

高等学校试用教材

# 传热学

姜为珩 编

745526

745526

TK124/73

高等学校试用教材

# 传 热 学

姜为珩 编

高等教育出版社

## 内 容 简 介

本书是根据国家教委审定的高等工业学校《传热学课程教学基本要求》(40~50学时)为机械制造热加工各专业编写的教材。

全书共七章。内容包括导热、对流、辐射和传热过程的基本原理和计算公式。此外,考虑到机械制造热加工各专业的专业特点,书中重点讨论了导热过程的基本原理,以及第一、第三类边界条件下的稳态和非稳态导热过程的解析解法和数值解法。书中例题力求结合工程实际,各章末有习题,书末有附录和参考文献。全书采用我国法定计量单位。

本书经国家教委热工课程教学指导委员会传热学课程教学指导小组于1988年6月召开的审稿会审订,可作为机械制造热加工各专业及相近专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。

高等学校试用教材

传 热 学

姜为珩 编

\*

高等教育出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

\*

开本 850×1168 1/32 印张 8.625 字数 210 000

1989 年 9 月第 1 版 1989 年 9 月第 1 次印刷

印数 0001—1 690

ISBN7-04-002233-8/TH·201

定价 2.10 元

## 前 言

本书是根据国家教委审定的高等工业学校《传热学课程教学基本要求》(40~50学时)的精神为机械制造热加工各专业编写的教材。

传热学是机械制造热加工各专业的技术基础课。书中讨论了导热、对流、辐射和传热过程的基本原理和计算公式,并针对热加工过程中热传递的特点,比较深入地讨论了导热过程的基本理论,以及第一、第三类边界条件下稳态和非稳态导热问题的解法。全书共分七章,除第一章绪论外,第二至第四章为导热的基本原理、稳态导热和非稳态导热,第五章至第七章为对流换热、辐射换热和传热过程。为了培养学生对专业中所涉及的传热问题的分析能力和计算能力,书中例题、习题力求结合工程实际。此外,书中打有\*号的内容是考虑某些专业的需要和学生课外学习参考而编写的,不属基本要求。

本书初稿由上海机械学院徐昂千教授主审,同济大学梅飞鸣教授复审,并于1988年6月在镇江召开的审稿会上经传热学课程教学指导小组及部分学校代表审订。会上,大家对书稿提出了许多宝贵的意见和建议,在此,编者谨向主审人、复审人、传热学课程教学指导小组的全体委员及参加会议的代表表示衷心的感谢。会后,编者对书稿作了进一步的修改。

由于编者水平所限,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

1988年9月

## 主要符号表

- $a$  导温系数(热扩散系数),  $\text{m}^2/\text{s}$   
 $A$  吸收率  
 $c$  比热容,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$   
 $C$  辐射系数,  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$   
 $C_0$  黑体辐射系数,  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$   
 $d$  直径,  $\text{m}$   
 $D$  直径,  $\text{m}$ ; 穿透率  
 $d_e$  当量直径,  $\text{m}$   
 $E$  辐射力,  $\text{W}/\text{m}^2$   
 $E_\lambda$  单色辐射力,  $\text{W}/\text{m}^3$  或  $\text{W}/(\mu\text{m}, \text{m}^2)$   
 $f$  截面积,  $\text{m}^2$ ; 力,  $\text{N}$   
 $F$  面积,  $\text{m}^2$   
 $g$  重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$   
 $G$  投射辐射,  $\text{W}/\text{m}^2$   
 $H$  高度,  $\text{m}$   
 $J$  有效辐射,  $\text{W}/\text{m}^2$   
 $k$  传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$   
 $l$  长度,  $\text{m}$ ; 特征尺寸,  $\text{m}$   
 $m$  质量,  $\text{kg}$   
 $\dot{m}$  质量流量,  $\text{kg}/\text{s}$   
 $q$  热流密度,  $\text{W}/\text{m}^2$   
 $Q$  热流量,  $\text{W}$ ; 热量,  $\text{J}$   
 $r$  半径,  $\text{m}$ ; 凝固潜热,  $\text{J}/\text{kg}$   
 $R$  半径,  $\text{m}$ ; 热阻,  $^\circ\text{C}/\text{W}$  或  $\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{W}$ ; 反射率  
 $t$  温度,  $^\circ\text{C}$   
 $t_0$  初始温度,  $^\circ\text{C}$   
 $t_f$  流体温度,  $^\circ\text{C}$

