



普通高等教育“十三五”规划教材——应用热工学系列

中国石油和石化工程教材出版基金资助项目

应用传热学

主 编 周锡堂
副主编 钟莹莹 陈媛媛



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

普通高等教育“十三五”规划教材——应用热工学系列
中国石油和石化工程教材出版基金资助项目

应用传热学

主 编 周锡堂
副主编 钟莹莹 陈媛媛

中国石化出版社

内 容 提 要

本书为“普通高等教育‘十三五’规划教材——应用热工学系列”之一。主要介绍传热的基本概念、热的传递形式及其规律、基本传热工艺及其相应装备的计算。

本书适合作为油气类等本科专业 32~48 学时的传热学教材,也可供研究生、职业院校学生及其他相关人员参阅。书中内容可视需要取舍,延展阅读是一些应用性的小知识,完全可以由读者自由阅读。

图书在版编目(CIP)数据

应用传热学 / 周锡堂主编. —北京: 中国石化出版社, 2019. 1
普通高等教育“十三五”规划教材, 应用热工学系列
ISBN 978-7-5114-5079-1

I. ①应… II. ①周… III. ①传热学—高等学校—教材 IV. ①TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 289623 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市朝阳区吉市口路 9 号

邮编:100020 电话:(010)59964500

发行部电话:(010)59964526

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 10.5 印张 224 千字

2019 年 1 月第 1 版 2019 年 1 月第 1 次印刷

定价:35.00 元



前 言

目前在工科院校得到大范围使用的热工基础教材体系成熟、内容完整,但也存在强调理论基础、忽视具体应用的问题,对于广大地方院校的应用型人才培养未必很适用。从事油气类专业热工基础教学的广大教师希望能集中多方智慧,合作编写一系列既有必要的热工基础知识、又突出专业自身特点和要求的热工学教材。

工程教育专业认证要求每一门课程与专业毕业要求有明确对应关系,整个社会都强调高校要把重点放在应用型人才的培养上,这是教育理念的进步。本系列教材有别于现有的热工类教材之处,就在于它介绍理论的目的在于应用,使学生在课程学习过程中接触到某些实用知识,而这是部分工科专业学生四年本科学习中唯一的热工知识学习和训练机会。

本系列教材分为《应用工程热力学》和《应用传热学》。其中,《应用工程热力学》主要介绍热力学基本概念、热力学定律、典型的动力循环及水蒸气和湿空气性质;《应用传热学》主要介绍传热的基本概念、热的传递形式及其规律、基本传热工艺及其相应装备的计算。

本书为《应用传热学》,第1章和第2章由中国民航大学陈媛媛编写;第3章和第4章由北部湾大学钟莹莹编写;第5章和第6章由广东石油化工学院周锡堂编写;附录由广东石油化工学院黄凯亦编写;全书由周锡堂统稿。本书在编写过程中还得到了广东石油化工学院龙志勤和北部湾大学梁金禄等老师的大力支持。

本书适合作为油气类等本科专业32~48学时的传热学教材,也可供研究生、职业院校学生及其他相关人员参阅。书中内容可视需要取舍,延展阅读是一些应用性的小知识,完全可以由读者自由阅读。每章后的思考题都是该章的重要概念,认真思考和回答有利于概念的掌握;各章习题都是些经典问题,目

