

高等学校試用教科書

傳 熱 學

(修訂本)

楊世銘 陳大燮編



中國工業出版社

114
高等学校試用教科書



傳 热 学

(修訂本)

楊世銘 陈大燮編

1163/13
中国工业出版社



本书是“传热学”的修订本，共分十六章。首先介绍传热学的研究对象及其在科学技术上的重要性；然后依次对热传导、对流和辐射三种传热方式作了系统的叙述，对相似理论的概念及其在传热学上的运用，也作了比较详细的介绍。在上述理论的基础上，并用具体的实例说明了换热器的计算原理和计算方法。在本书的最后部分对不稳定热传导也作了简要的叙述。

传 热 学

杨世铭 陈大燮编

*

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)。

(北京市书刊出版事业许可证出字第110号)

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $14^{1/4}$ ·字数328,000

1958年10月水利电力出版社北京第一版

1961年10月北京新版·1961年10月北京第一次印刷

印数0001—4,013·定价(10-6)1.70元

统一书号: 15165·1044(水患-157)

目 录

基本符号	3
第一章 緒論	5
§1-1 傳熱学的研究对象及其在科学技术上的重要性	5
§1-2 換热的基本方式	5
§1-3 傳熱学簡史及展望	6
第二章 热传导的基本概念及定律	8
§2-1 溫度場	8
§2-2 傅立叶定律	9
§2-3 导热系数	9
§2-4 热傳导問題的数学描写	15
第三章 稳定热传导	18
§3-1 平壁的热傳导	19
§3-2 圓筒壁的热傳导	24
§3-3 球壁的热傳导	29
§3-4 不規則形状物体的热傳导	31
§3-5 表面溫度不均匀时的热傳导	35
§3-6 通过肋片的散热	35
§3-7 元件平衡法	42
第四章 对流換热的基本概念	45
§4-1 放热过程	45
§4-2 放热系数	46
§4-3 換热的微分方程式組	47
§4-4 換热的单值性条件	50
§4-5 边界层的概念	51
第五章 相似理論	52
§5-1 相似的概念	52
§5-2 相似准則和相似定理	55
§5-3 相似理論应用到对流換热的一个实例	56
§5-4 常用准則数的物理意义	59
§5-5 定性溫度和定形尺度	60
第六章 流体受迫运动时的放热 I——管内槽内流动	62
§6-1 管内流动的特征	62
§6-2 湍流时的放热	66
§6-3 层流时的放热	69
§6-4 过渡状态的放热	71
§6-5 液态金属在管内流动时的放热	72
第七章 流体受迫运动时的放热 II——外掠物体流动	72
§7-1 掠过平壁	72

§7-2	横向掠过圆管	75
§7-3	横向掠过管簇	77
§7-4	气体高速流动时的放热	81
第八章	流体自由运动时的放热	85
§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	87
§8-3	有限空间中的自由运动放热	92
第九章	流体集态改变时的放热 I——蒸汽凝結	94
§9-1	珠状凝結和膜状凝結	94
§9-2	膜状凝結放热的綜合关系	96
§9-3	液膜层流时平均放热系数的綜合公式	97
§9-4	部分液膜湍流时平均放热系数的綜合公式	98
§9-5	其他因素对凝結放热的影响	100
第十章	流体集态改变时的放热 II——液体沸騰	104
§10-1	液态沸騰与膜态沸騰	104
§10-2	汽泡的形成和成长	105
§10-3	大容器内液态沸騰放热的綜合关系	110
§10-4	临界热載荷	115
§10-5	管内沸騰	117
§10-6	膜态沸騰的放热	118
第十一章	热輻射的基本概念 I	119
§11-1	热輻射的本质	119
§11-2	輻射的吸收, 反射和穿透, 绝对黑体	120
§11-3	輻射力和輻射强度	121
§11-4	兰貝特定律	122
§11-5	克希荷夫定律	123
§11-6	蒲朗克定律	124
§11-7	斯蒂芬-波尔茨曼定律	124
第十二章	热輻射的基本概念 II	125
§12-1	实际固体和液体的輻射和吸收, 灰体	125
§12-2	輻射能在吸收性介质内的传递	128
§12-3	气体的輻射	130
§12-4	火焰的輻射	135
第十三章	輻射换热	137
§13-1	本身輻射与有效輻射	137
§13-2	被介热体隔开的平行平面間的輻射换热, 遮热板	138
§13-3	被介热体隔开的空腔内物体与空腔内壁間的輻射换热	140
§13-4	被介热体隔开的二个黑体任意面积間的輻射换热	141
§13-5	輻射换热的几何特征, 角系数的确定方法	143
§13-6	气体与外壳間的輻射换热	149
§13-7	炉内輻射	151
第十四章	传热和热絕緣	154

