

专业指导委员会推荐教材
高校建筑环境与设备工程学科

GAO XIAO
JIAN ZHU
HUAN JING YU
SHE BEI
GONG CHENG
XUE KE
ZHUAN YE
ZHI DAO WEI
YUAN HUI TUI
JIAN JIAO CAI

热质交换 原理与 设备

连之伟 主编
连之伟 张寅平 编
陈宝明 曹登祥
孙德兴 主审

4-43

中国建筑工业出版社

高校建筑环境与设备工程学科专业指导委员会推荐教材

热质交换原理与设备

连之伟 主编

连之伟 张寅平 陈宝明 曹登祥 编

孙德兴 主审

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

热质交换原理与设备/连之伟主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2001.9

高校建筑环境与设备工程学科专业指导委员会推荐教材

ISBN 7-112-04639-4

I. 热… II. 连… III. 传热传质学-高等学校-教材
IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 061166 号

“热质交换原理与设备”课程是高等学校建筑环境与设备工程专业的
主干课之一。本书即是按照本门课程的基本要求编写的。全书共分六章：
绪论、热质交换过程、相变热质交换原理、空气热质处理方法、其它形式
的热质交换、热质交换设备等。本书在强调原理、加强基础的同时，注意
与实际工程结合。

本书亦可供其它有关专业的教学参考，同时还可供有关工程技术人员
和自学者参考。

高校建筑环境与设备工程学科专业指导委员会推荐教材

热质交换原理与设备

连之伟 主编

连之伟 张寅平 陈宝明 曹登祥 编

孙德兴 主审

*

中国建筑工业出版社出版 (北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 15 $\frac{1}{4}$ 字数: 380 千字

2001 年 9 月第一版 2002 年 2 月第二次印刷

印数: 6,001—11,000 册 定价: 22.00 元

ISBN 7-112-04639-4

TU·4109(10089)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

前 言

为了适应国家新的学科目录，建设部于1997年6月成立了“面向21世纪高等教育教学内容和课程体系的改革与实践”课题组。相应地，建筑环境与设备工程专业也进行了这方面的教学改革研讨。在本学科专业指导委员会的坚强领导与支持下，本着加强基础，提高学生能力的原则，新增加了三门专业基础与专业理论课，“热质交换原理与设备”即是其中之一。

该课程是将专业中的《传热学》、《流体力学》、《工程热力学》、《供暖工程》、《区域供热》、《工业通风》、《空气调节》、《空调用制冷技术》、《锅炉及锅炉房设备》和《燃气燃烧》等课程中牵涉到流体热质交换原理及相应设备的内容抽出，经综合整理、充实加工而形成的一门课程，它以动量传输、热量传输及质量传输共同构成的传输理论（Transport Theory）为基础，重点研究发生在建筑环境与设备中的热质交换原理及相应的设备热工计算方法，为进一步学习创造良好的建筑室内环境打下基础。

由此可见，本课程是创造建筑室内环境所用热质交换方法的理论知识与设备知识同时兼顾的一门主干专业理论课，起着联接本专业基础课与技术课的桥梁作用。

本课程教学大纲和教材大纲经过众多学校相关教师多次讨论，三易其稿而定，它将以往分散在多门专业课中的热质交换现象及其相应设备内容有机结合起来，重点讨论热质交换现象同时产生的过程，使之在理论上系统化，然后再将理论应用于具体设备。

本书第1章及第5、6章部分内容由上海交通大学连之伟教授执笔，第3章及第4、6章部分内容由清华大学张寅平教授执笔，第2章及第4章部分内容由山东建筑工程学院陈宝明教授执笔，第5、6章部分内容由重庆大学曹登祥教授执笔。全书由连之伟主编，哈尔滨工业大学孙德兴教授主审。