的在于运用本章及已介绍概念和方法解决现实中出现的问题，特别是计算和综合分析问题；附录提供了一些必要的参数、物性和图表，供读者参考。

本书出版得到“中国石油和石化工程教材出版基金”的资助，各位编者所在学校相关部门为本书的编写和顺利出版提供了帮助，在此一并表示感谢！

由于作者水平有限，文中难免会有错误与不周之处，还请读者批评指正。

主要符号表

符 号	意 义	单 位	符 号	意 义	单 位
A	面积	m^2	P	功率	W
a	热扩散率	m^2/s		总压力	N
	加速度	m/s^2	p	压力(强)	Pa
C	热容流量	$\text{J}/(\text{K} \cdot \text{s})$	Q	热量或热流量	J 或 W
	辐射系数	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$	q	热流密度	W/m^2
c	比热容	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	q_m	质量流量	kg/s
c_p	定压比热容	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	q_v	体积流量	m^3/s
c_f	范宁摩擦系数	—	R	热阻	K/W
d	直径	m		电阻	Ω
E	能量	J	r	半径, 距离	m
	辐射力	J/m^2		汽化相变焓	J/kg
E_λ	光谱辐射力	J/m^3		面积热阻	$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$
F	力	N	R_s	污垢热阻	$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$
f	频率	Hz	T	热力学温度	K
	摩擦因子	—	t	摄氏温度	$^\circ\text{C}$
G	投射辐射	W/m^2	t_c	特征温度	$^\circ\text{C}$
g	重力加速度	m/s^2	U	热力学能	J
H	焓	J	u	比热力学能	J/kg
	高度	m	V	体积	m^3
h	表面传热系数	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	v	比体积	m^3/kg
	比焓	J/kg	v_c	特征速度	m/s
h_c	对流传热系数	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	W	功	J
h_r	辐射传热系数	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	w	比功	J/kg
I	电流密度	A	X	角系数	rad
J	有效辐射	W/m^2	α_v	体积膨胀系数	K^{-1}
j	传热因子	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	β	肋化系数	—
K	总传热系数	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	δ	厚度	m
L	定向辐射度	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$	ε	发射率	—
L_e	定向发射辐射度	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$	Θ	无量纲过余温度	—
L_r	定向反射辐射度	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$	θ	过余温度	K
l	长度	m	λ	波长	mm
l_c	特征长度	mm		热导率(导热系数)	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
m	质量	kg	η	(动力)黏度	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
ρ	密度	kg/m^3	Ω	立体角	sr
ψ	温差修正系数	—	s	比熵	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
S	熵	J/K			



目 录

1 传热学基本概念	(1)
1.1 热量传递的基本方式	(1)
1.2 热量传递的基本过程	(6)
拓展阅读——加热炉	(8)
思考题	(10)
习题	(10)
2 热传导	(11)
2.1 导热理论基础	(11)
2.2 稳态导热及基本计算	(17)
2.3 非稳态导热过程分析	(26)
拓展阅读——管道及储罐的保温	(36)
思考题	(37)
习题	(37)
3 对流传热	(39)
3.1 对流传热的基本概念	(39)
3.2 单相对流传热及计算	(45)
3.3 相变对流传热及计算	(63)
拓展阅读——气液两相流混合传热	(72)
思考题	(73)
习题	(73)
4 辐射传热	(75)
4.1 热辐射的基本概念	(75)
4.2 黑体辐射的基本定律	(78)
4.3 实际物体的辐射特性	(82)
4.4 辐射传热的计算	(87)
4.5 综合传热问题分析	(91)
拓展阅读——储罐呼吸现象	(99)

思考题	(99)
习题	(100)
5 传热过程	(103)
5.1 传热过程计算	(103)
5.2 传热效率——传热单元数法*	(111)
5.3 传热的强化与弱化	(116)
拓展阅读——油气管道的散热与保温	(119)
思考题	(119)
习题	(120)
6 换热器及其设计	(122)
6.1 换热器的类型	(122)
6.2 间壁式换热器	(124)
6.3 管壳式换热器的设计与选型	(128)
拓展阅读——油气储运涉及的典型换热装置	(138)
思考题	(140)
习题	(140)
参考文献	(142)
附录	(143)
附表 1 常用热力学的 MLT 量纲	(143)
附表 2 金属材料的密度、比热容和热导率	(145)
附表 3 部分非金属材料的密度和热导率	(146)
附表 4 部分非金属材料的热导率与温度的关系	(147)
附表 5 大气压力下烟气的热物理性质	(148)
附表 6 饱和水的热物理性质	(149)
附表 7 干饱和蒸汽的热物理性质	(151)
附表 8 几种饱和液体的热物理性质	(152)
附表 9 过热水蒸气的热物理性质	(153)
附表 10 水的污垢热阻	(153)
附表 11 工业流体的污垢热阻	(154)
附表 12 化工过程流体的污垢热阻	(154)
附表 13 天然气-汽油加工流体的污垢热阻	(155)
附表 14 石油炼制过程液体的污垢热阻	(155)

