

传 热 学

南京航空学院
西北工业大学 合编
北京航空学院



国防工业出版社

内 容 简 介

本书系根据航空三院校针对航空工程的特点所拟定的大纲编写的。主要论述传热学的基本理论，并着重介绍传热学在航空工程中的应用。

全书共分七章，第一章至第四章系统地叙述导热、对流换热和辐射换热三种基本传热方式及其应用；第五章讨论了几种传热方式同时存在时的复合换热的分析方法；第六章介绍传质的基本理论；第七章着重阐述了传热学在航空发动机冷却方面的应用。各章均附有例题及参考文献。

本书可作为高等院校航空航天工程、动力机械、热物理等专业的教科书或教学参考书，也可供有关科技人员参考。

传 热 学

南京航空学院

西北工业大学 合编

北京航空学院

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张11³/₄ 296千字

1982年1月第一版 1982年1月第一次印刷 印数：0,001—5,500册

统一书号：15034·2357 定价：1.45元

前 言

本书是根据三机部航空三院校传热学教材会议上讨论制订的大纲编写的。在编写过程中，注意到在加强基础理论的同时，适当地联系航空工程中的传热问题，酌量增加了对流换热的理论分析和航空发动机的冷却两部分内容。在编写过程中，还注意到吸取以往的教学经验和参考了国内外的新教材新成就。本书采用国际单位制。导热一章补充了二元稳定导热的数学分析解和数值解；对流换热一章中加强了高速气流的对流换热和燃气与叶片间的对流换热；辐射一章增加辐射的网络分析和发动机燃气黑度的计算方法；复杂传热一章增加涡轮叶片对流冷却的分析和加力燃烧室壁温的计算。为便于学生自学，本书力求叙述简明扼要，层次清楚。各章末还列有相应的参考文献目录。

本书第一章由王宝官编写，第二、三章和第七章中的第一、二、三、四节由郑际睿编写，第四章由陆大有编写，第五、六两章和第七章中的第五节由朱长青编写，附录中关于空气在不同油气比和压力下的物性由王丰收集编写。本书由郑际睿主编，朱长青、王丰、陆大有分工审查，最后由朱长青、王丰审阅定稿，由陆大有负责全书的组织工作。

由于水平的限制，加之时间比较仓促，书中不免有不妥或错误之处，热忱盼望读者批评指正。

编 者

符 号 表

- A 面积 $[\text{m}^2]$; 常数
 A_{cs} 截面积 $[\text{m}^2]$
 A_h 换热面积 $[\text{m}^2]$
 a 导温系数, $a = \lambda / c_p \rho [\text{m}^2 / \text{s}]$; 音速
 a_t 涡流热扩散系数 $[\text{m}^2 / \text{s}]$
 B 亮度因子; 常数
 b 宽度 $[\text{m}]$; 变导热系数的温度系数
 C 常数
 c 浓度; 比热 $[\text{kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}]$; 叶弦长度 $[\text{m}]$; 热容量 $[\text{kJ} / \text{K}$ 或 $\text{J} / \text{K}]$
 C_f 摩擦系数
 C_m 气膜冷却中的混合系数
 c_n 相邻两喷孔的中心距离 $[\text{m}]$
 c_p 定压比热 $[\text{kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}]$
 D 直径 $[\text{m}]$; 阻力 $[\text{N}]$; 质量扩散系数 $[\text{m}^2 / \text{s}]$
 D_t 涡流质量扩散系数 $[\text{m}^2 / \text{s}]$
 d 直径 $[\text{m}]$
 d_{eq} 当量直径 $[\text{m}]$, $d_{eq} = 4A_{cs} / l_p$
 d_i 内直径 $[\text{m}]$
 d_o 外直径 $[\text{m}]$
 d_n 喷孔直径 $[\text{m}]$
 E 辐射力 $[\text{W} / \text{m}^2]$; 能量 $[\text{J}]$
 E_b 黑体辐射力 $[\text{W} / \text{m}^2]$
 E_λ 波长为 λ 时的单色辐射力 $[\text{W} / \text{m}^2 \cdot \mu\text{m}]$
 F 力 $[\text{N}]$
 f 范宁摩擦系数, $f = \Delta p / (l/d) (1/2) \rho \bar{U}^2$
 g 重力加速度 $[\text{m} / \text{s}^2]$
 H 投射辐射力 $[\text{W} / \text{m}^2]$