在本书的编写过程中，得到全国各有关院校本专业教师的热情帮助，提出了许多宝贵意见。同时，专业指导委员会的领导和委员对本书也一直给予积极支持，在此一并表示衷心感谢。

由于时间仓促和编者水平所限，书中一定有许多不尽人意之处，恳请读者批评指正，并提出建议，以期二版时质量有较大提高。

基本符号表

<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 10%;">A</td><td style="width: 40%;">面积</td><td style="width: 50%;">米² (m²)</td></tr> <tr><td>a</td><td>导温系数 (热扩散系数)</td><td>米²/秒 (m²/s)</td></tr> <tr><td>B</td><td>大气压强</td><td>巴 (bar), 牛顿/米² (N/m²),</td></tr> <tr><td>Bi</td><td>毕奥数</td><td>公斤/米·秒² (kg/m·s²)</td></tr> <tr><td>C</td><td>质量浓度</td><td>公斤/米³ (kg/m³)</td></tr> <tr><td>c</td><td>比热</td><td>焦耳/千克·度 (J/kg·°C)</td></tr> <tr><td>d</td><td>直径</td><td>米 (m)</td></tr> <tr><td>D</td><td>质扩散系数</td><td>米²/秒 (m²/s)</td></tr> <tr><td>f</td><td>摩擦系数</td><td></td></tr> <tr><td>i</td><td>焓</td><td>焦耳/千克 (J/kg)</td></tr> <tr><td>H</td><td>高度</td><td>米 (m)</td></tr> <tr><td>H_m</td><td>融解热</td><td>焦耳/千克 (J/kg)</td></tr> <tr><td>h</td><td>对流换热系数</td><td>瓦/米²·度 (W/m²·°C)</td></tr> <tr><td>h_m</td><td>传质系数</td><td>米/秒 (m/s)</td></tr> <tr><td>K</td><td>传热系数</td><td>瓦/米²·度 (W/m²·°C)</td></tr> <tr><td>l</td><td>长度</td><td>米 (m)</td></tr> <tr><td>M</td><td>质流量</td><td>千克/秒 (kg/s)</td></tr> <tr><td>M</td><td>质量</td><td>千克 (kg)</td></tr> <tr><td>m</td><td>质流通量</td><td>千克/米²·秒 (kg/m²·s)</td></tr> <tr><td>n</td><td>摩尔数</td><td></td></tr> <tr><td>NTU</td><td>传热单元数</td><td></td></tr> <tr><td>p</td><td>压强</td><td>帕 (Pa), 巴 (bar) 牛顿/米² (N/m²)</td></tr> <tr><td>Q</td><td>热流量</td><td>瓦 (W)</td></tr> <tr><td>q</td><td>热流通量</td><td>瓦/米² (W/m²)</td></tr> <tr><td>R</td><td>热阻</td><td>米²·度/瓦 (m²·°C/W)</td></tr> <tr><td>r</td><td>半径</td><td>米 (m)</td></tr> <tr><td>r</td><td>汽化潜热</td><td>焦耳/千克 (J/kg)</td></tr> <tr><td>S</td><td>距离</td><td>米 (m)</td></tr> <tr><td>Ste</td><td>斯蒂芬数</td><td></td></tr> </table>	A	面积	米 ² (m ²)	a	导温系数 (热扩散系数)	米 ² /秒 (m ² /s)	B	大气压强	巴 (bar), 牛顿/米 ² (N/m ²),	Bi	毕奥数	公斤/米·秒 ² (kg/m·s ²)	C	质量浓度	公斤/米 ³ (kg/m ³)	c	比热	焦耳/千克·度 (J/kg·°C)	d	直径	米 (m)	D	质扩散系数	米 ² /秒 (m ² /s)	f	摩擦系数		i	焓	焦耳/千克 (J/kg)	H	高度	米 (m)	H _m	融解热	焦耳/千克 (J/kg)	h	对流换热系数	瓦/米 ² ·度 (W/m ² ·°C)	h _m	传质系数	米/秒 (m/s)	K	传热系数	瓦/米 ² ·度 (W/m ² ·°C)	l	长度	米 (m)	M	质流量	千克/秒 (kg/s)	M	质量	千克 (kg)	m	质流通量	千克/米 ² ·秒 (kg/m ² ·s)	n	摩尔数		NTU	传热单元数		p	压强	帕 (Pa), 巴 (bar) 牛顿/米 ² (N/m ²)	Q	热流量	瓦 (W)	q	热流通量	瓦/米 ² (W/m ²)	R	热阻	米 ² ·度/瓦 (m ² ·°C/W)	r	半径	米 (m)	r	汽化潜热	焦耳/千克 (J/kg)	S	距离	米 (m)	Ste	斯蒂芬数		<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 10%;">T</td><td style="width: 40%;">热力学温度</td><td style="width: 50%;">(K)</td></tr> <tr><td>t</td><td>摄氏温度</td><td>度 (°C)</td></tr> <tr><td>U</td><td>周边长度</td><td>米 (m)</td></tr> <tr><td>u</td><td>速度</td><td>米/秒 (m/s)</td></tr> <tr><td>V</td><td>容积</td><td>米³ (m³)</td></tr> <tr><td>v</td><td>速度</td><td>米/秒 (m/s)</td></tr> <tr><td>w</td><td>速度</td><td>米/秒 (m/s)</td></tr> <tr><td>β</td><td>肋化系数</td><td></td></tr> <tr><td>β</td><td>容积膨胀系数</td><td>1/开 (1/K)</td></tr> <tr><td>δ</td><td>厚度</td><td>米 (m)</td></tr> <tr><td>ε</td><td>换热器效能</td><td></td></tr> <tr><td>Δ</td><td>差值</td><td></td></tr> <tr><td>η</td><td>效率</td><td></td></tr> <tr><td>θ</td><td>过剩温度 或无量纲温度</td><td>度 (°C) (W/m·K)</td></tr> <tr><td>λ</td><td>导热系数</td><td>瓦/(米·度) [W/(m·K)]</td></tr> <tr><td>μ</td><td>分子量</td><td></td></tr> <tr><td>μ</td><td>动力粘度</td><td>牛顿秒/米² (N·s/m²)</td></tr> <tr><td>ν</td><td>运动粘度</td><td>米²/秒 (m²/s)</td></tr> <tr><td>ρ</td><td>密度</td><td>千克/米³ (kg/m³)</td></tr> <tr><td>τ</td><td>时间</td><td>秒 (s), 时 (h)</td></tr> <tr><td>τ</td><td>剪切应力</td><td>巴 (bar), 牛顿/米² (N/m²)</td></tr> <tr><td>φ</td><td>相对湿度</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>下标</td><td></td></tr> <tr><td>f</td><td>流体</td><td></td></tr> <tr><td>m</td><td>融化</td><td></td></tr> <tr><td>l</td><td>液态</td><td></td></tr> <tr><td>p</td><td>相变材料</td><td></td></tr> <tr><td>s</td><td>固态</td><td></td></tr> <tr><td>lm</td><td>对数平均</td><td></td></tr> </table>	T	热力学温度	(K)	t	摄氏温度	度 (°C)	U	周边长度	米 (m)	u	速度	米/秒 (m/s)	V	容积	米 ³ (m ³)	v	速度	米/秒 (m/s)	w	速度	米/秒 (m/s)	β	肋化系数		β	容积膨胀系数	1/开 (1/K)	δ	厚度	米 (m)	ε	换热器效能		Δ	差值		η	效率		θ	过剩温度 或无量纲温度	度 (°C) (W/m·K)	λ	导热系数	瓦/(米·度) [W/(m·K)]	μ	分子量		μ	动力粘度	牛顿秒/米 ² (N·s/m ²)	ν	运动粘度	米 ² /秒 (m ² /s)	ρ	密度	千克/米 ³ (kg/m ³)	τ	时间	秒 (s), 时 (h)	τ	剪切应力	巴 (bar), 牛顿/米 ² (N/m ²)	φ	相对湿度			下标		f	流体		m	融化		l	液态		p	相变材料		s	固态		lm	对数平均	
A	面积	米 ² (m ²)																																																																																																																																																																													
a	导温系数 (热扩散系数)	米 ² /秒 (m ² /s)																																																																																																																																																																													
B	大气压强	巴 (bar), 牛顿/米 ² (N/m ²),																																																																																																																																																																													
Bi	毕奥数	公斤/米·秒 ² (kg/m·s ²)																																																																																																																																																																													
C	质量浓度	公斤/米 ³ (kg/m ³)																																																																																																																																																																													
c	比热	焦耳/千克·度 (J/kg·°C)																																																																																																																																																																													
d	直径	米 (m)																																																																																																																																																																													
D	质扩散系数	米 ² /秒 (m ² /s)																																																																																																																																																																													
f	摩擦系数																																																																																																																																																																														
i	焓	焦耳/千克 (J/kg)																																																																																																																																																																													
H	高度	米 (m)																																																																																																																																																																													
H _m	融解热	焦耳/千克 (J/kg)																																																																																																																																																																													
h	对流换热系数	瓦/米 ² ·度 (W/m ² ·°C)																																																																																																																																																																													
h _m	传质系数	米/秒 (m/s)																																																																																																																																																																													
K	传热系数	瓦/米 ² ·度 (W/m ² ·°C)																																																																																																																																																																													
l	长度	米 (m)																																																																																																																																																																													
M	质流量	千克/秒 (kg/s)																																																																																																																																																																													
M	质量	千克 (kg)																																																																																																																																																																													
m	质流通量	千克/米 ² ·秒 (kg/m ² ·s)																																																																																																																																																																													
n	摩尔数																																																																																																																																																																														
NTU	传热单元数																																																																																																																																																																														
p	压强	帕 (Pa), 巴 (bar) 牛顿/米 ² (N/m ²)																																																																																																																																																																													
Q	热流量	瓦 (W)																																																																																																																																																																													
q	热流通量	瓦/米 ² (W/m ²)																																																																																																																																																																													
R	热阻	米 ² ·度/瓦 (m ² ·°C/W)																																																																																																																																																																													
r	半径	米 (m)																																																																																																																																																																													
r	汽化潜热	焦耳/千克 (J/kg)																																																																																																																																																																													
S	距离	米 (m)																																																																																																																																																																													
Ste	斯蒂芬数																																																																																																																																																																														
T	热力学温度	(K)																																																																																																																																																																													
t	摄氏温度	度 (°C)																																																																																																																																																																													
U	周边长度	米 (m)																																																																																																																																																																													
u	速度	米/秒 (m/s)																																																																																																																																																																													
V	容积	米 ³ (m ³)																																																																																																																																																																													
v	速度	米/秒 (m/s)																																																																																																																																																																													
w	速度	米/秒 (m/s)																																																																																																																																																																													
β	肋化系数																																																																																																																																																																														
β	容积膨胀系数	1/开 (1/K)																																																																																																																																																																													
δ	厚度	米 (m)																																																																																																																																																																													
ε	换热器效能																																																																																																																																																																														
Δ	差值																																																																																																																																																																														
η	效率																																																																																																																																																																														
θ	过剩温度 或无量纲温度	度 (°C) (W/m·K)																																																																																																																																																																													
λ	导热系数	瓦/(米·度) [W/(m·K)]																																																																																																																																																																													
μ	分子量																																																																																																																																																																														
μ	动力粘度	牛顿秒/米 ² (N·s/m ²)																																																																																																																																																																													
ν	运动粘度	米 ² /秒 (m ² /s)																																																																																																																																																																													
ρ	密度	千克/米 ³ (kg/m ³)																																																																																																																																																																													
τ	时间	秒 (s), 时 (h)																																																																																																																																																																													
τ	剪切应力	巴 (bar), 牛顿/米 ² (N/m ²)																																																																																																																																																																													
φ	相对湿度																																																																																																																																																																														
	下标																																																																																																																																																																														
f	流体																																																																																																																																																																														
m	融化																																																																																																																																																																														
l	液态																																																																																																																																																																														
p	相变材料																																																																																																																																																																														
s	固态																																																																																																																																																																														
lm	对数平均																																																																																																																																																																														