附录 15 原油参数 (155)

附录 16 其他参数 (155)

附录 17 固定管板式换热器常见规格 (156)

附录 18 U 形管式换热器常见规格 (157)

附录 19 浮头式换热器常见规格(以内导流式为例) (157)

附录 20 常用材料的表面发射率 (159)



传热学基本概念

传热学是一门研究热量传递规律的科学。根据热力学第二定律——热量可以自发地由高温热源传给低温热源——可知，热是一种传递中的能量，凡是有温度差的地方就有热量传递，温差是热量传递过程的推动力。由于自然界中温差无处不在，因次，热量传递也是自然界和工程领域中极为普遍的现象。例如，20 世纪 70 年代每平方米集成电路芯片的功率最高为 10W，80 年代增加到 20~30W，90 年代上升到 100W 量级。芯片产生的热量如果不及时散出，将使芯片的温度升高而影响到电子器件的寿命及工作的可靠性，因而电子器件的有效散热方式已经成为获得新一代产品的关键问题。再如，航天器在重返地球时，以 15~20 倍音速进入大气层，由于摩擦，局部气流温度可达到 5000~15000K (4726.85~14726.85℃)。为保证航天器的安全，有效的冷却及隔热方法极为关键。可见，传热学在生产技术领域应用非常广泛，几乎在每个工程技术部门中都会遇到传热问题。动力、化工、制冷、建筑、环境、机械制造、新能源、微电子、核能、航空航天、微机电系统、新材料、军事科学与技术、生命科学与生物技术等，只要有温差就会有传热。

传热学就是分析各种具体的传热过程是如何进行的，探求工程及自然现象中热量传递过程的物理本质，揭示各种热现象的传输机理，建立能量输运过程的数学模型，分析计算传热系统的温度和热流水平，揭示热量传递的具体规律。在一些较为复杂的场合，则通过计算机模拟或直接用实验方法，研究热量传递的规律。

在本章中，我们将首先简要介绍传热学的主要研究内容，给出导热、对流与辐射这三种热量传递基本方式的概念及所传递热量的计算公式。后续 2~6 章将分别详细讨论导热、对流换热和辐射换热的基本规律。最后，在此基础上，把上述知识综合起来，介绍传热过程及换热设备的计算方法。

1.1

热量传递的基本方式

自然界存在三种基本的热量传递方式：热传导、热对流和热辐射。例如，一只猫趴在地球上，那么，猫和地面之间热量传递的方式主要是热传导，猫和其周围空气间的传热方式主要是热对流，而猫和太阳之间则主要为热辐射。在各种不同的场合下，这三种方式可能单独存在，也可能产生不同的组合形式。下面分别详细阐述。

1.1.1 热传导

(1) 定义和特征

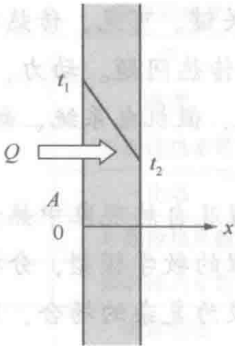
当物体内部存在温度差(也就是物体内部能量分布不均匀)时,在物体内部没有宏观位移的情况下,热量会从物体的高温部分传到低温部分;此外,不同温度的物体互相接触时,热量也会在相互没有物质转移的情况下,从高温物体传递到低温物体。这样一种热量传递的方式被称为热传导或简称为导热。因此,当物体各部分之间不发生相对位移时,借助于分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而实现的热量传递过程称之为导热。

导热过程的特点有两个:①导热过程总是发生在两个互相接触的物体之间或同一物体中温度不同的两部分之间;②导热过程中物体各部分之间不发生宏观的相对位移。

(2) 导热机理

在导热过程中,物体各部分之间不发生宏观位移,从物质的微观结构对导热过程加以描述与计算是比较复杂的。从微观角度看,气体、液体、导电固体和非导电固体的导热机理是不同的。

