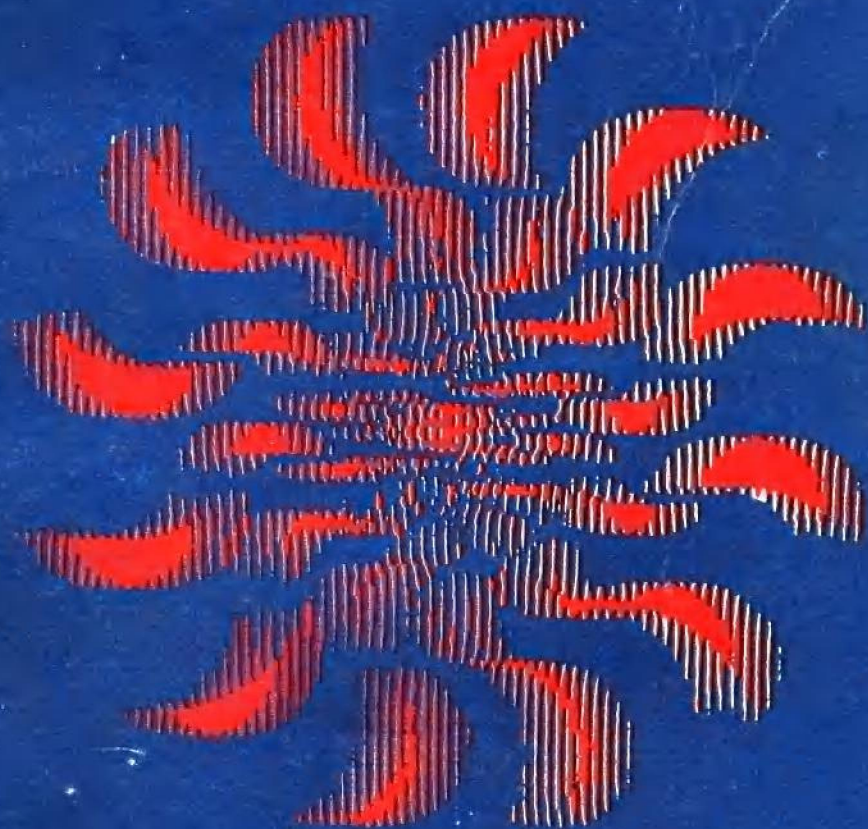


高等学校教材

传热学

〔日〕西川兼康 藤田恭伸 著

孙业斌 侯克复 等译



兵器工业出版社

30220303

TK124
30

传 热 学

〔日〕西川兼康 藤田恭伸 著

孙业斌 侯克复 宋敬埔 译

兵器工业出版社

内 容 提 要

本书共分十三章。包括：传热的基本概念；热传导；一维稳定热传导；二维稳定热传导；不稳定热传导；对流换热；强迫对流换热；自然对流换热；沸腾；冷凝；热辐射；换热器；质量传递。各章中均附有实用例题，书末附有各章的练习题及习题答案。

本书论述清楚，公式推导严密，问题的阐述和数学模型的建立具有启发性，便于自学。可作化工、建筑、机械等专业学生的教材，也可供从事传热专业的工程技术人员参考。

传 热 学

〔日〕 西川兼康 藤田恭伸 著
孙业斌 侯克复 宋敬埔 译

*

兵器工业出版社 出版
(北京市海淀区车道沟10号)
新华书店总店科技发行所发行
各地新华书店经销
顺义后沙峪印刷厂印装

*

开本：787×1092 1/16 印张：23.75 字数：585千字

1990年10月第1版 1990年10月第1次印装

印数：1~1400 定价：4.70元

ISBN 7-80038-216-8/TK·5 (课)

译者序

本书是根据日本九州大学西川兼康和藤田恭伸二位教授共同编著的“传热学”第一版译出的。西川教授从事传热学方面的研究达30多年，积累了丰富的经验。书中编进了二位教授多年来从事教学、科研的成果。