目 录

基本符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 三种传递现象的类比	1
1.1.1 分子传递 (传输) 性质	1
1.1.2 湍流传递性质	3
1.2 热质交换设备的分类	4
1.3 本门课程在专业中的地位与作用	8
1.4 本课程的主要研究内容	9
第 2 章 热质交换过程	11
2.1 传质的基本概念	11
2.1.1 传质的基本方式	11
2.1.2 浓度的概念	12
2.1.3 扩散通量	13
2.2 扩散传质	13
2.2.1 斐克定律	13
2.2.2 斯蒂芬定律	15
2.2.3 扩散系数	17
2.3 对流传质	19
2.3.1 对流传质的基本特点	19
2.3.2 浓度边界层	21
2.3.3 对流传质简化模型	26
2.3.4 对流传质系数的模型理论	27
2.3.5 对流传质过程的相关准则数	30
2.4 动量、热量和质量传递类比	31
2.4.1 三传方程及传质相关准则数	31
2.4.2 动量交换与热交换的类比在质交换中的应用	33
2.4.3 对流质交换的准则关联式	36
2.5 热质传递模型	38
2.5.1 同时进行传热与传质的过程和薄膜理论	38
2.5.2 同一表面上传质过程对传热过程的影响	39
2.5.3 刘伊斯关系式	43
2.5.4 湿球温度的理论基础	45
第 3 章 相变热质交换原理	48
3.1 沸腾换热	48

3.1.1	沸腾换热现象及分析	48
3.1.2	沸腾换热计算式	52
3.1.3	影响沸腾换热的因素	60
3.2	凝结换热	61
3.2.1	凝结换热现象及分析	61
3.2.2	膜状凝结分析解及实验关联式	62
3.2.3	制冷剂的冷凝放热	68
3.3	固液相变传热	70
3.3.1	一维凝固和融解问题及其分析方法	70
3.3.2	多维相变传热问题	78
3.3.3	考虑固、液密度差的简单区域中的相变传热	78
3.3.4	相变蓄热系统 (LHTES) 的理论模型和热性能分析	79
第 4 章	空气热质处理方法	81
4.1	空气热质处理的途径	81
4.1.1	空气热质处理的各种方案	81
4.1.2	空气热质处理及设备	82
4.2	空气与水 / 固体表面之间的热质交换	82
4.2.1	湿空气在冷表面上的冷却降湿	82
4.2.2	湿空气在肋片上的冷却降湿过程	84
4.2.3	空气与水直接接触时的热湿交换	86
4.3	吸收、吸附法处理空气的基本知识	90
4.3.1	吸收、吸附和干燥剂	90
4.3.2	干燥循环	90
4.3.3	吸收、吸附法处理空气的优点	91
4.4	吸附材料处理空气的机理和方法	92
4.4.1	吸附现象简介	92
4.4.2	吸附剂的类型和性能	92
4.4.3	吸附剂处理空气的原理	93
4.4.4	吸附时的传质及其主要影响因素	95
4.4.5	静态吸附除湿和动态吸附除湿	97
4.4.6	吸附除湿型空调系统简介	101
4.5	吸收剂处理空气的机理和方法	102
4.5.1	吸收现象简介	102
4.5.2	常用吸收型除湿剂及其性能特点简介	103
4.5.3	吸收除湿计算	104
4.5.4	吸收型干燥系统及其应用简介	105
第 5 章	其它形式的热质交换	108
5.1	空气射流的热质交换	108
5.1.1	空气射流的种类及其热质交换原理	108
5.1.2	风口型式与送风参数	113
5.2	燃料燃烧时的热质交换	115
5.2.1	燃料与燃烧过程	115