气体中,导热是气体分子的不规则热运动,是相互碰撞的结果。气体的温度越高,分子的运动动能越大,不同能量水平的分子相互碰撞的结果,使能量从高温处传向低温处。导电固体中有相当多的自由电子,它们在晶格之间像气体分子那样运动,自由电子的运动在导电固体的导热中起主要作用。非导电固体中,导热通过晶格结构的振动,即原子、分子在其平衡位置附近的振动来实现。液体的导热机理十分复杂,有待于进一步的研究。



(3) 傅里叶公式

对于导热这种热量传递方式的研究可以追溯到 19 世纪初期毕欧(Boit)早期的研究工作。他在对大量的平板导热实验(图 1-1)的数据分析中得出如下的结论:

通过垂直于平板方向上的热流量正比于平板两侧的温度差和平板面积的大小,而反比于平板的厚度。归纳如下数学关系:

$$Q = \lambda A \frac{t_1 - t_2}{\Delta x} \quad (1-1)$$

式中 Q ——单位时间导热量,又称热流量, W;

A ——导热面积, m^2 ;

$t_1 - t_2$ ——大平板两表面之间的温差, $^{\circ}C$ (K);

λ ——比例系数,称为平板材料的导热系数(或热传导率),表示物体导热能力的大小, $W/(m \cdot K)$ 。

上式亦可表示为如下形式:

$$q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\Delta x} \quad (1-2)$$

式中 q ——单位面积热流量, 又称热流密度, W/m^2 。

1822 年, 法国数学家傅里叶 (Joseph Fourier) 将毕欧的热传导关系归纳为

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \quad (1-3)$$

此式称为傅立叶定律, 在第 2 章中将其进行详细的论述。式中, $\partial t / \partial n$ 为温度梯度, 负号表示热流密度的方向与温度梯度的方向相反, 即热量传递的方向与温度升高的方向相反。当温度 t 沿 x 方向增加时, $dt/dx > 0$, $q < 0$, 说明热量沿 x 减小的方向传递 (图 1-2); 反之, $dt/dx < 0$, $q > 0$, 说明热量沿 x 增加的方向传递 (图 1-3)。

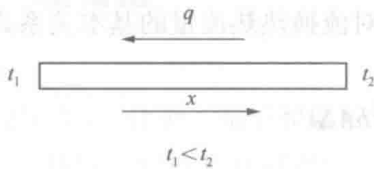


图 1-2 热量沿 x 减小的方向传递

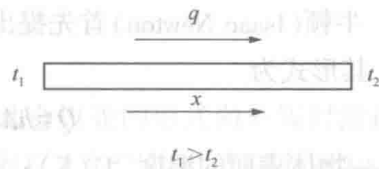


图 1-3 热量沿 x 增加的方向传递

【例 1-1】 有三块分别由纯铜 [热导率 $\lambda_1 = 398 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]、黄铜 [热导率 $\lambda_2 = 109 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$] 和碳钢 [热导率 $\lambda_3 = 40 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$] 制成的大平板, 厚度都为 10 mm , 两侧表面的温差都维持为 $t_{w1} - t_{w2} = 50^\circ\text{C}$ 不变, 试求通过每块平板的导热热流密度。

解: 这是通过大平壁的一维稳态导热问题。

对于纯铜板: $q_1 = \lambda_1 \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = \frac{398 \times 50}{0.01} = 1.99 \times 10^6 \text{ W}/\text{m}^2$

对于黄铜板: $q_2 = \lambda_2 \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = \frac{109 \times 50}{0.01} = 0.545 \times 10^6 \text{ W}/\text{m}^2$

对于碳钢板: $q_3 = \lambda_3 \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = \frac{40 \times 50}{0.01} = 0.2 \times 10^6 \text{ W}/\text{m}^2$

1.1.2 热对流与对流换热

(1) 定义和特征

流体中温度不同的各部分流体之间, 由于发生相对运动而把热量由一处带到另一处的热现象称为热对流, 这是一种借助于流体宏观位移而实现的热量传递过程。宏观位移是大量分子集体运动或者说流体微团的运动结果, 这时不仅有宏观运动, 还有随机运动, 即微观运动。所以实际上流体在进行热对流的同时, 热量的传导过程也同时发生。因此, 发生在流动介质中的热量传递是热传导与热对流的综合过程。工程上还经常遇到流体与温度不同的固体壁面接触时的热量交换情况 (图 1-4), 这种热量的传递过程称为对流换热。由于单一的热对流是不存在的, 因而传热学中讨论的对流问题主要是对流换热过程。