$t_w$  壁面温度, °C  
 $T$  绝对温度, K  
 $U$  截面周长, m; 润湿周界, m  
 $V$  体积, m<sup>3</sup>  
 $w$  速度, m/s

\* \* \* \* \*

$\alpha$  换热系数, W/(m<sup>2</sup>·°C)  
 $\beta$  体膨胀系数, K<sup>-1</sup>  
 $\delta$  厚度, m  
 $\epsilon$  黑度  
 $\theta$  过剩温度, °C  
 $\lambda$  导热系数, W/(m·°C); 波长, m或 $\mu\text{m}$   
 $\mu$  动力粘度, kg/(m·s) Pa·s  
 $\nu$  运动粘度, m<sup>2</sup>/s  
 $\rho$  密度, kg/m<sup>3</sup>  
 $\tau$  时间, s  
 $\Omega$  立体角, sr

### 相似准则

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad \text{——毕渥准则}$$

$$Fo = \frac{a\tau}{l^2} \quad \text{——傅里叶准则}$$

$$Re = \frac{wl}{\nu} \quad \text{——雷诺准则}$$

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad \text{——努谢尔特准则}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad \text{——普朗特准则}$$

$$Gr = \frac{g\beta\Delta tl^3}{\nu^2} \quad \text{——格拉晓夫准则}$$

$$Pe = RePr = \frac{wl}{a} \quad \text{——贝克来准则}$$

# 目 录

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| <b>主要符号表</b> .....              | 3   |
| <b>第一章 绪论</b> .....             | 1   |
| § 1-1 传热学的研究对象及在机械加工工业中的应用..... | 1   |
| § 1-2 热传递的基本方式.....             | 2   |
| § 1-3 传热学的研究方法.....             | 5   |
| <b>第二章 导热的基本原理</b> .....        | 6   |
| § 2-1 温度场及温度梯度.....             | 6   |
| § 2-2 傅里叶定律.....                | 9   |
| § 2-3 导热系数.....                 | 10  |
| § 2-4 导热微分方程.....               | 14  |
| § 2-5 导热微分方程的定解条件.....          | 17  |
| <b>第三章 稳态导热</b> .....           | 22  |
| § 3-1 平壁导热.....                 | 22  |
| § 3-2 圆筒壁导热.....                | 29  |
| § 3-3 肋片导热.....                 | 33  |
| § 3-4 二维稳态导热的数值解法.....          | 41  |
| <b>第四章 非稳态导热</b> .....          | 63  |
| § 4-1 非稳态导热的一般概念.....           | 63  |
| § 4-2 对流边界条件下的非稳态导热.....        | 67  |
| § 4-3 恒壁温条件下半无限大物体的非稳态导热.....   | 93  |
| § 4-4 非稳态导热的数值解法.....           | 103 |
| § 4-5 非稳态导热的正规状况.....           | 118 |
| <b>第五章 对流换热</b> .....           | 124 |
| § 5-1 概述.....                   | 124 |
| § 5-2 粘性流体、边界层的概念.....          | 124 |
| § 5-3 牛顿冷却公式及换热微分方程.....        | 132 |
| § 5-4 影响对流换热的主要因素.....          | 134 |

