

高校建筑环境与设备工程  
专业指导委员会规划推荐教材



普通高等教育土建学科专业  
“十五”规划教材

PUTONG  
GAODENG  
JIAOYU  
TU JIAN XUEKE  
ZHUANYE  
SHIWU  
GUIHUA  
JIAOCAI

# 热质交换 原理与 设备(第二版)

连之伟 主编  
孙德兴 主审

中国建筑工业出版社

普通高等教育土建学科专业“十五”规划教材  
高校建筑环境与设备工程专业指导委员会规划推荐教材

# 热质交换原理与设备

## (第二版)

连之伟 主编  
连之伟 张寅平 陈宝明 编著  
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. —2 版. —北京:  
中国建筑工业出版社, 2006

普通高等教育土建学科专业“十五”规划教材. 高校  
建筑环境与设备工程专业指导委员会规划推荐教材

ISBN 7-112-08054-1

I. 热... II. 连... III. ①传热传质学-高等学校  
-教材②换热器-高等学校-教材 IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 010216 号

普通高等教育土建学科专业“十五”规划教材  
高校建筑环境与设备工程专业指导委员会规划推荐教材

**热质交换原理与设备**

(第二版)

连之伟 主编

连之伟 张寅平 陈宝明 编著

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

北京华艺制版公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17 $\frac{1}{4}$  插页: 1 字数: 432 千字

2006 年 4 月第二版 2006 年 4 月第八次印刷

印数: 28401—31400 册 定价: 25.00 元

ISBN 7-112-08054-1

(14008)

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.cabp.com.cn>

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

本书为普通高等教育土建学科专业“十五”规划教材，也是高校建筑环境与设备工程专业指导委员会规划推荐教材。

在总结本书第一版使用情况的基础上，并考虑到四年多来本学科的发展，本版教材在体系、内容的更新与充实等方面都进行了很好的修订和改进。本书共5章，主要内容包括：绪论、热质交换过程、固液相变热质交换原理和应用、空气热质处理方法、热质交换设备等。每章后面还增加了思考题与习题，以便于学生更好的学习与理解。

本书除可作为高校建筑环境与设备工程专业的教材外，还可供相关专业的工程技术人员参考。

\* \* \*

责任编辑：齐庆梅 姚荣华

责任设计：崔兰萍

责任校对：张景秋 刘梅

## 第二版前言

笔者在本书第一版使用过程中听取了任课教师和学生的许多改进意见，其间，全国高等学校建筑环境与设备工程专业教学指导委员会对本书第一版在使用过程中发现的问题也作过多次研讨。第二版的修订就是要在总结经验的基础上发扬第一版的长处，吸收正确的意见，改正不足，以更好地适应专业教学改革的需要。

本书编写的意图是要将建筑环境与设备工程专业各门课程中涉及流体热质交换原理及相应设备的内容抽出，将不同的内容充实、整合，体现整个专业教学内容体系的科学性与系统性。但由于传热传质学内容本身覆盖面广、公式多、符号杂，所以容易使各章节内容缺乏系统性，也使课堂教学枯燥乏味。为此，本版教材做了如下的改进：

### 1. 在内容体系方面。

依据厚基础、重实践、引思考的基本原则，本版教材力求重点突出，以点带面。因此，第一版中第五章“其他形式的热质交换”的内容整体删除了。虽然空气在空间射流时与室内空气也发生着动量、能量和质量的交换，特别是燃烧过程也是一种非常典型的热质交换现象，但是考虑到本专业的具体情况，同时由于学时所限，所以为了突出重点，这部分内容在本书二版中不再出现，而留到相应的课程中讲述。同样的，汽液相变换热原理与传热学相应内容重复较多，其相应的冷凝器、蒸发器等设备内容在“制冷技术”中有较多讲述，因此这部分内容也从本书中删除了，以更加集中地讲授在冰蓄冷等技术中有广泛应用的固液相变换热的知识。另外，为了更好地体现系统性与完整性，将原绪论中的“三传”的类比移到了第二章“动量、热量和质量传递类比”中，而将原绪论中设备的分类移到了“热质交换设备”中去。同时，各章节内部的内容先后次序也做了不同程度的调整。

