

高等学校試用教科書

# 传 热 学

(修訂本)

楊世銘 陈大燮 編



中国工业出版社

## 基本符号

<p><math>a</math> 导热系数, <math>\frac{\lambda}{c\gamma}</math>, “(米)<sup>2</sup>/小时”。</p> <p><math>c</math> 比热, “大卡/(公斤)<sup>o</sup>C”。</p> <p><math>C</math> 辐射系数, “大卡/(米)<sup>2</sup>(小时)(<sup>o</sup>K)<sup>4</sup>”。</p> <p><math>d</math> 直径, “米”。</p> <p><math>f</math> 横截面积, “(米)<sup>2</sup>”。</p> <p><math>F</math> 换热面积, “(米)<sup>2</sup>”。</p> <p><math>g</math> 重力加速度, “米/(秒)<sup>2</sup>”。</p> <p><math>G</math> 重量, “公斤”; 或流体的重量流量, “公斤/小时”。</p> <p><math>k</math> 传热系数, “大卡/(米)<sup>2</sup>(小时)<sup>o</sup>C”。</p> <p><math>k_l</math> 通过管壁的长度传热系数, “大卡/(米)(小时)<sup>o</sup>C”。</p> <p><math>l</math> 长度, “米”。</p> <p><math>p</math> 压力, “公斤/(米)<sup>2</sup>”, “公斤/(厘米)<sup>2</sup>”。</p> <p><math>\Delta p</math> 压力差, “公斤/(米)<sup>2</sup>”。</p> <p><math>q</math> 热流量, “大卡/(米)<sup>2</sup>(小时)”。</p> <p><math>Q</math> 热量, “大卡”; 或单位时间内通过的热量, “大卡/小时”。</p> <p><math>r, R</math> 半径, “米”; “<math>r</math>”在集态改变放热中亦作为汽化潜热, “大卡/公斤”。</p> <p><math>s</math> 每单位面积的摩擦阻力, “公斤/(米)<sup>2</sup>”。</p> <p><math>S</math> 力, “公斤”。</p> <p><math>t</math> 温度, “<sup>o</sup>C”。</p> <p><math>T</math> 绝对温度, “<sup>o</sup>K”。</p> <p><math>t_w</math> 壁面温度, “<sup>o</sup>C”。</p>	<p><math>t_f</math> 流体温度, “<sup>o</sup>C”。</p> <p><math>\Delta t</math> 温压, “<sup>o</sup>C”。</p> <p><math>V</math> 容积, “(米)<sup>3</sup>”; 或流体的容积流量, “(米)<sup>3</sup>/(小时)”。</p> <p><math>w</math> 速度, “米/秒”, “米/小时”。</p> <p><math>\alpha</math> 放热系数, “大卡/(米)<sup>2</sup>(小时)<sup>o</sup>C”。</p> <p><math>\beta</math> 容积膨胀系数, “1/<sup>o</sup>C”。</p> <p><math>\gamma</math> 重度, “公斤/(米)<sup>3</sup>”。</p> <p><math>\delta, \Delta</math> 厚度, “米”, “毫米”。</p> <p><math>\epsilon</math> 黑度。</p> <p><math>\zeta</math> 局部阻力系数。</p> <p><math>\theta, \Theta</math> 过余温度, “<sup>o</sup>C”。</p> <p><math>\lambda</math> 导热系数, “大卡/(米)(小时)<sup>o</sup>C”; 在辐射诸章中<math>\lambda</math>亦作波长, “米”。</p> <p><math>\mu</math> 粘度(粘性系数), “(公斤)(秒)/(米)<sup>2</sup>”。</p> <p><math>\nu</math> 动粘度(运动粘性系数), <math>\frac{\mu}{\rho}</math>, “(米)<sup>2</sup>/秒”, “(米)<sup>2</sup>/小时”。</p> <p><math>\xi</math> 摩擦阻力系数。</p> <p><math>\rho</math> 密度, <math>\frac{\gamma}{g}</math>, “(公斤)(秒)<sup>2</sup>/(米)<sup>4</sup>”。</p> <p><math>\sigma</math> 表面张力, “公斤/米”; 在辐射诸章中亦作斯忒藩-玻耳兹曼常数。</p> <p><math>\tau</math> 时间, “小时”, “秒”。</p> <p><math>\omega</math> 立体角。</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### 相似准则

<p><math>Re = \frac{w \cdot l}{\nu}</math>—雷诺准则。</p> <p><math>Pr = \frac{\nu}{a}</math>—普朗特准则。</p> <p><math>Pe = Re \cdot Pr = \frac{w \cdot l}{a}</math>—贝克利准则。</p> <p><math>Nu = \frac{al}{\lambda}</math>—努谢尔特准则。</p> <p><math>Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t</math>—葛拉晓夫准则。</p> <p><math>Ho = \frac{w \cdot \tau}{l}</math>—均时性准则。</p>	<p><math>Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2}</math>—欧勒准则。</p> <p><math>Fr = \frac{gl}{w^2}</math>—弗鲁特准则。</p> <p><math>Ga = Fr \cdot Re^2 = \frac{gl^3}{\nu^2}</math>—伽里略准则。</p> <p><math>Ar = Ga \cdot \frac{\rho - \rho_0}{\rho} = \frac{gl^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho - \rho_0}{\rho}</math>—阿基米德准则。</p> <p><math>Fo = \frac{a\tau}{l^2}</math>—傅里叶准则。</p> <p><math>Bi = \frac{al}{\lambda_w}</math>—毕渥准则。</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

# 目 录

## 基本符号

第一章 緒論	1
§ 1-1 传热的研究对象及其在科学技术上的重要性	1
§ 1-2 换热的基本方式	1
§ 1-3 传热学簡史及展望	2
第二章 导热的基本概念及定律	4
§ 2-1 温度場	4
§ 2-2 傅里叶定律	5
§ 2-3 导热系数	5
§ 2-4 导热問題的数学描写	11
第三章 稳定导热	15
§ 3-1 平壁的导热	15
§ 3-2 圆筒壁的导热	20
§ 3-3 球壁的导热	25
§ 3-4 不规则形状物体的导热	27
§ 3-5 表面温度不均匀时的导热	31
§ 3-6 通过肋片的散热	31
§ 3-7 元体平衡法	38
第四章 对流换热的基本概念	42
§ 4-1 放热过程	42
§ 4-2 放热系数	43
§ 4-3 换热的微分方程式組	43
§ 4-4 换热的单值性条件	47
§ 4-5 边界层的概念	47
第五章 相似理論	50
§ 5-1 相似的概念	50
§ 5-2 相似准则和相似定理	53
§ 5-3 相似理論应用到对流换热的一个实例	54
§ 5-4 常用准则数的物理意义	57
§ 5-5 定性温度和决定性尺度	58
第六章 流体受迫运动时的放热 I ——管内槽内流动	61
§ 6-1 管内流动的特征	61
§ 6-2 湍流时的放热	64
§ 6-3 层流时的放热	67
§ 6-4 过渡状态的放热	69
§ 6-5 液态金属在管内流动时的放热	70
第七章 流体受迫运动时的放热 II ——外掠物体流动	71
§ 7-1 掠过平壁	71

