和体系编排上均属初步尝试，故书中难免存在不妥和错误之处，愿望读者批评指正。

秦永烈 1988年10月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 制约固体表面温度的条件	(1)
第二节 固体及表面温度测量的困难	(2)
第三节 与固体表面温度测量有关的四类传热边界 条件	(4)
第四节 固体热阻及表面的换热热阻	(7)
第二章 表面温度传感器	(10)
第一节 表面温度传感器的分类	(10)
第二节 热电偶式表面温度传感器	(10)
第三节 热电阻式表面温度传感器	(22)
第四节 辐射式温度传感器	(30)
第五节 光纤温度传感器	(40)
第六节 液晶表面温度传感器	(48)
第七节 电涡流表面温度传感器	(50)
第八节 其他的表面温度传感器	(59)
第三章 接触法测量表面温度的误差	(62)
第一节 接触测温中被测对象供热与测温元件 散热的关系	(62)
第二节 热电偶的安装方法和测温误差的来源	(64)
第三节 接触式表面温度测量误差的分析	(70)
第四节 测温元件引线导热对被测对象引起的 导热误差	(81)
第五节 等温线敷设表面热电偶的热阻误差分析和 表面精确温度的获得	(86)

第四章	辐射法非接触表面温度测量	(98)
第一节	概述	(98)
第二节	利用单色、部分辐射、比色、全辐射法 测量表面温度	(99)
第三节	影响热辐射法测量固体表面温度准确度的 因素	(108)
第四节	光纤式表面温度计	(114)
第五节	红外热象法测量固体表面温度	(117)
第六节	线阵列扫描温度计	(124)
第七节	红外照相法图示表面温度分布的测量 技术	(130)
第五章	提高表面温度测量准确度的方法	(135)
第一节	概述	(135)
第二节	热电偶等温线敷设法	(137)
第三节	补偿热电偶丝中导热损失的补偿式表面 热电偶	(138)
第四节	利用箱形补偿式温度传感器在容器外壁 测量容器内壁温度及其介质温度	(142)
第五节	采用双检测元件法消除被测对象热物性 参数的影响	(149)
第六节	埋入式双检测元件法	(154)
第七节	零温差微分法	(157)
第八节	调谱平衡测温法	(162)
第九节	具有辅助辐射源的表面温度测量方法	(166)
第十节	多波长(多色)温度计	(170)
第六章	表面温度计检定装置	(177)
第一节	表面温度计检定的特点	(177)
第二节	对接触式表面温度计检定装置的要求	(180)
第三节	直接加热式表面温度计检定装置	(181)

第四节	热管式表面温度计检定装置	(182)
第五节	沸点炉(固定点式)表面温度计检定 装置	(189)
第六节	模拟现场工况的表面温度计检定装置	(191)
第七节	辐射式表面温度计的检定方法及装置	(194)
第七章	不同工况条件下的表面温度测量	(203)
第一节	低温固体表面温度的测量	(203)
第二节	带电物体表面温度的测量	(208)
第三节	运动物体表面温度的测量	(211)
第四节	用热电偶测量快变的表面温度	(223)
第五节	非等温表面温度的测量	(237)
第八章	不同对象的表面温度测量	(242)
第一节	加热炉内固体坯件温度的测量	(242)
第二节	连铸生产中运动铸坯表面温度计的选择	(248)
第三节	热处理过程中大型锻件的温度测量	(252)
第四节	非晶态合金制取设备旋转辊的温度测量	(255)
第五节	金属切削中表面温度的测量	(258)
第六节	微波加热治癌时皮肤温度的测量	(260)
第七节	悬浮固体微粒表面温度的测量	(262)
第八节	小目标对象的表面温度测量	(264)
第九节	用热电偶测量绝热固体材料的温度	(269)
第十节	用热电偶测量半透明固体材料的温度	(274)
第十一节	用辐射法测量半透明固体的温度	(277)
第十二节	玻璃窑炉生产线上浮法玻璃带温度 的测量	(279)
第十三节	海水及大地表面温度的遥测与信号 图象处理	(283)
参考文献	(292)

