



“十三五”普通高等教育本科规划教材

工程传热学 学习指导与提高

黄晓明 许国良 王晓墨 编



中国电力教材服务官方微信

配套国家级规划教材
能动类专业考研必备
典型例题习题及解析



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

“十三五”普通高等教育本科规划教材

工程传热学 学习指导与提高

黄晓明 许国良 王晓墨 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为《普通高等教育“十一五”国家级规划教材 工程传热学》的配套教材。各章内容与主教材教学内容一一对应，每章分为学习指导、要点归纳、典型例题、自学练习、自学练习解答五部分。

编写本书的目的在于帮助学生延伸学习内容、深入学习思考、提高专业素质。本书要点、重点、难点分析透彻；例题、习题选取适当；答案清晰明确，符合“工程传热学”课程教学大纲，可满足能源、动力、化工、机械专业及相关专业本科、专升本等学生远程教学的学习与指导需要，也可供学生研究生考试复习使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程传热学学习指导与提高/黄晓明, 许国良, 王晓墨编. —北京: 中国电力出版社, 2018. 12
“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5198-2382-5

I. ①工… II. ①黄…②许…③王… III. ①工程传热学—高等学校—教学参考资料
IV. ①TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 204338 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 吴玉贤 (610173118@qq.com)

责任校对: 黄 蓓 太兴华

装帧设计: 郝晓燕 赵丽媛

责任印制: 钱兴根

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次: 2018 年 12 月第一版

印 次: 2018 年 12 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 12

字 数: 292 千字

定 价: 38.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前 言

工程传热学是研究由温差所引起的热量传递规律的科学。由于自然界和生产技术中到处存在着促使热量传递的温差，所以传热学的理论在自然界及各个领域都有着非常广泛的应用。工程传热学已成为现代科学技术中最重要的基础学科之一，是能源、动力、化工、机械、电子和土木等学科的主干技术基础课。通过本课程的学习，可以使学生熟练掌握和运用传热学的基本理论和研究方法，具备分析和解决实际工程中热量传递问题的能力，为其后续课程的学习和今后从事热能合理利用、热工设备效能提高及换热设备设计等方面的工作打下必要的基础。

编写本书的目的在于帮助学生延伸学习内容、深入学习思考、提高专业素质。本书共分8章：第1章概述、第2章稳态导热、第3章非稳态导热、第4章对流换热原理、第5章对流换热计算、第6章热辐射基础、第7章辐射换热计算、第8章传热过程和换热器。各章讨论的内容与主教材（《普通高等教育“十一五”国家级规划教材 工程传热学》ISBN 978-7-5123-1227-2）教学内容一一对应，每章分为学习指导、要点归纳、典型例题、自学练习及自学练习解答五部分。主要特点如下：

(1) 学习指导和要点归纳简明扼要地阐明本章基本内容、要点、重点、难点及易混淆之处，整个部分清晰实用，力求使读者一目了然，起到提纲挈领的作用。

(2) 典型例题选取一些有代表性的习题进行解题示范，给出解题思路和技巧，使学生能举一反三。通过题末的分析与思考，可以有效强化学生的工程意识，避免出现理论教学与工程应用严重脱节的现象。

(3) 自学练习为选择题、简答题、分析题和计算题等类型。所选习题具有典型性、代表性、趣味性、实用性、启发性和科学性，力求帮助读者真正掌握课程教学内容的同时，引导学生进行创新性学习，在科学思维方式上有所突破。

本书在整个策划编写过程中得到华中科技大学能源与动力工程学院工程热物理系全体同仁的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促，加之编者水平所限，书中的不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者
2018年12月

目 录

前言	
第 1 章 概述	1
1.1 学习指导	1
1.2 要点归纳	1
1.3 典型例题	2
1.4 自学练习	3
1.5 自学练习解答	5
第 2 章 稳态导热	7
2.1 学习指导	7
2.2 要点归纳	7
2.3 典型例题	12
2.4 自学练习	18
2.5 自学练习解答	22
第 3 章 非稳态导热	27
3.1 学习指导	27
3.2 要点归纳	27
3.3 典型例题	32
3.4 自学练习	37
3.5 自学练习解答	40
第 4 章 对流换热原理	46
4.1 学习指导	46
4.2 要点归纳	46
4.3 典型例题	54
4.4 自学练习	60
4.5 自学练习解答	63
第 5 章 对流换热计算	68
5.1 学习指导	68
5.2 要点归纳	68
5.3 典型例题	80
5.4 自学练习	87
5.5 自学练习解答	91
第 6 章 热辐射基础	100
6.1 学习指导	100

