

[苏] B. A. 奥西彼娃 著

550051

传热学实验研究

高等教育出版社

560051

TK124/09

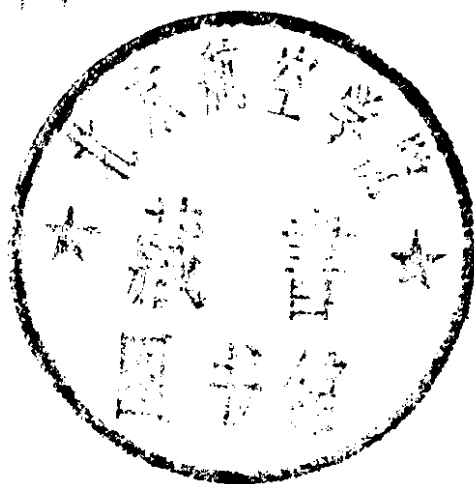
传热学实验研究

〔苏〕B. A. 奥西波娃 著

蒋章焰 王传院 译

蒋章焰 校

41-39/10



C0246338

高等教育出版社

1982

内 容 简 介

本书译自苏联动力出版社出版的 В. А. ОСИПОВА 著 “ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА” 一书。原书第一版于1964年问世，1969年出第二版，本书是根据1979年修订补充第三版译出的。该书经苏联高等与中等专业教育部审定为高等学校热能动力专业教学参考书。

目前，实验研究仍然是解决传热问题的一个十分重要的环节；本书就专门阐述传热学实验研究这一问题。书中不仅讲述传热测试的原理和方法，而且还介绍各类测试装置。全书共九章，内容包括研究热物性的稳态法和不稳态法、对流和相变换热的实验研究、热辐射以及换热器试验等。此外，书中还对测量和数据处理问题作了简要说明。

本书可供高等学校动力、化工、航空、工程热物理、以及核反应堆工程等专业师生用作教学参考书，也可供有关科技人员参考。

传热学实验研究

〔苏〕В. А. 奥西波娃 著

蒋章焰 王传院 译

蒋章焰 校

★

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

★

开本 850×1168 1/32 印张10.25 字数247,000

1982年9月第1版 1984年6月第1次印刷

印数 00,001—6,200

书号 15010.0452 定价 1.60 元

序

苏联第十个五年计划是提高产品质量、强化生产、加速科学技术进展的五年计划。技术的进步导致提高设备单位容积的功率、扩大研究对象、并强化其中的热力过程。由此而提出对实验传热学的现状进行评论的迫切任务。

本书专门阐述最重要的换热过程的实验研究问题，包括这些实验研究的原理、方法和技术。书中所描述的一些实验装置，既能最全面地考虑到理论前提和实验条件，又能可靠地实现必要的测量。书中还按实验的课题对实验装置进行了分类。

每一章开头都阐明所研究的过程中发生的机理，综述某些最引人注目的研究成果。书中广泛引用莫斯科动力学院(МЭИ)热工理论基础教研室多年来进行过的实验，其中包括作者本人所做的实验。此外，在这一次新版本中还系统介绍苏联另外一些科学研究所和实验室研究出来的一些新的首创性的实验方法和测试装置。

第三版仍保持第二版的章节顺序，与传热学教材^[2-1]的体例大致相同。书中的内容则基本上都作了更新和补充。

附录列出国际单位制(CI)换算表，还附有某些必要的备查资料。

伊万诺沃动力学院(Ивановский энергетический институт)热工理论基础教研室审阅了本书，作者谨对他们表示衷心感谢。

编辑B. A. 安德丽阿诺娃(B. A. Андрианова)做了大量的编辑工作，作者也谨在此表示谢意。

作者

目 录

第一章 测量概论	1
1-1 热流的测量	1
1-2 温度的测量	5
1-3 流量、流速和压力的测量	10
1-4 测量误差的确定	12
第二章 研究物质热物性的稳态法	17
2-1 概述; 研究方法	17
2-2 确定导热系数的方法	19
2-3 无限大平板层法	24
2-4 无限长圆筒层法	40
2-5 球体层法	63
第三章 研究物质单项热物性的不稳态法	66
3-1 概述	66
3-2 第一类正规热工况法	69
3-3 第二类正规热工况法	94
3-4 第三类正规热工况法	99
3-5 变速连续加热法	105
第四章 研究物质热物性的综合法	114
4-1 引论	114
4-2 基于导热过程初始阶段理论的方法	114
4-3 第一类正规热工况法	126
4-4 第二类正规热工况法	130
4-5 单调加热法	135