### 2. 在内容的更新与充实方面。

在精简了许多教学内容后，注意本专业的最新发展动向，吸取最新的成果。如根据本专业的发展和室内空气品质要求的不断提高，注意对流传质在这方面的应用举例。鉴于本专业自身的特点，特别加强和充实了空气与水直接接触时的热质交换方面的内容。考虑到计算机的发展，将热质交换设备的计算机仿真建模方法也引入了进来，当然，鉴于这部分内容对于本科生来讲有一定的难度，将其以“\*”标示，供学有余力的学生学习。另外，为了教学方便，书末也增加了部分附录。

### 3. 统一符号、单位。

由于本课程的性质决定了教材中会存在大量的公式与符号，因此，本版教材力求全书符号的统一。并且除了在书最前边给出符号表外，在一些公式后面也给出了主要符号的解释。单位也统一采用国际单位制。

### 4. 加入习题、思考题。

将习题、思考题等加入到了每章末，以期更好地理解 and 消化学习内容。

总之，本书编著者在本版教材中力求提炼共性，举一反三。希望通过以上改进能有助于提高本门课程的教学质量。

因内容调整，原编者曹登祥教授未参加本版的编写工作。参加本版编写的是上海交通大学连之伟（第1章，第2章2.5.1节，第5章），清华大学张寅平（第2章2.8节，第3章，第4章4.4和4.5节），山东建筑工程学院陈宝明（除2.5.1和2.8节外的整个第2章，第4章4.1~4.3节）。全书由连之伟主编，哈尔滨工业大学孙德兴教授主审。

在本书编写过程中，得到了本学科专业指导委员会的一贯支持与鼓励，使得本书的质量不断提高，并将本版教材推荐为普通高等教育土建学科专业“十五”规划教材，同时彦启森教授、孙德兴教授、朱颖心教授等多次审阅第二版编写大纲，而且亲临第二版大纲的研讨会，提出了许多指导性和建设性的意见；感谢中国建筑工业出版社的领导对二版大纲研讨会的支持，特别是齐庆梅编辑做了大量的组织工作；另外，许多院校的有关教师（恕不一一列名）提出了许多很好的意见和建议；还有上海交通大学的青年教师姚晔博士及部分博士生、硕士生及个别本科生也做了一些资料收集与文字录入，在此一并向他们表示衷心的感谢！

由于时间仓促和编著者水平所限，书中一定还有许多不尽如人意之处，恳请读者批评指正，并提出建议。具体意见可发送至 [zhiweilian@126.com](mailto:zhiweilian@126.com)。您的建议和编著者的新想法，以及本学科技术的不断发展，都将是本书第三版良好的基础。

## 第一版前言

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。

## 高校建筑环境与设备工程专业指导委员会规划推荐教材

征订号	书 号	作 者	定价 (元)	备 注
12174	全国高等学校土建类专业本科教育 培养目标和培养方案及主干课程教 学基本要求——建筑环境与设备工 程专业	高等学校土建学 科教学指导委员会 建筑环境与设备工 程专业指导委员会	17.00	
10086	传热学 (第四版)	章熙民 等	28.5	
9241	工程热力学 (第四版)	廉乐明 等	24.5	全国教材二等奖
12170	流体力学	龙天渝 等	26.00	土建学科“十五”规划教材
12172	建筑环境学 (第二版)	朱颖心 等	29.00	国家级“十五”规划教材
13137	流体输配管网 (第二版)	付祥钊 等	39.00 (含光盘)	国家级“十五”规划教材
14008	热质交换原理与设备 (第二版)	连之伟 等	25.00	土建学科“十五”规划教材
10329	暖通空调	陆亚俊 等	38.00	
12171	空气调节用制冷技术 (第三版)	彦启森 等	20.00	土建学科“十五”规划教材
12168	供热工程	李德英 等	27.00	土建学科“十五”规划教材
12169	燃气供应	詹淑慧 等	22.00	土建学科“十五”规划教材
10090	燃气输配 (第三版)	段常贵 等	24.30	
10330	建筑环境测试技术	方修睦 等	27.40	
12173	暖通空调工程设计方法与系统分析	杨昌智 等	18.00	土建学科“十五”规划教材
11083	建筑设备安装工程经济与管理	王智伟 等	25.00	
14009	人工环境学	李先庭 等	25.00	土建学科“十五”规划教材
	建筑设备自动化	江 亿 等		土建学科“十五”规划教材 预计2006年上半年出版