6.2	要点归纳	100
6.3	典型例题	106
6.4	自学练习	111
6.5	自学练习解答	115
第7章	辐射换热计算	120
7.1	学习指导	120
7.2	要点归纳	120
7.3	典型例题	126
7.4	自学练习	131
7.5	自学练习解答	134
第8章	传热过程和换热器	138
8.1	学习指导	138
8.2	要点归纳	138
8.3	典型例题	145
8.4	自学练习	152
8.5	自学练习解答	157
附录	模拟测试题	170
	模拟测试题一 (32 学时适用)	170
	模拟测试题一 (32 学时适用) 答案	171
	模拟测试题二 (32 学时适用)	174
	模拟测试题二 (32 学时适用) 答案	176
	模拟测试题三 (64 学时适用)	178
	模拟测试题三 (64 学时适用) 答案	180
	模拟测试题四 (64 学时适用)	182
	模拟测试题四 (64 学时适用) 答案	183

第 1 章 概 述

1.1 学 习 指 导

1.1.1 学习目标与要求

- (1) 了解传热学研究内容；
- (2) 掌握三种基本传热方式的机理和基本公式；
- (3) 掌握传热过程和传热系数的概念及计算。

1.1.2 学习重点

对热量传递的三种基本方式、传热过程及热阻的概念有所了解，并能进行简单的计算，能对工程实际中简单的传热问题进行分析。

1.2 要 点 归 纳

1. 传热学研究内容

传热学研究在有限温差作用下物体内部或者物体之间所发生的热量传递过程的基本规律及其工程应用。发生热量传递的必要条件是存在温度差。

2. 三种传热方式（见表 1-1）

表 1-1 三种传热方式及相应热流速率方程的总结

传热方式	传热机理	热流速率方程	相关系数
热传导	微观粒子随机热运动导致的热量扩散	$q = -\lambda \frac{dt}{dx}$	导热系数 λ ，单位 $W/(m \cdot K)$
热对流	温度不同的各部分流体间因宏观相对运动、掺混引起的热量传递（包含导热作用）	$q = h(t_w - t_f)$	对流换热表面传热系数 h ，单位 $W/(m^2 \cdot K)$
热辐射	因物体温度导致的以电磁波形式进行的热量转移	$q = \epsilon \sigma (T_w^4 - T_{sur}^4)$	发射率（也称黑度） ϵ

- 注 1. 表中给出的热传导传热速率方程为简化公式，仅适用于一维导热。
 2. 表中给出的热对流传热速率方程为简化公式，适用于表面对流换热现象。
 3. 热辐射的传热速率计算公式为简化公式，仅适用于物体（灰体）与大环境之间的辐射换热。

3. 传热过程与传热系数

传热过程是热量在被壁面隔开的两种流体之间热量传递的过程。在传热过程中，三种传热方式常常联合起作用。传热过程的热流速率方程为

$$q = k(t_w - t_f) \quad (1-1)$$

式中 k ——传热系数，是表征传热过程强弱的标尺， $W/(m^2 \cdot K)$ 。

1.3 典型例题

【例 1-1】 有三块分别由纯铜、碳钢和硅藻土砖制成的大平板，它们的厚度都为 $\delta=50\text{mm}$ ，两侧表面的温差都维持为 $t_{w1}-t_{w2}=100^\circ\text{C}$ 不变，试求通过每块平板的导热热流密度。纯铜、碳钢和硅藻土砖的导热系数分别为 $\lambda_1=398\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ， $\lambda_2=40\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ， $\lambda_3=0.242\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

解：这是通过大平壁的一维稳态导热问题，应用一维导热傅里叶公式，对于纯铜板，热流密度为

$$q_1 = \lambda_1 \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = 398 \times \frac{100}{0.05} = 7.96 \times 10^5 (\text{W}/\text{m}^2)$$

对于碳钢板，有

$$q_2 = \lambda_2 \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = 40 \times \frac{100}{0.05} = 0.8 \times 10^5 (\text{W}/\text{m}^2)$$

对于硅藻土砖，有

$$q_3 = \lambda_3 \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = 0.242 \times \frac{100}{0.05} = 4.84 \times 10^2 (\text{W}/\text{m}^2)$$

由计算可见，由于几种材料的导热系数各不相同，即使在相同的条件下，通过它们的热流密度也是不相同的。通过纯铜的热流密度大约是通过硅藻土砖的热流密度的 2000 倍。

【例 1-2】 一室内暖气片的散热面积为 $A=2.5\text{m}^2$ ，表面温度为 $t_w=50^\circ\text{C}$ ，和温度为 20°C 的室内空气之间自然对流换热的表面传热系数为 $h=5.5\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。试计算该暖气片的对流散热量。

解：暖气片 and 室内空气之间是稳态的自然对流换热。根据牛顿冷却公式可得

$$\Phi = Ah(t_w - t_f) = 2.5 \times 5.5 \times (50 - 20) = 412.5 (\text{W})$$

故该暖气片的对流散热量为 412.5W 。

【例 1-3】 若例 1-2 中暖气片的发射率为 $\epsilon_1=0.8$ ，室内墙壁温度为 20°C 。试计算该暖气片和室内墙壁的辐射传热量。

解：由于墙壁面积比暖气片大得多，因而可采用下式计算两者间的辐射传热量：

$$\Phi = \epsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) = 0.8 \times 2.5 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (323^4 - 293^4) = 398.5 (\text{W})$$