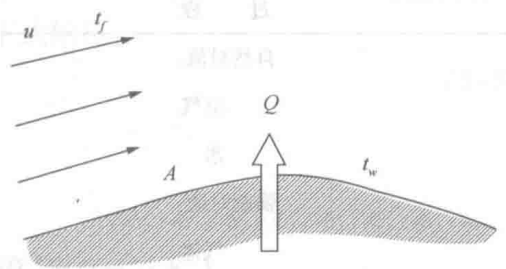


图 1-4 对流换热过程示意图

(2) 分类

对流换热按照不同的原因可分为多种类型。按照是否相变，分为：有相变的对流换热和无相变的对流换热。按照流动原因，分为：强迫对流换热和自然对流换热。按照流动状态，分为：层流和紊流。强迫对流换热是由外因造成的，例如风机、水泵或大自然中的风。自然对流换热是由于温度差造成密度差，产生浮升力，热流体向上运动，冷流体填充空位，形成的往复过程。例如无风天气，一条晒热的路面与环境的散热；有风时，强迫换热占主导。

(3) 牛顿冷却公式

1701 年，牛顿(Isaac Newton)首先提出了计算对流换热热流量的基本关系式，常称为牛顿冷却定律，其形式为

$$Q=hA(t_w-t_f)=hA\Delta t \tag{1-4}$$

- 式中 t_w ——物体表面的温度,℃(K);
 t_f ——流体的温度,℃(K);
 $\Delta t=t_w-t_f$ ——温差,这里认为 $t_w>t_f$,人为约定 Δt 取正值,℃(K);
 h ——定义的系数,称为对流换热系数或表面传热系数,它是一个反映对流换热过程强弱的物理量, W/(m²·K)。

由于对流换热是一个复杂的热量交换过程,影响因素很多,如:引起流动的原因(自然或强迫流动)、流体流动的状态(层流或紊流)、流体的物理性质(密度、比热容等)、流体的相变(沸腾或冷凝)、换热边界的几何因素(形状、大小及相对位置)等。显然,单凭式(1-4)是不可能描述或反映这些复杂因素对换热过程的影响,而只是把这些因素都集中到对流换热系数 h 之中。因此,针对各种对流换热问题求解对流换热系数 h 则是分析和研究对流换热问题的主要任务。

表 1-1 给出了几种对流换热表面的换热系数值。就换热方式而言,自然对流换热系数最小(空气为 1~10,水为 200~1000),有相变时最大(10³~10⁴量级),强迫对流居中。就介质而言,水比空气强烈。

表 1-1 对流传热表面传热系数的大致取值范围

过 程	$h/[W/(m^2 \cdot K)]$
自然对流:	
空气	1~10
水	200~1000
强制对流:	
气体	20~100
高压水蒸气	500~35000
水	1000~1500
水的相变换热:	
沸腾	2500~35000
蒸汽凝结	5000~25000

【例 1-2】 一室内暖气片的散热面积为 3 m^2 ，表面温度为 $t_w = 50^\circ\text{C}$ ，与温度为 20°C 的室内空气之间自然对流换热的表面传热系数为 $h = 4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。试问该暖气片相当于多大功率的电暖气？

解：暖气片和室内空气之间是稳态的自然对流换热，于是有

$$Q = hA(t_w - t_f) = 4 \times 3 \times (50 - 20) = 360 \text{ W} = 0.36 \text{ kW}$$