§14-1 复杂换热	154
§14-2 传热	156
§14-3 传热的增强	163
§14-4 热绝缘	167
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	171
§15-3 列管间壁换热器的设计	173
§15-4 间壁式换热器的核算	182
§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 不稳定热传导	191
§16-1 加热和冷却过程	191
§16-2 数学解法的概念	193
§16-3 有限差分图解法	201
§16-4 正规状况法的概念	202
附录1 各种不同材料的比重、导热系数、热容量和导热系数	206
附录2 $B=760$ 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 μ_0 的数值	209
附录4 氧、氮、碳酸气、空气和蒸汽的 $\mu=f(t)$ ，以及含水量 $w=11\%$ 的烟气的 $\nu=f(t)$	209
附录5 空气的 ρ 和 ν ： $\rho=f(t, B)$ ， $\nu=f(t, B)$	210
附录6 在饱和线上蒸汽的物理参数	210
附录7 在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 $\lambda \times 10^2$	213
附录12 各种不同材料在表面法线方向上的辐射的黑度	214
附录13 计算蒸汽凝结放热系数的一些辅助量计算公式	220
附录14、15、16、17 $\varepsilon_{A1}=f(P, R)$	220
附录18 工业用换热设备里 α 和 K 的大致范围	221
附录19、20、21、22 技术上某些重要的辐射换热的场合角系数的数值	222
附录23 双曲线函数	224
附录24 虚变数的贝塞尔及干凯尔函数	225
参考文献	226

基本符号

α 导热系数， $\frac{\lambda}{\delta}$ ，“(米)²/小时”。

c 比热，“大卡/(公斤) $^{\circ}C$ ”。

C 辐射系数，“大卡/(米)²(小时)($^{\circ}K$)⁴”。

d 直径，“米”。

f 横截面积，“(米)²”。

F 换热面积，“(米)²”。

g 重力加速度，“米/(秒)²”。

G 重量，“公斤”；或流体的重量流量，“公斤/小时”。

k 传热系数，“大卡/(米)²(小时) $^{\circ}C$ ”。

k_1 通过管壁的长度传热系数，“大卡/(米)(小

- 时) $^{\circ}\text{C}$ ”。
- l 长度, “米”。
- p 压力, “公斤/(米) 2 ”, “公斤/(厘米) 2 ”。
- Δp 压力差, “公斤/(米) 2 ”。
- q 热流量, “大卡/(米) 2 (小时)”。
- Q 热量, “大卡”; 或单位时间内通过的热量, “大卡/小时”。
- r, R 半径, “米”; “ r ”在集态改变放热中亦作为气化潜热, “大卡/公斤”。
- s 每单位面积的摩擦阻力, “公斤/(米) 2 ”。
- S 力, “公斤”。
- t 温度, “ $^{\circ}\text{C}$ ”。
- T 绝对温度, “ $^{\circ}\text{K}$ ”。
- t_w 壁面温度, “ $^{\circ}\text{C}$ ”。
- t_f 流体温度, “ $^{\circ}\text{C}$ ”。
- Δt 温差, “ $^{\circ}\text{C}$ ”。
- V 容积, “(米) 3 ”; 或流体的容积流量, “(米) 3 / (小时)”。
- w 速度, “米/秒”, “米/小时”。
- α 放热系数, “大卡/(米) 2 (小时) $^{\circ}\text{C}$ ”。
- β 容积膨胀系数, “ $1/^{\circ}\text{C}$ ”。
- γ 重度, “公斤/(米) 3 ”。
- δ, Δ 厚度, “米”, “毫米”。
- ε 黑度。
- ζ 局部阻力系数。
- θ, Θ 过剩温度, “ $^{\circ}\text{C}$ ”。
- λ 导热系数, “大卡/(米)(小时) $^{\circ}\text{C}$ ”; 在辐射章节中 λ 亦作波长, “米”。
- μ 粘度(粘性系数), “(公斤)(秒)/(米) 2 ”。
- ν 动粘度(运动粘性系数), $\frac{\mu}{\rho}$, “(米) 2 /秒”, “(米) 2 /小时”。
- ξ 摩擦阻力系数。
- ρ 密度, $\frac{\gamma}{g}$, “(公斤)(秒) 2 / (米) 3 ”。
- σ 表面张力, “公斤/米”; 在辐射章节中亦作斯蒂芬-波尔茨曼常数。
- τ 时间, “小时”, “秒”。
- ω 立体角。