可见，此暖气片和室内的对流散热量和辐射散热量大致相当。

【例 1-4】 有一氟利昂冷凝器，管内有冷却水流动，对流换热表面传热系数为 $h_1=8800\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，管外是氟利昂凝结，表面传热系数为 $h_2=1800\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，管壁厚为 $\delta=1.5\text{mm}$ ，导热系数为 $\lambda=380\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，试计算三个环节的热阻和总传热系数，欲增强传热应从哪个环节入手（假设管壁可作为平壁处理）。

解：三个环节的面积热阻为

$$\text{水侧换热: } \frac{1}{h_1} = \frac{1}{8800} = 1.14 \times 10^{-4} (\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W})$$

$$\text{管壁导热: } \frac{\delta}{\lambda} = \frac{1.5 \times 10^{-3}}{380} = 3.95 \times 10^{-6} (\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W})$$

$$\text{蒸汽凝结: } \frac{1}{h_2} = \frac{1}{1800} = 5.56 \times 10^{-4} (\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W})$$

冷凝器的总传热系数为

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} = \frac{1}{1.14 \times 10^{-4} + 3.95 \times 10^{-6} + 5.56 \times 10^{-4}} = 1484 [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$$

三个环节的热阻比例为 16.9%、0.6%、82.5%。

故蒸汽侧的热阻占主要部分，应从这一环节入手增强换热。

【例 1-5】 一房屋的外墙为混凝土，其厚度为 $\delta=150\text{mm}$ ，混凝土的热导率为 $\lambda=1.5\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，冬季室外空气温度为 $t_{f2}=-10^\circ\text{C}$ ，有风天和墙壁之间的表面传热系数为 $h_2=20\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，室内空气温度为 $t_{f1}=25^\circ\text{C}$ ，和墙壁之间的表面传热系数为 $h_1=5\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。假设墙壁及两侧的空气温度及表面传热系数都不随时间而变化，求单位面积墙壁的散热损失及内外墙壁面的温度 t_{w1} 和 t_{w2} 。

解：这是一个稳态传热过程，冷热流体由混凝土墙壁隔开。其传热过程的总面积热阻包含三个环节的面积热阻，即内墙壁的对流换热热阻 $1/h_1$ 、墙壁的导热热阻 $\frac{\delta}{\lambda}$ 、外墙壁的对流换热热阻 $1/h_2$ 。因此，通过墙壁的热流密度，即单位面积墙壁的散热损失为

$$q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} = \frac{[25 - (-10)]}{\frac{1}{5} + \frac{0.15}{1.5} + \frac{1}{20}} = 100 (\text{W}/\text{m}^2)$$

内、外墙面与空气之间的对流换热可根据牛顿冷却公式写出，即

$$q = h_1(t_{f1} - t_{w1})$$

$$q = h_2(t_{w2} - t_{f2})$$

于是可求得

$$t_{w1} = t_{f1} - q \frac{1}{h_1} = 25 - 100 \times \frac{1}{5} = 5(^\circ\text{C})$$

$$t_{w2} = t_{f2} + q \frac{1}{h_2} = -10 + 100 \times \frac{1}{20} = -5(^\circ\text{C})$$

1.4 自 学 练 习

一、单项选择题

- 热传递的三种基本方式是（ ）。
 - 导热、热对流和传热过程
 - 导热、热对流和核辐射换热
 - 导热、热对流和热辐射
 - 导热、对流换热和辐射换热
- 炉墙内壁到外壁的热传递过程为（ ）。
 - 热对流
 - 复合换热
 - 对流换热
 - 导热
- 由炉膛火焰向水冷壁传热的主要方式是（ ）。
 - 热辐射
 - 热对流
 - 导热
 - 都不是
- 在传热过程中，系统传热量与下列哪一个参数成反比？（ ）
 - 传热面积
 - 流体温差
 - 传热系数
 - 传热热阻
- 太阳与地球间的热量传递属于（ ）传热方式。
 - 导热
 - 热对流
 - 热辐射
 - 以上几种均不是

6. 物体之间发生热传导的动力是 ()?
- A. 温度场 B. 温差 C. 等温面 D. 微观粒子运动
7. 有一台放置于室外的冷库, 从减少冷库冷量损失的角度, 冷损失最小的冷库外壳颜色为 ()。
- A. 绿色 B. 蓝色 C. 灰色 D. 白色
8. 冬天时节, 棉被经过白天晾晒, 晚上人盖着感觉暖和, 是因为 ()。
- A. 棉被中蓄存了热量, 晚上释放出来了 B. 棉被内表面的表面传热系数减小了
- C. 棉被变厚了。棉被的导热系数变小了 D. 棉被外表面的表面传热系数减小了