书中重点论述了传热过程的基本原理，介绍了热传导、对流换热、沸腾、凝结、热辐射及传质等各过程的机理和各种传热现象之间的相互关系。在讨论热传导和对流换热时尽量采用解析解法，因为这种方法能使读者更深刻地理解问题的物理本质。同时，作者也非常重视传热学原理的工程应用，向读者介绍了数值解法以及经验公式。这对传热学的工程应用及掌握计算技术这一工具是十分重要的。另外，书中在叙述基本原理时，概念清楚，逻辑性强，公式推导严密，有一定启发性，便于自学；注意理论联系实际，各章中均有实用例题，书末附有各章的习题及习题答案，涉及面广，实用性强；传热及传质结合起来研究，对有关传热、传质结合密切的技术领域有一定指导意义。所以，本书不失为是一本大专院校较好的教科书。

本书1~8章由北京理工大学孙业斌副教授翻译，9~10章由华东工学院宋敬埔工程师翻译，11~13章及练习题由华东工学院侯克复副教授翻译。孙业斌担任主译并统校全书。北京理工大学蒋炳生副教授校阅了全书，姚仲鹏副教授对全书进行了审查，都提出了宝贵意见，在此表示衷心感谢！

由于译者水平所限，不当之处在所难免，请诸君多加指正。

译 者

1988.8

原 序

热力学是研究平衡状态下的系统，传热学则是一门研究因温度差使物体间发生能量传递的科学。传热学不仅在动力工程领域中占有极其重要的地位，而且还广泛地应用在机械工程、化学工程、金属工学、环境工程及电气工程等领域中。特别是联系到近代的能源问题，越来越显示出这门学科的重要性。

笔者力求使本书成为使用方便的教科书。为此，考虑到大学系里开设本课程多数情况下是在一学期内讲完，故本书用大号字排印了大体在这段时间内使学生能够学懂的内容。但是，为了确切地掌握传热学的基础概念，搞懂传热学的理论或实验背景，培养学生对该课程的兴趣也是必要的。为使学生在不看专著的情况下也能理解基础理论，故本书对这部分内容尽量作了详细地记述，书中用小字排版。本书可做为大专院校的教科书，也可供一般工程技术人员参考。

昭和18年，笔者听了现已故恩师九州大学名誉教授山縣清先生的讲课后开始接触传热学。战后，本人在九州大学，主要参加传热学课题的研究，山縣先生给予了多方面的教导，因此，本书也到处寓于着山縣先生的科学思想。在此，再一次向山县先生的高深学识表示仰慕。

另外，笔者是十几年前接受传热学执笔的任务，本书能够出版，多亏长期耐心等待本书完成的已故関口傅氏，对帮助本书出版的理工学社吉住久氏表示衷心地感谢。

西川兼康

1981年12月

主要符号

英文大写字母

A : 换热面积
 C : 摩尔浓度
 C_D : 阻力系数
 C_f : 摩擦阻力系数或管摩擦系数
 D : 扩散系数
 E : 辐射力
 E_B : 黑体的辐射力
 F : 截面积
 F_{ij} , $\bar{F}_{ij}$, $\mathcal{F}_{ij}$: 形状系数
 F_s : 辐射率系数
 G : 质量流量或入射辐射
 I : 辐射强度
 J : 有效辐射
 K : 吸收系数
 L : 潜热
 L_{ij} : 关于透射、吸收气体的射线平均行程
 M : 分子量
 NTU : 传热单元数
 P : 压力 (SI制为 p)
 Q : 传热量
 Q_v : 体积放热量
 R : 传热热阻, 固有函数, 气泡半径或气体的射线平均行程
 R_c : 临界气泡半径
 R_f : 污垢系数
 R_g : 气体常数
 R_j : 接触热阻
 R_0 : 普通气体常数
 R_{ij} : 与辐射相关的气体射线平均行程
 S : 管螺距
 T : 周期或绝对温度
 V : 体积
 W : 热容流量

英文小写字母

α : 导温系数或吸收率

c : 比热容或质量浓度
 d : 直径
 f : 气泡发生频率
 g : 重力加速度
 h : 焓或肋片的高度
 k : 总传热系数
 l : 长度, 特征尺寸或混合距离
 m : 质量流量
 n : 发泡点数, 管列数或段数
 p : 分压力
 q : 热流密度
 r : 半径坐标, 半径, 温度恢复系数
 s : 周长, 长度
 t : 流体温度
 t_b : 整体温度
 t_m : 混合平均温度
 t_s : 饱和温度
 u : 速度
 v : 速度, 比容
 w : 速度
 x : 坐标, 质量率
 y, z : 坐标