- h 换热系数 $[W/m^2 \cdot K]$; 普朗克常数
 h_D 传质系数 $[m/s]$
 h_f 有气膜冷却时的换热系数 $[W/m^2 \cdot K]$
 $\overline{h}$ 平均换热系数 $[W/m^2 \cdot K]$
 h^* 用式 (7-12) 定义的受气膜冷却影响的换热系数 $[W/m^2 \cdot K]$
 I 焓 $[J]$; 辐射强度 $[W/m^2 \cdot sr]$
 i 比焓 $[J/kg]$
 J 有效辐射 $[W/m^2]$
 K 传热系数 $[W/m^2 \cdot K]$; 常数
 K_l 单位长度的传热系数 $[W/m \cdot K]$
 k 绝热指数
 L 长度 $[m]$
 L_0 1 公斤燃油完全燃烧时所需的理论空气量
 l_p 周边长度 $[m]$
 l 叶片或肋片长度 $[m]$; 射线平均行程 $[m]$; 特征尺寸
 M 马赫数; 动量流 $[kg \cdot m/s^2]$ 或 N
 $M_x (M_y)$ x (或 y) 轴向的动量流
 M_u 分子量
 $\overline{M}$ 冷却密流比, $\overline{M} = \rho_c U_c / \rho_g U_g$
 m 幂指数; 冷却率, $m = hA/cpV$; 质量 $[kg]$
 $\dot{m}$ 质量流量 $[kg/s]$
 $\dot{m}''$ 质量流密度 (简称密流) $[kg/m^2 \cdot s]$
 N 扩散密流 $[kg/m^2 \cdot s]$
 $\dot{N}$ 莫尔扩散密流 $[mol/m^2 \cdot s]$
 n 莫尔浓度 $[mol/m^3]$; 常数或幂指数
 P 传质中混合气压力; 多孔度
 p 压力 $[N/m^2]$; 光子动量
 p^* 总压 $[N/m^2]$
 Q 热流 $[W]$
 q 比热流 (热流密度) $[W/m^2]$
 q_λ 导热比热流 $[W/m^2]$
 q_c 对流比热流 $[W/m^2]$
 q_r 辐射比热流 $[W/m^2]$

- R 半径[m]; 热阻; 电阻
 r 半径[m]; 恢复系数
 $\mathcal{R}_0$ 通用气体常数[J/mol·K]
 $\mathcal{R}$ 气体常数[J/kg·K]
 s 射槽(或狭缝)高度[m]
 T 温度[K或°C]
 T_f 流体平均温度[K或°C]
 T_f' 进口截面流体容积平均温度[K或°C]
 T_f'' 出口截面流体容积平均温度[K或°C]
 T_g 燃气温度[K或°C]
 T_m 流体薄膜温度, $T_m = (T_w + T_f)/2$ [K或°C]
 T_{eq} 平衡温度[K]
 T_w 壁面温度[K或°C]
 T^* 总温[K]
 T_* 参考温度, $T_* = T_\infty + 0.5(T_w - T_\infty) + 0.22(T_f - T_\infty)$
 T_r 恢复温度[K]
 T_{aw} 绝热壁温度[K]
 T_{ge} 燃气有效温度[K]
 t 叶片节距(栅距)[m]; 温度[K或°C]; 射槽唇口厚度
 U 速度; 特征速度[m/s]; 内能[J]
 $\overline{U}$ 截面平均速度[m/s]
 U_∞ 自由流速度[m/s]
 u x 轴向速度; 速度[m/s]
 V 容积(m³); 无因次速度
 v y 轴向速度[m/s]
 $\bar{v}$ 分子平均速度[m/s]
 W 功[J]
 w 相对速度; z 轴向速度[m/s]
 X, Y, Z 分别为 x, y, z 轴向无因次坐标;
 $X = x/l$ 或 x/d ; $Y = y/l$ 或 y/d ; $Z = z/l$ 或 z/d
 x, y, z 坐标
 z_n 喷孔至壁面的距离[m]
 Re 雷诺数