第一章 绪 论

第一节 制约固体表面温度的条件

固体表面温度的数值取决于许多因素，它因固体内部传热和边界的换热条件而异。固体内部的传热取决于材料的导热系数；边界的换热取决于对流换热系数和发射率。

固体内部向边界的传热决定于固体材料本身。固体有金属、有机材料和无机材料之分。它们的导热机理是不同的，这是制约固体表面温度的微观因素。由于金属中的电子不受束缚，所以电子间的相互作用或碰撞是金属中导热的主要因素，即电子导热机理。此外，由于金属是晶体，热量也通过晶格或点阵的振动传递，晶格振动的能量是量子化的，我们把晶格振动的“量子”称为声子，这样，金属的导热有一部分是声子的贡献。

在绝大多数非金属无机材料中，由于它的电子是被束缚的，因此不能成为导热的载体，而热能的传递主要靠“声子”。此外，在非金属固体电介质中，除了晶格振动的“声子”传热外，还有一小部分是较高频率的电磁辐射能。因为在非金属无机材料中具有一定的空隙，在空隙之间形成辐射的传热，而且此传递的能量随温度增高而急剧增大，这种传热机理称为“光子”导热。在高温时，无机材料的“光子”导热效应增大。

其次，从客观来说，根据固体传热的傅里叶定律及固体

表面与周围介质边界处的传热，如果固体温度高于周围介质温度，则边界处的对流辐射散热与固体内部的传热一起制约了分界表面的温度。

由于固体表面与周围环境换热的复杂性，以及对流换热系数受周围气流波动的影响，因而表面温度往往是一个随机涨落的值，其值随表面气流而变化。这种受气流变化所引起的表面温度涨落，变化较快，但变化量通常较小。

此外，由于供热量及被测材料导热系数的变化，也使固体表面温度产生随机的变化。

真实的表面温度将是上述诸因素综合影响的结果。

第二节 固体及表面温度 测量的困难

固体表面温度测量有接触法和非接触法之分。前者测温元件直接与被测固体或表面相接触，后者测温元件不直接接触被测表面。测量固体内部的温度一般用接触法。下面介绍固体表面温度测量中的一些困难。

与气体及液体的温度测量一样，固体及其表面温度的测量，也应用各种基于不同物理原理的传感器和仪表。比较成熟的如热电偶、热电阻、热辐射式测温仪表。但是对固体及其表面温度的测量，与测量液体的温度不同，用接触法测量液体温度时，只要测温传感器有足够的插入深度及对流换热条件，就能测得较准确的温度；而表面温度测量时，传感器一般不能插入固体表面，或不能插入很深，尤其在温场不均匀的固体温度测量中，即使采用埋入式测温传感器，也会产生较大的误差。

一、接触法测量表面温度的困难

在接触测温中，当安上传感器后，会引起表面温场的破坏。其破坏程度与传感器（或称测温元件）材料的热物性、尺寸、形状、传感器表面的散热情况；被测物体材料的热物性、尺寸、形状及周围的换热工况有关。这些因素又与更多的其他因素联系着，并且其变化的随机性很大。因此，很难定量分析和准确测量传感器安装前后对原有被测物体温场破坏的程度。这种对原温场的破坏导致测温传感器根本感受不到被测表面原来的真实温度，因此，很难确定到底测量达到多高的准确度，也就是通常所讲的“表面温度准确值的不可知性”。

总而言之，接触法测量固体及其表面温度的困难是：安装上传感器后其引出线导热引起原来温场破坏，并引起被测物体及其表面热阻的变化。测温工作者为提高接触法测量表面温度准确度所作的种种努力，大多是围绕上述几点进行的。

二、非接触法测量固体表面温度的困难

用辐射法非接触测量固体表面温度时，最困难的是测量结果受被测物体表面发射率所制约，而表面发射率又与被测物体的材料、表面粗糙度、氧化程度、有无油污、表面水汽层等有关。这些参数变化无常，很难定量确定，因而使测温的准确度下降。

三、检定装置与检定方法的问题

(1) 目前生产的便携接触式表面温度计的类型很多，但大多受上述诸因素的影响而不能定量地测得准确的数值。

而目前很多检定装置仅能在规范条件下对表面温度计进行分度或检定，不能适应现场的变化工况，因而在检定时所确定的测温精度不能应用于现场，存在较大并难于计算的使用误差。因此表面温度计的检定方法和检定装置应进一步研究改进。