即相当于功率为 0.36 kW 的电暖气。

1.1.3 热辐射

(1) 定义

物质的微观离子(分子、原子和电子等)的运动会以光的形式向外辐射能量，我们称之为电磁辐射。电磁辐射的波长范围很广，从长达数百米的无线电波到小于 $10 \sim 14 \text{ m}$ 的宇宙射线。这些射线不仅产生的原因各不相同，而且性质也各异，由此也构成了围绕辐射过程的广泛的科学和技术领域。这里我们无意去讨论各种辐射过程，仅仅对由物质的热运动(即无序运动)而产生的电磁辐射，以及因这些电磁辐射投射到物体上而引起的热效应感兴趣。我们把物体通过电磁波来传递热量的方式称为热辐射。凡是温度高于 $0(\text{K})$ 的物体都有向外发射热射线的能力。热辐射的波长大多集中在红外线区，在可见光区占比重不大。物体的温度越高，辐射能力越强。温度相同，但物体的性质和表面状况不同，辐射能力也不同。

(2) 特点

热辐射是热量传递的基本方式之一。与热传导和热对流不同，热辐射是通过电磁波(或光子流)的方式传播能量的过程，它不需要物体之间的直接接触，也不需要任何中间介质。当两个物体被真空隔开时，导热和对流均不会发生，只有热辐射。太阳将大量的热量传给地球，就是靠热辐射的作用。

热辐射的另一个特点是：它不仅产生能量的转移，而且还伴随着能量的转换。即发射时从热能转化为辐射能，吸收时又从辐射能转化为热能。

(3) 斯蒂芬-玻尔兹曼(Stefen-Boltzmann)定律

一个理想的辐射和吸收能量的物体被称为黑体。黑体的辐射和吸收本领在同温度物体中是最大的。黑体向周围空间发射出去的辐射能由下式给出：

$$Q = A\sigma T^4 \quad (1-5)$$

式中 Q ——黑体发射的辐射能， W/m^2 ；

A ——物体的辐射表面积， m^2 ；

T ——绝对温度， K ；

σ ——斯蒂芬-玻尔兹曼常数，其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

式(1-5)称为斯蒂芬-玻尔兹曼(Stefen-Boltzmann)定律，它是从热力学理论导出并由实验证实的黑体辐射规律，又称为辐射四次方定律，是计算热辐射的基础。一切实际物体的辐射能力都小于同温度下黑体的辐射能力。实际物体发射的辐射能可以用辐射四次方定律的经验修正来计算：

$$Q = \varepsilon A\sigma T^4 \quad (1-6)$$

式中 ε ——该物体的发射率(又称黑度),其值小于1。

一个物体的发射率与物体的温度、种类及表面状态有关。物体的 ε 值越大,则表明它越接近理想的黑体。

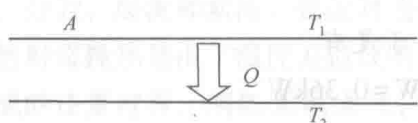


图 1-5 两平行黑平板间的辐射换热

自然界中的所有物体都在不断地向周围空间发射辐射能,与此同时,又在不断地吸收来自周围空间其他物体的辐射能,两者之间的差额就是物体之间的辐射换热量。物体表面之间以辐射方式进行的热交换过程我们称之为辐射换热。对于两个相距很近的黑体表面(图 1-5),由于一个表面发射出来的能量几乎完全落到另一个表面上,那么它们之间的辐射换热量为

$$Q = A\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (1-7)$$

当 $T_1 = T_2$ 时,也就是物体和周围环境处于热平衡时,辐射换热量等于零。但此时是动态平衡,辐射和吸收仍在不断进行。此时物体的温度保持不变。

【例 1-3】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及空气温度分别为 $t_w = 48^\circ\text{C}$, $t_f = 23^\circ\text{C}$,此时空气与管道外表面间的自然对流换热的表面传热系数 $h = 3.42\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,保温层外表面的发射率 $\varepsilon = 0.9$ 。

问:(1)此管道的散热必须考虑哪些热量传递方式;