## IV

§ 7-2 横向掠过圆管 .....	73
§ 7-3 横向掠过管束 .....	76
§ 7-4 气体高速流动时的放热 .....	80
<b>第八章 流体自由运动时的放热 .....</b>	<b>85</b>
§ 8-1 流体自由运动的特征 .....	85
§ 8-2 无限空间中的自由运动放热 .....	85
§ 8-3 有限空间中的自由运动放热 .....	91
<b>第九章 流体集态改变时的放热 I——蒸汽凝结 .....</b>	<b>94</b>
§ 9-1 珠状凝结和膜状凝结 .....	94
§ 9-2 膜状凝结放热的综合关系 .....	95
§ 9-3 液膜层流时平均放热系数的综合公式 .....	97
§ 9-4 部分液膜湍流时平均放热系数的综合公式 .....	98
§ 9-5 其他因素对凝结放热的影响 .....	100
<b>第十章 流体集态改变时的放热 II——液体沸腾 .....</b>	<b>104</b>
§ 10-1 沫态沸腾与膜态沸腾 .....	104
§ 10-2 汽泡的形成和成长 .....	105
§ 10-3 大容器内沫态沸腾放热的综合关系 .....	109
§ 10-4 临界热负荷 .....	114
§ 10-5 管内沸腾 .....	116
<b>第十一章 热辐射的基本概念 I .....</b>	<b>118</b>
§ 11-1 热辐射的本质 .....	118
§ 11-2 辐射的吸收、反射和穿透, 绝对黑体 .....	118
§ 11-3 辐射力和辐射强度 .....	119
§ 11-4 朗伯定律 .....	120
§ 11-5 基尔霍夫定律 .....	121
§ 11-6 蒲朗克定律 .....	122
§ 11-7 斯忒藩-玻耳兹曼定律 .....	123
<b>第十二章 热辐射的基本概念 II .....</b>	<b>124</b>
§ 12-1 实际固体和液体的辐射和吸收, 灰体 .....	124
§ 12-2 辐射能在吸收性介质内的传递 .....	126
§ 12-3 气体的辐射 .....	129
§ 12-4 火焰的辐射 .....	134
<b>第十三章 辐射换热 .....</b>	<b>136</b>
§ 13-1 本身辐射与有效辐射 .....	136
§ 13-2 被透明介质隔开的平行平面间的辐射换热, 遮热板 .....	137
§ 13-3 被透明介质隔开的空腔内物体与空腔内壁间的辐射换热 .....	139
§ 13-4 被透明介质隔开的二个黑体任意面积间的辐射换热 .....	140
§ 13-5 辐射换热的几何特征, 角系数的确定方法 .....	142
§ 13-6 气体与外壳间的辐射换热 .....	148
§ 13-7 炉内辐射 .....	151
<b>第十四章 传热和热绝缘 .....</b>	<b>154</b>
§ 14-1 复杂换热 .....	154

§ 14-2	传热	155
§ 14-3	传热的增强	162
§ 14-4	热绝缘	166
第十五章	换热器	168
§ 15-1	换热器的基本原理	168
§ 15-2	间壁式换热器的平均温差	170
§ 15-3	列管间壁换热器的设计	173
§ 15-4	间壁式换热器的验算	181
§ 15-5	最经济换热器的设计及换热器的效率	186
§ 15-6	换热器的模化实验法	187
第十六章	不稳定导热	191
§ 16-1	加热和冷却过程	191
§ 16-2	数学解法的概念	192
§ 16-3	有限差值图解法	200
§ 16-4	正规状况法的概念	202
附录		206
附录 1	各种不同材料的比重、导热系数、比热和导温系数	206
附录 2	在大气压力 $B = 760$ “毫米汞柱”时干空气的物理参数	208
附录 3	计算气体粘度的 $C$ 和 $\alpha_0$ 的数值	209
附录 4	在大气压力 $B = 760$ 毫米汞柱下烟气的物理参数	209
附录 5	空气的 $\rho$ 和 $\nu$ ; $\rho = f(t, B)$ , $\nu = f(t, B)$	210
附录 6	在饱和线上水蒸汽的物理参数	210
附录 7	在一个大气压或饱和线上水的物理参数	211
附录 8	水和水蒸汽; $\lambda = f(t, p)$	212
附录 9	水银及熔融金属的物理参数	213
附录 10	各种不同液体的热参数	213
附录 11	各种不同液体的导热系数, $\lambda \times 10^2$ “大卡/(米)(小时) $^{\circ}C$ ”	213
附录 12	各种不同材料的黑度(法线方向辐射)	214
附录 13	计算水蒸汽凝结放热系数的一些辅助量计算公式	220
附录 14~17	$\epsilon_{dt} = f(P, R)$	220
附录 18	工业用换热设备里 $\alpha$ 和 $h$ 数值的大致范围	221
附录 19~22	技术上某些重要辐射换热场合的角系数的数值	222
附录 23	双曲线函数	224
附录 24	虚变数的贝塞尔及汉格尔函数	225
参考文献		226

# 第一章 緒 論

## § 1-1 传热学的研究对象及其在科学技术上的重要性

传热学的研究对象是热的传播过程。热力学第二定律指出，只要有温度差存在，热量总是自发地从高温物体传向低温物体。温度差普遍地出现在自然界里，所以热的传播过程是一个很普遍的自然现象。

研究和学习传热学的目的是为生产服务。传热学的工程应用范围是很广泛的。许多隶属于不同工程领域的生产技术都建筑在传热学的基础上。涉及的工程领域包括：动力、建筑、冶金、制冷、机械制造、电工、化工及航空等。其中特别是热能动力部门对传热学的要求更为突出。热能动力设备的设计、制造及运行方面大量地应用着传热学研究所总结出的规律。