4-6	第三类正规热工况法(温度波法)	147
4-7	基于不稳态导热和稳态导热各种不同工况组合的方法	148
4-8	稳态热流法	154
第五章	单相流体的对流换热	161
5-1	概述	161
5-2	实验测定换热系数的方法	163
5-3	综合实验数据的相似理论法	168
5-4	流体在有限和无限空间中自由运动时的换热的研究	172
5-5	流体在管内和通道内强制流动时的换热研究	182
5-6	流体纵掠平板强制流动时的换热研究	201
5-7	外部绕流单个圆柱体和管束时的换热研究	204
5-8	近临界参数区和超临界参数区的换热研究	214
5-9	液态金属换热的研究	224
5-10	热量输运和动量输运的实验研究	228
5-11	强化对流换热的方法	236
第六章	液体沸腾时的换热	245
6-1	概述	245
6-2	沸腾机理的研究	246
6-3	液体在大容器内自然对流时的沸腾换热	251
6-4	液体在管内和通道内强制对流时的沸腾换热	257
第七章	蒸汽凝结时的换热	264
7-1	凝结的方式	264
7-2	蒸汽膜状凝结时的换热	264
7-3	蒸汽珠状凝结时的换热	273
第八章	热辐射	276
8-1	研究辐射系数(黑度)的方法	276
8-2	辐射法	276
8-3	量热计法	281
8-4	正规热工况法	282
8-5	漫散射表面的反射率角分布的研究	285
8-6	研究辐射角系数的光学模拟法	288

第九章 换热器试验	291
9-1 试验方法	291
9-2 实际换热器的传热研究	292
9-3 用空气模型进行锅炉装置的换热研究	294
附录	297
参考文献	303

第一章 测量概论

1-1 热流的测量

本章是引言，不拟详细阐述有关测量的所有问题，因为这是许多重要的专门著作论述的题目。全章只阐明本书后面的内容所涉及的一些与测量有关的一般性问题。

测定热流的方法是极其多种多样的，它跟所提出的热工课题的类型、研究对象的热量输入和输出的特性，以及其他一些因素有关。

导热系数 研究稳态工况下的导热系数时，热流在多数情况下是用外加的电加热器产生的。这种电加热器须保证热流沿试样的计算表面均匀分布。要得到一维的热流（依方法的要求而定），就必须采用各种办法对试样进行热防护。实际上，即要求做到，在对试样进行加热时，热损失和所加入的热流比较，可小到忽略不计。于是，所加入的热流量 $Q(W)$ 即可由测量主加热器所耗功率，或者测量加热器中的电流 I 和电压降 ΔU 直接求得：

$$Q = I\Delta U \quad (1-1)$$

测量加热器的功率、电流和电压降要用到各种不同量程和精度等级（从0.05级到4级）的瓦特计、电流表和伏特计。为了精确测量不大的热流，就须借助标准电阻用电位差计法进行测量。标准电阻和主加热器串联接入电路。于是，只要用电位差计测量标准电阻和加热器上的电压降，即可由下式求得加热器的功率（热流）（瓦）：

$$W = Q = \Delta U I = \Delta U \frac{\Delta U_N}{R_N} \quad (1-2)$$

式中 ΔU , ΔU_N ——分别为加热器和标准电阻上的电压降, V;
 R_N ——标准电阻的电阻值, Ω 。

在研究导电材料时, 加热是靠电流直接通过试样实现的, 这时, 试样本身就是加热器。这种情况同样可以应用上述关系式。

对于比较法, 热流要由具有已知导热系数的试样(标准试样)来确定。这时, 热流通过串联的被测试样和标准试样。就平板形被测试样和标准试样而言, 热流可由下式确定:

$$Q = \frac{\lambda_s}{\delta_s} (t_{s1} - t_{s2}) F_s, \quad (1-3)$$

式中 δ_s ——标准试样上温度为 t_{s1} 和 t_{s2} 这两个等温表面之间的距离, m;
 λ_s ——标准试样的导热系数, W/(m·K); F_s ——计算的表面积, m²。