希腊字母

α : 换热系数
 α_D : 传质系数
 β : 体膨胀系数
 δ : 板的厚度, 液膜厚度, 边界层厚度
 Δt_m : 平均对数温差
 Δt_L : 过冷度
 Δt_s : 过热度
 ε : 辐射率
 ε' : 有效辐射率
 ε_D : 涡流扩散系数
 ε_H : 涡流导温系数
 ε_M : 涡流动粘性系数
 η : 无量纲变数
 θ : 壁面温度, 角度

λ : 导热系数, 波长

μ : 粘性系数

ν : 运动粘性系数

ρ : 密度, 反射率

σ : 表面张力, 垂直应力, 斯蒂芬-波尔茨曼常数

τ : 时间, 剪切应力, 透射率

ϕ : 肋片效率, 换热器的温度效率, 角度

ϕ_s : 带散热肋片壁面的总效率

φ : 角度, 无量纲温度

ψ : 角度, 接触角, 流函数

Ω : 立体角

■ 无量纲特征数

Bi : 比奥数

Bo : 沸腾数

Fo : 傅里叶数

Ga : 伽里略数

Gr : 格拉晓夫数

Ja : 雅考布数

Kn : 克努森数

Le : 路易斯数

Ma : 马赫数

Nu : 努塞尔数

Pe : 贝克来数

Pr : 普朗特数

Ra : 瑞利数

Re : 雷诺数

Sc : 施密特数

Sh : 薛伍德数

St : 斯坦顿数

目 录

译者序

原序

1 绪论	(1)
1.1 热移动	(1)
1.2 换热系数和总传热系数	(1)
2 热传导	(3)
2.1 基本定律和基本方程式	(3)
2.2 导热系数	(5)
1. 气体的导热系数	(5)
2. 液体的导热系数	(6)
3. 金属的导热系数	(6)
4. 保温材料的导热系数	(7)
3 一维稳定热传导	(10)
3.1 稳定热传导	(10)
1. 平板	(10)
2. 圆管	(12)
3. 球	(14)
3.2 总传热量	(15)
1. 平板	(15)
2. 圆管	(16)
3. 总传热量的等效电路	(18)
3.3 放热体	(18)
1. 平板	(18)
2. 圆柱	(19)
3.4 细长棒	(20)
1. 流体温度的测定	(21)
2. 固体温度的测定	(22)
3.5 带肋片的表面	(23)
1. 矩形直肋	(24)
2. 矩形环肋	(26)
3. 三角形直肋	(27)
4. 最佳肋片	(28)
5. 肋化表面的总传热	(30)
4 二维稳定热传导	(32)
4.1 解析解	(32)

1. 半无限大平板	(32)
2. 矩形柱	(33)
4.2 数值解	(35)
1. 原理	(35)
2. 解法	(35)
3. 扩展	(36)
5 不稳定热传导	(40)
5.1 解析解	(40)
1. 表面有温度突变的情况	(40)
2. 表面有散热的情况	(44)
5.2 图解法和数值解	(48)
1. 原理	(48)
2. 表面有温度突变时的解法	(49)
3. 表面有散热时的解法	(51)
5.3 周期性热传导	(52)
5.4 结冰与融解	(56)
1. 结冰	(56)
2. 冰的融解	(59)
5.5 烧蚀	(60)
1. 烧蚀的机理	(61)
2. 准稳定烧蚀过程	(62)
6 对流换热	(64)
6.1 对流的基本概念	(64)
1. 换热系数	(64)
2. 流动及能量传递机理	(64)
3. 边界层	(65)
4. 努塞尔数	(66)
5. 对流换热系数的求解方法	(68)
6.2 量纲分析	(68)
1. 基本单位和量纲	(69)
2. 无量纲物理量群的确定	(70)
3. 实验数据的无量纲化	(71)
6.3 对流换热的基本方程式	(72)
1. 连续性方程式	(72)
2. 动量方程式	(73)
3. 能量方程式	(74)
6.4 动量及能量积分方程	(76)
1. 动量积分方程	(77)
2. 能量积分方程	(78)
6.5 对流换热的特征数及相似定理	(79)