- Nu 努谢尔数
 Nu₀ 在驻点处的努谢尔数
 Gr 葛拉晓夫数, $Gr = g\beta\Delta T l^3 / \nu^3$
 Gr* 修正的葛拉晓夫数, $Gr^* = g\beta q_w x^4 / \nu^2 \lambda = Gr_x Nu_x$
 Pe 贝克列数, $Pe = Pr Re = U d / a$
 Pr 普朗特数, $Pr = \mu c_p / \lambda = \nu / a$
 St 斯坦顿数, $St = h / \rho c_p u$
 α 吸收率; 余气系数, $\alpha = m_a / m_f L_0$
 β 流体容积膨胀系数; 叶型的进、出口角
 δ 附面层、平壁、肋壁或夹层厚度[m]
 $\delta_l, \delta_t, \delta_T$ 分别为层流附面层, 紊流附面层或热附面层厚度[m]
 ε 黑度; 修正系数; 光子能量
 ε_l 考虑进口段影响的修正系数
 ε_R 考虑弯管半径影响的修正系数
 ε_n 系统黑度
 ε_0 量子能量, $\varepsilon_0 = h\nu$, h 为普朗克常数, ν 为频率
 ε_ϕ 冲击角为 ϕ 时的修正系数
 Φ 辐射角系数
 $\bar{\Phi}$ 平均辐射角系数
 φ 角度
 λ 导热系数[J/m·K]; 射线波长[μm]
 $\bar{\lambda}$ 平均自由行程[m]
 η 气膜冷却效果(绝热有效温比); 效率
 ρ 密度[kg/m³]; 反射率; 质量浓度[kg/m³]; 反力度
 σ 黑体辐射常数; 分子有效直径[m]
 τ 时间[s]; 穿透率; 切应力[N/m²]
 τ_m, τ_t 分别为分子切应力或涡流切应力[N/m²]
 μ 动力粘性系数(分子粘度)[kg/m·s 或 N·s/m²]
 μ_t 涡流粘度[kg/m·s 或 N·s/m²]
 ν 运动粘性系数(动粘度)[m²/s]
 ν_t 涡流动粘度[m²/s]
 Θ 温差比或过余温度比
 θ 角度

VIII

θ 温差或过剩温度 [K 或 $^{\circ}\text{C}$]

γ 油气质量比, $\gamma = \text{燃油质流} / \text{空气质流} = m_f / m_a$

下角注:

∞ 自由流的

g 燃气的

c 冷却气的

t 紊流的

l 层流的

T 温度(或热)的

目 录

绪论	1
第一章 导热	6
1-1 导热的基本定律	6
1-2 固体导热微分方程	13
1-3 通过平壁的稳定导热	20
1-4 通过圆筒壁的导热	27
1-5 二元稳定导热	33
1-6 不稳定导热的概念	45
参考文献	52
第二章 对流换热的理论分析	53
2-1 对流换热概述	53
2-2 层流附面层的微分方程	58
2-3 平壁上层流附面层的积分方程及其近似解	66
2-4 紊流附面层的流动与换热	78
2-5 管内紊流流动与换热	86
参考文献	96
第三章 对流换热的经验公式	98
3-1 相似准则和准则方程的建立	98
3-2 流体在管内受迫流动时的对流换热	106
3-3 流体外绕物体时的受迫对流换热	116
3-4 自然对流换热	130
3-5 高速气流的对流换热	143
3-6 燃气与涡轮叶片间的对流换热	157
参考文献	164
第四章 热辐射与辐射换热	166
4-1 热辐射的基本概念	166
4-2 热辐射的基本定律	174