由式(1-3)求得 Q 之后, 就可以根据类似的关系式确定被测试样的 λ , 只不过在后一情况下, Q 是已知值, 而 λ 则是未知值。

要是热损失, 就必须加以考虑。这种热损失通常要由预先进行的校准实验来确定, 或者要由量热计来确定。

如果热流是靠辐射从被测试样输出或输入的, 就可以由式(2-22)或(8-3)用计算方法求得(这时, 辐射系统的光学特性和几何特性应是已知的)。

热流还可用量热计法求得, 在这种情况下, 具有已知比热容的量热液体流过试样, 于是有

$$Q = G_{\pi} c_{p,\pi} (t_{\pi}'' - t_{\pi}') \quad (1-4)$$

式中 G_{π} ——量热液体的质量流量, kg/s; $c_{p,\pi}$ ——量热液体的定压比热容, J/(kg·K); $t_{\pi}'' - t_{\pi}'$ ——量热液体在工作段上的温度变化, K。

当 Q 可以根据冷却器中冷却介质的加热来确定时，同样可应用这个计算方程。

在某些情况下，为了测量热流，还要利用按附加壁法工作的量热计。附加壁法的实质是：在需要测定所通过热流的表面上贴紧一个具有已知热阻（ $R_0 = \delta_0 / \lambda_0$ ）的附加壁。于是，只要测出附加壁的温差 Δt_0 ，那么，就可以求出通过附加壁的热流密度（ W/m^2 ）：

$$q = \frac{\lambda_0}{\delta_0} \Delta t_0 \quad (1-5)$$

若附加壁的热阻与主壁面（被测材料）的热阻比起来并不大，则在稳态热工况下，通过附加壁的热流与通过主壁面的热流将是相同的。

为了测量量热计层中的温降，要串联敷设许多副热电偶；这时，偶数热电偶接点布置在量热计的一侧，奇数热电偶接点则布置在另一侧。在这种情况下，不大的温差对应着相当大的热电势，从而可以足够精确地测出来。量热计的热阻 $R_0 = \delta_0 / \lambda_0$ 可看作是常数^[1-1, 1-2]。于是，按照式(1-5)，热流密度就正比于温差 Δt_0 。量热计通常是在制造时校准的，检流计的刻度尺当时即以 W/m^2 或 W/m 给出。

对于不稳态法，不测量 Q 而测量若干计算点处的温度及其随时间的变化。对于准稳态工况，在小毕奥数数的情况下，被测试样的温度实际上沿整个体积是不变的，因而热流可由下式表示：

$$Q = G c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (1-6)$$

式中 G ——试样的质量； c_p ——试样的比热容； $\partial t / \partial \tau$ ——试样的冷却（或加热）速率， K/s 。

在准稳态工况比较法中， Q 是按已知热物性的标准试样的温

度分布确定的。如果小毕奥数的条件不满足，那么式(1-6)中就要引入沿整个体积平均积分的温度值。对于简单几何形状的物体，可求出真实温度值与该物体平均积分温度值相符合的点的坐标[参看式(4-13)]。于是，只要在该点上进行温度测量，那么，就可由式(1-6)求出 Q 。

在对流换热的情况下，热流与加热方式有关，它可以采用跟上述导热过程相类似的关系式加以确定。

这样，若表面加热用电加热器进行（参看图5-3），则可利用式(1-1)和(1-2)确定热流。为了获得大热流，可以把低压直流电直接通过表面（通道壁或管道壁）进行加热。也可以利用交流电。然而，这时应注意，在通道壁面厚度比较小的情况下，这种加热器的热惯性会小到如此程度，以致直流加热和交流加热会有不同的结果。