欲了解更多信息, 请登陆中国建筑工业出版社网站: [www.cabp.com.cn](http://www.cabp.com.cn) 查询。

在使用本套教材的过程中, 若有何意见或建议, 可发 Email 至: [jiangongshe@163.com](mailto:jiangongshe@163.com)。



# 目 录

基本符号表 .....	1
<b>第1章 绪论</b> .....	<b>4</b>
1.1 热质交换现象 .....	4
1.1.1 三种传递现象的联系 .....	4
1.1.2 本专业中的典型热质交换现象 .....	7
1.2 本门课程在专业中的地位与作用 .....	9
1.3 本课程的主要研究内容与方法 .....	10
思考题 .....	12
<b>第2章 热质交换过程</b> .....	<b>13</b>
2.1 传质概论 .....	13
2.1.1 混合物组成的表示方法 .....	13
2.1.2 传质的速度和扩散通量 .....	15
2.1.3 质量传递的基本方式 .....	17
2.2 扩散传质 .....	18
2.2.1 斐克定律 .....	18
2.2.2 气体中的稳态扩散过程 .....	20
2.2.3 液体中的稳态扩散过程 .....	23
2.2.4 固体中的稳态扩散过程 .....	25
2.2.5 扩散系数及其测量 .....	30
2.3 对流传质 .....	33
2.3.1 对流传质系数 .....	33
2.3.2 浓度边界层及其对传质问题求解的意义 .....	34
2.3.3 紊流传质的机理 .....	38
2.3.4 对流传质的数学描述 .....	39
2.3.5 对流传质过程的相关准则数 .....	44
2.3.6 对流传质问题的分析求解 .....	45
2.4 相际间的对流传质模型 .....	52
2.4.1 薄膜理论 .....	53
2.4.2 渗透理论 .....	53
2.4.3 表面更新模型 .....	54
2.5 动量、热量和质量传递类比 .....	55
2.5.1 三种传递现象的类比 .....	55
2.5.2 三传方程 .....	57

2.5.3	动量交换与热交换的类比在质交换中的应用	59
2.6	对流传质的准则关联式	62
2.6.1	流体在管内受迫流动时的质交换	62
2.6.2	流体沿平板流动时的质交换	63
2.7	热量和质量同时进行时的热质传递	66
2.7.1	同时进行传热与传质的过程	67
2.7.2	同一表面上传质过程对传热过程的影响	68
2.7.3	刘伊斯关系式	72
2.7.4	湿球温度的理论基础	74
2.7.5	自然环境中的传热传质	76
2.8*	传质应用举例	79
2.8.1	建材有机挥发性化合物散发问题	79
2.8.2	光催化处理室内有机挥发物	90
2.8.3	大气污染防治方面	92
	思考题与习题	92
<b>第3章</b>	<b>固液相变原理和应用</b>	<b>98</b>
3.1	固液相变简介	98
3.2	蓄热用固液相变材料的分类和选择	98
3.3	一维凝固和融解问题及其分析方法	99
3.3.1	常见一维相变传热问题	99
3.3.2	求解方法及举例	100
3.3.3	多维相变传热问题	107
3.3.4	考虑固、液密度差的简单区域中的相变传热	108
3.3.5	相变潜热贮能系统的理论模型和热性能分析	108
3.4	固液相变应用举例	110
3.4.1	集中空调的相变蓄冷系统分类	110
3.4.2	空调蓄冷系统的设计	114
3.4.3	蓄冷系统设计应注意的问题	117
3.4.4	典型蓄冷空调系统的经济效益	118
	思考题与习题	119
<b>第4章</b>	<b>空气热质处理方法</b>	<b>121</b>
4.1	空气热质处理的途径	121
4.1.1	几个相关概念	121
4.1.2	空气热质处理的各种方案	122
4.1.3	空气热质处理及设备	123
4.2	空气与固体表面之间的热质交换	123
4.2.1	湿空气在冷表面上的冷却降湿	123
4.2.2	湿空气在肋片上的冷却降湿过程	126
4.3	空气与水直接接触时的热湿交换	128