|             |                             |            |
|-------------|-----------------------------|------------|
| § 5-5       | 相似原理                        | 138        |
| § 5-6       | 强制对流换热                      | 151        |
| § 5-7       | 自然对流换热                      | 162        |
| § 5-8       | 沸腾换热和凝结换热的特点                | 166        |
| <b>第六章</b>  | <b>辐射换热</b>                 | <b>172</b> |
| § 6-1       | 热辐射的基本概念                    | 172        |
| § 6-2       | 热辐射的基本定律                    | 177        |
| § 6-3       | 实际物体的辐射特性 灰体                | 187        |
| § 6-4       | 物体之间的辐射换热                   | 191        |
| § 6-5       | 气体辐射和吸收的特点                  | 210        |
| <b>第七章</b>  | <b>传热过程</b>                 | <b>214</b> |
| § 7-1       | 复合换热                        | 214        |
| § 7-2       | 传热过程                        | 218        |
| § 7-3       | 传热温差计算                      | 227        |
| § 7-4       | 热传递的增强、削弱与控制                | 235        |
| <b>附录一</b>  |                             | <b>244</b> |
| 附录 1-1      | 金属的特性数值                     | 244        |
| 附录 1-2      | 非金属的特性数值                    | 249        |
| 附录 1-3      | 常用保温材料及耐火材料的导热系数计算式         | 251        |
| 附录 1-4      | 铸造生产中常用材料的密度、导热系数和比热容       | 252        |
| 附录 1-5      | 典型金属和砂型的热物性量概略值             | 252        |
| 附录 1-6      | 某些造型材料及其混合料的热物性量            | 253        |
| 附录 1-7      | 某些非金属材料的吸热系数和导温系数           | 254        |
| 附录 1-8      | 大气压下烟气的物理参数                 | 254        |
| 附录 1-9      | 大气压下干空气的物理参数                | 255        |
| 附录 1-10     | 饱和线上水的物理参数                  | 256        |
| 附录 1-11     | 几种饱和液体的热物理性质                | 258        |
| 附录 1-12     | 固体材料沿表面法线方向的辐射黑度 $\epsilon$ | 259        |
| 附录 1-13     | 双曲函数值                       | 260        |
| 附录 1-14     | 误差函数值                       | 261        |
| <b>附录二</b>  | <b>对流换热能量方程、Pr 准则的推导</b>    | <b>262</b> |
| <b>参考文献</b> |                             | <b>265</b> |



# 第一章 绪 论

## §1-1 传热学的研究对象及在机械加工工业中的应用

热量总是自发地从高温传向低温，热量传递(亦称热传递)的动力是温度差。传热学是研究热量传递规律的科学，具体地说，传热学的研究内容包括热量传递的方式、温度场的变化规律、传热量的计算以及影响热量传递的因素等。

传热学广泛应用于诸如动力、冶金、建筑、化工、机械、电子、制冷、低温技术以及航空航天技术等工业部门。在机械热加工和冷加工过程中常伴随有热量传递，它对产品质量、生产周期等有很大影响。例如，在铸件浇注过程中，高温铁水在铸型腔内冷却凝固，把凝固热传给铸型。在此过程中，热量传递的强度直接影响铁水的凝固速度，从而影响铸件的质量和生产品期。因此，为了有效地控制铁水的凝固速度，必须研究铸件与铸型间热量传递的规律。又例如，在热处理工艺中，置于热处理炉中的金属材料或成品，经过加热、保温、冷却三者有机配合的过程，使金属材料的金相组织符合要求，从而获得优良的机械性能。具体地说，就是通过炉子的热工操作来控制炉内的热量传递过程，使金属材料得到合适的加热速度、加热温度、保温时间、冷却速度和热处理周期。在机械制造工艺中，由机床、夹具、刀具、工件组成的工艺系统，在加工过程中经历了冷态——热态——冷态的变化，出现所谓“热变形”，这将对加工精度产生重要影响。例如，磨削平面时磨削热使平面的中部上