对于在圆管内流动的液体，只要知道管壁材料的导热系数、管子长度 l 、管子直径 d_1 和 d_2 ，即可求得热流。在管壁没有轴向热损失的情况下，代替式(1-2)，可用下式计算：

$$Q = \frac{2\pi\lambda(\overline{t_{c1}} - \overline{t_{c2}})l}{\ln d_2/d_1} \quad (1-7)$$

可利用式(1-7)计算 Q 的局部值。按此法确定 Q 需知管壁材料的 λ 及其随温度的变化。此外，为了可靠地测定沿管壁厚度的温差 $\Delta t = \overline{t_{c1}} - \overline{t_{c2}}$ ，管壁必须比较厚，因此这种方法称厚壁管法。它也叫做温度梯度法。采用厚壁管可以使试验管的内表面浓集比较大的热流密度。当切断通过管壁的电流时（液态金属），这种方法尤其方便。若要改变热流的方向，就不能用电加热器，而须在管子的外表面用任何一种介质进行冷却。

在用单相液体加热并且没有热损失的情况下，热流可按液体

的质量流量和温差确定（焓差法）：

$$Q = G c_p (t'_x - t'_n) = G (i'_x - i'_n) \quad (1-8)$$

焓差法可以用于液体加热条件下的换热研究，也可用于液体冷却条件下的换热研究。

在用蒸汽凝结的办法来加热表面时，热流可按下列方程计算（凝结法）：

$$Q = G_n (i_n - i_x) \\ = G_n [r + c_{p,n} (t_{n,p} - t_n) + c_{p,x} (t_n - t_{o,x})] \quad (1-9)$$

式中 G_n ——蒸汽的质量流量，kg/s； i_n 和 i_x ——与加热蒸汽和凝结水相应的比焓，J/kg； $t_{n,p}$ ， t_n ， $t_{o,x}$ ——分别为蒸汽的过热温度，以及出口凝结水的饱和温度和过冷温度，K； r ——凝结潜热，J/kg； $c_{p,n}$ ， $c_{p,x}$ ——过热蒸汽和凝结水的定压比热容，J/(kg·K)。

如果热流是从加热表面传给沸腾的液体的（沸腾法），那么它也可按凝结法确定，因为可以把沸腾时生成的蒸汽引到专用的换热器中去凝结，并在该处进行必要的测量。

在研究热辐射和换热器中的换热过程时，可采用上述各个关系式来计算热流。对于专门的课题，还有其他许多不同的确定热流的方法。要测定自喷管流出的等离子体流或气流的热流密度分布，需利用专用的微型量热计。为了测定蒸汽锅炉炉膛中的辐射热流，还研制出一些专用的量热设备。

1-2 温度的测量

表面温度和介质温度一般要用热电偶或电阻温度计进行测量。热电偶的主要优点是简单和通用性。选择热电偶材料时应注意，热电偶所能产生的热电势要大，而在重复加热时，热电偶的特性却又变化不大。此外，还须考虑热电偶工作的温度条件，根

据这个温度条件，可采用各种不同的热电偶材料。最常用的热电偶有铜-康铜热电偶（到350℃）、铜-考铜热电偶（到350℃）、镍铬-考铜热电偶（到800℃），以及镍铬-镍铝热电偶*）（95%Ni + 5%Al，到900~1000℃）。带有铜热电极的热电偶，因为铜会迅速氧化而只能应用于不高的温度下。短时间工作时，上述极限工作温度可以略为提高一些。

在用贵金属做的热电偶中最常用的是铂-铂铑热电偶。这种热电偶的一个热电极是由纯铂做成的，另一个热电极则由铂铑合金（90%铂，10%铑）做成；其极限温度是1300℃，而在短时间加热的情况下可达1600℃。还采用两个热电极都由铂铑合金配制成的热电偶。这种铂铑合金热电偶比铂-铂铑热电偶有一些优点。铂铑合金的熔点超过1800℃，因而铂铑-铂铑热电偶所能测量的温度达1800℃。此外，这种热电偶对杂质也比较不敏感。