应用传热学规律来求解的实际问题不外乎二种类型：第一种类型是力求热传播过程的增强，例如设计最经济的换热设备来完成交换一定热量的任务就属于这个类型；第二种类型是力求热传播过程的削弱，例如减少不必要的热损失就属于这类问题。下面举具体的例子来说明传热学在热能动力部门的重要作用。

先谈力求增强换热的具体例子。按照热力学的理论，热能动力系统包括两个温度不同的热源和一个工作于这两个热源间的热机。在这个系统的工作过程里载热体（介质）常常变换，系统热效率的提高就要求用尽可能小的温差来把热量从一个载热体传到另一个载热体。这里传热学起着决定性的作用。在蒸汽动力厂里热量最初存在于燃气（高温热源）之中。在锅炉里燃气将热传给蒸汽。蒸汽作功后进入凝汽器又把热传给冷却水。冷却水在通过冷却塔时又将热量传给大气（低温热源）。从燃气到大气载热体变换了好几次，处处要应用传热学的规律来处理。内燃机动力厂的情况与蒸汽动力厂不同，没有载热体的变换。燃气直接作功，废气和废热一起排入大气。虽然如此，内燃机的设计和运行还是需要传热学的知识，因为气缸壁必须依靠水或空气冷却保持在安全工作温度之下。热效率高的内燃机气缸的输出功率，在一定程度上取决于气缸壁的有效冷却和废气中热量的利用。燃气轮机动力厂和内燃机动力厂的情况是类似的。燃气轮机的叶片冷却、转子冷却和加强换热器效率是提高燃气轮机效率的重要途径。

其次，再谈第二类型的问题。减少不必要的热损失对热力机械的效率亦有很大的影响。热力学第二定律告诉我们，一定量的热在高温时较低温时作功能力为大。因此蒸汽机汽缸和管道的保温是很重要的事情。此外，社会主义国家很重视高温车间防暑降温改善劳动条件的工作，这和热力设备的热绝缘与保温亦是分不开的。

## § 1-2 换热的基本方式

根据过程物理本质的不同，换热的现象可以区分为三种基本方式：导热的方式、对流的方式和辐射的方式。

导热方式是指直接接触的物体各部分能量交换的现象。在液体和固体介电质中，能量转移主要是依靠弹性波的作用；固体金属则主要依靠自由电子的运动；气体则主要依靠原

子或分子的运动。

对流方式只能在液体和气体中出现。它是指流体各部分发生相对位移而引起的热量交换。对于对流方式，流体的状态和运动的性质是非常重要的因素。对流方式总相伴有导热过程。

辐射是一种由电磁波来传播能量的现象。它与导热和对流方式有着本质上的区别。它不仅产生能量的转移，而且还伴随着能量形式之间的转化；从热能到辐射能，或者相反地从辐射能转化为热能。

不同的换热方式遵循着不同的换热规律，因此分别研究每一种的规律是非常必要的。此外，几种换热方式的常常同时出现，使得实际的换热过程很复杂。以蒸汽锅炉为例，从燃气到沸水管的外表面（烟垢外表面），热量的传播同时具备导热、对流和辐射三种方式；从烟垢外表面通过烟垢层、沸水管的管壁、水垢层到沸水管内表面（水垢内表面）的热量的传递完全依靠导热；最后从水垢内表面到水流就依靠对流及导热。由此可见，实际换热的过程往往是二种或三种基本方式的复杂组合。在实际计算里，对于这一类复杂的过程，有时就给它一些专门名称，把它当作一个整体来看待。例如，把壁面和流体间的对流和导热的总作用叫做“**对流换热**”过程。把热量从一流体穿过间壁传往另一流体的过程叫做“**传热过程**”。

本课程将首先依次讨论三个基本换热方式的规律，其次讨论传热过程的规律，再次讨论这些规律的应用；换热器的计算。在最后一章里将扼要地讨论不稳定导热过程的规律。

### § 1-3 传热学简史及展望

传热学说是从M. B. 罗蒙诺索夫（1760）所奠基的关于热的一般学说的基础上发展起来的。在18世纪和19世纪里，由于蒸汽机，接着是汽轮机和内燃机的相继出现，热学作为物理学的一部分而日益发展起来。它研究了一些普遍的原理，其中也包括着热的传播的各种问题，先后出现了导热，对流换热和热辐射的计算公式。

导热：傅里叶（1822）公式

$$Q = \lambda \frac{F \Delta t}{L} \text{ “大卡/小时”} . \quad (1-1)$$

对流换热：牛顿（1702）公式

$$Q = \alpha F \Delta t \text{ “大卡/小时”} . \quad (1-2)$$

热辐射：斯忒藩（1879）玻耳兹曼（1884）公式

$$Q = \sigma F T^4 \text{ “大卡/小时”} . \quad (1-3)$$

式中  $\lambda$  为导热系数，“大卡/（米）（小时） $^{\circ}\text{C}$ ”；

$\alpha$  为放热系数，“大卡/（米） $^2$ （小时） $^{\circ}\text{C}$ ”；

$\sigma$  为辐射常数，“大卡/（米） $^2$ （小时）（ $^{\circ}\text{K}$ ） $^4$ ”。

在19世纪末，随着生产的发展要求提高单个发动机功率，传热过程在热机中的作用显得愈来愈重要。同时，建筑、冶金、致冷、机械制造和电工等其他技术部门都开始对换热现象注意起来。

在本世纪初叶，虽然传热问题的研究已得到一些成绩，但一般说来，传热的学说还

处在萌芽的状态，特别在对流换热方面只不过汇集了某些个别的經驗数据罢了。传热学說的发展成为一門独立的学科还是近几十年內的事情。

相似理論的确立，使传热学說的发展获得了可靠的基础。B.И.基尔比切夫（1874），M.B.基尔比切夫（1923）和A.费杰尔曼（1911）在俄国和苏联，W.努謝尔特（1910）在德国，均已很早就研究相似理論。最近几十年来相似理論获得了很大的发展，已經成为一套关于研究、修訂和綜合实验数据的一般方法論。借助于相似理論，换热方面的已有数据都重新經过审定和修正而被整理成明确的系統。有的国家并且以相似理論为基础創造了“热模化”的理論。其次，近几十年来物理学上的成就，特别是对流体的层流和湍流情况的研究和边界层理論的逐渐充实，更深刻地闡明了对流换热过程的物理本质，也促进了传热学說更进一步的发展。现在，传热学已成为一門独立的学科，与热力学共同組成热工学的理論基础。