凸,于是加工时(热态)已经削平的平面冷却后(冷态)却出现平面中部下凹。随着科学技术的发展,对加工精度的要求愈来愈高。有关资料表明,在精密加工中,由于工艺系统热变形引起的加工误差占总加工误差的40~70%。为了减少热变形,提高加工精度,必须分析研究加工中发热的热源、热量的传递、热变形的情况以及减少热变形的对策,等等。因此,研究工艺系统的热传递与热变形是机械制造业的一个重要课题。但是,传热学作为一门技术基础课程,将主要介绍有关热传递的基础知识,而生产中遇到的各种与热传递有关的课题不可能一一在传热学课程中加以讨论。传热学课程的主要任务是,为学生学习专业课程准备必要的理论基础,使学生对与专业有关的热传递问题具备一定的分析和计算能力,并为以后接受专业发展中有关的新理论、新工艺打下基础。

## § 1-2 热传递的基本方式

工业生产及日常生活中的热传递现象是多种多样的,但就其物理本质而言,可分为三种基本方式,即导热(热传导)、对流和热辐射。下面对这三种基本方式作一简单的介绍。

### 一、导热

导热是指物体内部或直接接触的物体之间的热量传递过程。例如,加热铜棒的一端,铜棒的另一端不久也将热起来,这是物体内部导热的最简单的例子。导热也可以发生在两个物体的接触处,此时热量从高温物体的边界进入与之接触的低温物体中。例如,用手握住加热了的铜棒,热量将以导热方式从铜棒传到手中。导热的物理本质是物体的分子、原子以及自由电子等微观粒子的热运动。因此,导热可以在气体、液体和固体中发生。

### 二、对流

用烧杯加热水时(如图 1-1所示),杯底水的温度高、密度小,作

上升运动,把热量带往上部;上部水的温度较低、密度较大而下降,在杯底获得热量后又作上升运动。这样,热量就从杯底传给了杯内的水,使全部水变热。我们把流

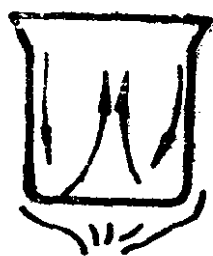


图 1-1 用烧杯加热水

体内部各部分之间发生相对位移而引起的热传递过程称为对流。如烧杯中冷、热水之间相对运动的同时传递了热量,这种方式就是对流。必须指出,对流与导热的区别在于,对流所指的流体各部分间的相对位移,是指流体微团(分子群)之间的宏观相对运动,而流体的导热是由流体分子杂乱无章的热运动引起的。对流的流体速度是指流体微团的定向运动速度,而不是指单个分子的热运动速度。不过,流体中发生对流时总伴随有导热,只有静止的气体、液体才能单独出现导热,但一般少见。在传热学中,流体流过固体壁面时所发生的热传递过程称为对流换热,例如,图 1-1 中烧杯底与水之间的热传递过程就是对流换热。

对流换热的基本公式——牛顿冷却公式(或称牛顿冷却定律的表达式),用以计算流体与固壁间的对流换热量:

$$Q = \alpha F (t_w - t_f) \quad (1-1)$$

式中:  $Q$ ——对流换热热量, W;

$F$ ——对流换热面积,即流体与固壁接触面积,  $m^2$ ;

$t_w$ ——壁面温度,  $^{\circ}C$ ;

$t_f$ ——流体温度,  $^{\circ}C$ ;