相似准则

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \text{— 雷诺准则。}$$

$$Pr = \frac{\nu}{\lambda} \text{— 柏朗特准则。}$$

$$Pe = Re \cdot Pr = \frac{w \cdot l}{\alpha} \text{— 佩克利准则。}$$

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \text{— 努谢尔准则。}$$

$$Gr = \frac{g l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t \text{— 格拉晓夫准则。}$$

$$Ho = \frac{w \cdot \tau}{l} \text{— 均时性准则。}$$

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2} \text{— 欧拉准则。}$$

$$Fr = \frac{g l}{w^2} \text{— 弗鲁特准则。}$$

$$Ga = Fr \cdot Re^3 = \frac{g l^3}{\nu^2} \text{— 伽里略准则。}$$

$$Ar = Ga \cdot \frac{\rho - \rho_0}{\rho} = \frac{g l^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \text{— 阿基米德准则。}$$

$$Fo = \frac{\alpha \tau}{l^2} \text{— 傅立叶准则。}$$

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda_w} \text{— 毕渥准则。}$$

第一章 緒 論

§1-1 傳熱學的研究對象及其在科學技術上的重要性

傳熱學的研究對象是熱的傳播過程。熱力學第二定律指出：只要有溫度差存在，熱量總是自發地從高溫物體傳向低溫物體。溫度差普遍地出現在自然界里，所以熱的傳播過程是一個很普遍的自然現象。

研究和學習傳熱學的目的是為生產服務。傳熱學的工程應用範圍是很廣泛的。許多隸屬於不同工程領域的生產技術都建築在傳熱學的基礎上。涉及的工程領域包括：動力、建築、冶金、致冷、機械製造、電工、化工及航空等。其中特別是熱能動力部門對傳熱學的要求更為突出。熱能動力設備的設計、製造及運行方面大量地應用着傳熱學研究所總結出的規律。

應用傳熱學規律來求解的實際問題不外乎二種類型：第一種類型是力求熱傳播過程的增強，例如設計最經濟的換熱設備來完成交換一定熱量的任務就屬於這個類型；第二種類型是力求熱傳播過程的削弱，例如減少不必要的熱損失就屬於這類問題。下面舉具體的例子來說明傳熱學在熱能動力部門的重要作用。

先談力求增強換熱的具體例子。按照熱力學的理論，熱能動力系統包括兩個溫度不同的熱源和一個工作於這兩個熱源間的热機。在這個系統的工作過程里載熱體(介質)常常變換，系統熱效率的提高就要求用尽可能小的溫差來把熱量從一個載熱體傳到另一個載熱體。這裡傳熱學起着決定性的作用。在蒸汽動力廠里熱量最初存在於燃氣(高溫熱源)之中。在鍋爐里燃氣將熱傳給蒸汽。蒸汽作功後進入凝汽器又把熱傳給冷卻水。冷卻水在通過冷卻塔時又將熱量傳給大氣(低溫熱源)。從燃氣到大氣載熱體變換了好幾次，處處要應用傳熱學的規律來處理。內燃機動力廠的情況與蒸汽動力廠不同，沒有載熱體的變換。燃氣直接作功，廢氣和廢熱一起排入大氣。雖然如此，內燃機的設計和運行還是需要傳熱學的知識，因為氣缸壁必須依靠水或空氣冷卻保持在安全工作溫度之下。追求高熱效率的內燃機氣缸的輸出功率，就要在一定程度上取決於氣缸壁的有效冷卻和廢氣中熱量的利用。燃氣輪機動力廠和內燃機動力廠的情況是類似的。燃氣輪機的葉片冷卻、轉子冷卻和加強換熱器效率是提高燃氣輪機效率的重要途徑。

