

● 高等学校教学用书 ●

传 热 学

(第 2 版)

周筠清 编

G AODENG
XUEXIAO
JIAOXUE
YONGSHU

冶金工业出版社

高等学校教学用书

传 热 学

(第2版)

北京科技大学 周筠清 编

北 京
冶金工业出版社
1999

图书在版编目(CIP)数据

传热学/周筠清编. - 2 版. - 北京:冶金工业出版社,
1999.5.

高等学校教学用书

ISBN 7-5024-2275-7

I. 传… II. 周… III. 传热学-高等学校-教学参考资料
IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 12109 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 程志宏

北京市顺义兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1989 年 10 月第 1 版; 1999 年 5 月第 2 版; 1999 年 5 月第 3 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 22 印张; 519 千字; 341 页; 4001-5500 册

29.50 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64013877

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010)65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

第 2 版前言

本书是在 1989 年出版的《传热学》基础上经过修改和增加部分内容修订完成的。

本次再版除保持原书的特点,如加强不稳态导热部分,对各类边界条件下材料(钢材)加热计算作了较详细的阐述;加强了数值计算内容;适当增强了辐射换热部分,对具有吸收-透过性介质的炉内换热进行了初步分析之外,为适应当前教学改革,扩大专业面的要求,这次再版增加了相变传热部分,主要讲述凝固传热、凝结和沸腾换热,为专业扩展提供热物理基础知识。本次再版还增加了有关传质的内容。

全书共分为 11 章,前 8 章与第 1 版基本相同。第 9 章为相变传热,第 10 章为传热过程和热交换器,第 11 章为传质原理。本次再版修改了第 1 版每章后的例题、小结、复习题和习题。

本书采用法定计量单位和符号及新国际规定的物理量名称。

本次再版由北京航空航天大学王丰教授,北京科技大学张欣欣教授审阅并提出了宝贵意见,编者特此向他们表示感谢。

限于水平,书中错误和不妥之处,望读者批评指正。

编 者

1998.6

前 言

本教材是根据原冶金部 1988~1990 年高等院校教材出版规划,在北京科技大学校内讲义《传热学》的基础上修改编写成书的。

目前,“传热学”教材较多,但对于以工业窑炉为主要专业方向的冶金热能工程专业来讲还不能完全适用。为适应专业的需要,在教学实践的基础上,编写了《传热学》讲义。该讲义编写后由孙鸿宾、俞昌铭审阅,并经五届教学实践证明,效果较好。

与其他教材相比,本教材中加强了不稳态导热部分,对各类边界条件下材料(钢材)加热计算作了较详细的阐述;为增强学生对电子计算机的应用能力,加强了数值计算内容;为进行炉内高温换热分析,适当增强了辐射换热内容,对具有吸收-透过性介质的炉内换热进行了初步分析;此外,在传热过程部分中增加了蓄热室原理和计算。

全书共分为 9 章,第 2、3、4 章为稳态导热,第 5 章为不稳态导热,第 6、7 章为对流换热,第 8 章为辐射换热,第 9 章为传热过程和换热器。为便于学生自学,每章后都有例题、小结、复习题和习题。