(2) 目前有不少辐射温度计常被用来测量表面温度或表面温场分布，它们大多是在黑体炉上分度的，即在发射率近似为1下分度的。但是在现场被测对象的发射率是变化不定的，虽然有些新型的仪表可由操作者预估被测对象的发射率而预置于仪表中，但这种估计是靠经验和主观臆断，不能解决实测中的准确度问题。

目前测量固体表面温度的仪表虽不少，但至今尚无标准的检定装置和检定方法可用来分度或检定表面温度计。所以分析表面温度测量准确度的影响因素；研究产生测量误差的机理；研究合理的测试方法和精确的测温传感器以及标准检定装置和规范的检定方法是解决精确测量固体表面温度的主要课题。

第三节 与固体表面温度测量有关的

四类传热边界条件

在测量固体内部温度、固体表面温度和液体表面温度时，其测量方法要受到传热边界条件的影响。根据传热理论，有四类边界条件，在进行表面温度测量时必须予以考虑。

(1) 测量固体内部温度通常采用接触法。即将测温元件埋设于固体内，被测物体将热量传给测温元件，测温元件

处于被测材料包围之中，见图1-1(a)。被测物体与测温元件间的换热属第四类边界条件，即固体与固体间的导热，其边界条件为

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \quad (1-1)$$

式中： λ_1 、 λ_2 ——被测材料与测温元件材料的导热系数；

x ——一维热流或温度梯度的方向；

T_1 、 T_2 ——被测材料与测温元件的温度值。

只有当 $\lambda_1 = \lambda_2$ 时，才能得到该点的真实温度。因为这时测温元件装入被测物体不引起原来被测点温度的变化。

(2) 固体表面温度的测量牵涉到它与周围环境的换热，以及安装测温元件以后的换热状况。因此必须分析固体表面以及安装测温元件后与周围环境换热的边界条件。根据传热理论，固体表面与周围介质的换热边界条件有三类。

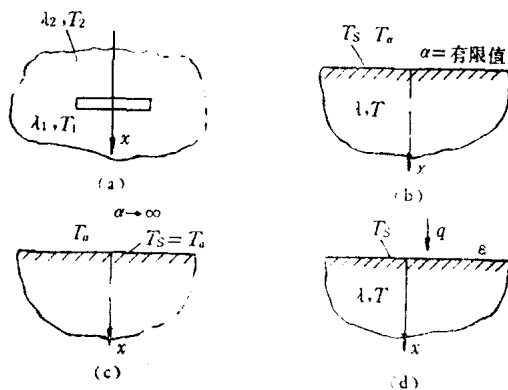


图 1-1 被测物体和测温元件与周围介质换热的四类边界条件

(a) 第四类边界条件； (b) 第三类边界条件；

(c) 第一类边界条件； (d) 第二类边界条件

一、第三类边界条件

第三类边界条件是指被测物体表面与其周围介质作对流换热，而有边界条件〔见图1-1(b)〕

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T_s - T_a) \quad (1-2)$$

式中： α ——物体表面与周围介质对流换热系数；

T_s ——被测物体表面温度；

T_a ——周围介质温度。

由式(1-2)可见，只有当安于被测物体表面的测温元件不改变原表面导出的热量及对流换热系数时，才可测得真实的表面温度。

二、第一类边界条件〔见图1-1(c)〕

当对流换热系数增大或趋向于无穷大时，由于固体内部具有一定的热阻，因而存在温度梯度。但被测物体的导热系数不会是无穷大，因此只有当 $T_s \approx T_a$ 时，式(1-2)才能成立。这就是第一类边界条件。在第一类边界条件下，如图1-2(b)所示，只要安于被测物体表面的测温元件不改变被测物体的导热热阻，就可测得较准确的表面温度。

三、第二类边界条件〔见图1-1(d)〕

第二类边界条件是当被测物体表面接受的是辐射或其他的热流，而物体内部具有一定的温度梯度，其表达式为

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1-3)$$

式中： q ——投射于被测表面之热流。