二、多项选择题

1. 热量传递的基本方式是 ()。
- A. 热传导 B. 热对流 C. 热辐射 D. 传热过程
2. 在传热过程中, 系统传热量与下列哪些参数成正比? ()
- A. 传热面积 B. 传热热阻 C. 流体温差 D. 传热系数
3. 在稳态传热过程中, 传热温差一定, 如果希望系统传热量增大, 则可以采取下述哪些手段? ()
- A. 增大传热热阻 B. 增大传热面积
- C. 增大传热系数 D. 增大对流换热系数
4. 冰雹落地后, 既慢慢融化, 融化所需热量可由如下途径得到 ()。
- A. 地面的导热量 B. 空气的对流换热量
- C. 与环境中固体表面间的辐射换热量 D. 吸收太阳辐射热量

三、简答题

1. 试说明热传导、热对流和热辐射三种热量传递基本方式之间的联系与区别。
2. 导热系数、表面传热系数及传热系数的单位是什么? 哪些是物性参数? 哪些与过程有关。
3. 在有空调的房间内, 夏天和冬天的室温均控制在 20°C , 夏天只需穿衬衫, 但冬天穿衬衫会感到冷, 这是为什么?
4. 有人将一碗热粥置于一盆凉水中冷却, 为使粥凉得更快一些, 它应该搅拌碗中的粥还是盆中的凉水。
5. 请说明在传热设备中, 水垢、灰垢的存在对传热过程会产生什么影响?
6. 在深秋晴朗无风的夜晚, 气温高于 0°C , 但清晨却看见草地上披上一身白霜, 但如果阴天或有风, 在同样的气温下草地却不会出现白霜, 试解释这种现象。
7. 冬季用手触摸室外的木材与铁件有不同的感觉, 即感到木材与铁的温度不一样, 如何解释这种现象。

四、计算题

1. 25mm 厚的聚氨酯泡沫。其两表面的温度差为 5°C 。已知该塑料的导热系数为 $0.032\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。试计算通过该材料的热流密度。如果将泡沫塑料压缩成 5mm 厚, 且在同样温差下散热量变为 $64\text{W}/\text{m}^2$, 求出此时的导热系数。
2. 一双层玻璃窗, 宽 1.1m, 高 1.2m, 厚 3mm, 导热系数为 $1.05\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; 中间空气层厚 5mm, 设空气隙仅起导热作用, 导热系数为 $0.026\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。室内空气温度为 25°C , 表面传热系数为 $20\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; 室外空气温度为 -10°C , 表面传热系数为 $15\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

试计算通过双层玻璃窗的散热量，并与单层玻璃窗相比较。假定在两种情况下室内、外空气温度及表面传热系数相同。

3. 一炉子的炉墙厚 13cm，总面积为 20m^2 ，平均导热系数为 $1.04\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，内外壁温分别是 520°C 及 50°C 。试计算通过炉墙的热损失。如果所燃用的煤的发热量是 $2.09\times 10^4\text{kJ}/\text{kg}$ ，问每天因热损失要用掉多少千克煤？

4. 一外径为 0.3m，壁厚为 5mm 的圆管，长为 5m，外表面平均温度为 80°C 。200℃ 的空气在管外横向掠过，表面传热系数为 $80\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。入口温度为 20°C 的水以 $0.1\text{m}/\text{s}$ 的平均速度在管内流动。如果过程处于稳态，试确定水的出口温度。水的比定压热容为 $4184\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，密度为 $980\text{kg}/\text{m}^3$ 。

5. 一根水平放置的蒸汽管道，其保温层外径 $d=583\text{mm}$ 。外表面实测平均温度 $t_w=48^\circ\text{C}$ ，空气温度 $t_f=23^\circ\text{C}$ 。此时空气与管道外表面间的自然对流传热的表面传热系数 $h=3.42\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，保温层外表面的发射率 $\epsilon=0.9$ 。假设：过程处于稳态，沿管子长度方向各给定的参数都保持不变；管道周围的其他固体表面温度等于空气温度。

1.5 自学练习解答

一、单项选择题

1. C 2. D 3. A 4. D 5. C 6. B 7. D 8. C

二、多项选择题

1. A, B, C 2. A, C, D 3. B, C, D 4. A, B, C, D

三、简答题

1. 答：导热、对流换热及辐射换热是热量传递的三种方式。导热主要依靠微观粒子运动而传递热量；对流换热是流体与固体壁面之间的换热，依靠流体对流和导热的联合作用而产生热量传递；辐射换热是通过电磁波传播能量，是物体之间辐射和吸收的综合结果。一个传热现象往往是几种传热方式同时作用。

2. 答：导热系数 λ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 物性参数
 表面传热系数 h $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 与过程有关
 传热系数 k $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 与过程有关