4-3	固体表面间的辐射换热	185
4-4	在空间内任意放置的两壁面间的辐射换热	195
4-5	辐射换热的网络法	203
4-6	气体辐射及其与壁面之间的辐射换热	212
4-7	太阳辐射简介	227
	参考文献	229
第五章 复合换热		230
5-1	复合换热与传热	230
5-2	通过平壁的传热	232
5-3	通过圆筒壁的传热	234
5-4	传热的强化	236
5-5	传热的削弱	240
5-6	通过肋壁(或枢轴)的复合换热	242
5-7	涡轮导向叶片的对流冷却	250
5-8	加力燃烧室壁温计算	254
	参考文献	263
第六章 传质		264
6-1	引言	264
6-2	斐克定律	265
6-3	分子扩散的传质	268
6-4	二元混合物中的扩散	271
6-5	传质微分方程	277
6-6	层流附面层中的传质	281
6-7	动量、热量和质量交换的类比	286
6-8	传质系数	288
6-9	紊流附面层中的传质	291
	参考文献	294
第七章 航空燃气涡轮发动机的冷却		295
7-1	引言	295
7-2	冲击冷却	298
7-3	气膜冷却	303
7-4	发散冷却	315
7-5	固体火箭发动机的换热和壁温计算	327

参考文献347

附录350

〔A〕 单位换算表——国际制、工程制、英制单位的换算.....350

〔B〕 物性参数表353

〔B-1〕 金属材料的热物性参数353

〔B-2〕 非金属材料的热物性参数356

〔B-3〕 空气及燃气的热物性参数357

〔B-4〕 各种材料的辐射性质360

〔B-5〕 饱和水的热物性参数363

参考文献364

绪 论

1. 传热学的研究对象

在一系统中只要存在温度梯度，或者两个不同温度的系统发生接触，就会产生能量的传递。这种在迁移中的能量称为“热量”，它只在迁移过程中才存在。它既不能直接测量，也不能直接观察到，但它所产生的效应是可以观察到的，同时也是可以间接测量出来的。这种由于温差引起的能量迁移过程统称为“传热”。单位时间内所传递的热量称为“热流”。

一切传热过程都包括能量的传递和转换，它们必须遵循热力学第一定律和第二定律。初看起来，传热原理似乎可从热力学的基本定律推导出来。其实不然，因为经典热力学只从宏观上研究处于热力平衡（包括力平衡、热平衡和化学平衡）状态下系统的能量转换问题，所以，可直接地用压力、容积和温度等宏观参数进行热力分析，而无须对物质结构作任何假设。换言之，经典热力学所采用的热力分析只限于平衡态的理想过程。但在传热学中，热流的产生正是由于温度不平衡的结果，显然不能简单地用热力学方法加以处理，而应利用其他一些定律作为依据来进行定量分析。这是传热学同热力学的第一个不同点。

其次，从热力学观点来看，在过程中所传递的热量是系统的能量增量与外功的代数和。热力学在研究系统中某一过程从始态到终态间的能量转换时，并不涉及能量转换的机理和所需的时间。但在传热学中，不仅要探求和解释热量是怎样进行传递的，而且还要推算这种热量传递的速率。因此，从工程观点来看，在规定的温差下如何确定热流是传热学的一个关键问题。

在一些工程领域里设计换热设备时，要计算所传递的热量，

了解在给定条件下热量传递的速率,还要考虑换热设备的经济性、可用性和确定它的尺寸。由此,在传热分析中,往往需要计算在单位时间内所传递的热量和确定物体内部温度的变化规律。总之,传热学是研究由于温差引起的热量传递的一门学科,它着重研究物体内部或物体与物体之间的热量传递机理,所传递的热流、物体内部或物体间的温度分布,以及其他与物体的加热和冷却有关的一些问题。