6.6 紊流换热的动量理论	(82)
7 强迫对流	(84)
7.1 平板层流传热的精确解	(84)
1. 动量方程的解	(84)
2. 能量方程的解	(87)
7.2 平板层流传热的近似解	(93)
7.3 平板紊流传热的近似解	(96)
7.4 管内层流传热	(98)
1. 泊肃叶流动	(98)
2. 能量方程	(101)
3. 传热面温度为常数时的精确解	(102)
4. 传热面温度为常数时的近似解	(106)
5. 传热面热流密度为常数时的精确解	(108)
7.5 非圆管内的层流传热	(112)
7.6 紊流流动的动量传递与热传递的类比	(113)
1. 时间平均值及脉动分量	(113)
2. 动量传递和紊流应力	(113)
3. 热传递和紊流热流密度	(116)
4. 普朗特的混合距离理论	(117)
5. 紊流的速度分布	(119)
6. 根据动量传递与热传递的类似性解析紊流换热	(121)
7.7 管内紊流换热	(128)
7.8 横向绕过物体流动的传热	(134)
7.9 传热的整理式	(136)
1. 无量纲整理式和简化式	(136)
2. 管内流动	(137)
3. 沿平板的流动	(138)
4. 圆管外部的流动	(139)
7.10 高速流动的传热	(144)
8 自然对流	(147)
8.1 机理	(147)
8.2 竖直平板层流换热的精确解	(148)
1. 换热的基本方程式(边界层方程式)	(148)
2. 等壁温时的精确解	(149)
3. 等壁面热流密度时的精确解	(152)
8.3 竖直平板层流换热的近似解	(155)
1. 换热的积分方程式	(155)
2. 等壁温时的近似解	(156)
3. 等壁热流密度时的近似解	(162)
4. 由层流向紊流的过渡	(162)

8.4	竖直平板的紊流换热	(162)
8.5	换热的整理式	(164)
1.	无量纲整理式 (一般式)	(164)
2.	简化式	(166)
8.6	热虹吸	(167)
8.7	气体层	(168)
9	沸腾	(171)
9.1	沸腾曲线	(171)
9.2	现象的非重现性	(172)
9.3	气泡力学	(172)
1.	泡核的生成	(172)
2.	气泡的发生和脱离	(177)
3.	气泡的成长	(180)
9.4	自然对流沸腾	(181)
1.	泡核沸腾	(181)
2.	过渡沸腾和熄沸	(186)
3.	膜沸腾	(189)
9.5	沸腾流动	(192)
1.	流动形式和换热	(192)
2.	换热的整理式	(193)
3.	熄沸	(194)
9.6	超临界压力下流体的换热	(199)
1.	自然对流	(200)
2.	强迫对流	(201)
10	冷凝	(203)
10.1	机理	(203)
10.2	层流膜状冷凝	(204)
1.	努塞尔静态饱和蒸气水膜理论	(204)
2.	努塞尔动态饱和蒸气水膜理论	(213)
3.	二相界面理论	(216)
10.3	紊流膜状冷凝	(220)
1.	层流液膜流动向紊流的过渡	(220)
2.	静态饱和蒸气的紊流膜状冷凝	(222)
3.	动态饱和蒸气的紊流膜状冷凝	(224)
10.4	过热蒸气及含有不冷凝气体的蒸气	(226)
1.	过热蒸气的膜状冷凝	(226)
2.	含不冷凝气体的蒸气	(226)
10.5	珠状冷凝	(227)
11	热辐射	(229)
11.1	基本定律	(229)