在传热学方面，我国劳动人民在向自然界斗争的过程里，积累了极其丰富的經驗，卓越地运用了符合客观規律的科学原理。远在五千年前，我国制造的陶器中有一种名为“商”的东西，它有长而中空的三个足，用它烧水和煮食物比一般器具易熟，原因是它的传热面积較大并且结构有利于器中的流体自然对流。我国古代炼丹炉上所用的黄土、石灰、紙筋泥有絕热的作用，使炼丹炉的温度变化不急劇。我国古代炼鋼制剑所以能够放出異彩也是和改进炉膛輻射及选用有效的絕热材料分不开的。这些事例充分說明了我国劳动人民的高度智慧。可是长期的封建和反动派統治阻碍了生产力的更进一步发展，使我国这些早期的实践經驗也就只能长期停留在純經驗的阶段上。

解放后，在党的英明领导下，科学技术的迅速发展也給传热学的发展奠定了可靠的基础。有关高等学校从1952年开始，按照专业的需要开设了独立的传热学課程，建立了传热学实验室，为培养传热研究的干部創造了条件。同时在第一个五年計划期間一些工业企业部門开始建立了传热研究的机构。党制定的科学规划里也指出要迅速填补传热学这門空白学科的任务，給传热学的发展起了巨大的推动作用。在短短的几年里，科学院、高等学校和企业部門的传热研究联系了我国的生产实际，逐步加强了学术活动，并已取得了初步的研究成果，出现了蓬勃发展的新气象。

在党的社会主义建設总路綫的光輝照耀下，我国国民經济的各个部門正以史无前例的高速度繼續跃进。生产的跃进对传热学提出了很多新的尖端課題。同时一些基础理論課題也随着技术应用的迅速发展被提到研究的日程上来。

我們相信全国科学工作者和技术干部，在党的正确领导下，高举总路綫、大跃进、人民公社三面紅旗，一定能够出色地完成摆在我們面前的巨大而光荣的各項科研任务，并且在完成这些任务的过程中，使传热学在我国社会主义建設中，更好地發揮其作用。



## 第二章 导热的基本概念及定律

### § 2-1 温 度 场

导热过程是依靠温度的差别而产生的。所以在研究导热的过程时，必须知道物体的温度分布。一般讲来物体的温度分布可以是坐标和时间的函数，所以可以表达成下列形式：

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

式中  $x, y, z$  为空间坐标， $\tau$  为时间坐标。

某一瞬间空间一切点的温度分布称为温度场。场内任何点的温度不随时间而变动的温度场称为稳定温度场；随时间而变动的称为不稳定温度场，在稳定温度场中，

$$t = \Phi(x, y, z); \quad \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0. \quad (2-2)$$

具有稳定温度场的导热称为稳定导热。在一般情况下，当时间趋近无限长时，不稳定温度场，渐近于稳定温度场。

物体中的温度场可以是三向的、二向的和一向的；即三向上都有温度变化、二向上有温度变化和仅只一向上有温度变化。两个表面各自保持均匀温度（但二个表面上的温度不相同）的大内壁内的温度场是一向温度场的例子。球体及圆柱体内内外壁温度各保持均匀值时的导热有时也可以作为一向导热看待。一向导热时，其温度场的式子为，

$$t = \varphi(x, \tau); \quad \frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\partial t}{\partial z} = 0. \quad (2-3)$$

一向而又稳定的温度场，其式子为，

$$t = \Psi(x); \quad \frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0. \quad (2-4)$$

温度场中同瞬间的等温点相连接成为等温面。等温面与其它任一平面相交成一等温线。不同的等温面，可与同一平面相交，成为后一平面上的一族的等温线。物体的温度场可以用等温线图或等温面图来表示。当温度场为一向时，所有的等温面，与所有平行于导热方向的平面相交所成的等温线族是相同的，因此与任一个这样的平面相交所成的等温线族，就可以完全代表各个等温面。对于内外两表面各维持恒温的圆柱体来说，任何垂直于中心线的平面上的等温线族就是如此。

等温面之间，以及等温线之间是不会相交的。这是因为空间的任何一个点不可能同时具有二个温度值。在连续的温度场内，等温面和等温线也是不会中断的。

在等温面的法线方向，单位长度的温度变化最大。

温度梯度是温差  $\Delta t$  对于沿法线方向两等温线间距离  $\Delta n$  的比值的极限。它是一个向量，即，

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta t}{\Delta n} \right) = \text{grad} t = n_0 \frac{\partial t}{\partial n}. \quad (2-5)$$

式中  $\vec{n}_0$  表示单位向量， $\frac{\partial t}{\partial n}$  表示温度在法线方向上的导数。温度梯度在空间三个主轴上的分量，等于其相对应的偏导数，即，

$$\text{grad}t = \vec{i} \frac{\partial t}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial t}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial t}{\partial z} \quad (2-6)$$

式中  $\vec{i}$ 、 $\vec{j}$ 、 $\vec{k}$  表示三个主軸上的三个单位向量。

温度势或温度降度为温度梯度的負值，即：

$$\vec{E} = -\text{grad}t \quad (2-7)$$

热的传导方向，与温度梯度的方向相反，而与温度降度的方向相一致，参看图2-1。

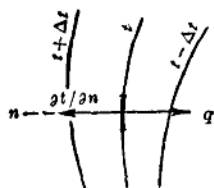


图 2-1 温度梯度和热流方向的关系

## §2-2 傅里叶定律

在純导热的现象中，所传导的热量，是与温度降度、时间、垂直于导热方向的截面积成正比的。以算式表示，单位时间内通过单位面积的热量是：

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}t = -\lambda \vec{n}_0 \frac{\partial t}{\partial n} \quad (2-8)$$