“传热”这个名词具有广义和狭义两种意义。就广义来说,传热是指一切由于温差而引起的热量传递,而狭义的传热指从热流体通过固体壁到冷流体之间的整个换热过程。

2. 传热的基本方式

温差是一切传热现象的推动力,是物体间产生传热的必要条件。因此,这种温差也称为温压,正如在电学中促使产生电流的电位差称为电压一样。由于传热的机理很复杂,不只随温差而异,而且还受各种不同物理定律所支配,因而传热现象往往同时包含几种不同机理的换热过程。为便于分析,一般根据换热过程的机理,把传热归纳为三种基本方式:热传导(简称导热)、对流和热辐射。严格地说,只有导热和热辐射才能列为传热的基本方式。这是因为只有这两种过程的机理才取决于温差的存在,而对流除了温差以外还受着质量迁移的支配,并不严格地遵守传热的定义。不过,由于对流也能实现把热量从高温区传到低温区,因而习惯上也把对流作为传热的一种基本方式看待。在研究某些传热过程时,可把这三种传热方式分别进行分析。必须指出,在自然界中,热量很少以单一的方式进行传递而往往是几种方式同时发生。在工程应用中分清哪种传热方式在数量上处于主导地位是非常重要的。因此,在具体分析中可忽略次要方式而得出具有实用价值的近似解。

(1) 导热 导热指在介质(固体、液体或气体)中或者在不同介质直接接触时,热量从高温区传到低温区的过程。在导热

过程中，没有宏观物体的相对运动而只有微观粒子的运动。在不透明的固体中，导热是传递热量的唯一方式。在流体中，导热也是存在的，但所传递的热量通常总与对流结合在一起。

为了对传热作出定量的分析，有必要研究不同形式的换热规律。导热的基本规律首先由法国数理学家付里叶经过多年的观察于1822年提出的。对于一元导热，可用下式表示：

$$Q_K = -\lambda A dT/dx \quad (1)$$

式中 Q_K 为导热热流[W]； A 为与热流方向垂直的面积[m²]； dT/dx 为在该截面上沿热流方向 x 的温度梯度，即温度沿 x 轴的变化率。 x 轴向表示热流的方向。根据热力学第二定律，热量总是自发地从高温区传到低温区，即热流方向与温度梯度方向相反，因此上式带有负号；比例常数 λ 称为导热系数[W/m·°C]。

(2) 对流 对流是把导热作用、能量存储和混合运动三者结合在一起的能量迁移过程。对流换热是指固体壁与流体之间的能量传递过程，它在传热学中占有重要的地位。从温度较高的壁面对周围流体的对流换热过程可分成几个步骤进行。首先，热量通过导热作用从壁面传给邻近的流体微团，传热的结果增加了这些流体微团的温度和热能；然后，由于受外力或温差引起的升力作用，受热的流体微团转移到低温区同其他微团混合，从而把能量传给低温的流体微团。这里的流体起着载热体的作用：先把能量储存起来然后转移给低温流体。对流换热的强度主要取决于流体的热物理性质和混合作用。因此，在对流换热的分析中，需有流体力学的知识。

固体壁与流体之间的对流换热的计算公式首先由英国科学家牛顿于1701年提出：

$$Q_o = h_o A (T_w - T_f) = h_o A \Delta T \quad (2)$$

式中 Q_o 为对流换热热流[W]； h_o 为对流换热系数[W/m²·K]，下角注“ w ”和“ f ”分别表示壁面和流体。事实上，该式只能作为换热系数 h_o 的定义，而不是对流换热的定律。长期以来人们都引

用该式来计算对流换热热流。

(3) 辐射 以上两种传热方式只有在直接接触时才能实现,而辐射却无须直接接触便可把热量从高温物体传给低温物体。甚至两物体处于真空中也可进行热量传递。“辐射”这个术语一般用于所有以电磁波传播的现象,而在传热学中“辐射”是指由物体的热能转化而来的辐射能量,通常称为热辐射。一切物体都会不断地发射辐射能,其强度取决于物体的温度和物体的表面性质。辐射能以光速和电磁波形式向周围传播。黑体是最完善的辐射体,它所发射的辐射能可按斯蒂芬-波尔茨曼定律来计算:

$$Q_r = \sigma AT^4 \quad (3)$$

式中 Q_r 是辐射热流[W]; A 为黑体的表面积[m²]; T 为黑体的绝对温度[K]; σ 称为斯蒂芬-波尔茨曼常数,其值为 5.669×10^{-8} W/m²·K⁴。式(3)首先由奥地利科学家斯蒂芬于1879年通过实验发现的,而波尔茨曼则于1884年从理论上予以证实。式(3)指出,热辐射与绝对温度的四次方成比例,与周围介质无关。两黑体1和2之间的辐射换热热流可按下式计算:

$$Q_{1 \rightarrow 2} = \sigma \bar{\phi}_{12} A_1 [T_1^4 - T_2^4] \quad (4)$$

式中 $\bar{\phi}_{12}$ 为物体1对物体2的平均角系数。

有些传热学书中也包括了传质(即质量传递)的内容,这是因为有些传热现象有时与传质现象有关。例如气膜冷却和发散冷却是当前先进航空发动机所采用的两种冷却技术,它们都与传质有关。本书也将简要地介绍传质过程。