4.3.1	热湿交换原理	128
4.3.2	空气与水直接接触时的状态变化过程	130
4.3.3	空气和水直接接触时的对流增湿和减湿	132
4.3.4	影响空气与水表面之间热质交换的主要因素	132
4.3.5	空气与水表面的热质交换系数	135
4.4	吸附材料处理空气的机理和方法	136
4.4.1	吸附的基本知识和概念	136
4.4.2	等温吸附线	140
4.4.3	常用吸附剂的类型和性能	144
4.4.4	多孔介质传质浅析	145
4.4.5	空气静态吸附除湿和动态吸附除湿	146
4.4.6*	通过吸附改善室内空气品质	153
4.4.7*	通过光催化改善室内空气品质	154
4.5	吸收剂处理空气的机理和方法	161
4.5.1	吸收现象简介	161
4.5.2	液体除湿剂的类型和性能	161
4.5.3	吸收剂处理空气的机理	165
4.5.4	影响吸收的主要因素	167
4.5.5	吸收剂处理空气系统和应用简介	170
	思考题与习题	172
<b>第5章</b>	<b>热质交换设备</b>	<b>174</b>
5.1	热质交换设备的形式与结构	174
5.1.1	热质交换设备的分类	174
5.1.2	间壁式换热器的形式与结构	178
5.1.3	混合式换热器的形式与结构	179
5.2	间壁式热质交换设备的热工计算	186
5.2.1	间壁两侧流体传热过程分析	186
5.2.2	总传热系数与总传热热阻	186
5.2.3	换热器热工计算常用计算方法	188
5.2.4	表面式冷却器的热工计算	198
5.2.5	其他间壁式热质交换设备的热工计算	207
5.3	混合式热质交换设备的热工计算	210
5.3.1	影响混合式设备热质交换的主要因素	210
5.3.2	混合式设备发生热质交换的特点	211
5.3.3	喷淋室的热工计算	212
5.3.4	冷却塔的热工计算	220
5.3.5	其他混合式热质交换设备的热工计算	226
5.4*	热质交换设备仿真建模方法	234
5.4.1	间壁式换热器的建模	234

5.4.2 混合式换热器的建模 .....	236
5.5 热质交换设备的优化设计及性能评价 .....	242
5.5.1 热质交换设备的优化设计与分析 .....	242
5.5.2 热质交换设备的性能评价 .....	245
5.5.3 热质交换设备的发展趋势 .....	250
思考题与习题 .....	250
附录 .....	252
附录 2-1 干饱和水蒸气的热物理性质 .....	252
附录 2-2 饱和水的热物理性质 .....	254
附录 2-3 空气的热物理性质 ( $p = 101.325\text{kPa}$ ) .....	256
附录 2-4 扩散系数 .....	257
附录 4-1 湿空气焓湿图 .....	插页
附录 5-1 有代表性流体的污垢热阻 .....	260
附录 5-2 总传热系数的有代表性的数值 .....	260
附录 5-3 部分水冷式表面冷却器的传热系数和阻力实验公式 .....	261
附录 5-4 水冷式表面冷却器的 $\epsilon_2$ 值 .....	262
附录 5-5 JW 型表面冷却器技术数据 .....	262
附录 5-6 部分空气加热器的传热系数和阻力计算公式 .....	262
附录 5-7 部分空气加热器的技术数据 .....	263
附录 5-8 喷淋室热交换效率实验公式的系数和指数 .....	264
附录 5-9 湿空气的密度、水蒸气压力、含湿量和焓 .....	265
参考文献 .....	266

## 基本符号表

符号	物 理 量	常 用 单 位
$A$	面积	$\text{米}^2 (\text{m}^2)$
$a$	导温系数 (热扩散系数)	$\text{米}^2/\text{秒} (\text{m}^2/\text{s})$
$a_A$	组分 $A$ 的质量分数	
$B$	大气压强	巴 (bar), 牛顿/米 <sup>2</sup> ( $\text{N}/\text{m}^2$ ), 公斤/(米·秒 <sup>2</sup> ) [ $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$ ]
$C$	摩尔浓度	千摩尔/米 <sup>3</sup> ( $\text{kmol}/\text{m}^3$ )
$c$	比热	焦耳/(千克·度) [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ]
$C_A$	组分 $A$ 的量浓度 (摩尔浓度)	$\text{kmol}/\text{m}^3$
$D$	质扩散系数	$\text{米}^2/\text{秒} (\text{m}^2/\text{s})$
$d$	直径或含湿量	米 (m) 或 千克/千克干空气 ( $\text{kg}/\text{kg}$ 干空气)
$f$	摩擦系数	
$G$	质流量	千克/秒 ( $\text{kg}/\text{s}$ )
$G_A$	组分 $A$ 的传质速率 (流量)	千克/秒 ( $\text{kg}/\text{s}$ )
$H$	高度	米 (m)
$h$	对流换热系数	瓦/(米 <sup>2</sup> ·度) [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ]
$h_m$	对流传质系数	米/秒 ( $\text{m}/\text{s}$ )
$h_{md}$	对流传质系数 (以空气含湿量差为基准)	千克/(米 <sup>2</sup> ·秒) [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]
$h_{mp}$	对流传质系数 (以空气水蒸气分压力差为基准)	千克/(牛·秒) [ $\text{kg}/(\text{N} \cdot \text{s})$ ]
$h_w$	冷却剂侧的对流换热系数	瓦/(米 <sup>2</sup> ·度) [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ]
$i$	焓	焦耳/千克 ( $\text{J}/\text{kg}$ )