其次，再談第二類型的問題。減少不必要的熱損失對熱力機械的效率亦有很大的影響。熱力學第二定律告訴我們，一定量的熱在高溫時較低溫時作功能力為大。因此蒸汽機汽缸和管道的保溫是很重要的事情。此外，社會主義國家很重視高溫車間防暑降溫改善勞動條件的工作，這和熱力設備的熱絕緣與保溫亦是分不開的。

§1-2 換熱的基本方式

根據物理過程的不同，換熱的現象可以區分為三種基本方式：熱傳導的方式、對流的方式和輻射的方式。

熱傳導方式是指直接接觸的物體各部分能量交換的現象。在液體和固體介電質中，能量轉移主要是依靠彈性波的作用；固體金屬則主要依靠自由電子運動；氣體則主要

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。对流方式总相伴有热传导的过程。

辐射是一种由电磁波来传播能量的现象。它与热传导和对流方式有着本质上的区别。它不仅要产生能量的转移，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热传导、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热传导；最后从水管内表面到水流就依靠对流及热传导。由此可见，实际换热的过程往往是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热传导的总作用叫做“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热传导过程的规律。

§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，先后出现了热传导，对流换热和热辐射的计算公式：

热传导：傅立叶(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)及黎赫曼(1711~1753)公式

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

热辐射：斯蒂芬(1879)波尔茨曼(1884)公式

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

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

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

σ 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经验数据罢了。传热学的发展成为一门独立的科学还是近几十年内的事情。

相似理论的确立，使传热学的发展获得了可靠的基础。B.И. 基尔比切夫(1845~1913), M.Б. 基尔比切夫(1923)和 A. 费杰尔曼(1911)在俄国和苏联, W. 努谢尔特(1910)在德国, 均已在很早就研究相似理论。最近几十年来相似理论获得了很大的发展, 已经成为一套关于研究、修订和综合实验数据的一般方法论。借助于相似理论, 换热方面的已有数据都重新经过审定和修正而被整理成明确的系统。在苏联, 并且以相似理论为基础创造了“热模化”的理论。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论的逐渐充实, 更深刻地阐明了对流换热过程的物理本质, 也促进了传热学更进一步的发展。现在, 传热学已成为一门独立的科学, 与热力学共同组成热工学的理论基础。

在传热学方面, 我国劳动人民在向自然界斗争的过程中, 积累了极其丰富的经验, 卓越地运用了符合客观规律的科学原理。远在五千年前, 我国制造的陶器中有一种名为“鬲”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较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、纸筋泥有绝热的作用, 使炼丹炉的温度变化不急剧。我国古代炼钢制剑所以能够放出异彩也是和改进炉膛辐射及选用有效的绝热材料分不开的。这些事例充分说明了我国劳动人民的高度智慧。可是长期的封建和反动派统治阻碍了生产力的更进一步发展, 使我国这些早期的实践经验也就只能长期停留在纯经验的基础上。

解放后, 在党的英明领导下, 科学技术的迅速发展也给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, 学习苏联先进经验, 按照专业的需要开设了独立的传热学课程, 建立了传热学实验室, 为培养传热研究的干部创造了条件。同时在第一个五年计划期间一些工业企业部门, 在苏联的帮助下, 也开始建立了传热研究的机构。1956年党制定的12年科学规划明确地指出要迅速填补传热学这门空白学科的任务, 给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、高等学校和企业部门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。

国产新型高效能热绝缘材料的发掘、鉴定和提高质量, 是十几年来一项光辉的成就, 它显示了我国劳动人民的高度智慧。

在党的社会主义建设总路线的光辉照耀下, 我国国民经济的各个部门正以史无前例的高速度继续跃进。生产的跃进对传热学提出了很多新的尖端课题。同时一些基础理论课题也随着技术应用的迅速发展被提到研究的日程上来。