$\alpha$ ——比例系数,称为对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ 。

单位时间内单位面积传递的热量称为热流密度,用  $q$  表示,  $q = Q/F [W/m^2]$ 。用  $q$  表示时,牛顿冷却公式写为

$$q = \alpha (t_w - t_f) \quad (1-2)$$

### 三、热辐射

在工厂里，我们站在高温工业炉旁边感到很热，这是由于炉壁对人体辐射热量的缘故。辐射是物质中的分子或原子受到某种能量的激发而向外辐射能量的现象。辐射能以电磁波的方式传递。因此，人们把物体通过电磁波方式传播能量的过程称为辐射。如果分子或原子激发的原因是物体的温度，并且辐射的特性与温度有关，则我们把这样的辐射称为热辐射。物体不论温度高低都会进行热辐射，且辐射能量的多少与其绝对温度的四次方成正比。互相辐射的物体之间并不需要接触，例如我们不用接触到炉壁就会受到它的辐射。但是，导热、对流则不同，参与换热的物体（或物体与流体）之间必须接触，否则热量无法传递。热辐射的另一特点是，能量的传递不用借助于媒介物，即使在真空中也能传递。在我们掌握了热辐射的这些特点以后，就容易把热辐射与导热或对流区别开来。

### 四、复合换热与传热

导热、对流和热辐射这三种基本传热方式单独出现的情况不多，大多数情况下是同时出现的。凡是由两种以上的基本方式组成的热传递过程称为复合换热。例如，建筑物的采暖就是暖气片通过对流和热辐射两种方式使热量向四周传开，从而提高室温。又如，在铸造生产中，铸件凝固时收缩，在铸件和铸型之间出现一层气体薄层，铸件的热量就是依靠热辐射和气体层的导热而传至铸型，再由铸型传走的。

冷、热两种流体被固壁隔开，热量由热流体经固壁传给冷流体的过程称为传热。例如，冲天炉熔化带外部所敷设的冷却水套以及利用工业炉排气余热的各种加热器等，其中的热传递过程都是传热。

本书将分别讨论各种热传递的基本方式，复合换热和传热的

变化规律、计算公式和影响因素。

### § 1-3 传热学的研究方法

传热学是一门技术基础课程,它的研究方法主要有以下几种。

1. 解析法 所谓解析法,就是对描写热传递过程的方程式用数学分析的方法求解。例如导热问题,在特定条件下,描写导热的傅里叶定律和导热微方程可用数学分析方法求得理论解。近百年来,各种不同条件下导热问题的理论解已积累了大量的文献资料。此外,随着边界层理论不断发展,对流换热问题用解析法求解的范围已愈来愈大。解析法不但能较深刻地揭示问题的物理本质,而且求解的结果具有普遍性。当前,这种方法的求解领域日益扩大,理论体系逐步完善,它的价值是不容低估的。

2. 实验研究法 用解析法求解问题时往往要加入许多简化条件,例如为使问题有解常假设一些量为常数。因此,有些理论解的结果与实际相差较远,而必须通过实验对理论解进行检验和修正。还有一些复杂的热传递问题无法用解析法求解,只能通过实验测定。此外,许多与热传递有关的物理参数,如材料的导热系数、导温系数和黑度等都是通过实验方法测定的。因此,实验方法在传热问题的求解中占有重要地位。

3. 数值解法 数值解法通常需要按一定程序作较冗长、繁杂的计算,但借助于高速电子计算机可使计算快速简便。当前,数值解法已广泛应用于各种换热计算,特别是条件比较复杂而解析法难以解决的问题。本书将介绍导热问题温度场的数值计算。

总的说,传热学的各种研究方法是互相补充、相辅相成的,并且随着科学技术的发展而不断发展和完善。对于初学者来说,只要求了解这些研究方法的实质和要点,而重点在于掌握各种换热的原理、公式的运算和基本的测试技能。

## 第二章 导热的基本原理

导热是热传递的一种基本方式,它发生在物体(包括静止的气体、液体)的内部或直接接触的物体之间。本章主要介绍导热过程的基本原理,即温度场及温度梯度的概念;导热的基本定律——傅里叶定律;导热时温度随时间和空间变化的数学方程——导热微分方程。导热过程的基本原理不但阐明了导热的共性问题,而且也是各种具体导热过程的温度场和传热量计算的基础,这从以后有关章节可以看出。

### § 2-1 温度场及温度梯度

温差是热传递的前提。有了温差,热量就会自发地从高温传到低温,而且传递热量的多少及其传递方向与温度的分布有着非常密切的关系。为此,首先要了解温度分布的情况。我们把某瞬间空间各点的温度分布称为温度场,图 2-1 是平板型铸件凝固时的温度场。一般说,温度场中的温度是空间坐标与时间的函数,即