5.2.2	气体燃料的燃烧方法	116
5.2.3	固体燃料的燃烧方法	121
5.2.4	液体燃料的燃烧方式	124
第6章	热质交换设备	127
6.1	热质交换设备的型式与结构	127
6.1.1	间壁式换热器	127
6.1.2	混合式换热器	128
6.1.3	典型的燃烧装置与器具	135
6.2	间壁式热质交换设备的热工计算	145
6.2.1	总传热系数与总传热热阻	145
6.2.2	常用计算方法	147
6.2.3	表面式冷却器的热工计算	151
6.2.4	其它间壁式热质交换设备的热工计算	159
6.3	混合式热质交换设备的热工计算	161
6.3.1	喷淋室处理空气时发生的热质交换的特点	162
6.3.2	影响喷淋室处理空气效果的主要因素	163
6.3.3	喷淋室的设计计算	165
6.3.4	喷淋室的校核计算	170
6.3.5	其它混合式热质交换设备的热工计算	172
6.4	典型燃烧装置主要尺寸和运行参数的计算	185
6.4.1	扩散式燃烧器主要尺寸和运行参数的计算	185
6.4.2	大气式燃烧器主要尺寸及运行参数的计算	191
6.4.3	完全预混燃烧器主要尺寸及运行参数的计算	194
6.5	相变热质交换设备	197
6.5.1	冷凝器	197
6.5.2	蒸发器	207
6.5.3	空调冰蓄冷系统	217
6.6	热质交换设备的优化设计及性能评价	224
6.6.1	热质交换设备的优化设计与分析	224
6.6.2	热质交换设备的性能评价	227
6.6.3	热质交换设备的发展趋势	231
附录	232
参考文献	237

第 1 章 绪 论

动量、热量和质量的传递现象，在自然界和工程技术领域中是普遍存在的。《热质交换原理与设备》这门课程，就是重点研究发生在建筑环境与设备工程专业领域里的动量、热量和质量的传递现象。

在以往的教学过程中，大多数工程专业都开设动量传递（流体力学）和热量传递（传热学）课程，而质量传递课程的开设一般仅限于化工专业。但是近年来，许多工程领域，例如动力机械工程、制冷工程、冶金工程、生化工程、环境工程及建筑环境与设备工程等对于气体、液体和固体的传质过程的研究兴趣日益增大。因此目前许多工程专业都分别开设动量传递、热量传递和质量传递这三门课程。

对于学生来说，分别学习这三门课程时，往往难于理解上述三种传递过程之间的内在联系，这是一个较大的缺陷。1960年 R. B. 伯德 (R. B. Bird) 等人首先在《传递现象》(Transport Phenomena) 一书中对这三种传递现象用统一的方法进行了讨论，力图阐明这三种传递过程之间在定性和定量描述以及计算上的相似性。这对于学生更深入理解传递过程的机理是十分有益的。自此，统一研究这三种传递现象的课程越来越受到人们的重视，它已成为许多工程专业必修的专业基础课。本门课程就是将这一专业基础课与其在本专业上的应用结合起来，架设起专业基础课与技术课的桥梁。

1.1 三种传递现象的类比

当流体中存在速度、温度和浓度的梯度时，则分别发生动量、热量和质量的传递现象。动量、热量和质量的传递，既可以是由分子的微观运动引起的分子扩散，也可以是由旋涡混合造成的流体微团的宏观运动引起的湍流传递。

1.1.1 分子传递（传输）性质

流体的粘性、热传导性和质量扩散性通称为流体的分子传递性质。因为从微观上来考察，这些性质分别是非均匀流场中分子不规则运动时同一个过程所引起的动量、热量和质量传递的结果。当流场中速度分布不均匀时，分子传递的结果产生切应力；而温度分布不均匀时，分子传递的结果产生热传导；在多组分的混合流体中，如果某种组分的浓度分布不均匀，分子传递的结果便引起该组分的质量扩散。表示上述三种分子传递性质的数学关系分别为：

(1) 牛顿粘性定律

两个作直线运动的流体层之间的切应力正比于垂直于运动方向的速度变化率，即

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-1)$$

对于均质不可压缩流体，上式可改写为：

$$\tau = \nu \frac{d(\rho u)}{dy} \quad (1-2)$$

式中 τ ——切应力，同时也表示单位时间内通过单位面积传递的动量，又称动量通量密度， N/m^2 ；

μ ——流体的动力粘性系数， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ；

ν ——流体的运动粘性系数，又称动量扩散系数， m^2/s ；

y ——垂直于运动方向的坐标， m ；

$\frac{d(\rho u)}{dy}$ ——动量浓度的变化率，表示单位体积内流体的动量在 y 方向的变化率， $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$ 。

(2) 傅立叶定律

在均匀的各向同性材料内的一维温度场中，通过导热方式传递的热量通量密度为：

$$q = -\lambda \frac{dt}{dy} \quad (1-3)$$

对于恒定热容量的流体，上式可改写为：

$$q = -\frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{d(\rho c_p t)}{dy} = -a \frac{d(\rho c_p t)}{dy} \quad (1-4)$$

式中 q ——热量通量密度，或能量通量密度，表示单位时间内通过单位面积传递的热量， $\text{J}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ；

$\frac{d(\rho c_p t)}{dy}$ ——焓浓度变化率，或称能量浓度变化率，表示单位体积内流体所具有的焓在 y 方向的变化率， $\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{m})$ ；