在这次正式出版审稿中东北工学院、昆明工学院、重庆大学、华东冶金学院等院校的老师都提出了宝贵的修改意见,特此向他们表示感谢。

本书采用我国法定计量单位,并附有法定单位和工程单位的换算表。

本书可作为大专院校热能工程专业本科教材,授课时间约 70 学时,也可供从事工业窑炉热工、热能合理利用等工作的工程技术人员参考。

限于水平,书中错误和不妥之处,望读者批评指正。

编 者

1988.7.1

主要符号表

a 热扩散率, m^2/s
 A 辐射吸收率; 肋片截面积, m^2
 c 质量热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
 C 辐射系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$
 d 直径, m
 D 透过率
 E 辐射力, W/m^2
 f 截面积, 肋的纵剖面积, m^2
 F 面积, m^2
 g 重力加速度, m/s^2
 h 高度, m
 I 辐射强度, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr})$
 J 有效辐射, W/m^2
 k 辐射减弱系数
 K 传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
 l, L 长度, m
 p 压力, Pa
 q 热流密度, W/m^2
 q_v 热源强度, W/m^3
 Q 热量, J
 r 半径, m ; 汽化潜热, J/kg
 R 半径, m ; 热阻, $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$; 反射率
 S 厚度, m
 t 温度, $^{\circ}\text{C}$
 T 热力学温度, K
 U 周长, m
 V 容积, m^3
 w 速度, m/s
 α 对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
 α_v 体胀系数, K^{-1}
 δ 厚度, m
 ϵ 发射率; 系统发射率; 换热器的效能; 修正系数
 θ 过剩温度, $^{\circ}\text{C}$
 λ 热导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; 波长, μm
 μ 动力粘度, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$
 ν 运动粘度, m^2/s

ρ 密度, kg/m^3
 σ 表面张力, N/m ; 辐射常数
 σ_0 黑体辐射常数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$
 τ 时间, s
 ω 立体角, sr ; 炉围开展度
 φ 角系数
 Φ 热流量, W

传质部分

c 物质的量浓度(摩尔浓度), mol/m^3
 D 质扩散率, m^2/s
 m 质流通量, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$
 M 摩尔质量(克分子量), kg/mol
 M_r 相对分子质量(分子量)
 n 物质的量(摩尔数), mol
 N 物质的量通量(摩尔通量), $\text{kmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$

特征数

雷诺数 $Re = \frac{wl}{\nu}$
 欧拉数 $Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2}$
 普朗特数 $Pr = \frac{\nu}{a}$
 贝克来数 $Pe = RePr = \frac{wl}{a}$
 傅里叶数 $Fo = \frac{a\tau}{S^2}$
 努塞尔数 $Nu = \frac{al}{\lambda}$
 毕渥数 $Bi = \frac{al}{\lambda}$
 格拉晓夫数 $Gr = \frac{gl^3\beta\Delta t}{\nu^2}$
 施密特数 $Sc = \frac{\nu}{D}$
 路易斯数 $Le = \frac{a}{D}$
 舍伍德数 $Sh = \frac{\beta l}{D}$

目 录

主要符号表

1 绪 论	1
1.1 导热	1
1.2 对流	2
1.3 热辐射	2
2 热传导的基本概念和方程	6
2.1 热传导的基本概念	6
2.2 傅里叶定律	8
2.3 热导率	9
2.4 导热微分方程式	11
小 结	15
复 习 题	15
3 一维稳态导热	16
3.1 平壁的导热	16
3.2 圆筒壁的导热	22
3.3 肋壁的导热	25
3.4 有内热源的稳态导热	31
3.5 接触热阻	34
小 结	36
复 习 题	36
习 题	36
4 二维稳态导热	39
4.1 二维稳态导热的分析解法	39
4.2 二维稳态导热的数值解法	43
4.3 计算机解题介绍	53
小 结	55
习 题	56
5 不稳态导热	58
5.1 不稳态导热的基本概念	58
5.2 恒温介质中无限薄材的加热(集总参数法)	60
5.3 求解导热微分方程的定解条件	65
5.4 第一类边界条件:表面恒温 and 等速加热	67
5.5 第二类边界条件:恒热流加热	81
5.6 第三类边界条件:恒炉温对流加热	84
5.7 二维、三维不稳态导热的计算	90
5.8 实际物体的加热计算	94