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (2-1)$$

其中:  $t$  —— 温度, °C;

$x, y, z$  —— 直角坐标;

$\tau$  —— 时间。

各点温度不随时间变化的温度场称为稳态温度场,其数学表达式为

$$t = f(x, y, z) \quad (2-2)$$

具有稳态温度场的导热称为稳态导热。如果温度场中的温度随时

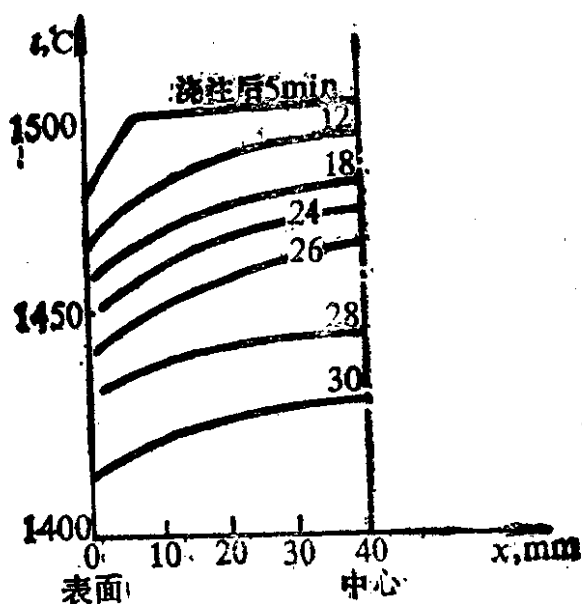


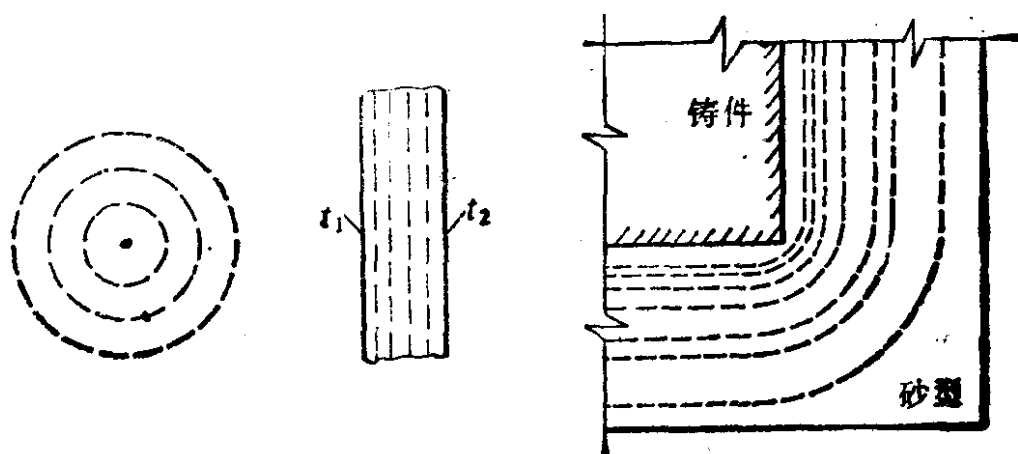
图 2-1 不同瞬间铸件某一截面的温度分布

间变化,则称为非稳态温度场,而具有非稳态温度场的导热称为非稳态导热。以上是按时间划分温度场和导热的类别。

温度场的温度可以沿直角坐标的三个坐标方向、二个坐标方向和一个坐标方向变化,分别称为三维温度场、二维温度场和一维温度场。如果温度场中的温度沿三个坐标方向都不变化,则是温度均匀的温度场,其中没有热传递。以上是按空间来划分温度场。式(2-1)是三维非稳态温度场的数学表达式。最简单的情况是一维稳态温度场,其数学表达式为