我们相信全国科学工作者和技术干部, 在党的正确领导下, 高举总路线、大跃进、人民公社三面红旗, 一定能够出色地完成摆在我们面前的巨大而光荣的各项科研任务, 并且在完成这些任务的过程中为传热学的进一步发展作出贡献。

第二章 热传导的基本概念及定律

§2-1 温度场

热传导过程是依靠温度的差别而产生的。所以在研究热传导的过程时，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， τ 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，

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

具有稳定温度场的热传导称为稳定热传导。在一般情况下，当 τ 趋近 ∞ 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）的大平壁内的温度场是一向温度场的例子。球体及圆柱体中内外壁温度各保持均匀值时的导热有时也可以作为一向热传导看待。一向热传导时，其温度场的式子为：

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

一向而又稳定的温度场，其式子为：

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

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。

温度梯度是等温面法线方向上单位长度的温度增加量，它是一个向量，即：

$$\text{grad } t = n_0 \frac{\partial t}{\partial n}. \quad (2-5)$$

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} 表示三个主轴上的三个单位向量。

温度势或温度降度为温度梯度的负值，即：

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

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。

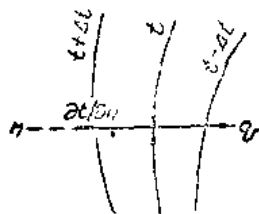


图2-1 温度梯度和热流方向的关系

§2-2 傅立叶定律

在纯热传导的现象中，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：

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad } t = -\lambda n_0 \frac{\partial t}{\partial n} \quad (2-8)$$

或就代数值来说

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \quad (2-8a)$$

是谓傅立叶定律。在单位时间内，单位面积所通过的热量 \vec{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)²(小时)”。 λ 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)²(小时)·C/米”[或“(大卡)/(米)(小时)·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异。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 λ 为常数时，在一向导热的场合下，傅立叶定律成为 $q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = -\lambda \frac{t_2 - t_1}{x_2 - x_1}$ 。如 λ 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端温度数值的算术平均值，并把它当作常数处理。这种方法对于稳定热传导基本上也是合理的(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)①②。

(1) 气体的导热系数：根据实验测定的结果大致气体的导热系数数值在 0.005~0.5“大卡/(米)(小时)·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中。

① 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年。

② 此外括号均系书末参考文献的序号，下同。

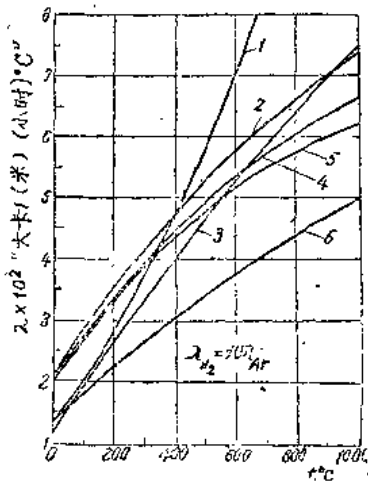


图 2-2 几种气体的 $\lambda = f(t)$
 1—蒸汽; 2—氮; 3—二氧化碳(CO₂);
 4—空气; 5—氧; 6—氢。

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”。

气体的热传导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：

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

- 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;
 γ ——气体的重度;
 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 γ 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(°C)	$\lambda \times 10^3$ “大卡/(米)(小时)°C”						
	空 气	氮	氧	蒸 汽	二氧化碳	氢	氧
0	21.6	20.9	21.2	13.0	12.6	150.0	14.0
100	27.6	27.1	28.3	20.0	19.6	186.0	18.1
200	33.8	33.1	35.0	28.4	26.6	242.0	22.2
300	39.6	38.6	41.3	37.3	33.6	258.0	26.2
400	44.3	43.6	47.3	47.3	40.6	274.0	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	44.3
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：

$$\frac{m \bar{w}^2}{2} = 3T \quad (2-10)$$

- 式中 m ——每个气体分子的质量;
 T ——气体的绝对温度;

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，氢和氨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則，它們必須用实验来测定。