或就代数值来说  $q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \quad (2-8a)$

是謂**傅里叶定律**。在单位时间内，单位面积所通过的热量  $q$  称为热流量。根据热力学第二定律，热流量应是与温度梯度相反的向量。它的工程单位是“大卡/(米)<sup>2</sup>(小时)”。 $\lambda$ 是单位时间内经过单位面积，每单位温度降度的热量，称为**导热系数**。导热系数的工程单位是“大卡/(米)<sup>2</sup>(小时)<sup>2</sup>°C/米”〔或“(大卡)/(米)(小时)<sup>2</sup>°C”〕。导热系数是一个表征物质导热能力的物理量，对于不同的物质，导热系数是各不相同的。在同一物质内，导热系数还要随着物质的压力，温度，及其他有关因素而变異。因为上式是对微元长度写的，所以对于变导热系数也是适用的。

当  $\lambda$  为常数时，在一向导热的场合下，傅里叶定律成为  $q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = -\lambda \frac{t_2 - t_1}{x_2 - x_1}$ 。如  $\lambda$  并非常数，往往可用  $\lambda = \lambda_0 (1 + bt)$  的关系求解。在实际计算中，导热系数的数值是取物体两极端温度对应的算术平均值，并把它当作常数处理。这种方法求得的结果对于稳定导热与用  $\lambda = \lambda_0 (1 + bt)$  的关系求得的结果是相同的(参看§3-1)。

## §2-3 导热系数

各种材料的导热系数都是用实验方法测定的。从事工程计算时导热系数的数值最好从按照实验数据整理成的图表中查取。但是这些图表远远不能包括实用上所能遇到的场合，图表上的数据往往有必要外延或按照具体条件，温度、压力、湿度等加以修正。为了指导合理地外延和修正，下面分别对气体液体和固体材料分析一下各种因素对导热系数影响的规律。这些规律可以从微观角度来阐明，但是这将超越本课程的范围。读者如有兴趣可参阅这方面的一些专门著作〔9, 11〕<sup>①</sup>。

(1) 气体的导热系数：根据实验测定的结果大多数气体的导热系数数值在 0.005~0.5 “大卡/(米)(小时)<sup>2</sup>°C” 的范围内。几种常见气体的导热系数给出在表2-1及图2-2

① 此处编号均系书末参考文献的序号，下同。

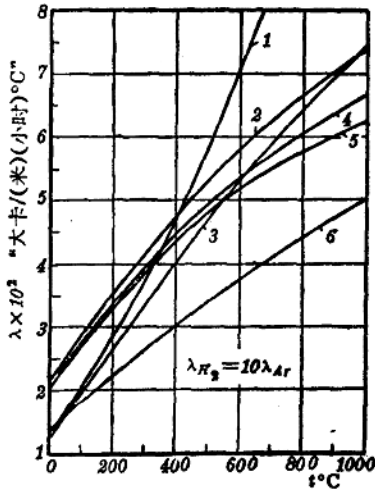


图 2-2 几种气体的  $\lambda = f(t)$   
 1—蒸汽; 2—氧; 3—碳酸气( $\text{CO}_2$ );  
 4—空气; 5—氢; 6—氮。

的情况以外,大多数气体是符合上述条件的。在极端低压时,例如低于20毫米水银柱的真空度时,气体稀薄到分子的平均自由行程可以与容器的尺度相比拟。这时  $\bar{l}$  将受到容器的限制,所以当压力再降低时,  $\bar{l}\gamma$  的乘积将不能保持不变而有所减小,故导热系数将随压力的降低而减小。在极端高压时(高于2000大气压)由于气体分子间的相互作用力随压力的增加而加大,因此导热系数将随压力的增高而增大。

表 2-1 各种气体在大气压力下的导热系数

温 度 $t \text{ } ^\circ\text{C}$	$\lambda \times 10^3$ “大卡/(米)(小时) $^\circ\text{C}$ ”						
	空 气	氧	氮	蒸 汽	碳 酸 气	氢	氩
0	21.0	20.9	21.2	13.9	12.6	150.0	14.0
100	27.6	27.1	28.3	20.6	19.6	186.0	18.1
200	33.8	33.1	35.0	28.4	26.6	222.0	22.2
300	39.6	38.6	41.3	37.3	33.6	258.0	26.2
400	44.8	43.6	47.3	47.3	40.6	294.0	30.0
500	49.4	48.0	52.9	58.4	47.2	330.0	33.7
600	53.5	51.9	58.0	70.7	53.4	366.0	37.3
700	57.2	55.2	62.6	84.2	59.2	402.0	40.7
800	60.6	58.0	66.8	98.8	64.6	438.0	44.0
900	63.7	60.3	70.5	114.5	69.6	474.0	47.1
1000	66.5	62.2	73.8	131.0	74.2	510.0	50.1

气体分子运动的平均二次方速度与温度有如下的关系:

$$\frac{m \bar{w}^2}{2} = BT. \quad (2-10)$$

式中  $m$ ——每个气体分子的质量;  
 $T$ ——气体的绝对温度;

中。气体的导热系数对温度、压力的依变关系可大致归结为一句话——“气体的导热系数随温度的升高而增加而与压力无关”。

气体的导热作用主要是由于分子的移动及其相互碰撞。按照理想气体分子运动的理论分析可以得到:

$$\lambda = \frac{1}{3} \bar{w} \bar{l} \gamma c_v. \quad (2-9) \textcircled{1}$$

式中  $\bar{w}$ ——气体分子运动的平均二次方速度;  
 $\bar{l}$ ——气体分子互相碰撞的平均自由行程;  
 $\gamma$ ——气体的重量;  
 $c_v$ ——气体的定容比热。

当气体的行为遵循理想气体的方程式时  $\bar{l}\gamma$  的乘积为常数。这是因为随着压力的增加  $\gamma$  的增大和  $\bar{l}$  的减小程度相等的缘故。所以在这种条件下导热系数的数值与压力无关。除了极端低压或极端高压的

① 例如可参看高等工业学校物理学编写组编, 物理学(初稿)第一册, 152—154页。高等教育出版社, 1955。

B——常数。

根据上式的关系，气体导热系数随温度的升高而增加是很容易理解的。

值得指出，氢和氦的导热系数比一般气体高得多（5~10倍），这是由于它们具有较小的分子质量，因而分子运动速度较快的缘故。

混合气体的导热系数不适用部分求和的法则，它们必须用实验来测定。

(2) 液体的导热系数：实验确定液体的导热系数在0.08~0.6大卡/(米)(小时)°C的范围以内。除了水和甘油以外绝大多数液体的导热系数随温度的增加略有所减小，参看图2-3。值得指出：水的导热系数比其他液体要大好几倍并且对温度的依变关系很特殊，在120°C以下水的导热系数随温度的升高而增大，但高于120°C时则又随温度升高而减小。