1. 吸收、反射及透射	(229)
2. 基尔霍夫定律	(230)
3. 普朗克定律	(231)
4. 维恩位移定律	(231)
5. 斯蒂芬-波尔茨曼定律	(232)
6. 辐射强度和兰贝特余弦定律	(233)
11.2 实际表面的辐射特性	(234)
1. 灰体	(234)
2. 定向辐射率及定向吸收率	(234)
3. 全辐射率及全吸收率	(236)
11.3 黑体系统的辐射换热	(239)
1. 黑体两表面间的辐射换热和形状系数	(239)
2. 黑体密闭空间系统的辐射换热	(243)
3. 含反射面的黑体系统的辐射换热	(244)
11.4 灰体系统的辐射换热	(245)
1. 灰体两表面间的辐射换热	(245)
2. 有效辐射和入射辐射	(247)
3. 灰体系统辐射换热的等效电路	(248)
4. 灰体密闭空间系统的辐射换热	(248)
5. 假想辐射面的有效辐射率	(250)
11.5 辐射换热的等效换热系数	(255)
11.6 降低辐射换热量的方法	(256)
1. 温度测量误差	(256)
2. 辐射防护板	(256)
11.7 气体辐射	(259)
1. 气体的吸收	(260)
2. 气体的辐射	(261)
3. 气体内的辐射能传递方程	(262)
4. 气体的辐射力和辐射率	(263)
5. 气体的射线平均行程	(265)
6. 气体的吸收率和穿透率	(268)
7. 实际气体的定向辐射率和定向吸收率	(271)
11.8 含有等温气体的灰体密闭空间系统的辐射换热	(274)
1. 含灰气体的系统	(275)
2. 等温、等辐射率的灰体系统	(278)
11.9 火焰辐射及微粒碳焰辐射	(280)
12 热交换	(282)
12.1 换热器	(282)
12.2 传热式换热器	(283)
1. 平均温度差	(283)

2. 换热器的设计	(286)
3. 出口温度	(289)
4. 换热器的温度效率	(293)
5. 污垢系数	(294)
12.3 蓄热式换热器	(300)
1. 忽略蓄热体内部温差的情况	(300)
2. 考虑蓄热体内部温差的情况	(303)
13 质量传递	(310)
13.1 机理	(310)
13.2 斐克定律	(310)
1. 等温气体的等摩尔扩散	(312)
2. 等温静止气体中的扩散	(313)
13.3 质量的对流传递	(315)
1. 质量传递的基本方程式	(315)
2. 对流质量交换的特征数及相似准则	(316)
3. 质量传递与热量传递的类比	(318)
4. 喷吹层流边界层的热及质量传递	(319)
13.4 紊流中的质量传递	(323)
1. 质量传递和紊流质流密度	(323)
2. 普朗特混合距离理论	(323)
3. 动量、热量及质量传递的类比	(324)
13.5 质量传递的准则方程	(327)
1. 沿平板的流动	(328)
2. 管内紊流	(328)
3. 单个球	(328)
练习题	(329)
习题答案	(350)
附录 I 热量单位换算表	(354)
附录 II 金属(固体)的热学性质	(356)
附录 III 固体非金属的热学性质	(357)
附录 IV 饱和液体的热学性质	(358)
附录 V 熔融金属的热学性质	(359)
附录 VI 水的热学性质	(360)
附录 VII 气体的热学性质	(361)
参考文献	(362)

1 绪 论

1.1 热移动

热能的传递有三种方式,即(i)热传导(conduction), (ii)热对流(convection), (iii)热辐射(radiation)。由物体内粒子相互接触而产生的热传递称为热传导。由流体粒子宏观运动或因流体相互混合而传递热量的情况称为热对流。热对流中又可分为①自然对流(natural convection)或自由对流(free convection), ②强迫对流(forced convection)。前者发生在因有温度差而产生的流体运动的场合, 后者发生在因机械原因而产生流体运动的场合。另外, 几乎所有的物体都要以波动的形式辐射或吸收少部分能量。由这种形式传出去的能量就是辐射能。但是, 在实际生活中, 由这三种方式分别独立地传递能量是罕见的, 通常是以两种或三种方式同时传递能量。

1.2 换热系数和总传热系数

在热交换装置中, 固体表面与流体之间处处发生着热交换, 下式可表示热交换的大小。

$$\frac{Q}{A} = q = \alpha (\theta - t) \quad (1-1)$$

式中, Q 为单位时间内传递的热量, W [kcal/h]; θ 为固体表面的温度, K [$^{\circ}\text{C}$]; t 为流体的温度, K [$^{\circ}\text{C}$]; A 为固体的表面积, 即换热面积, m^2 [m^2]; q 为热流密度, W/m^2 [kcal/($\text{m}^2 \cdot \text{h}$)]*。 (1-1)式就称为牛顿冷却定律(Newton's cooling law)。由此定义的系数 α 称换热系数** (coefficient of heat transfer), 其单位为 $W/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, [kcal/($\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$)]。