λ ——导热系数， $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ；

a ——热扩散系数，又称导温系数， m^2/s ；

y ——温度发生变化方向的坐标， m 。

(3) 斐克定律

在无总体流动或静止的双组分混合物中，若组分 A 的质量分数 C_A^* （也称为质量份额， $C_A^* = \rho_A/\rho$ ，其中 ρ_A 为组分 A 的密度，或称质量浓度， ρ 为混合物的密度）的分布为一维的，则通过分子扩散传递的组分 A 的质量通量密度为：

$$m_A = -D_{AB}\rho \frac{dC_A^*}{dy} \quad (1-5)$$

对于混合物密度为常数的情况，上式可改写为：

$$m_A = -D_{AB} \frac{d\rho_A}{dy} \quad (1-6)$$

式中 m_A ——组分 A 的质量通量密度，表示单位时间内，通过单位面积传递的组分 A 的质量， $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ；

D_{AB} ——组分 A 在组分 B 中的扩散系数， m^2/s ；

y ——组分 A 的密度发生变化的方向的坐标， m ；

$\frac{d\rho_A}{dy}$ ——质量浓度变化率,表示单位体积内组分 A 的质量浓度在 y 方向的变化率, kg/(m³·m)。

在公式(1-3)~(1-6)中的负号,分别表示传热和传质是向温度、浓度降低的方向进行的。

由式(1-1)~(1-6)可见,表示三种分子传递性质的数学关系式是类似的。今以式(1-2)、(1-4)和式(1-6)说明。

动量传递公式(1-2)表明:动量通量密度正比于动量浓度的变化率。

能量传递公式(1-4)表明:能量通量密度正比于能量浓度的变化率。

质量传递公式(1-6)表明:组分 A 的质量通量密度正比于组分 A 的质量浓度的变化率。

因而这三个传递公式可以用如下的统一公式来表示,

$$FD\Phi' = C \frac{d\Phi}{dy} \quad (1-7)$$

其中, $FD\Phi'$ 表示 Φ' 的通量密度, $d\Phi/dy$ 表示 Φ 的变化率, C 为比例常数。 Φ' 可分别表示质量、动量和热量,而 Φ 可分别表示质量浓度(单位体积的质量),动量浓度(单位体积的动量)和能量浓度(单位体积的能量)。

若令式(1-7)中的 $FD\Phi' = m_A$, $\Phi = \rho_A$, $C = -D_{AB}$, 则得质量传递公式(1-6)。

若令式(1-7)中的 $FD\Phi' = q$, $\Phi = \rho c_p t$, $C = -a$, 则得能量传递公式(1-4)。

若令式(1-7)中的 $FD\Phi' = \tau$, $\Phi = \rho\mu$, $C = \nu$, 则得动量传递公式(1-2)。

这些表达式说明动量交换、热量交换、质量交换的规律可以类比。动量交换传递的量是运动流体单位容积所具有的动量 $\rho\mu$; 热量交换传递的量是物质每单位容积所具有的焓 $c_p\rho t$; 质量交换传递的量是扩散物质每单位容积所具有的质量也就是浓度 C_A 。显然,这些量的传递速率都分别与各量的梯度成正比。系数 D 、 a 、 ν 均具有扩散的性质,它们的单位均为 m²/s, D 为分子扩散或质扩散系数, a 为热扩散系数, ν 为动量扩散系数或称运动粘度。

以后我们将会看到,正是由于这三个基本传递公式的类似性将导致这三种传递过程具有一系列类似的特性。不过,在多维场中,动量是一个矢量,因而表示其传递量的动量通量密度是一个张量,而热量和质量都是标量,因而表示其传递量的热量通量密度和质量通量密度都是矢量。就这一点来说,前者和后两者是不同的。

1.1.2 湍流传递性质

在湍流流动中,除分子传递现象外,宏观流体微团的不规则混掺运动也引起动量、热量和质量的传递,其结果从表象上看起来,相当于在流体中产生了附加的“湍流切应力”,“湍流热传导”和“湍流质量扩散”。由于流体微团的质量比分子的质量大得多,所以湍流传递的强度自然要比分子传递的强度大得多。

尽管湍流混掺运动与分子运动之间有重要差别,然而早期半经验湍流理论的创立者还是仿照分子传递性质的定律建立了湍流传递性质的公式。在这种理论中定义了湍流动力粘性系数 μ_t 、湍流导热系数 λ_t 和湍流质量扩散系数 D_{ABt} , 并认为对于只有一个速度分量的一维流动而言,湍流切应力 τ_t 、湍流热量通量密度 q_t 和湍流扩散引起的组分 A 的质量通量密度 m_{At} 分别与平均速度 \bar{u} 、平均温度 \bar{t} 和组分 A 的平均密度 $\bar{\rho}_A$ 的变化率成正比,亦即

$$\tau = \mu_t \frac{d\bar{u}}{dy} \quad (1-8)$$

$$q_t = -\lambda_t \frac{d\bar{t}}{dy} \quad (1-9)$$

$$m_{At} = -D_{ABt} \frac{d\bar{\rho}_A}{dy} \quad (1-10)$$

因为在流体中同时存在湍流传递性质和分子传递性质，所以总的切应力 τ_s 、总的热量通量密度 q_s 和组分 A 的总的质量通量密度 m_s 分别为：

$$\tau_s = \tau + \tau_t = (\mu + \mu_t) \frac{d\bar{u}}{dy} = \mu_{\text{eff}} \frac{d\bar{u}}{dy} \quad (1-11)$$

$$q_s = -(\lambda + \lambda_t) \frac{d\bar{t}}{dy} = -\lambda_{\text{eff}} \frac{d\bar{t}}{dy} \quad (1-12)$$

$$m_s = -(D_{AB} + D_{ABt}) \frac{d\bar{\rho}_A}{dy} = -D_{AB\text{eff}} \frac{d\bar{\rho}_A}{dy} \quad (1-13)$$

这里， μ_{eff} 、 λ_{eff} 和 $D_{AB\text{eff}}$ 分别称为有效动力粘性系数、有效导热系数和组分 A 在双组分混合物中的有效质量扩散系数。

在充分发展的湍流中，湍流传递系数往往比分子传递系数大得多，因而有 $\mu_{\text{eff}} \approx \mu_t$ ， $\lambda_{\text{eff}} \approx \lambda_t$ ； $D_{AB\text{eff}} \approx D_{ABt}$ 。故可以用式 (1-8)、(1-9) 和 (1-10) 分别代替式 (1-11)、(1-12) 和 (1-13)。这样，湍流动量传递、湍流热量传递和湍流质量传递的三个数学关系式 (1-8)、(1-9) 和 (1-10) 也是类似的。