(2)计算每米长度管道的总散热量。

解:(1)此管道的散热有辐射换热和自然对流换热两种方式。

(2)把管道每米长度上的散热量记为 q_l 。

当仅考虑自然对流时,单位长度上的自然对流散热为

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

每米长度管道外表面与室内物体及墙壁之间的辐射为

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

讨论:计算结果表明,对于表面温度为几十摄氏度的一类表面的散热问题,自然对流散热量与辐射具有相同的数量级,必须同时予以考虑。

1.2 热量传递的基本过程

工业生产中所遇到的许多实际热交换过程常常是热介质将热量传给换热面,然后由换热面传给冷介质。这种热量由热流体通过间壁传给冷流体的过程称为传热过程。传热过程中由热流体传给冷流体的热量通常表示为

$$Q = kA\Delta t \quad (1-8)$$

式中 Δt ——热流体与冷流体间的平均温差, $^\circ\text{C}$ (K);

k ——传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。在数值上,传热系数等于冷、热流体间温差。

$\Delta t = 1^\circ\text{C}$ 、传热面积 $A = 1\text{m}^2$ 时的热流量值,是一个表征传热过程强烈程度的物理量。传

热过程越强，传热系数越大，反之则越弱。

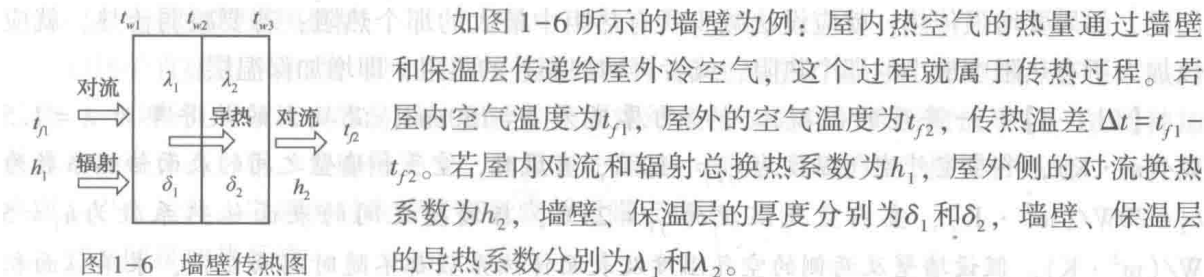


图 1-6 墙壁传热图

如图 1-6 所示的墙壁为例：屋内热空气的热量通过墙壁和保温层传递给屋外冷空气，这个过程就属于传热过程。若屋内空气温度为 t_{f1} ，屋外的空气温度为 t_{f2} ，传热温差 $\Delta t = t_{f1} - t_{f2}$ 。若室内对流和辐射总换热系数为 h_1 ，屋外侧的对流换热系数为 h_2 ，墙壁、保温层的厚度分别为 δ_1 和 δ_2 ，墙壁、保温层的导热系数分别为 λ_1 和 λ_2 。

从热流体 t_{f1} 到 t_{w1} ，有

$$Q = Ah_1(t_{f1} - t_{w1}) \quad (1-9)$$

则
$$t_{f1} - t_{w1} = \frac{Q}{Ah_1} \quad (1-10)$$

从 t_{w1} 到 t_{w2}
$$Q = \frac{A\lambda_1(t_{w1} - t_{w2})}{\delta_1} \quad (1-11)$$

则
$$t_{w1} - t_{w2} = \frac{Q}{\frac{A\lambda_1}{\delta_1}} \quad (1-12)$$

从 t_{w2} 到 t_{w3}
$$Q = \frac{A\lambda_2(t_{w2} - t_{w3})}{\delta_2} \quad (1-13)$$

则
$$t_{w2} - t_{w3} = \frac{Q}{\frac{A\lambda_2}{\delta_2}} \quad (1-14)$$

从 t_{w3} 到冷流体
$$Q = Ah_2(t_{w3} - t_{f2}) \quad (1-15)$$

则
$$t_{w3} - t_{f2} = \frac{Q}{Ah_2} \quad (1-16)$$

将式(1-10)、式(1-12)、式(1-14)和式(1-16)相加并整理，得

$$Q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{Ah_1} + \frac{\delta_1}{A\lambda_1} + \frac{\delta_2}{A\lambda_2} + \frac{1}{Ah_2}} = \frac{\Delta t}{\frac{1}{Ak}} \quad (1-17)$$

将式(1-17)表示成热阻的形式，有

$$Q = \frac{\Delta t}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{\Delta t}{R_t} \quad (1-18)$$