5.9 不稳态导热的数值计算	99
小 结	115
复 习 题	116
习 题	116
6 对流换热原理	119
6.1 对流换热概述	119
6.2 对流换热的数学描写	121
6.3 边界层对流换热微分方程组的建立	125
6.4 边界层积分方程组的建立和求解	129
6.5 动量与热量传递的类比	142
6.6 相似理论在对流换热上的应用	150
小 结	153
复 习 题	154
习 题	154
7 对流换热的计算	155
7.1 管槽内受迫对流换热的特征数方程式	155
7.2 外掠圆管流动换热的特征数方程式	159
7.3 大空间自然流动换热的特征数方程式	162
7.4 有限空间自然流动换热的特征数方程式	164
小 结	167
复 习 题	167
习 题	167
8 辐射换热	169
8.1 热辐射的本质和基本定义	169
8.2 绝对黑体的辐射规律	175
8.3 实际物体的辐射性能	183
8.4 辐射角系数	192
8.5 物体间的辐射换热计算	203
8.6 有遮热板的辐射换热	217
8.7 关于炉温和热电偶温度	219
8.8 孔隙中的辐射换热	222
8.9 气体辐射	224
8.10 具有吸收-透过性介质时的辐射换热	233
小 结	238
复 习 题	240
习 题	241
9 相变传热	246
9.1 凝固传热	246
9.2 凝结换热	263

9.3 沸腾换热	272
9.4 热管工作原理	282
小 结	283
复 习 题	284
习 题	285
10 传热过程和热交换器	287
10.1 复合换热	287
10.2 通过平壁、圆筒壁、肋壁的传热	288
10.3 增强传热	294
10.4 换热器	297
10.5 蓄热室	310
小 结	317
复 习 题	318
习 题	318
11 传质原理	320
11.1 概述	320
11.2 扩散传质	321
11.3 对流传质与传质系数	326
小 结	328
复 习 题	328
习 题	328
附 录	329
参考书目	341

1 绪 论

传热学是研究具有不同温度的物体间或物体内部温度不同的部分间热量传递规律的一门科学。

凡存在温度差的地方,就有热量由高温物体传到低温物体的现象。由于在自然界和生产过程中,温差总是存在的,因此,传热现象就成为自然界和生产领域中非常普遍的现象。

大家知道,热力学是研究体系从一种平衡状态变为另一种平衡状态时体系的能量变化。但它不能指出这一变化过程的快慢。而传热学能够确定由于温度不平衡所引起的热量传递速率以及系统内部的温度分布。这是研究传热学要解决的问题。

传热学在各个工业部门应用十分广泛。例如,提高各类锅炉及其换热设备的能力;化工生产中所要求的温度环境;快速冷却和加热技术;建筑部门的采暖、通风、隔热措施;电子工业中各种元件的散热;原子能、火箭冷却技术的应用;以及太阳能、地热等的应用,都需要传热学的知识。

冶金工业生产是一种高温工艺过程,从炼铁、炼钢、轧钢到热处理等等都与传热现象密切相关。传热过程对提高生产率、产品质量和降低消耗指标都具有重要的影响。尤其在当前能源紧张,大力开展各工序节能研究中,深入学习传热学的基本原理是开展各项节能研究的基础。因此,传热学是热能与动力工程专业的重要技术基础课。

概括来讲,工程中要求解决的传热问题可以划分为两大类,一类要求增强传热,即加速加热和冷却过程,这往往是提高生产率的关键;另一类是要求减缓传热过程,如减少散热损失,降低能耗,改善劳动条件等等。这两方面的工作都是为了达到同一目的,就是提高产量,降低消耗,多快好省地完成生产过程。学习传热学的目的就是要了解传热的基本规律,掌握控制传热过程的知识,为解决上述问题打下牢固的理论基础。

工程上传热现象是相当复杂的。对于各种复杂的传热现象按其物理本质都可以分解为三种不同的基本传热方式,即:热传导、对流和辐射。本课程的主要内容是介绍这三种传热方式的基本规律和计算方法,并在此基础上介绍复合传热和传质方面的基本规律。下面分别介绍三种传热方式的物理本质。

1.1 导热

导热(又称为热传导)是指物体内部温度不均或者温度不同的物体相互接触时,由于物体内部微观粒子、分子或原子直接交换能量,而实现从高温向低温处的热能转移过程。无论是气体、液体和固体只要在其内部有温差存在就会发生导热现象。例如,把铁棒的一端放在火中,由于铁棒具有良好的导热性能,另一端会很快地被加热。又如,用手摸冷的东西感到凉,这就是手的热能传给冷的物体的结果。