应当指出的是，有了类似于式 (1-8)、(1-9) 和 (1-10) 这样的从表象出发建立起来的公式，并没有根本解决湍流计算的问题。因为确定湍流传递系数 μ_t 、 λ_t 、 D_{ABt} ，比起确定分子传递系数 μ 、 λ 、 D_{AB} 困难得多。首先，分子传递系数只取决于流体的热力学状态，而不受流体宏观运动的影响，因此分子传递系数 μ 、 λ 、 D_{AB} 均是与温度、压力有关的流体的固有属性，是物性。然而湍流传递系数主要取决于流体的运动，取决于边界条件及其影响下的速度分布，故不是物性。其次，分子传递性质可以由逐点局部平衡的定律来确定；然而对于湍流传递性质来说，应该考虑其松弛效应，即历史和周围流场对某时刻、某空间点湍流传递性质的影响。除此之外，在一般情况下，分子传递系数 μ 、 λ 、 D_{AB} 是各向同性的；但是在大多数情况下，湍流传递系数 μ_t 、 λ_t 、 D_{ABt} 是各向异性的。

正是由于湍流传递性质的上述特点，使得湍流流动的理论分析至今仍是远未彻底解决的问题，目前主要还是依靠实验来解决。

1.2 热质交换设备的分类

热质交换设备的分类方法很多，可以按工作原理、流体流动方向、设备用途、传热传热表面结构、制造材质等分为各种类型。在各种分类方法中，最基本的是按工作原理分类。

(1) 按工作原理分类

按不同的工作原理可以把热质交换设备分为：间壁式、直接接触式、蓄热式和热管式等类型。

间壁式又称表面式，在此类换热器中，热、冷介质在各自的流道中连续流动完成热量传递任务，彼此不接触，不渗混。凡是生产中介质不容渗混的场合都使用此类型换热器，

它是应用最广泛，使用数量最大的一类。专业上的表面式冷却器、过热器、省煤器、散热器、暖风机、燃气加热器、冷凝器、蒸发器等均属此类。

直接接触式又称为混合式，在此类热质交换设备中，两种流体直接接触并允许相互渗透，传递热量和质量后，再各自全部或部分分开，因而传热传质效率高。专业上的喷淋室及蒸汽喷射泵、冷却塔、蒸汽加湿器、热力除氧器等均属此类。

蓄热式又称回热式或再生式换热器，它借助由固体构件（填充物）组成的蓄热体作为中间载体传递热量。在此类换热器中，热、冷流体依时间先后交替流过由蓄热体组成的流道，热流体先对其加热，使蓄热体温度升高，把热量储存于固体蓄热体内，随即冷流体流过，吸收蓄热体通道壁放出的热量。在蓄热式换热器里所进行的热传递过程不是稳态过程，蓄热体不停地、周而复始地被加热和冷却，壁面和壁内部温度均处于不停的变化之中。炼铁厂的热风炉、锅炉的中间热式空气预热器及全热回收式空气调节器等均属此类。

热管换热器是以热管为换热元件的换热器。由若干支热管组成的换热管束通过中隔板置于壳体内，中隔板与热管加热段、冷却段及相应的壳体内腔分别形成热、冷流体通道，热、冷流体在通道中横掠热管束连续流动实现传热。当前该类换热器多用于各种余热回收工程。

在间壁式、混合式和蓄热式三种主要热质交换设备类型中，间壁式的生产经验、分析和计算方法比较丰富和完整，它们的某些计算方法对混合式和蓄热式也适用。

(2) 按照热流体与冷流体的流动方向分类

热质交换设备按照其内热流体与冷流体的流动方向，可分为：顺流式、逆流式、叉流式和混合式等类型。

顺流式或称并流式，其内冷、热两种流体平行地向着同一方向流动，如图 1-1 (a) 所示。冷、热流体同向流动时，可以用平壁隔开，但是更通常的是用同心管（或是双层管）隔开，其布置简图示于图 1-1 (b)。在这样的顺流布置中，热、冷流体由同一端进入换热器，向着同一方向流动，并由同一端离开换热器。

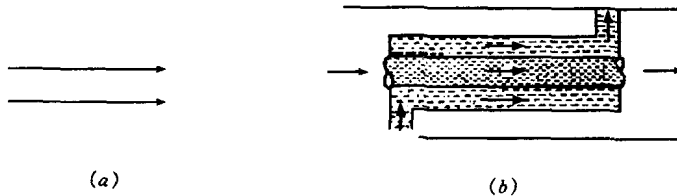


图 1-1 顺流换热器
(a) 示意图；(b) 同心管

逆流式，两种流体也是平行流动，但它们的流动方向相反，如图 1-2 (a) 所示。冷、热流体逆向流动，由相对的两端进入换热器，向着相反的方向流动，并由相对的两端离开换热器，其布置简图示于图 1-2 (b)。

叉流式或称错流式，两种流体的流动方向互相垂直交叉，示意图如图 1-3 (a) 所示。这种布置通常是用在气体受迫流过一个管束而管内则是被泵送的液体，图 1-3 (b)、(c) 表示了两种常见的布置方式。对于像图 1-3 (b) 那样的带肋片的管束，气体流是不混合的，因为它不能在横向（垂直于流动方向）自由运动。类似地，因为液体被约束在互相隔

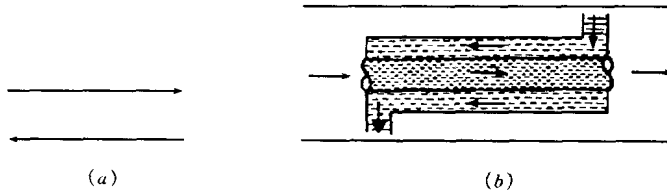


图 1-2 逆流换热器

(a) 示意图; (b) 同心管

开的管子中, 所以液体在流过管子时也是不混合的。这一类肋片管叉流换热器被广泛应用于空调装置中。与之相反, 如果管子是不带肋片的, 那么气体就有可能一边向前流动, 一边横向混合, 象图 1-3 (c) 那样的布置, 气流是混合的。应当注意, 在不混合时, 流体应表示为二维的温度分布, 即其温度在流动方向和垂直于流动的方向上都是变化的。然而, 在有横向混合流动的条件下, 温度虽然主要是在流动方向发生变化, 但混合情况对于换热器总的传热会有重要的影响。