式中 $R_i (i=1, 2, 3, 4)$ ——传热过程的各个分热阻，K/W；

R_t ——传热过程的总热阻，K/W。

式(1-18)相当于电学中的欧姆定律(电流=电压/电阻； $I = \Delta U / R$)，且式中总热阻和分热阻的关系也具有电学中串联电路的电阻叠加特性：总电阻等于各串联分电阻之和。导热现象的比拟(流量=动力/阻力)如图 1-7 所示。

热阻是传热学的基本概念之一。用热阻的概念分析各种传

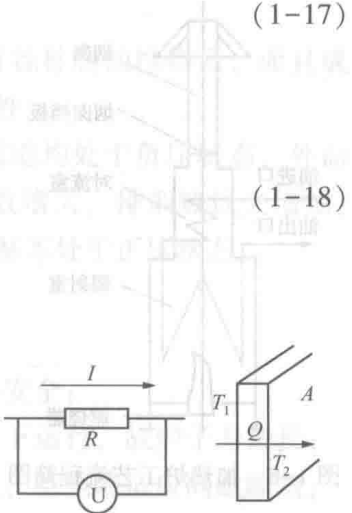


图 1-7 导热现象的比拟

热现象，不仅可使问题的物理概念更加清晰，而且推导和计算也来得简便。对于某一传热问题，如果要增强传热，就应设法减少所有热阻中最大的那个热阻；若要减弱传热，就应该加大所有热阻中最小的那个热阻，或者再增加额外的热阻，即增加保温层。

【例 1-4】一房屋的混凝土外墙的厚度为 $\delta = 150\text{mm}$ ，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 $t_{f2} = -10^\circ\text{C}$ ，有风时，空气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 $t_{f1} = 25^\circ\text{C}$ ，与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。

解：由给定条件可知，这是一个稳态传热过程。通过墙壁的热流密度，即单位面积墙壁的散热损失为

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

根据牛顿冷却公式，对于内、外墙面与空气之间的对流换热，有

$$q = h_1(t_{f1} - t_{w1}) = h_2(t_{w2} - t_{f2})$$

于是，内外墙壁面的温度分别为

$$t_{w1} = t_{f1} - \frac{q}{h_1} = 5^\circ\text{C}$$

$$t_{w2} = t_{f2} + \frac{q}{h_2} = -5^\circ\text{C}$$

拓展阅读——加热炉

我国原油大部分为高含蜡、高凝点、高黏度的“三高”原油，因此，原油加热输送工艺应用比较广泛。加热炉是原油加热的主要设备，其工艺流程简图如图 1-8 所示。液体(气

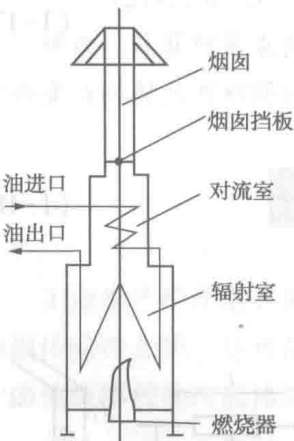


图 1-8 加热炉工艺流程简图

体)燃料在加热炉辐射室中燃烧，产生高温烟气流向对流室换热后，从烟囱排出。待加热的原油首先进入加热炉对流室炉管，炉管主要以对流方式从对流室的烟气中获得热量，又由炉管外表面传导到炉管内表面，再通过对流方式传递给管内流动的原油。原油由对流室炉管进入辐射室炉管，在辐射室内燃烧器喷出的火焰主要以辐射方式将热量的一部分辐射到炉管外表面，另一部分辐射到炉墙上，炉墙再次以辐射方式将热量辐射到背火面一侧的炉管表面上。这两部分辐射热共同作用，使管表面升温并与管壁内表面形成了温差，热量传导至管内壁，管内流动的原油又以对流方式不断从管内壁获得热量，实现了加热原油的工艺要求。

按油流是否通过加热炉管，可将原油加热方式分为直接加热和间接加热两种：直接加热是原油直接经过加热炉，吸收燃料燃烧放出的热量；间接加热是原油通过中间介质(导热油、饱和水蒸气或饱和水)在换热器中吸收热量，达到升温的目的。