单纯的导热只能发生在密实的固体中。因为,在地球引力场的作用下,当有温差时液体和气体就会出现对流现象,难以保持单纯的导热。对于平壁,如果壁两侧的温差为 Δt ,壁厚为 S ,壁的热导率为 λ 时,通过表面积为 F 的平壁导热量用下式计算

$$\Phi = \frac{\lambda}{S} \Delta t F$$

上式还可以写成

$$\Phi = \frac{\Delta t}{\frac{S}{\lambda F}}$$

与电学中的欧姆定律比较,温差相当于电位差;热阻 $R_t = \frac{S}{\lambda F}$ 相当于电阻。这样,就得到了传热学中重要的概念——热阻。热阻的概念在传热学中应用非常广泛。大部分的传热问题可以归结为求解传热过程中的热阻。这将在下面各章中详细分析。

1.2 对流

依靠流体的运动,将热量由高温处传递到低温处的现象,称为对流。在对流过程中,单位时间通过单位面积的流体质量 $m / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ 由温度 t_1 流至温度 t_2 处所传递的热量为

$$q = mc_p(t_1 - t_2)$$

式中 c_p ——质量定压热容。

在工程上常遇到的传热问题,大都是流体与固体壁面接触时的传热。在这种情况下,传热过程就不单有流体的对流作用,还有导热作用。我们把这种导热和对流同时存在的传热过程称为对流换热。对流换热是一个受许多因素影响的复杂过程,它的基本计算式是牛顿在 1701 年提出的,称为牛顿冷却公式,即

$$\Phi = \alpha(t_w - t_f)F$$

式中 t_w ——固体表面温度;

t_f ——流体温度;

α ——称为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。它的大小反映了对流换热的强弱。

利用热阻概念,可将上式改写为

$$\Phi = \frac{\Delta t}{\frac{1}{\alpha F}} = \frac{\Delta t}{R_a}$$

式中 $\frac{1}{\alpha F}$ ——称为对流换热热阻, $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

1.3 热辐射

热辐射的本质与对流和导热有本质的区别。热辐射是依靠物体表面发射电磁波而传递热量的。每平方米物体表面每秒向半球空间所有方向发射出的全部波长的辐射能量称为辐射力 E , 其单位为 W/m^2 。理论和实践都证实,辐射力 E 与物体表面热力学温度的四次方成正比,即

$$E = C \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

式中 C ——辐射系数,单位是 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。辐射系数的大小取决于材料表面的性质及状态,其数值处于 0~5.67 之间;

T ——物体表面的热力学温度, K 。

在辐射换热过程中,不仅有热量的传递,而且伴随着能量形式的转化,即物体的内能—电磁波能—物体内能。辐射换热不需要直接接触,并且低温物体同样向高温物体辐射,辐射换热的结果是低温物体得到了热量,高温物体失去热量。

对于两个相互辐射的无限大平板,如果各自表面温度均匀,分别为 T_1 和 T_2 ,并且 $T_1 > T_2$,则单位时间通过单位面积两表面间辐射换热量的计算式是

$$q = C_{1,2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

式中 $C_{1,2}$ ——称为辐射系数,它取决于换热表面的材料和状态,一般在 $0 \sim 5.67 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 之间。

导热、对流换热、热辐射是传热最基本的方式,任何复杂的传热现象都是由这三种方式组成的。根据不同的具体条件,它们在传热过程中所占的主次可能是不同的,所以学习传热学首先要掌握这三种基本传热方式的规律,然后在这个基础上学习复合传热的有关问题。

学习传热学的方法是要着重物理概念的理解,掌握三种传热方式的基本规律和基本计算方法,多作练习,综合运用,提高分析问题的能力。本书各章后都附有小结,该小结概括了学习本章的主要内容和要求,可结合复习题一起学习。

本书采用我国法定计量单位。我国法定计量单位包括国际单位制的基本单位和辅助单位、国际单位制中具有专门名称的导出单位以及国家选定的非国际单位制单位等等。我国法定计量单位采用的国际单位制的基本单位是:

长度——米, m;

质量——公斤, kg;

时间——秒, s;

温度——开尔文, K。

但在传热计算中,凡属于温度差,均采用摄氏温度 $^{\circ}\text{C}$ 作为温度单位(摄氏度是国际单位制中具有专门名称的导出单位)。

力、压力、应力、能量、功率等的单位采用国际单位制中具有专门名称的导出单位,它们是:

力——牛顿, $\text{N}(\text{m} \cdot \text{kg}/\text{s}^2)$;

压力、应力——帕斯卡, $\text{Pa}(\text{N}/\text{m}^2 \text{ 或 } \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2))$;

能量、热量、功量——焦耳, $\text{J}(\text{N} \cdot \text{m} \text{ 或 } \text{m}^2 \cdot \text{kg}/\text{s}^2)$;

功率、辐射通量——瓦特, $\text{W}(\text{J}/\text{s})$ 。

由于目前传热学中采用工程单位制还比较多,因此还必须熟悉两者的换算关系。在传热学中常用的工程单位制的基本单位和导出单位是:

长度——米, m;

重量——公斤力, kgf;

时间——秒, s;

温度——摄氏度, $^{\circ}\text{C}$;

质量—— $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$;

压力、应力—— kgf/m ;

热量——千卡, kcal;

能量——公斤力·米, $\text{kgf} \cdot \text{m}(1 \text{kcal} = 427 \text{kgf} \cdot \text{m})$;

功率——千瓦, kW。

国际单位制和工程单位制的基本换算关系为

表 1-1 常用单位换算表

物理量名称	符号	换 算 系 数			
		国际单位制	米制工程单位	英制工程单位	
压 力	p	MPa, $10^6\text{N}/\text{m}^2$	at, kgf/cm^2	psi, lbf/in^2	
		1	10.1972	145.038	
		0.0980665	1	14.2233	
		0.00689476	0.070307	1	
运动粘度	ν	m^2/s	m^2/s	ft^2/s	
		1	1	10.7639	
		0.092903	0.092903	1	
1st = $10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$					
动力粘度	μ	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2)$	$\text{kgf}\cdot\text{s}/\text{m}^2$	$\text{lbf}\cdot\text{s}/\text{ft}^2$	
		1	0.101972	0.671969	
		9.80665	1	6.58976	
		1.48816	0.151750	1	
热 量	Q	kJ	kcal	Btu	
		1	0.238846	0.94783	
		4.1868	1		
		1.05504		1	
质量热容	c	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$	$\text{kcal}/(\text{kgf}\cdot^\circ\text{C})$	$\text{Btu}/(\text{lbf}\cdot^\circ\text{F})$	
		1	0.238846	0.238846	
		4.1868	1	1	
		4.1868	1	1	
热流密度	q	W/m^2	$\text{kcal}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$	$\text{Btu}/(\text{ft}^2\cdot\text{h})$	
		1	0.859845	0.316992	
		1.163	1	0.368862	
		3.15465	2.71251	1	
热导率	λ	$\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$	$\text{kcal}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$	$\text{Btu}/(\text{ft}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{F})$	
		1	0.859845	0.577789	
		1.163	1	0.671969	
		1.73073	1.48816	1	
换热系数 传热系数	α k	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$	$\text{kcal}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$	$\text{Btu}/(\text{ft}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{F})$	
		1	0.859845	0.176111	
		1.163	1	0.204817	
		5.67824	4.88241	1	
功 率	N	W	kcal/h	kgf·m/s	lbf·ft/s
		1	0.859845	0.101972	0.737562
		1.163	1	0.118583	0.857785
		9.80665	8.433719	1	7.233012
		1.355818	1.165793	0.138255	1

$$1 \text{ N} = \frac{1}{9.81} \text{ kgf} = 0.102 \text{ kgf}$$

或

$$9.81 \text{ N} = 1 \text{ kgf}$$

$$1 \text{ kJ} = \frac{1 \times 1000}{9.81 \times 427} \text{ kcal} = 0.239 \text{ kcal}$$