要测量更高的温度须利用高熔点的金属，诸如钨（3380℃）、铼（3167℃）、钽（3000℃）。铼的特点是脆性大、硬度高，它很难拉成细丝，因而为了配制热电偶，往往采用由上述各种金属组成的合金。例如，由钨和铼组成的合金就有较好的韧性，容易拉成细丝，也容易焊接。在1000~2000℃温度范围内，钨-钨铼（铼占26%）热电偶的热电势为 $16.2\mu\text{V/K}$ ，而钽-钨铼热电偶的热电势则为 $13.6\mu\text{V/K}^{[1-3]}$ 。

自动装置中心试验室的热电偶是用含铼5%的钨铼合金和含铼20%的钨铼合金配制的（BP5/20），它在2000℃温度下的灵敏度为 $11\mu\text{V/K}$ ；BP10/20热电偶在2000℃温度下的灵敏度为 $7\mu\text{V/K}$ 。这类热电偶可用于以下一些场合的温度测量：氩、氦、氢介质中，真空中，带有煤灰或陶瓷粉尘的介质中，与钛、钼、

*）我国现在已用镍硅电极代替镍铝电极而组成镍铬-镍硅热电偶。——译者注

硬质合金、石墨相接触的场所，以及在振动和高速条件下。采用含1.78%镍的铜合金导线作为 BP5/20 热电偶的补偿导线，而对于BP10/20 热电偶则用铁丝-铜丝副作补偿导线。

钨(99.95%) - 铼 (99.9%)热电偶可以在氦介质中稳定地工作，其工作温度可一直到2000℃。

正确测量温度的必要条件是在温度测点处热电偶跟被测材料试样（固体表面）可靠地接触。热电偶指示精度与它在试样上的固定方式有关。

热电偶丝的直径为 0.2~0.5mm，有时达 1mm。为了测量核反应堆中的温度，应采用小型热电偶，其偶丝的直径要小得多。采用小直径热电极的热电偶可以减小温度测量误差，因为它们的热容小，实际上不会使布置热接点区域内的温度场发生畸变。然而，热电偶丝比较细，机械强度也就比较低，尤其是在高温下、热电极变脆时就更是如此。测量用的热电偶，其热电极直径可以小些；而控制用的热电偶，其热电极直径则要大些^[1-4]。

在高温下对大多数热电偶来说，最好是工作在惰性介质（氦、氮等）氛围中。用作电绝缘的材料是极其多种多样的，如石英毛细管、单孔道和双孔道细陶瓷管（至1000~1200℃）、双孔道氧化铝或氧化铍针管（至 3000℃）、卡普隆套管、玻璃纤维套管（至 500℃）等。还采用薄壁金属管做保护套。热电偶丝的材料必须高度均匀，其直径沿长度方向须保持恒定不变。

为了消除内应力，除了工厂的热处理之外，热电偶丝还应再行退火。这种退火是这样进行的：在温度接近于热电偶最大工作温度的情况下通电几小时。在高温下，退火应在真空电炉中于惰性介质氛围下进行。

选择热电偶时应注意，热电偶材料的导热系数必须接近于所测试材料的导热系数。这是因为要求沿热电偶热电极散出的热量

比起计算热流来必须小到可以忽略不计，在研究保温材料时，这一点尤其重要。为了避免温度指示畸变，热电偶的热电极应沿着等温面布置。

必须注意，在热电偶的热接点处，由于两个热电极的导热系数不同可能产生温度场的不均匀性。适当选择热电极的直径可消除这类误差。

热电偶的热电极用钎焊或熔焊的办法连接起来。用锡、银及其他金属作焊料。

热电偶的热电极接到转换开关。所有的热电偶可以有一个共同的冷接点，也可是每副热电偶都有自己单独的冷接点。冷接点必须保持恒温，也就是保持恒定不变的温度。

为了精确测量温差，采用差接式多接点热电偶^{*)}。它们是若干副串联的热电偶组。偶数接点联成一束，奇数接点联成另一束。接点应有电绝缘。

热电偶的热电势用电位差计、检流计、毫伏表进行测量。采用精度等级为 0.5 级的 ЭПП-09-M1 型自动电子仪表等可以同时测量并记录若干点的温度值。

电阻温度计 这是所有温度计中最精确的一种，因为测量电阻的方法已经进行了充分的研究，精确度可以很高。这类温度计还具有较高的机械强度和相当高的灵敏度，它们还可以像热电偶那样用于宽广温度范围内的温度测量。电阻温度计要用电阻随温度的变化而有很大变化的材料做成。属于这类材料的有：铂（至 660℃）、铜（至 200℃）、铁（至 150℃）。在高温下要用钨，其特点是机械强度高。作为铂的代用品，可以应用合金 ЦНИИЧМ-3661，以及由碳质电阻作成的电阻温度计。采用特殊涂层（漆、