$$t = f(x) \quad (2-3)$$

同一瞬间,由温度场中温度相同的点所连成的面称为等温面,等温面与其它任一平面的交线是等温线,不同的等温面与同一平面相交的交线,在此平面上形成一簇等温线。图 2-2 为几种等温线的分布情况:图 2-2a 为点热源(或线热源)附近的等温线分布,它是一组同心圆;图 2-2b 为平板两侧表面温度均匀但不相等时沿平板厚度方向的等温线分布,它是一簇平行线;图 2-2c 为浇注后砂型截面上等温线的分布情况。空间任何一点在同一瞬间不可



(a) 点(或线)热源      (b) 平板      (c) 砂型

图 2-2 几种等温线的分布情况

能有两个或更多的温度值，因此等温面(或等温线)永远不会相交，它们或是完全封闭的曲面(线)，或者终止于物体的边缘。

沿等温面的切线方向没有温度变化，但沿着等温面的法线方向温度变化最显著，参阅图 2-3。两等温面之间的温差  $\Delta t$  与其法线方向的距离  $\Delta n$  的比值的极限称为温度梯度，以  $\text{grad}t$  表示，即

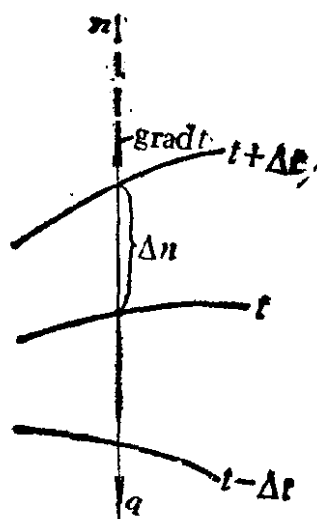


图 2-3 温度梯度与热流方向的关系

$$\text{grad}t = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} \mathbf{n} = \frac{\partial t}{\partial n} \mathbf{n} \quad \text{°C/m} \quad (2-4)$$

可见，温度梯度标志着温度场中温度变化的显著程度。温度梯度是一个向量，方向从低温指向高温，即指向温度增加的方向。负的温度梯度称为温度降度。热传递的方向是从高温指向低温，与温度梯度的方向相反，而与温度降度的方向一致。

温度梯度若以空间直角坐标表示，则有



$$\text{grad}t = \frac{\partial t}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial t}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial t}{\partial z}\mathbf{k} \quad (2-5)$$

式(2-5)是三维温度场的温度梯度表达式。

## § 2-2 傅里叶定律

1882年法国物理学家约瑟夫·傅里叶在实验观察的基础上,对于均匀、各向同性(材料的导热性质各个方向相同)的固体材料确定了导热量与温度梯度成正比的关系,这就是著名的傅里叶定律,其数学表达式为

$$\mathbf{q} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \mathbf{n} = -\lambda \text{grad}t \quad \text{W/m}^2 \quad (2-6)$$

式中:  $\mathbf{q}$ ——热流密度,即单位时间内通过单位面积的导热量,  $\text{W/m}^2$ ;

$\frac{\partial t}{\partial n} \mathbf{n} = \text{grad}t$ ——温度梯度,  $^{\circ}\text{C/m}$ ;

$\lambda$ ——比例系数,称为导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

式中负号表示热流密度  $\mathbf{q}$  的方向与温度梯度的方向相反。傅里叶定律的标量形式为

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \quad \text{W/m}^2 \quad (2-7)$$

今后,我们会常常遇到一维( $x$ 轴方向)温度场的导热问题,其数学表达式为

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad \text{W/m}^2 \quad (2-8)$$

通过整个等温面  $F$  的导热量  $Q = qF$ , 有

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dx} F \quad \text{W} \quad (2-9)$$

以后将会看到,个别简单的导热问题可对傅里叶定律的数学表达式直接积分求解,而对于较复杂的导热问题,则要先确定其温度梯