续表

符号	物理量	常用单位
$j$	质流通量	千克/(米 <sup>2</sup> ·秒) [kg/(m <sup>2</sup> ·s)]
$J$	摩尔通量	摩尔/(米 <sup>2</sup> ·秒) [mol/(m <sup>2</sup> ·s)]
$j_A$	组分 A 的质量通量	千克/(米 <sup>2</sup> ·秒) [kg/(m <sup>2</sup> ·s)]
$J_A$	组分 A 的摩尔通量	千摩尔/(米 <sup>2</sup> ·秒) [kmol/(m <sup>2</sup> ·s)]
$K$	传热系数	瓦/(米 <sup>2</sup> ·度) [W/(m <sup>2</sup> ·°C)]
$l$	长度	米 (m)
$M$	质量	千克 (kg)
$M_A$	组分 A 的质量	千克 (kg)
$M_A^*$	组分 A 的摩尔质量	千克/千摩尔 (kg/kmol)
$m_A$	组分 A 的质量通量	千克/(米 <sup>2</sup> ·秒) [kg/(m <sup>2</sup> ·s)]
$m$	混合物的总质量通量	千克/(米 <sup>2</sup> ·秒) [kg/(m <sup>2</sup> ·s)]
$n$	物质量 (以摩尔计)	千摩尔 (kmol)
$n_A$	组分 A 的量 (以千摩尔计)	千摩尔 (kmol)
$N_A$	组分 A 的摩尔通量	千摩尔/(米 <sup>2</sup> ·秒) [kmol/(m <sup>2</sup> ·s)]
$N$	混合物的总摩尔通量	千摩尔/(米 <sup>2</sup> ·秒) [kmol/(m <sup>2</sup> ·s)]
$p$	压强	帕 (Pa), 巴 (bar), 牛顿/米 <sup>2</sup> (N/m <sup>2</sup> )
$Q$	热流量	焦耳/秒 (J/s)
$q$	热流通量	瓦/米 <sup>2</sup> (W/m <sup>2</sup> )
$R$	热阻	米 <sup>2</sup> ·度/瓦 (m <sup>2</sup> ·°C/W)
$r$	半径	米 (m)
$r$	汽化潜热	焦耳/千克 (J/kg)
$S$	距离	米 (m)
$S_p$	颗粒表面积	米 <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )
$s_v$	单位体积表面积	米 <sup>2</sup> /米 <sup>3</sup> (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
$T$	热力学温度	开尔文 (K)

续表

符号	物理量	常用单位
$t$	摄氏温度	度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
$U$	周边长度	米 (m)
$u$	速度	米/秒 (m/s)
$V$	容积	米 <sup>3</sup> (m <sup>3</sup> )
$v$	速度	米/秒 (m/s)
$w$	速度	米/秒 (m/s)
$W$	水流量	千克/秒 (kg/s)
$w$	冷却剂的质量流量	千克/秒 (kg/s)
$x_A$	组分 A 的摩尔分数	
$\varphi$	相对湿度	
$\beta$	肋化系数	
$\beta$	容积膨胀系数	1/开 (1/K)
$\delta$	厚度	米 (m)
$\varepsilon$	换热器效能	
$\Delta$	差值	
$\eta$	效率	
$\theta$	过剩温度	度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\lambda$	导热系数	瓦/(米·度) [W/(m· $^{\circ}\text{C}$ )]
$\mu$	分子量	
$\mu$	动力黏度	牛顿·秒/米 <sup>2</sup> (N·s/m <sup>2</sup> )
$\nu$	运动黏度	米 <sup>2</sup> /秒 (m <sup>2</sup> /s)
$\rho$	密度	千克/米 <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_A$	组分 A 的质量浓度	千克/米 <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )
$\tau$	时间	秒 (s), 时 (h)
$\tau$	剪切应力	巴 (bar), 牛顿/米 <sup>2</sup> (N/m <sup>2</sup> )