^{*)} 即差动式热电偶。——译者注

耐热胶合剂等),以减弱高温下的氧化过程。测量气流的温度时,要把电阻温度计感温元件固定在温度计的支座上,固定的方法有:夹持、超声波焊接或电容焊接。工业用电阻温度计的电阻约为 $45\sim 50\Omega$ 。用电阻温度计测量各单独区段或空间的平均温度特别方便。温度计的电阻是用电位差计法测定的。

测量高温可以用光学高温计。固体温度的测量是在小直径的深孔中进行的,这时物体的黑度应是已知值。

温度的测量问题已有许多专门文献作了论述^{[1-3][1-4]}。

热电偶的检定 用热电偶测量温度时,为了得到可靠的结果,不仅需要在用之前对热电偶预先进行检定*,而且需在使用过程中对这种检定进行定期校验。

热电偶的检定要在专门的机构中或者直接在实验室条件下进行。这种检定就是把所配制的热电偶的指示值跟标准温度计(电阻温度计)的指示值进行核对。在低温下也可以用标准水银温度计进行检定。

热电偶的检定条件和它今后的工作条件在以下几方面应该相同:热电偶的插入深度、冷接点温度及测量仪表的精度等级。在用检流计作测量仪表的情况下,检定时热电偶电路中的电阻和测量时热电偶电路中的电阻,两者在数值上应保持不变。热电偶的检定应在若干个不同的温度下进行,这些温度应包括整个所研究的温度范围。根据检定的数据编制出热电偶的热电势跟温度之间的关系对照表、图线或近似计算公式。检定实验的数据应与标准热电偶给出的数据相比较。

电阻温度计的检定 这种检定要由专门的机构进行。在实验

* 热电偶检定工作一般包括分度前的准备、分度和数据处理这三个步骤。——译者注

室条件下只能定期校验温度为 0°C 时的电阻 $R_0^{(1-7)}$ 。

1-3 流量、流速和压力的测量

通过工作段的液体的质量流量，在大多数情况下可以用质量法（体积法）或节流圈（节流孔板）进行测量。第一个方法是称量在任意给定时间间隔内所装满的液体量。可以用计量容器测量液体的体积。这个方法很简单，但只有在液体的质量流量不很大时才推荐使用。测量大流量需要有大的容器，因而一般测量大流量时都采用孔板。

质量流量的测量 用孔板测量液体的质量流量就在于计量压降。孔板是一种节流装置。液体流过孔板时，流速增加，静压下降。压降用差压计测量，差压计跟孔板前后管壁或通道壁上的开孔相连通。取静压的开孔，直径要小，边缘要圆，并且要严格垂直于管壁表面。静压降跟流量的关系如下：

$$G = c\sqrt{\rho(p_1 - p_2)} \quad (1-10)$$

式中 ρ ——液体的密度， kg/m^3 ；系数 $c = f(\text{Re})$ ，由校准实验确定； Re ——雷诺数。

孔板前后须有直管（通道）段，其长度为直径的30~40倍。

以亚声速高速流动的气体，其流量可以按通过喷管临界截面绝热流动的公式进行计算。液态碱金属的流量可用电磁流量计进行测量。

流速的测量 液体或气体在计算截面上的流速可以根据质量流量或者根据用普朗特管（трубка Прандтля）（见图5-23）测量的动压数据确定。如果沿通流截面运动的速度是变化的，就须测量沿该截面的速度分布，绘出速度分布图，并由此求得平均流速。普朗特管通常是在流速实际上恒定不变的截面上，沿通道或管道中心线装设的。