(3) 绝热材料的导热系数：导热系数最小的一些固体材料适宜于作为热绝缘材料。习惯上把导热系数小于0.2“大卡/(米)(小时)°C”的材料称为绝热材料。绝热材料所以具有较小的导热系数是和它们具有的多孔性的结构分不开的。通过多孔性材料的热交换过程实际上是一个通过固体和孔隙的复杂热传递过程，但习惯上总把整个过程当作单纯的热传导来处理。由于填充孔隙的空气导热系数的数值非常小因此绝热材料的导热系数随着多孔度的增加或容重（单位容积的重量）的减小而降低。当然，孔的断面结构、是否闭合以及固体物质的种类都对绝热材料的导热系数有重要的影响。

我国近年来制造成功多种新型高效能绝热材料，成本低、效用好，值得推广。几种典型的国产绝热材料的性质列在表2-2中。从表中可以看出，在低温工作条件下(250°C以下)

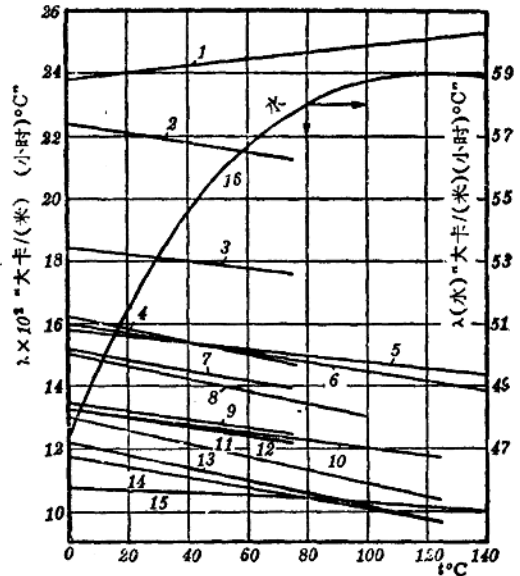


图 2-3 几种液体的 $\lambda=f(t)$

1—无水甘油；2—蚁酸；3—甲醇(木醇)；4—乙醇(酒精)；  
5—蓖麻油；6—胺(亚尼林)；7—醋酸；8—丙酮；9—丁  
醇；10—硝基苯；11—臭丙醇；12—苯；13—甲苯；14—  
二甲苯；15—凡士林油；16—水(右边的比例尺)。

表 2-2 几种国产绝热材料的性质

名 称	容 重 “公斤/(米) <sup>3</sup> ”	导热系数, $\lambda$ , “大卡/(米)(小时)°C”	使用极限温度 “°C”
1. 草绳	232	0.055~0.097	100
2. 黄土、木屑	800~900	$0.188 + 0.000378t_{cp}$	105
3. 石棉纸	770	0.10	
4. 苏维利特制品	340~400	$0.080 + 0.00010t_{cp}$	450
5. 蛭石屑	100	0.055~0.195	
6. 硅藻土制品	400~550	$0.054 + 0.00012t_{cp}$	900

可以采用黄土、木屑、石棉紙、泡沫混凝土等絕热材料。石棉紙、泡沫混凝土所以不能在較高温度范围内使用是由于它們具有在高温下分解的粘結剂成分。苏維利特制品具有很高的重复使用价值。在高温高压电厂管道热絕緣方面硅藻土及石棉硅藻土是适用的材料。硅藻土是天然矿物，我国很多地区都有出产。它除了粉末状的自然形式外，也有在窑內烧成砖或其他成形的制品。粉末状的自然硅藻土的导热系数給出在表 2-3 中。从表中可以看出对

表 2-3 天然硅藻土粉末的导热系数

容 重 (公斤/米 <sup>3</sup> )	导热系数, $\lambda$ , “大卡/(米)(小时) $^{\circ}$ C”					
	50 $^{\circ}$ C	100 $^{\circ}$ C	150 $^{\circ}$ C	200 $^{\circ}$ C	250 $^{\circ}$ C	300 $^{\circ}$ C
150	0.037	0.045	0.050	0.057	0.064	0.068
200	0.029	0.032	0.035	0.039	0.043	0.045
250	0.034	0.036	0.038	0.041	0.044	0.047
300	0.039	0.041	0.044	0.046	0.049	0.050

同一容重的粉末來說，导热系数随着温度的增加而增大。这种变化以容重較小时比較显著。另一方面还可以看到，象其他纖維状材料一样，在同一温度下随着容重的增加导热系数

先出現減小的現象，继而又出現增大的現象。这种变化是因为材料的对流换热和辐射的总作用要取决于孔隙的数目和大小、温度及温度差等好几种因素。

在制冰致冷等工业設備上要采用低温絕热材料。低温的壁面会导致空气中水分的凝結，因此这类絕热材料除了必須具有低导热系数以外还必須具有防潮的特点。在这个类型里玻璃絨，柏油，軟木，羊毛毡，羊毛毡都是应用很广的材料。

几种絕热材料的导热系数和温度的依变关系給出在图 2-4 中。

(4) 耐火材料的导热系数。在设计炉膛时，有时要求选用导热系数大的耐火材料，但也有要求选用导热能力差的耐火材料的場合。几种不同种类耐火材料的导热系数示出在表 2-4 中。

从表中的鎂砖的資料可以看出随着孔隙的增加导热系数有所减小。这种現象的原因在絕热材料一节里已經討論过。从表中和图 2-4 中的資料还可以看出絕大多数

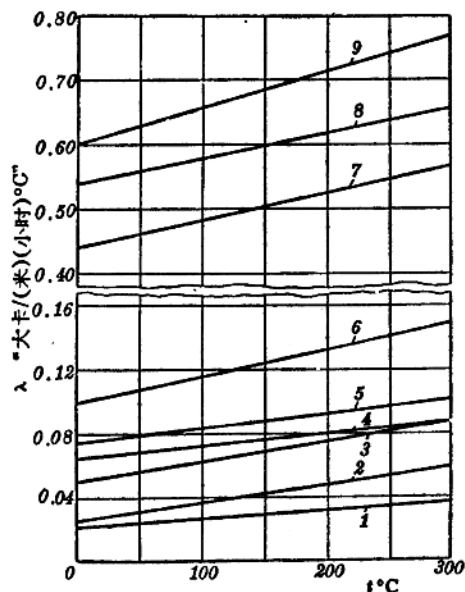


图 2-4 絕热材料和耐火材料的  $\lambda = f(t)$

1—空气；2—矿物毛， $\gamma = 160$  “公斤/(米)<sup>3</sup>”；  
3—紐凡尔●， $\gamma = 340$  “公斤/(米)<sup>3</sup>”；4—石棉  
白云石， $\gamma = 440$  “公斤/(米)<sup>3</sup>”；5—硅藻土，  
 $\gamma = 550$  “公斤/(米)<sup>3</sup>”；6—紅砖， $\gamma = 1.627$  “公  
斤/(米)<sup>3</sup>”；7—矿滓三合土， $\gamma = 1.373$  “公  
斤/(米)<sup>3</sup>”；8—耐火粘土， $\gamma = 1.840$  “公  
斤/(米)<sup>3</sup>”。