或

$$4.187 \text{ kJ} = 1 \text{ kcal}$$

$$1 \text{ J/s} = \frac{1 \times 3600}{9.81 \times 427} \text{ kcal/h} = 0.86 \text{ kcal/h}$$

或

$$1.163 \text{ J/s} = 1 \text{ kcal/h}$$

此外, 1 Pa 的单位太小, 国际单位制中还可选用 MPa 作为压力单位。根据上述关系, 则有

$$\begin{aligned} 1 \text{ MPa} &= 10^6 \text{ Pa} = \frac{10^6}{98066.5} \text{ kgf/cm}^2 \\ &= 10.1972 \text{ kgf/cm}^2 \end{aligned}$$

在传热学中, 两种单位制换算所涉及的量不多, 只要记住上述几个常用换算系数, 就可以灵活进行换算了。

其他物理量单位的换算可参看表 1-1。

2 热传导的基本概念和方程

热量从物体中温度较高的部分传递到温度较低的部分,或者从温度较高的物体传递到与之接触的温度较低的另一物体的过程称为热传导(又称导热)。在纯导热过程中不存在物质内部的宏观位移,也没有能量形式的转换。

从微观角度来看,气体、液体、导电固体和非导电固体的导热机理是不同的。气体的导热是依靠气体分子作不规则热运动时相互碰撞实现的。能量水平高的分子与能量水平低的分子相互碰撞,热量就由高温处传到了低温处。在金属导体中有相当多的自由电子,象气体中的分子一样在晶格之间运动。金属导体中的导热主要依靠自由电子的运动来完成。在非导电的固体中导热是通过晶格结构的振动来实现的。这种晶格结构振动的传递在文献中称为弹性波。至于液体中的导热机理有两种观点。一种观点认为定性上同气体相类似,只是情况更复杂些,因为液体分子间的距离比较近,分子间的作用力对碰撞过程的影响也要比气体大得多;另一种观点则认为液体的导热类似于非导体,即主要靠弹性波的作用,近年来的研究结果也支持这一观点。但总的说来,关于导热过程的微观机理目前仍不很清楚。在热传导的学习中我们着重于研究导热的宏观规律。

2.1 热传导的基本概念

2.1.1 温度场

大家知道,发生传热现象的必要条件是在物体内部或系统内部具有不同的温度,也就是说存在温度差。因此研究传热现象首先要研究物体内部或系统内部的温度分布。在某一瞬间物体内部所有各点的温度分布称为温度场。一般地说,温度场是时间和空间的函数,即

$$t = f(x, y, z, \tau)$$

式中 t ——温度;
 x, y, z ——空间坐标;
 τ ——时间。

均匀物体内部的温度场都是连续的温度场,但是如果物体内部有缝隙或物体由材料不同的两部分组成,则在缝隙处或交界面处温度可能发生突变,这时温度场在此处是不连续的。

从上式可以看出,物体内部各点的温度不仅和坐标位置(x, y, z)有关,而且还随时间变化,这样的温度场称为不稳态温度场。

如果温度不随时间变化(即 $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$),则温度场称为稳态温度场。此时该温度场只是坐标的函数,即

$$t = f(x, y, z)$$

物体内部温度分布可以是三个坐标、两个坐标或一个坐标的函数。这样的温度场称为三维、二维或一维温度场。例如, $t = f(x, y, \tau)$ 称为二维不稳态温度场; $t = f(x)$ 称为一维稳态温度场。实际上绝对稳态温度场是不存在的。但是在所研究的时间间隔内温度相对稳定, 则可近似地当做稳态温度场。由于温度不是矢量, 因此温度场也不是矢量场。

2.1.2 温度梯度

我们可以设想物体内部在某一定时刻内有些点具有相同的温度。把具有相同温度的各点相连接就得到等温面。因为在同一点上不可能存在不同的温度, 所以不同温度的等温面是不会相交的。只有穿过等温面的方向才能观察到温度的变化。如图 2-1 所示的 x 方向。