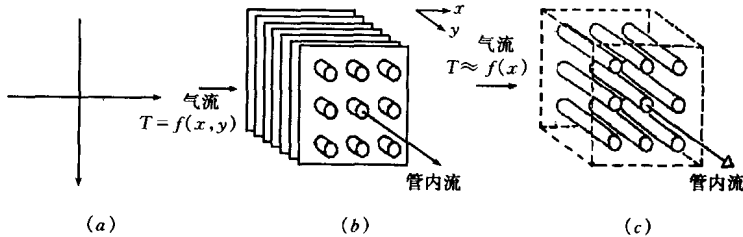


图 1-3 叉流换热器

(a) 示意图; (b) 两种流体均不混合; (c) 一种流体混合, 另一种不混合

混流式, 两种流体在流动过程中既有顺流部分, 又有逆流部分, 图 1-4 (a) 及 (b) 所示就是一例。当冷、热流体交叉次数在四次以上时, 可根据两种流体流向的总趋势, 将其看成逆流或顺流, 如图 1-4 (c) 及 (d)。

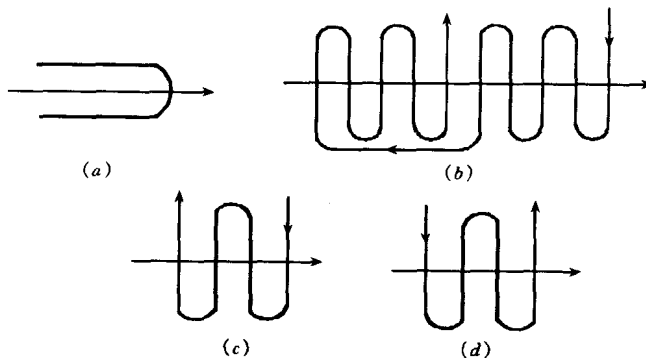


图 1-4 混流换热器示意图

(a) 先顺后逆的平行混流; (b) 先逆后顺的串联混流;
(c) 总趋势为逆流的混合流; (d) 总趋势为顺流的混合流

下面对各种流动形式做一比较。

在各种流动形式中，顺流和逆流可以看作是两个极端情况。在进出口温度相同的条件下，逆流的平均温差最大，顺流的平均温差最小；顺流时，冷流体的出口温度总是低于热流体的出口温度，而逆流时冷流体的出口温度却可能超过热流体的出口温度。这方面内容详见第6章。从这些方面来看，热质交换设备应当尽量布置成逆流，而尽可能避免布置成顺流。但逆流布置也有一个缺点，即冷流体和热流体的最高温度发生在换热器的同一端，使得此处的壁温较高，对于高温换热器来说，这是要注意的。为了降低这里的壁温，有时有意改用顺流，锅炉的高温过热器中就有这种情况。

当冷、热流体中有一种发生相变时，冷、热流体的温度变化就如图1-5所示。其中图1-5(a)表示冷凝器中的温度变化；图1-5(b)表示蒸发器中的温度变化，布置这类换热器时就无所谓顺流、逆流了。同样，当两种流体的水容量 C (Gc)相差较大，或者冷、热流体之间的温差比冷、热流体本身的温度变化大得多时，顺流、逆流的差别就不显著了。纯粹的逆流和顺流，只有在套管换热器或螺旋板式换热器中才能实现。但对工程计算来说，混合流，如图1-6所示的流经管束的流动，只要管束曲折的次数超过4次，就可作为纯逆流和纯顺流来处理了。

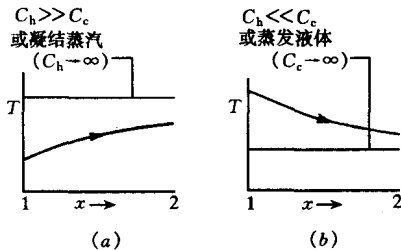


图 1-5 发生相变时冷、热流体的温度变化图

(a) 冷凝器中的温度变化；(b) 蒸发器中的温度变化

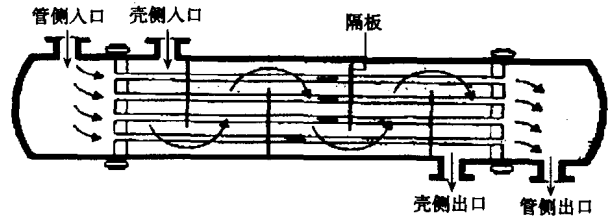


图 1-6 可作为纯顺流的实际工程中的混合流

(3) 按用途分类

热质交换设备按照用途来分有：表冷器、预热器、加热器、喷淋室、过热器、冷凝器、蒸发器、加湿器、暖风机等等。

1) 表冷器 用于把流体冷却到所需温度，被冷却流体在冷却过程中不发生相变，但其内某种成分，如空气中的水蒸气，可能出现凝结现象；

2) 加热器 用于把流体加热到所需温度，被加热流体在加热过程中不发生相变；

3) 预热器 用于预先加热流体，以使整套工艺装置效率得到改善；

4) 喷淋室 通过向被处理流体喷射液体，以直接接触的方式实现对被处理流体的加热、冷却、加湿、减湿等处理过程；

5) 过热器 用于加热饱和蒸汽到其过热状态；

6) 蒸发器 用于加热液体使之蒸发气（汽）化，或利用低压液体蒸发气化以吸收另一种流体的热量；

7) 冷凝器 用于冷却凝结性饱和蒸气（汽），使之放出潜热而凝结液化；

8) 加湿器 用于增加被处理对象的湿度；

9) 暖风机 用于加热空气，以向被供暖房间提供热量。

表 1-1 列出建筑环境与设备工程专业中常见的热质交换设备及其型式，同时还列出其设备内流体的传热机理。

建筑环境与设备专业常见的热质交换设备型式与传热机理

表 1-1

名称	型式	传热机理	名称	型式	传热机理
表冷器	间壁式	对流—导热—对流	冷凝器	间壁式	凝结—导热—对流
喷淋室	直接接触式	接触传热、传质	冷却塔	直接接触式	接触传热、传质
蒸发器（锅炉）	间壁式	辐射—导热—两相传热	蒸汽加热器	间壁式	凝结—导热—对流
蒸发器（制冷）	间壁式	对流—导热—蒸发	热水加热器	间壁式	对流—导热—对流
过热器	间壁式	辐射 + 对流—导热—对流	除氧器	直接接触式	接触传热、传质
省煤器	间壁式	对流（辐射份额少）—导热—对流	蒸汽加湿器	直接接触式	接触传热、传质
空气预热器	间壁式或蓄热式	对流—导热—对流	散热器	间壁式	对流—导热—对流 + 辐射
蒸汽喷射泵	直接接触式	接触传热、传质	暖风机	间壁式	对流（或凝结）—导热—对流