● 紐凡尔是85%輕苦土和15%三、四級石棉的混合物。

表 2-4 几种耐火材料的导热系数

名 称	比重量 “公斤/米 <sup>3</sup> ”	空 隙 百分数 (%)	主要化学组成(%)					导热系数 $\lambda$ , “大卡/(米)(小时) $^{\circ}$ C”				
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiC	MgO	ZrO <sub>2</sub>	200 $^{\circ}$ C	400 $^{\circ}$ C	600 $^{\circ}$ C	1000 $^{\circ}$ C	1400 $^{\circ}$ C
硅砖	2560	30.4	97					1.01	1.22	1.43	1.73	1.94
镁砖	2400	36				87		5.07	4.17	3.72	3.20	2.98
镁砖	2900	16				87			7.45	7.15	3.42	
锆砖	4860	29.5	27.3	7.8			60.4	1.23	1.38	1.53	1.65	1.76
碳化硅砖	2060	35	—	—	—					15.8	10.2	9.23
碳化硅砖	2320	26	7	3	90			17.1	14.0	10.2	9.10	
碳化硅砖	2360	21	10	8	77				10.4	9.10	7.15	
碳化硅砖	2240	24	21	16	57				5.07	4.91	4.02	
碳化硅砖	2190	22	26	20	49				4.02	3.32	3.28	

耐火材料的导热系数都是随温度的增高而增大的。但镁砖等却是例外。镁砖所以具有例外的性质原因在于它的内部结构。无论在理论上或者在实验上都已经证明晶体的导热系数和绝对温度成反比，而无定形态物质的导热系数则随温度的增加而增大。在一个组成成分复杂的耐火材料中结晶成分对导热系数变化的影响与无定形态物质成分，空气，以及孔隙中辐射的影响相反。镁砖主要是由结晶材料构成的。正因为这样它在低温时的导热系数较高温时为大。

(5) 建筑材料的导热系数：表2-5给出多种建筑材料的导热系数。很多建筑材料都具有多孔性的结构，例如砖，水泥，石灰石，灰浆，砂粒以及各种木材等。值得特别指出的是含水量对具有多孔性结构的材料的导热系数有很大的影响。填充空隙的水分具有比空气高得多的导热能力；并且若湿度分布不均还要产生水分的迁移，而附加了热量迁移。实验指出，湿度的增加使导热系数增大很多，这点从表2-5中也可以明显地看出。有一些材料，例如木材，在各个方向上具有不同的结构，它的导热系数也随方向的不同而有极大的差别。通常称这些材料为各向异性材料。对于各向异性材料的导热系数数据必须指明热流方向。

(6) 金属和合金的导热系数。纯金属是热的良导体。金属的热传导主要依靠分子间自由电子碰撞的作用。因为导热的机构和导电的机构相同，所以导热系数也和导电系数一样具有随温度的增加而减小的依变关系。图2-5示出一些主要金属的导热系数的数值。从图上可以看到，金属的纯度对导热有影响；这是因为杂质干扰自由电子的能量传递的缘故。

合金的导热系数视成分与结构而不同，它随温度的升高而增大。几种有色金属合金的导热系数列出在表2-6里。还可以注意到有些合金的导热系数甚至比任一种组成成分的导热系数为小。

液态金属水银和熔融钠的导热系数给出在附录9里。

几种热处理过的钢铁合金的导热系数被收集在表2-7里。从表上可以看出，增加铬、镍的成分可以使导热系数减小到熟铁导热系数的1/2至1/3的大小。含铬、镍成分多的高级合金钢具有导热系数随温度的增加而增大的性质。

图2-6示出各种气体、液体和固体导热系数的比较。

表 2-5 20°C时各种建筑材料的导热系数

材 料	容 重 “公斤/(米) <sup>3</sup> ”	导热系数, $\lambda$ , “大卡/(米)(小时)°C”
柏油	2100	0.60
砖, 干的	1680	0.45
1%容积含水	1680	0.60
2%容积含水	1680	0.90
混凝土, 干的	1900	0.68
10%容积含水	2300	1.10
加钢筋的	2300	1.15
玻璃	2500	0.64
石膏, 干的	1300	0.37
石灰石, 干的 细粒状	1680	0.60
15%容积含水, 细粒状	1680	0.82
干的, 粗粒状	2000	0.82
人造革	1200	0.16
灰浆, 2%容积含水	1850	0.75~0.90
橡胶制品, 40%含胶量的软质制品	—	0.25
90%含胶量的软质制品	—	0.15
黄砂, 干的	1500	0.28
10%容积含水	1600	0.90
土壤, 干的	2000	0.45
新出土的粘土, 30%容积含水	2000	2.10

表 2-6 几种有色金属合金的导热系数

材 料	导热系数 $\lambda$ , “大卡/(米)(小时)°C”			
	-50°C	0°C	200°C	400°C
黄铜: 70%Cu, 30%Zn	82	90	112	120
镍铬电热丝: 80%Ni, 20%Cr	—	—	13	16
镍铬电热丝: 90%Ni, 10%Cr	—	—	18	21
炮铜: 86%Cu, 9%Sn, 4%Zn	—	—	57	66
蒙乃尔合金: 67%Ni, 29%Cu	—	—	27	30