现在, 如果知道了换热系数 α , 在给出 θ , t 及 A 的情况下, 则可由式(1-1)计算出每单位时间的换热量 Q , 也可以在给定了 θ , t 及 Q 的条件下, 反求出所需要的换热面积 A 。问题是要想办法知道 α 的数值。

在实际的热交换装置中, 通常在固体壁两侧存在不同温度的流体, 在此条件下, 当给定了高温流体温度 t_h , 低温流体温度 t_c 及换热面积 A , 要求计算单位时间内从高温流体向低温流体传递的热量 Q , 可用下面热传导公式。

$$\frac{Q}{A} = q = k (t_h - t_c) \quad (1-2)$$

k 称为总传热系数*** (overall coefficient of heat transfer) 其单位为 $W/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

• 今后世界各国都将使用国际单位制(简称SI制), 在此过渡时期, 考虑到过去均使用工程单位制, 所以本书规定SI制与工程单位制并用, 本书中以SI制为主体, 工程单位放在〔〕内, 表、经验公式及例题中, SI制与工程单位制并用。

• • 在机械工学便览(修订本第6版)〔日本机械学会编〕中称传热率, 在化学工学便览(修订第4版)〔化学工学协会编〕中称换热系数或热传递系数。 α 是从牛顿冷却定律出发定义的, 如同后面阐述的那样, 因为仅仅是个约定, 所以称后者的名称较好。

• • • 机械工学便览中称热通过率, 化学工学便览中称综合换热系数, 也有称总传热系数的。

[kcal/(m²·h·°C)]。

现考虑以冷凝器作为实际的热交换装置来研究, t_h 为蒸气的温度, 已知冷凝器的真空度, t_c 为低温流体温度, 在此即为冷却水的温度, 冷却水的温度从冷凝器的入口到出口逐渐上升, 但是, 出口与入口冷却水的温差并不大, 所以, 可用某一平均温度代表出、入口的温度。我们认为这个温度可用 t_c 代表。这样, 即可求出传热量 Q 。也就是, 当给出单位时间内从蜗轮机流入冷凝器的蒸气流量 G 及其干度 x , 又可由冷凝器的真空度知其相当于压力 P 的蒸气潜热 L , 则 Q 可直接由下式求出。

$$Q = GxL$$

只要知道了 k 又可简单地求出满足上述要求的冷凝器的换热面积 A 。

问题是如何确定总传热系数 k 的数值。 k 至少是换热系数 α 的函数, 但 α 值又受各种条件的影响, 因此, 为了确定 k 值, 必须首先在分析、研究现象的基础上, 采用综合确定的方法。

〔例题1-1〕 求出处理干度为90%的蒸气100t/h, 真空度为722mmHg的冷凝器的换热面积〔冷凝水的温度为25°C, 总传热系数为3000kcal/(m²·h·°C)〕。

〔解〕 处理蒸气量 $G = 100000 \text{ kg/h}$

冷凝水压力 $P = 722 \text{ mmHg}$ 真空

$$= 1.033 \times \frac{760 - 722}{760} = 0.052 \text{ ata.}$$

由蒸气表可查出蒸气温度 t_h 及蒸发热 L 为

$$t_h = 33^\circ\text{C}, L = 578 \text{ kcal/kg}$$

又, 冷却水温度 $t_c = 25^\circ\text{C}$, 总传热系数 $k = 3000 \text{ kcal/(m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C)}$, 冷凝器入口蒸气的干度 $x = 0.9$, 则传热量为

$$Q = GxL = 100000 \times 0.9 \times 578 = 52 \times 10^6 \text{ kcal/h}$$

因此, 由式(1-2)即可求出换热面积 A

$$A = \frac{Q}{k(t_h - t_c)} = \frac{52 \times 10^6}{3000 \times (33 - 25)} = 2170 \text{ m}^2$$