3. 答：首先，冬季和夏季的最大区别是室外温度的不同。夏季室外温度比室内气温高，因此通过墙壁的热量传递方向是由室外传向室内。而冬季室外气温比室内低，通过墙壁的热量传递方向是由室内传向室外。因此冬季和夏季墙壁内表面温度不同，夏季高而冬季低。因此，尽管夏季和冬季的室温相近，但人体在冬季通过辐射与墙壁的散热比夏季高很多。人体对冷暖感受的衡量指标主要是散热量的大小，在冬季散热量大，因此要穿厚一些的绒衣。

4. 答：从热粥到凉水是一个传热过程。显然，粥和水的换热在不搅动时属自然对流。而粥的换热比水要差。因此，要强化传热增加散热量，应该用搅拌的方式强化粥侧的传热。

5. 答：水垢、灰垢增加了传热过程的热阻，而且水垢和灰垢的导热系数很低，导热热阻很大，大大削弱了换热设备传热能力，导致壁面温度升高。

6. 答：草地 (T_e) 与环境的换热包括两部分：即与空气 (T_a) 的对流换热及与太空 (T_{sky}) 的辐射换热，即

$$h(T_a - T_c) = \sigma(T_c^4 - T_{\text{sky}}^4)$$

寒冷晴空时 T_{sky} 约为 230K; 暖和雾天 T_{sky} 约为 285K。因此, 在寒冷晴天的晚上, 尽管 $T_a > 273\text{K}$, 辐射换热所损失的热量却可能使草地 (T_c) 低于 273K, 导致结霜。阴天辐射损失不会导致 $T_c < 273\text{K}$, 不会结霜。

7. 因为铁件比木材的导热系数大, 人接触时传热要快, 所以感觉温度低。

四、计算题

1. 解: (1) $\delta = 0.025\text{m}$; $\Delta t = 5^\circ\text{C}$; $\lambda = 0.032\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$

$$q = \lambda \frac{\Delta t}{\delta} = 6.4(\text{W}/\text{m}^2)$$

(2) 由 $q = \lambda \frac{\Delta T}{\delta}$ 得 $\lambda = \frac{q\delta}{\Delta T} = 0.064[\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})]$

2. 解: (1) 双层玻璃窗情形, 由传热过程计算式得

$$\Phi = \frac{A(t_{f1} - t_{f2})}{\frac{1}{h_1} + \sum_{i=1}^3 \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_2}} = \frac{1.1 \times 1.2 \times [25 - (-10)]}{\frac{1}{20} + \frac{0.003}{1.05} + \frac{0.005}{0.026} + \frac{0.003}{1.05} + \frac{1}{15}} = 146.8(\text{W})$$

(2) 单层玻璃窗情形为

$$\Phi = \frac{A(t_{f1} - t_{f2})}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} = \frac{1.1 \times 1.2 \times [25 - (-10)]}{\frac{1}{20} + \frac{0.003}{1.05} + \frac{1}{15}} = 386.5(\text{W})$$

3. 解: 根据傅里叶公式得

$$\Phi = \frac{\lambda A \Delta t}{\delta} = \frac{1.04 \times 20 \times (520 - 50)}{0.13} = 75.2(\text{kW})$$

每天用煤为

$$\frac{24 \times 3600 \times 75.2}{2.09 \times 10^4} = 310.9(\text{kg}/\text{d})$$

4. 解: (1) 管外空气与管子之间的对流换热量为

$$\Phi = hA(t_f - t_w) = h\pi dl(t_f - t_w) = 80\pi \times 0.3 \times 5 \times (200 - 80) = 45\,239(\text{W})$$

(2) 由于过程处于稳态, 管外空气所加的热量由管内水带走, 因此得

$$\Phi = \rho u A_c c_p (t_{\text{out}} - t_{\text{in}}) = \rho u \left[\frac{\pi}{4} (d - 2\delta)^2 \right] c_p (t_{\text{out}} - t_{\text{in}}) = 45\,239(\text{W})$$

其中 A_c 为管内流通截面积。故出口温度为

$$t_{\text{out}} = \frac{\Phi}{\rho u \left[\frac{\pi}{4} (d - 2\delta)^2 \right] c_p} + t_{\text{in}} = \frac{45\,239}{980 \times 0.1 \times 0.066 \times 4184} + 20 = 21.7(^{\circ}\text{C})$$

5. 解: 把管道每米长度上的散热量记为 q_1 。单位长度上的自然对流散热量为

$$q_{1,c} = \pi d \cdot h \Delta t = \pi d h (t_w - t_f) = 3.14 \times 0.583 \times 3.42 \times (48 - 23) = 156.5(\text{W}/\text{m})$$

于是每米长度管子上的辐射换热量为

$$q_{1,r} = \pi d \sigma \epsilon (T_1^4 - T_2^4) = 3.14 \times 0.583 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 0.9 [(48 + 273)^4 - (23 + 273)^4] = 274.7(\text{W}/\text{m})$$