(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。除了水和甘油以外絕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。

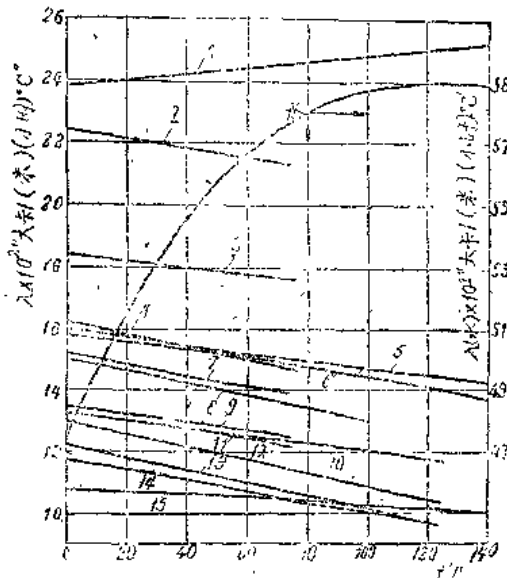


图 2-3 几种液体的 $\lambda = f(t)$

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

(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)可以采用黄土、木屑、石棉纸、泡沫混凝土等绝热材料。石棉纸、泡沫混凝土所以不能在较高温度范围内使用是由于它们具有在高温下分解的粘剂成分。苏维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绝缘方面硅藻土及石棉硅藻土是适

表 2-2 几种国产絕热材料的性质

名 称	容 重 “公斤/(米) ³ ”	导 热 系 数, λ ,		使用 极 限 温 度 “°C”
		“大卡/(米)(小时) °C”		
1. 草 绳	232	0.055~0.077		100
2. 黄土木屑	800~900	0.188+0.000378t _{cp}		105
3. 石棉紙	770	0.10		
4. 苏維利特制品	340~400	0.080+0.00010t _{cp}		450
5. 矽石屑	100	0.055~0.195		
6. 砂藻土制品	400~550	0.054+0.00012t _{cp}		900

用的材料。砂藻土是天然矿物,我国很多地区都有出产。它除了粉末状的自然形式外,也有在窑内燒成磚或其他成形的制品。粉末状的自然砂藻土的导热系数給出在表 2-3 中。从

表 2-3 天然砂藻土粉末的导热系数

容 重 “公斤/米 ³ ”	导 热 系 数, λ , “大卡/(米)(小时) °C”					
	50°C	100°C	150°C	200°C	250°C	300°C
150	0.037	0.045	0.050	0.057	0.064	0.068
200	0.029	0.022	0.035	0.039	0.043	0.045
250	0.034	0.026	0.038	0.041	0.044	0.047
300	0.039	0.041	0.044	0.046	0.049	0.050

表中可以看出对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,繼而又出現增大的現象。这种变化是因为材料的对流換热和輻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须具有防潮的特点。在这个类型里玻璃絨,柏油,軟木,羊毛毡,牛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。在設計炉膛

① 紐凡尔是 85%輕苦土和 15%三、四級石棉的混合物。

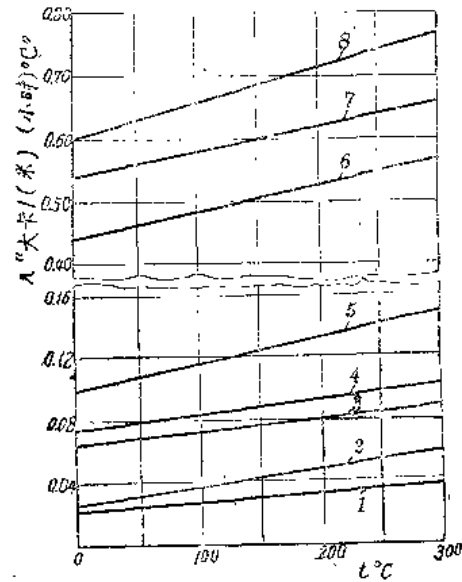


图 2-4 絕热材料和耐火材料的 $\lambda=f(t)$

1—空气; 2—矿物毛, $\gamma=160$ “公斤/(米)³”; 3—紐凡尔^①, $\gamma=340$ “公斤/(米)³”; 4—石棉白云石, $\gamma=440$ “公斤/(米)³”; 5—砂藻土磚, $\gamma=550$ “公斤/(米)³”; 6—紅磚, $\gamma=1.627$ “公斤/(米)³”; 7—矿滓三合土磚, $\gamma=1.373$ “公斤/(米)³”; 8—耐火黏土磚, $\gamma=1.840$ “公斤/(米)³”。