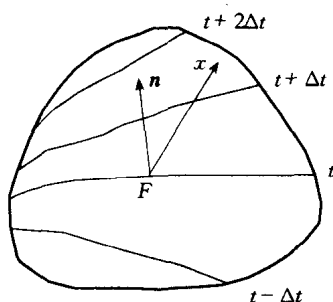


图 2-1 温度梯度的概念

在单位长度上最显著的温度变化是沿着等温面的法线 n 方向。温度差 Δt 与沿法线方向两等温面之间的距离 Δn 的比值的极限, 叫温度梯度, 用 $\text{grad}t$ 表示, 即

$$\text{grad}t = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta t}{\Delta n} \right) = \frac{\partial t}{\partial n} n \quad (2-1)$$

温度梯度是沿等温面法线方向的矢量。它的正方向是朝着温度升高的一面。负的温度梯度称为温度降度。

温度梯度在 x 方向的投影可由下式确定

$$\text{grad}_x t = n \frac{\partial t}{\partial n} \cos(n, x) = \frac{\partial t}{\partial x} i$$

三维空间温度场的温度梯度为

$$\text{grad}t = \frac{\partial t}{\partial x} i + \frac{\partial t}{\partial y} j + \frac{\partial t}{\partial z} k$$

2.1.3 热流密度、热流量、总热量

热流密度是指在单位时间内经过单位面积所传递的热量, 以 q 表示, 单位为 W/m^2 。如果在 $d\tau$ 时间内通过 dF 面积传递的热量为 dQ_τ , 则热流密度表示为

$$q = \frac{dQ_\tau}{dF d\tau} \quad (2-2)$$

热流量是指在单位时间内, 通过面积 F 所传递的热量, 以 Φ 表示, 单位为 W 。

$$\Phi = \frac{dQ_\tau}{d\tau} = \int_F q dF \quad (2-3)$$

热流密度 q 及热流量 Φ 是沿着等温面的法线方向的矢量。它的方向是朝着温度下降的一面。

如果在整个面积 F 上热量传递均匀,或者说通过面上不同点处所传递的热流密度彼此相等并为一常数,则热流量等于热流密度乘以面积

$$\Phi = q \int_F dF = qF \quad (2-4)$$

总热量是指在 τ 时间内通过 F 面积所传递的热量,以 Q_τ 表示,单位为 kJ

$$Q_\tau = \int_0^\tau \Phi d\tau = \int_0^\tau \int_F q dF d\tau \quad (2-5)$$

在稳态导热的情况下,当 F 面上传热均匀时,则总热量等于热流乘以时间,或热流密度乘以面积和时间

$$Q_\tau = \Phi\tau = qF\tau \quad (2-6)$$

2.2 傅里叶定律

法国数学家傅里叶在研究固体导热现象时于 1822 年确定了单位时间内传递的热量 Φ 与温度梯度及垂直于导热方向的截面积 F 成正比,即

$$\Phi = -\lambda \text{grad} t F \quad (2-7)$$

对于单位面积而言

$$q = \frac{\Phi}{F} = -\lambda \text{grad} t \quad (2-8)$$

上述关系式称为傅里叶定律,它已为后来的大量实验所证实。

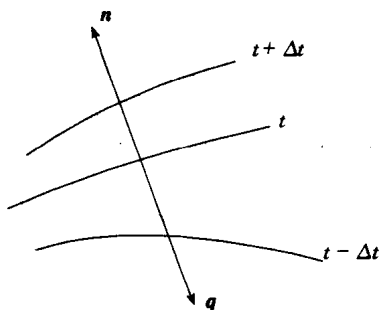


图 2-2 温度梯度和热流密度

式中的 λ 为比例系数,称为热导率,它与物体的材质和温度等因素有关。下面将详细讨论。

热流密度向量是朝着温度降的一面,即与温度梯度的方向相反,所以在公式中出现负号。

热流密度向量在 x, y, z 轴上的投影可由下式确定

$$q_x = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} i$$