每米长管道的总散热量为

$$q_1 = q_{1,c} + q_{1,r} = 156.5 + 274.7 = 431.2(\text{W}/\text{m})$$

第2章 稳态导热

2.1 学习指导

2.1.1 学习内容

- (1) 傅里叶定律的深入理解与分析;
- (2) 导热问题的数学描述 (导热微分方程的推导及定解条件);
- (3) 典型一维稳态导热问题的分析解 (平壁、圆柱、其他边界条件解);
- (4) 具有内热源的一维导热问题及计算;
- (5) 通过肋片的导热问题及计算;
- (6) 多维导热问题。

2.1.2 学习重点

- (1) 导热问题的导热微分方程推导 (微元分析法) 和定解条件;
- (2) 平壁、圆筒及其他边界条件的导热问题计算;
- (3) 具有内热源的一维导热问题计算;
- (4) 肋片传热问题的推导与计算。

2.2 要点归纳

2.2.1 导热问题的导热微分方程推导 (微元分析法) 和定解条件

导热微分方程建立的原理是: 能量守恒原理结合傅里叶导热定律。由导热物体的能量守恒可知:

导入微元体的总热流量 + 微元体内热源的生成热 = 导出微元体的总热流量 + 微元体热力学能的增量

代入傅里叶定律表示的导热量, 即可建立微元导热物体温度分布的具体数学描述。方程式通常包括非稳态项、导热项和内热源生成项。以各向同性的导热物体在直角坐标系下的导热微分方程为例

$$\underbrace{\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau}}_{\text{①}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right)}_{\text{②}} + \underbrace{\dot{\phi}}_{\text{③}} \quad (2-1)$$

式(2-1)中①表示微元体热力学能的增量 (非稳态项); ②表示导入微元体的净热流量 (“导进”与“导出”之差); ③表示微元体内热源的生成热。

导热微分方程式是描述导热过程共性的数学表达式, 由它得到的是问题的通解。要获得某一具体问题的特解, 导热微分方程必须辅助以定解条件。一般地讲, 定解条件包括初始条件和边界条件。导热微分方程与定解条件一起构成了具体导热过程的数学描述。

导热问题的初始条件为

$$t|_{\tau=0} = f(x, y, z) \quad (2-2)$$

导热问题的三类边界条件为：

(1) 给定系统边界上的温度值 $t_w = f(x, y, z, \tau)$

特例：定壁温边界条件 $t_w = \text{const}$

(2) 给定系统边界上的热流密度 $q_w = f(x, y, z, \tau)$

特例：绝热边界 $q_w = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = 0$

(3) 对流边界条件 $-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = h(t_w - t_f)$ (对物体被加热和冷却均适用)

其中， n 指向物体外法线方向。值得注意的是：第三类边界条件实际上是第一类和第二类边界条件的线性组合，在一定条件下可以相互转换。例如： $h \rightarrow \infty$ ，为第一类边界条件； $h \rightarrow 0$ ，为第二类边界条件。

求解导热问题的主要思路：首先由物理问题，在一定的简化假设条件下，得到其数学描写（导热微分方程及定解条件），然后求解得到温度场。接着利用傅里叶定律进一步求解通过物体界面的热流量或热流密度。

2.2.2 一维稳态无内热源导热问题的分析与计算

常物性、无内热源、第一类边界条件下的温度场、热流量计算式、热阻以及肋片导热的分析解汇总在表 2-1 中。

表 2-1 一维稳态导热部分分析解汇总

导热问题	温度场分析解	热流量计算式	热阻表达式
平板导热	$t = t_1 + (t_2 - t_1) \frac{x}{\delta}$	$\Phi = \lambda A \frac{t_1 - t_2}{\delta}$	$R = \frac{\delta}{\lambda A}$
圆筒体导热	$t = t_1 + (t_2 - t_1) \frac{\ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)}$	$\Phi = \frac{2\pi\lambda l(t_1 - t_2)}{\ln(r_2/r_1)}$	$R = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi\lambda l}$
球壳导热	$t = t_1 + (t_2 - t_1) \frac{1/r - 1/r_2}{1/r_1 - 1/r_2}$	$\Phi = \frac{4\pi\lambda(t_1 - t_2)}{1/r_1 - 1/r_2}$	$R = \frac{1}{4\pi\lambda} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$

在这部分内容的学习中，要特别注意以下几点：

1. 如何判断问题是否一维

判断问题是否一维应从边界条件考虑，而不能仅考虑几何角度。无论哪种形状，一维导热的基本条件主要体现为对边界条件均匀性的要求。

2. 求解一维导热问题的两种途径

求解一维稳态无内热源导热问题通常有两条途径：①从导热微分方程出发，连同定解条件，先求出温度分布，再用傅里叶定律得到热流密度或者热流量；②在给定两个恒温边界的情况下，对傅里叶定律直接积分即可获得热流量。对变截面、变导热问题，第二种方法尤为实用。