3. 传热学在航空工程中的应用

传热学原是物理学中热学的一部分。生产的发展促进了传热学的迅速发展而逐渐形成一门单独的学科。目前有许多工程领域都与传热学发生密切联系,特别在航空与航天工程中,随着喷气技术的迅速发展,飞行速度突破音障以后,飞行器进入超音速和高超音速的领域。为了解决飞行器的气动力加热和导弹及航天器的重返大气层等问题,传热学得到更加飞速的发展。例如,载人飞机

在9150 m高度以 $M = 2$ 的速度飞行时,若飞机表面保持为 50°C ,则由于气动力加热,高速气流对表面的加热热流高达 31550 W/m^2 ^[1]。这就要求设计师对飞机表面采取适当冷却措施以散走这股热流。航天器在91500 m高度以 7.9 km/s 的第一宇宙速度飞行,驻点的热流密度达 315500 W/m^2 以上,可使表面温度上升到 1650 K ^[1]。

对航空发动机来说,为了提高热效率和推进效率以减少燃料消耗,燃气涡轮喷气发动机向着“三高”方向发展,即高涡轮进口温度(T_3^*)、高增压比(π_k^*)和高涵道比。当前先进航空发动机燃烧室的出口燃气温度逐步接近于化学燃料的燃烧温度($2000\sim 2500\text{ K}$),远远超过材料所能承受的温度,这对发动机燃烧室和涡轮叶片的冷却提出更高的要求。今日的冷却技术已从一般的对流冷却逐步发展到冲击冷却、气膜冷却和发散冷却。火箭发动机和重返地面的飞行器则采用烧蚀(也称消融)冷却。这些冷却技术的理论基础就是传热与传质。在发动机设计和强度计算中,受热部件的热应力往往是一个严重问题。为了估算热应力,要求具有足够的传热学知识才能预测受热部件的温度分布。飞行器的座舱温度调节也需要传热方面的知识。

综上所述,传热学这门学科同近代许多工程领域发生了密切的联系,是上述领域的一门专业基础课程。

参 考 文 献

- [1] F. Kreith, Principles of Heat Transfer, p. 317, 2nd. Ed., International Textbook Co., 1965.

第一章 导 热

1-1 导热的基本定律

在绪论中已经介绍了传热的三种基本方式，导热是上述三种基本方式的一种。它是指直接接触的物体各部分能量交换的现象。这种能量交换的产生是由于分子间相互碰撞引起的内能传递的结果。这种现象在固体、液体和气体中均可产生。只要物体各部分存在温度差，就会产生这种能量的传递。

本章研究导热的机理和基本规律，介绍一些基本的计算方法及工程应用。在此之前，先要建立一些有关导热的基本概念。

1-1-1 导热的基本概念

1. 温度场

在自然界中，只要物体处于不同的温度之下，能量总会自发地由高温物体传给低温物体。所以，温差是热量传递的推动力。为此，我们在研究导热的时候，首先要研究物体各部分的温度分布。

物体的温度分布（也叫做温度场），一般来说，可以是空间坐标和时间坐标的函数，其数学表达式如下：

$$T = T(x, y, z, \tau) \quad (1-1)$$

式中 x 、 y 、 z 为空间坐标； τ 为时间坐标。

温度场可以分为稳定温度场和不稳定温度场两种。物体中各点的温度不随时间而变化的温度场称为稳定温度场；反之，称为不稳定温度场。式（1-1）就是不稳定温度场的表达式，而稳定温度场用下式表示：

$$T = T(x, y, z) \quad (1-2)$$