# 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。在建筑环境与设备工程专业领域里也是这样，亦存在着大量动量、热量和质量的传递现象。它们有时以一种形式出现，有时三种形式同时出现，且相互作用，相互影响。《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领域里的动量、热量和质量的传递现象，探讨它们传递的规律，以指导在实际工程里的应用。

在以往的教学，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则主要在化工专业。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日益增大。因此现在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，应该说这是一个较大的缺陷。同时，正如 R. B. 伯德 (R. B. Bird) 等人<sup>[1]</sup>1960 年在其《传递现象》(Transport Phenomena) 一书中所说的，在当前的工科教育中，愈来愈倾向于着重基本物理原理的理解，而不是盲目地套用经验结论。于是，基于这样的考虑，伯德等人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。这对于学生更深入的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 热质交换现象

如前所述，不论在自然界还是在本专业领域里，亦存在着大量的动量、热量和质量传递现象，我们首先看一下这三种传递现象的联系。

### 1.1.1 三种传递现象的联系<sup>[2]</sup>

当物系中存在速度、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。

以分子传递为例，从微观的角度来看，当流场中速度分布不均匀时，从流体力学的知识可知，分子传递的结果产生了切应力，用牛顿黏性定律描述如下：

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

式中  $\tau$  ——切应力，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， $N/m^2$ ；



$\mu$ ——流体的动力黏性系数, Pa·s;

$u$ ——流体沿  $x$  方向的运动速度, m/s;

$y$ ——垂直于运动方向的坐标, m;

$\frac{du}{dy}$ ——速度梯度, 或称速度的变化率, 表示速度沿垂直于速度方向  $y$  的变化率, 1/s。

式 (1-1) 表示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。负号表示黏性动量通量的指向是速度梯度的负方向, 或者说动量是朝速度减小的方向传递的。

式 (1-1) 还可从另外一个方面解释。在与  $y=0$  处运动着的固体表面十分邻近的区域中, 流体获得一定数量的  $x$  方向动量, 而该部分流体又将其一部分动量传给其邻近的一“层”流体, 并使后者在  $x$  方向运动。因此,  $x$  方向动量是通过流体在  $y$  方向上进行传递的。所以切应力  $\tau$  就可以解释为  $x$  方向的黏性动量在  $y$  方向上的通量了。不同的流体有不同的传递动量的能力, 这种性质用流体的动力黏性系数  $\mu$  来反映, 其物理意义可以理解为, 它表征了单位速度梯度作用的切应力, 反映了流体黏滞性的动力性质, 因此称它为“动力”黏性系数。

同样, 当温度分布不均匀时, 从传热学的知识可知, 分子传递的结果产生了热传导, 它可用傅立叶定律描述如下。傅立叶定律指出, 在均匀的各向同性材料内的一维温度场中, 通过热传导方式传递的热量通量密度为:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dy} \quad (1-2)$$

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, J/(m<sup>2</sup>·s);

$\lambda$ ——导热系数, W/(m·°C);

$t$ ——流体的温度, °C;

$y$ ——温度发生变化方向的坐标, m;

$\frac{dt}{dy}$ ——温度梯度, 表示温度沿垂直于  $y$  方向的变化率, °C/m。

式 (1-2) 表示物体之间的热量传递正比于其温度梯度。负号表示热量传递的方向是温度梯度的负方向, 或者说热量是朝温度降低的方向传递的。同样, 不同的物体有不同的这种传递热量的能力, 这种性质用物体的导热系数来反映。

再看看浓度分布不均匀的情况。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。从本书后面要介绍的传质学的知识可知, 表示这种质量扩散传递性质的数学关系可用费克定律描述。它是指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  $C_A$  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:

$$m_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dy} \quad (1-3)$$

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, kg/(m<sup>2</sup>·s);