3. 关于温度分布曲线的绘制

对一维稳态无内热源导热问题，当沿热量传递方向面积发生变化或导热系数发生变化时，其温度分布曲线的凹向判断可依据傅里叶定律，即 $\Phi = -A(x)\lambda(t) \frac{dt}{dx}$ 。对稳态问题， Φ

为常数, 此时, 依据傅里叶定律可以方便地判断变截面或变导热系数时导热体内的温度分布。

4. 热阻网络分析法

热、电同属传递现象, 具有可比拟性, 其比拟关系见表 2-2。根据热电比拟, 可定义传热过程的热阻。热阻概念的建立对复杂热传递过程的分析带来很大的便利, 可以利用比较熟悉的串联、并联电路电阻的计算公式来计算热传递过程的合成热阻 (或称总热阻), 这就是热阻网络分析法。它是掌握传热问题, 尤其是分析和计算较复杂问题的一个极有力的工具。

表 2-2 热电现象的比拟

现象	电量传递	热量传递
驱动力	电势差 (电压) V	温差 (温压) Δt
传递的流	电流 I	热流 Φ
传递的阻力	电阻 R_i	热阻 R_Φ
传递公式	$I = \frac{V}{R_i}$	$\Phi = \frac{\Delta t}{R_\Phi}$

串联电阻叠加得到总电阻的原则, 实质上已在绪论中被用于导出传热过程传热系数的表达式。在一维导热问题, 如复合平壁或圆筒壁导热问题中也被广泛应用。后面我们还将辐射换热问题中使用这种方法。

2.2.3 两等温面间的复杂几何形状导热 (多维导热)

用于求解多维稳态导热问题的方法有分析解法、数值解法和形状因子法。其中形状因子法主要用来求解发生在两等温表面之间的导热热量计算。为更好地理解形状因子方法, 下面给出形状因子的定义导出方法。

如图 2-1 所示的几种导热问题, 其特点为边界为等温面, 热量传递是从一个等温面到另一个等温面。

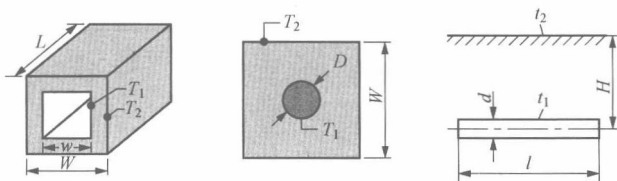


图 2-1 几种多维导热问题的示意

由傅里叶定律出发, 从任一等温面 A_1 转移到另一等温面 A_2 的热量 Φ , 可表示为

$$\Phi = -\lambda \iint_{A_1} \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_1 dA_1 = -\lambda \iint_{A_2} \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_2 dA_2 \quad (2-3)$$

定义 S 为

$$S = \frac{\iint_{A_1} \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_1 dA_1}{t_2 - t_1} = \frac{\iint_{A_2} \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_2 dA_2}{t_2 - t_1} \quad (2-4)$$

则热流量的形式可写为

$$\Phi = \bar{\lambda}S(t_1 - t_2) \quad (2-5)$$

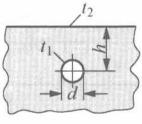
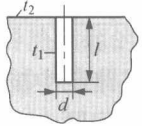
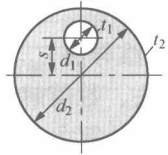
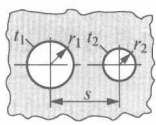
数学分析可证明, S 为纯几何参数, 与壁温、导热系数无关。

因此, 在计算两个等温表面之间的导热量时, 无论一维、二维或三维问题, 都可用形状因子 S 进行计算。表 2-3 给出一些典型导热问题的 S 计算表达式。读者还可以通过传热学手册查取更多。

表 2-3

几种几何条件下的形状因子 S

(m)

半无限大物体表面与水平埋管表面之间的导热		管长 $l \gg d, h < 1.5d$ 时: $S = \frac{2\pi l}{\cosh^{-1}\left(\frac{2h}{d}\right)}$ 管长 $l \gg d, h > 1.5d$ 时: $S = \frac{2\pi l}{\ln\left(\frac{2h}{d}\right)}$
半无限大物体表面与垂直埋管表面之间的导热		管长 $l \gg d$ 时: $S = \frac{2\pi l}{\ln\left(\frac{4h}{d}\right)}$
管道表面与偏心热绝缘层表面之间的导热		管长 $l \gg d_2$ 时: $S = \frac{2\pi l}{\cosh^{-1}\left(\frac{d_1^2 + d_2^2 - 4s^2}{2d_1 d_2}\right)}$
无限大物体中两圆管表面之间的导热		管长 $l \gg d_1, d_2$ 时: $S = \frac{2\pi l}{\cosh^{-1}\left(\frac{s^2 - r_1^2 - r_2^2}{2r_1 r_2}\right)}$