(4) 按制造材料分类

热质交换设备按制造材料可分为金属材料、非金属材料及稀有金属材料等类型。

在生产中使用最多的是用普通金属材料，如碳钢、不锈钢、铝、铜、镍及其合金等制造的热质交换设备。

由于石油、化学、冶金、核动力等工业中的许多工艺过程多在高温、高压、高真空或深冷、剧毒等条件下进行，而且常常伴随着极强的腐蚀性，因而对热质交换设备的材料提出了许多特殊甚至苛刻的要求。金属材料换热器已远不能满足需要，因此开始研制和生产了非金属及稀有金属材料的换热器。

非金属换热器有石墨、工程塑料、玻璃、陶瓷换热器等。

石墨具有优良的耐腐蚀及传热性能，线膨胀系数小，不易结垢，机械加工性能好，但易脆裂、不抗拉、不抗弯。石墨换热器在强腐蚀性液体或气体中应用最能发挥其优点，它几乎可以处理除氧化酸外的一切酸碱溶液。

用于制造热质交换设备的工程塑料很多，目前以聚四氟乙烯为最佳，其性能可与金属换热器相比但却具有特殊的耐腐蚀性。它主要用于硫酸厂的酸冷却，用以代替原有冷却器，可以获得显著的经济效益。

玻璃换热器能抗化学腐蚀，且能保证被处理介质不受或少受污染。它广泛应用于医药、化学工业，例如香精油及高纯度硫酸蒸馏等工艺过程。

稀有金属换热器是在解决高温、强腐蚀等换热问题时研制出来的，但材料价格昂贵使其应用范围受到限制。为了降低成本，已发展了复合材料，如以复合钢板和衬里等形式提供使用。对于制造换热器，目前是钛金属应用较多，锆等其它稀有金属应用较少。

1.3 本门课程在专业中的地位与作用

建筑环境与设备工程专业的毕业生，要能够从事工业与民用建筑中环境控制技术领域的工作，具有暖通空调、燃气供应、建筑给排水等公共设施系统和建筑热能供应系统的设计、安装、调试、运行能力，具有制定建筑自动化系统方案的能力，并具有初步的应用研

究与开发能力。从上述本专业培养目标不难看出，在专业的各个方向上，为实现建筑室内的环境控制，要牵涉到大量的能量交换及与实现这些能量转换相应的设备的知识。例如，制冷设备中常用的氟利昂卧式冷凝器中，氟利昂蒸气在管外凝结，管内流着冷却水，蒸气凝结时所放出的潜热穿过管壁而传到冷却水中（图 1-7），从而实现热量的转移。又如锅炉中的一些受热面（水冷壁、过热器等），在燃料燃烧时与之进行大量的热量交换。另外，空调中对空气进行各种处理的表面式冷却器和喷淋室，给房间供暖所用的散热器和暖风机，提供冷量的制冷系统所用的蒸发器和冷却塔，提供热量的锅炉的省煤器和空气预热器等等，都是本专业常用的进行能量交换的设备。这些设备设计得如何，不但直接影响到室内要控制的环境，而且还对能量消费有重大的影响，因为目前的建筑能耗已占到总能耗的 1/3 左右。

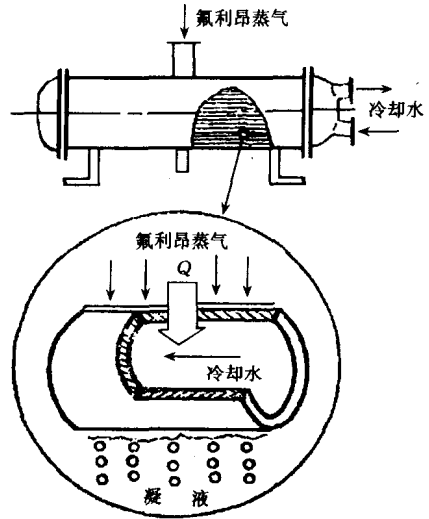


图 1-7 冷凝器中的热量传递过程

本课程是将专业中的《传热学》《流体力学》《工程热力学》及《供暖工程》《区域供热》《工业通风》《空气调节》《空调用制冷技术》《锅炉及锅炉房设备》《燃气燃烧》等课程中牵涉到流体热质交换原理及相应设备的内容抽出，经综合整理、充实加工而形成的一门课程，它是以动量传输、热量传输及质量传输共同构成的传输理论（Transport Theory）为基础，重点研究发生在建筑环境与设备中的热质交换原理及相应的设备热工计算方法，为进一步学习创造良好的建筑室内环境打下基础。

由此可见，本课程是创造建筑室内环境所用热质交换方法的理论知识与设备知识同时兼顾的一门课程，它是建筑环境与设备工程专业的一门主干专业理论课，起着连接本专业基础课与技术课的桥梁作用。

1.4 本门课程的主要研究内容

传热与传质是实际工程中普遍存在的现象。本门课程就是研究创造建筑室内环境所用的热质交换方法的基本特性和基本规律，为创造建筑室内环境所用的热质交换技术提供必要的理论知识和设备知识。其主要内容有：热质交换过程，相变热质交换原理，空气热质处理方法，其它形式的热质交换和热质交换设备等。

热质交换过程部分，主要涉及传质的基本概念、扩散传质、对流传质、热质传递模型和动量、热量和质量的传递类比。

相变热质交换原理部分，主要讨论以制冷剂为主的液体沸腾和蒸气凝结的基本规律，并探讨管内外强迫流动时的相变换热及固液相变热质交换的基本原理。

空气的热质处理方法部分，主要包括空气处理的各种途径，空气与水/固体表面之间的热质交换，用吸收剂处理空气和用吸附材料处理空气的机理与方法。

其它形式的热质交换部分，主要涉及经过处理的空气送入房间时与室内空气发生的热