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场合。几种不同种类耐火材料的导热系数示出在表 2-4 中。

表 2-4 几种耐火材料的导热系数

名 称	比重 公斤/米 ³	空隙 百分 数 %	主要化学组成, %					导热系数 λ , “大卡/(米)(小时) $^{\circ}\text{C}$ ”				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	SiC	MgO	ZrO ₂	200 $^{\circ}\text{C}$	400 $^{\circ}\text{C}$	600 $^{\circ}\text{C}$	1000 $^{\circ}\text{C}$	1400 $^{\circ}\text{C}$
矽 砖	2560	30.4	97					1.01	1.22	1.43	1.73	1.94
镁 砖	2490	36				87		5.07	4.17	3.72	3.29	2.98
镁 砖	2900	16				97			7.45	7.15	3.42	
铸 砖	4860	29.5	27.3	7.3			60.4	1.23	1.33	1.53	1.65	1.76
碳化矽砖	2066	35	—	—	—					15.8	10.2	9.23
碳化矽砖	2320	26	7	3	90			17.1	14.0	10.2	9.10	
碳化矽砖	2360	21	10	8	77				10.4	9.19	7.15	
碳化矽砖	2240	24	21	16	57				5.07	4.91	4.02	
碳化矽砖	2190	22	26	20	49				4.02	3.32	3.23	

从表中高岭土砖的资料可以看出随着孔隙的增加导热系数有所减小。这种现象的原因在绝热材料一节里已经讨论过。从表中和图 2-4 中的资料还可以看出绝大多数耐火材料的导热系数都是随温度的增高而增大的。但是镁砖却是例外。镁砖所以具有例外的性质原因是在于它的内部结构。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比高温时为大。

(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。

表2-5 20°C 时各种建筑材料的导热系数

材 料	容 重 “公斤/(米) ³ ”	导热系数, λ , “大卡/(米)(小时) $^{\circ}$ C”
柏 油	2100	0.60
砖, 干的	1600	0.45
1%容积含水	1680	0.60
2%容积含水	1600	0.90
混凝土, 干的	1900	0.68
10%容积含水	2300	1.10
钢筋	2300	1.15
玻 璃	2500	0.64
石膏, 干的	1200	0.37
石灰石, 干的細粒状	1600	0.60
15%容积含水, 細粒状	1600	0.82
干的, 粗粒状	2000	0.52
人造草	1200	0.16
灰浆, 2%容积含水	1350	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	0.23
10%容积含水	1600	0.50
土壤, 干的	2000	0.45
新出土的粘土, 30%容积含水	2300	2.10

表2-6 几种有色金属合金的导热系数

材 料	导热系数 λ , “大卡/(米)(小时) $^{\circ}$ C”			
	-50 $^{\circ}$ C	0 $^{\circ}$ C	200 $^{\circ}$ C	400 $^{\circ}$ C
黄铜: 70%Cu, 30%Zn	82	91	112	120
镍铬电热丝: 80%Ni, 20%Cr	—	—	13	16
镍铬电热丝: 90%Ni, 10%Cr	—	—	19	21
炮铜: 86%Cu, 9%Sn, 4%Zn	—	—	57	66
蒙乃尔合金: 67%Ni, 29%Cu	—	—	27	30

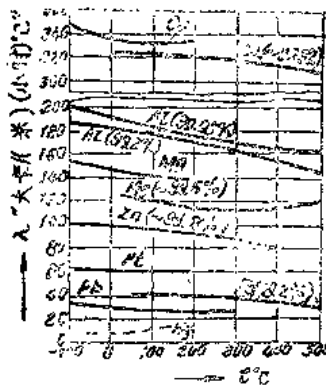


图 2-5 金属的 $\lambda = f(t)$