2.2.4 通过肋片的稳态导热

1. 肋片导热的特点

肋片工程在实际中是强化传热的有效方法。肋片导热和平壁及圆筒壁的导热有很大的区别, 其基本特征是在肋片伸展的方向上有表面的对流换热及辐射换热, 因而热流量沿传递方向不断变化。另外, 肋片表面所传递的热量都来自(或进入)肋片根部, 即肋片与基础表面的相交面。我们分析肋片导热的目的是要得到肋片的温度分布和通过肋片的热流量。

2. 等截面肋片一维温度分布假设的判定条件

所谓等截面是指沿肋高方向面积不发生变化的肋片。按照这种定义, 圆管外的等厚度环形肋片是变截面肋。教材中的肋片导热解析解是针对等截面直肋。

要应用教材中给出的肋片温度分布解析式, 必须满足一维导热假设, 即肋片温度仅沿肋高方向变化。已知肋片的导热热阻为 $\delta/2\lambda$, 而肋片表面的对流换热热阻为 $1/h$ 。当按肋厚一半 ($\delta/2$) 作为特征长度计算的 Bi 数足够小时, 即 $Bi = \delta h/2\lambda \ll 1$, 一维温度分布假设成立。这种判定方法类似第 3 章的集总参数法判定法, 其原理也是一致的。

3. 肋片导热数学描写及求解

一维稳态肋片导热问题的控制方程可以由导热微分方程简化而来，也可以按能量守恒原理导出，后者的物理意义更加清晰。由于问题是一维的，故肋片的两个侧面并不是计算区域的边界（计算区域的边界是 $x=0$ 及 $x=H$ ），但通过该两表面有热量的传递。因此，这种情况下，可以将肋片厚度方向的对流边界条件处理成负的内热源。肋片导热的数学描述包括导热微分方程和边界条件，基于一维稳态导热条件简化后，模型可以获得解析解。不同的边界条件对应不同的温度分布。

除温度分布外，人们还希望通过肋片的导热分析获得通过肋片的散热量。在得到肋片的温度分布后，通过肋片散热量的计算方法有两种：

- (1) 全部热量都必须通过 $x=0$ 处的肋根截面，此方法的推导见主教材。
- (2) 依据肋片表面的对流散热，有

$$\Phi = \int_0^H hP(t - t_\infty) dx = hP \int_0^H \frac{\text{ch}[m(x-H)]}{\text{ch}(mH)} \theta_0 dx = \frac{hP}{m} \theta_0 \text{th}(mH) \quad (2-6)$$

4. 肋效率的定义及基于肋效率的肋片散热量计算方法

肋效率是为了表征肋片散热的有效程度而定义的，其具体表达式如下：

$$\eta_f = \frac{\text{实际散热量}}{\text{假设整个肋表面处于肋基温度下的散热量}} \quad (2-7)$$

对于等截面直肋，其肋效率为

$$\eta_f = \frac{\frac{hP}{m} \theta_0 \text{th}(mH)}{hPH\theta_0} = \frac{\text{th}(mH)}{mH} \quad (2-8)$$

如图 2-2 所示，由于 $\text{th}(mH)$ 在 $0 \sim 1$ 之间变化，因而，随着 mH 的增大，肋效率 η_f 降低。假设 $t_0 > t_\infty$ ，如图 2-3 所示，则肋效率即为图中阴影面积与矩形 $abcd$ 面积之比。

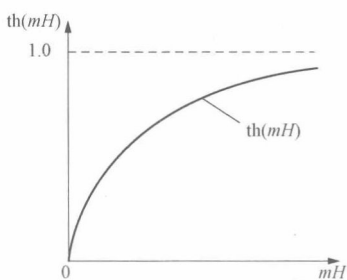


图 2-2 $\text{th}(mH)$ 随 mH 的变化

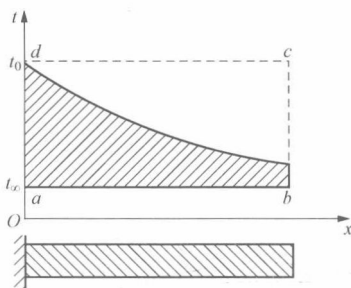


图 2-3 肋效率物理意义

对等截面直肋的肋效率分析可得到如下结论：

- (1) mH 增大，肋效率 η_f 降低，说明肋高不宜太高。
- (2) 肋片的导热系数 λ 增加， mH 减小，肋效率增加。这相当于图中 2-3 中阴影部分的面积增大。
- (3) 当肋厚 δ 增加时，与增大 λ 的效果一样，同样使肋效率增加。

注意，增加 λ 和降低 δ 都相当于降低沿肋高方向的导热热阻，让沿肋高方向的温度更接近于肋根温度，故肋效率 η_f 增加。如何合理选择肋片的高度、厚度、间距和材料等，应从总散热效果来评定。工程上典型肋片的 η_f 被制成图表，可以通过教材或手册查得。一般要