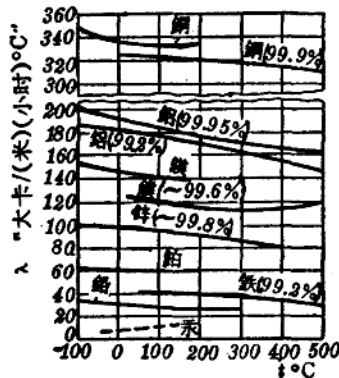


图 2-5 金属的  $\lambda = f(t)$

表 2-7 几种热处理过的钢铁合金的导热系数

名 称	化 学 组 成 (%)							导热系数 $\lambda$ , “大卡/(米)(小时) $^{\circ}\text{C}$ ”				
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	100 $^{\circ}\text{C}$	200 $^{\circ}\text{C}$	300 $^{\circ}\text{C}$	400 $^{\circ}\text{C}$	500 $^{\circ}\text{C}$
熟铁	0.04	0.05	0.136	0.025	0.265	—	—	50.3	45.2	42.7	38.8	34.8
高碳钢	0.83	0.27	0.017	0.015	0.16	—	—	38.3	37.4	35.4	33.5	31.5
低碳合金钢	0.35	0.56	0.015	0.020	0.20	1.37	0.46	38.2	36.7	35.1	33.6	32.0
低铬合金钢	0.10	0.45	0.013	0.017	0.18	—	5.15	31.4	30.7	30.2	29.5	28.9
铬合金钢	0.07	0.09	0.015	0.010	0.09	0.23	12.00	21.4	22.2	23.0	23.8	—
高铬合金钢	0.10	0.40	0.013	0.008	0.45	0.18	26.00	18.0	18.8	19.6	20.4	20.8
铬镍合金钢	0.07	0.27	—	—	—	9.10	18.60	14.1	15.2	16.4	17.4	18.6

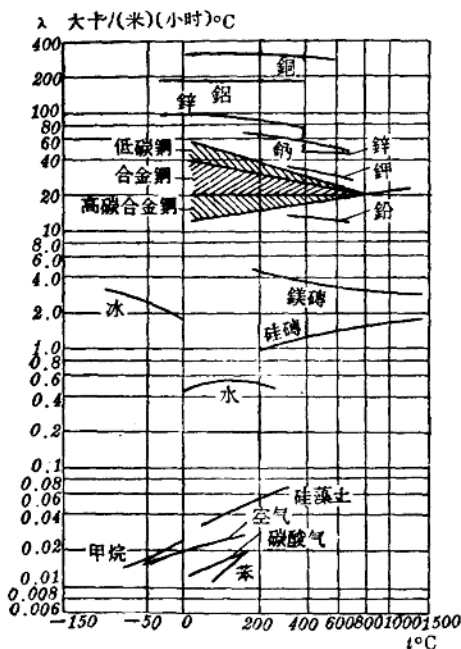


图 2-6 气体、液体和固体导热系数的比较

## § 2-4 导热问题的数学描写

导热理论的任务就是要找出任何时刻物体各部分的温度，即求出，

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

的具体关系。象其他许多数学物理问题一样，导热理论首先要建立解决温度分布问题的微分方程式。

傅里叶定律给出了通过某个面积的热量的计算公式，但是除了一些特别简单的情形以外，仅依靠它还不能求解出物体的温度场。为了求解物体的温度场，必须要利用傅里叶定律和能量守恒定律作基础，建立起描写导热问题的微分方程式。



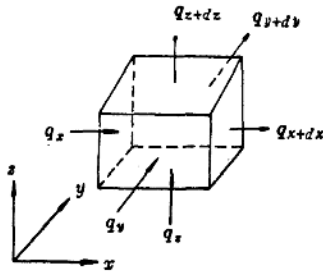


图 2-7 导热微分方程的推导

首先来建立起描写固体导热的微分方程式。为了减少问题的复杂性，假定被研究的物体是个各向同性的物体，并且假定它的导热系数 $\lambda$ ，比热 $c$ ，重度 $\gamma$ ，都可以当作常数来处理。在物体中分割出一个微元容积的平行六面体来，参看图 2-7。选用与平行六面体三个边相平行的坐标轴 $x, y, z$ ，则平行六面体的容积为， $dv=dx dy dz$ 。

现在来分别研究沿 $x, y, z$ 三个轴向的热流，参看图 2-7。经过 $x=x, y=y, z=z$ 三个相邻面所传导的热量可以从傅里叶定律直接写出，

$$\left. \begin{aligned} dQ_x &= -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} dy dz d\tau, \\ dQ_y &= -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} dx dz d\tau, \\ dQ_z &= -\lambda \frac{\partial t}{\partial z} dx dy d\tau. \end{aligned} \right\} \quad (a)$$

在 $x=x+dx, y=y+dy, z=z+dz$ 各个面上沿轴向所传导的热量可以分别写成，

$$\left. \begin{aligned} dQ_{x+dx} &= -\lambda \frac{\partial}{\partial x} \left( t + \frac{\partial t}{\partial x} dx \right) dy dz d\tau, \\ dQ_{y+dy} &= -\lambda \frac{\partial}{\partial y} \left( t + \frac{\partial t}{\partial y} dy \right) dx dz d\tau, \\ dQ_{z+dz} &= -\lambda \frac{\partial}{\partial z} \left( t + \frac{\partial t}{\partial z} dz \right) dx dy d\tau. \end{aligned} \right\} \quad (b)$$

按照能量守恒定律，如果物体内部没有热源，那末传入与传出微元体热量的差额应该等于在同一时间间隔 $(d\tau)$ 内微元体本身储存热量（或称焓）的增加。故可写出下列热平衡式：

$$\left[ \text{微元体储存热量的增加} \right] = \left[ \text{传入微元体的热量} \right] - \left[ \text{传出微元体的热量} \right]. \quad (c)$$

单位容积单位时间内物体储存热量的增加可以用 $c\gamma \frac{Dt}{d\tau}$ 来表示，其中 $c$ 代表比热， $\gamma$ 代表重度， $\frac{Dt}{d\tau}$ 代表 $t$ 对 $\tau$ 的全导数，即，

$$\frac{Dt}{d\tau} = \frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{\partial t}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial \tau} + \frac{\partial t}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial \tau} + \frac{\partial t}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial \tau}. \quad (d)$$

对固体来说， $\frac{\partial x}{\partial \tau}, \frac{\partial y}{\partial \tau}, \frac{\partial z}{\partial \tau}$ 都等于零，因此 $\frac{Dt}{d\tau}$ 就等于 $\frac{\partial t}{\partial \tau}$ 。这样在 $d\tau$ 一段时间内微元体储存热量的增加就可以表达为，