2 热传导

2.1 基本定律和基本方程式

现在来研究各向同性的均质固体或流体,如图2-1所示。假定其内部任意一点的温度为 θ ,那么,单位时间内因热传导通过在该点周围微小面积 dA 的热量

$$dQ = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} dA \quad (2-1)$$

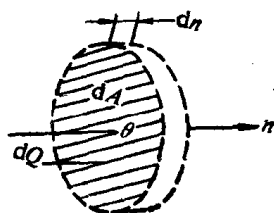


图2-1 物体内的微元面积

式(2-1)称为傅里叶定律。由于式中 $\frac{\partial \theta}{\partial n}$ 通常为“-”,为使热量为“+”,所以在

式(2-1)右边加了“-”。物理参数 λ 称为导热系数(thermal conductivity),其单位为 $W/(m \cdot K)$ [$kcal/(m \cdot h \cdot ^\circ C)$]。以傅里叶定律为基础就可导出热传导的基本微分方程式。

现取图2-2所示的直角坐标 (x, y, z) ,在所研究的物体内部,取一边长分别为 dx, dy, dz 的正六面体,并假定所研究的体积处于热平衡状态。那么,在时间 $d\tau$ 时, x 方向因热传导流入的热量为 $(dQ_x)_{in}$,流出的热量为 $(dQ_x)_{out}$,由式(2-1)可写成

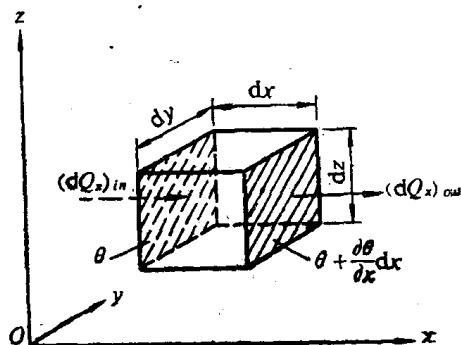


图2-2 物体内的微小正六面体(直角坐标)

$$(dQ_x)_{in} = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} dy dz d\tau$$

及

$$(dQ_x)_{out} = -\left[\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) dx \right] dy dz d\tau$$

因此,在 $d\tau$ 时间内,由 x 方向的热传导,使所研究物体内部增加的热量为

$$(dQ_x)_{in} - (dQ_x)_{out} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) dx dy dz d\tau$$

同理,在 y 轴方向及 z 轴方向的热流关系也成立,所以被研究体积内增加的热量为

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \right] dx dy dz d\tau$$

另外,物体在每单位体积、单位时间内的放热量为 Q_v ,则整个微元体积所产生的热量为

$$Q_v dx dy dz d\tau$$

假定这些热量仅仅用来使被研究体积内温度上升, 则被研究体积内的温度为

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} d\tau$$

达到热平衡后下式成立

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} d\tau \cdot \rho c dx dy dz &= Q_v dx dy dz d\tau \\ &+ \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \right] dx dy dz d\tau \\ \therefore \rho c \frac{\partial \theta}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + Q_v \quad (2-2) \end{aligned}$$

式中, ρ 为物体的密度, c 为物体的比热容。

在一定情况下, 导热系数不随温度变化, 则式 (2-2) 又可写成

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + \frac{Q_v}{\rho c} = a \nabla^2 \theta + \frac{Q_v}{\rho c} \quad (2-3)$$

式中, $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ (2-4)

a 为物理参数, 称为导温系数 (thermal diffusivity), 其单位为 m^2/h 。式 (2-2) 或式 (2-3) 即为热传导的基本方程式。

特殊情况下, 将温度 θ 不随时间 τ 变化的状态称为稳定状态 (steady state), 这时, 式 (2-3) 热传导方程变为泊松 (Poisson) 方程, 即

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{Q_v}{\lambda} = 0 \quad (2-5)$$

如果没有物体体积放热, 则又变为拉普拉斯 (Laplace) 方程, 即

$$\nabla^2 \theta = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0 \quad (2-6)$$

对热传导而言, 称以上诸式为傅里叶微分方程式 (Fourier's differential equation of heat conduction)。图2-3是用圆柱坐标系 (z, r, ϕ) 或极坐标系 (r, ϕ, φ) 表示的情况, 是通过取圆筒壳体或球壳体为研究对象, 写出热平衡方程式导出来的, 其结果与把上面在直角坐标系中所求的拉普拉斯方程换成圆柱坐标系或极坐标系的形式一致。即

$$\nabla^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2-7)$$

$$\nabla^2 = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\sin \phi \frac{\partial}{\partial \phi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \phi} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \quad (2-8)$$