



高等教育本科国家级规划教材

土建类学科专业“十三五”规划教材

高校建筑环境与能源应用工程学科专业指导委员会规划推荐教材

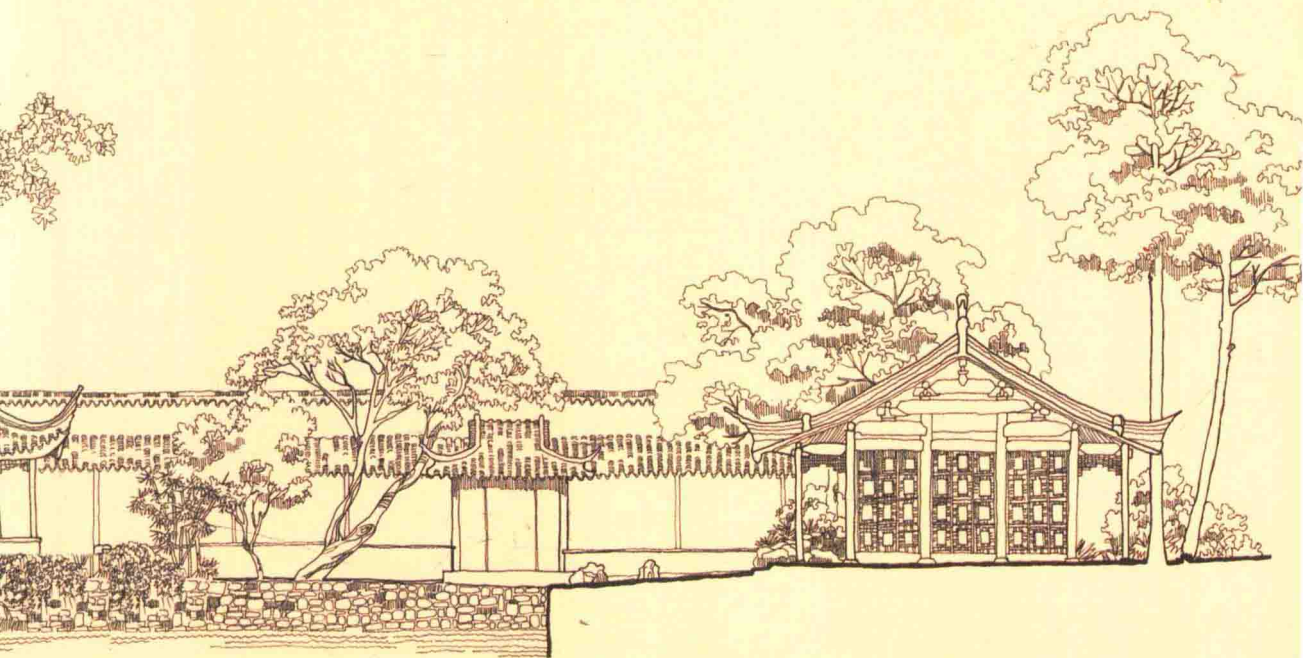
热质交换原理与设备

Fundamentals & Equipment of Heat & Mass Transfer

(第四版)

连之伟 陈宝明 编著

孙德兴 主审



中国建筑工业出版社

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
住房和城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材
高校建筑环境与能源应用工程学科专业指导委员会规划推荐教材

热质交换原理与设备

(第四版)

连之伟 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/连之伟等编著. —4 版. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 7

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材. 住房城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材. 高校建筑环境与能源应用工程学科专业指导委员会规划推荐教材
ISBN 978-7-112-22224-7

I. ①热… II. ①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. ①TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 101951 号

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,也是高校建筑环境与能源应用工程学科专业指导委员会规划推荐教材。

在总结本书第三版使用情况的基础上,并考虑到多年来本学科的发展,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 9 章,主要包括:绪论、传质的理论基础、传热传质问题的分析和计算、空气的热湿处理、吸附和吸收处理空气的原理与方法、间壁式热质交换设备的热工计算、混合式热质交换设备的热工计算、复合式热质交换设备的热工计算、热质交换设备的优化设计及性能评价。每章后面还增加了思考题与习题,以便于学生更好地学习与理解。

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

* * *

责任编辑:齐庆梅
责任校对:刘梦然

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
住房城乡建设部土建类学科专业“十三五”规划教材
高校建筑环境与能源应用工程学科专业指导委员会规划推荐教材

热质交换原理与设备

(第四版)

连之伟 陈宝明 编著

孙德兴 主审

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 19 插页: 1 字数: 473 千字

2018 年 7 月第四版 2018 年 7 月第三十四次印刷

定价: 39.00 元

ISBN 978-7-112-22224-7

(32005)

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)

第四版前言

在本书第三版六年多的使用过程中，作者多次碰头研讨，同时也征求相关学科方向专家的意见，意欲进一步提高本书的质量。另外，面向授课教师和学生，针对教学过程中存在的问题，也广泛征集修改补充与完善的意见和建议。这些宝贵的意见和建议及作者的不断授课实践，加之全国高等学校建筑环境与能源应用专业指导委员会的关心与指导，都给本书第四版的编写和修订奠定了坚实基础。

本版教材主要做了如下改进：

1. 在教材易教易学方面。

针对许多师生反映的本教材有些内容较难、不容易理解的问题，在不破坏原有体系的前提下，对部分内容做了“浅显化”处理，例如简化了某些公式的推导过程；修改了第4章的图4-5 以使其更容易理解；简化了第3.4.1节的理论求解部分等。

2. 在内容的更新与充实方面。

鉴于本专业的发展与某些技术的实际应用，吸取了一些最新的研究成果编入到此版本中，同时进一步加强了理论与实际应用的联系。例如，在第3章第3.4.4节增加了“超声波对空气处理中热质传递过程的促进”，涉及有超声波的雾化机理和对空气的加湿与除湿处理，但考虑到不是必讲内容，将其归入带*的选修内容。同时，为了减少与其他课程内容的过多重复，删减了部分重复的内容。例如，对第6章涉及换热器热工计算所用的对数平均温差法和效能-传热单元数法的具体推导过程进行了部分删减，但为了保持全书的系统性和完整性，同时便于查阅，相关的公式和图表还予以保留。

3. 在其他方面。

对某些章节的思考题和习题做了补充和完善。同时，对原书包括正文、例题及附录在内的文字和数字错误也做了订正。

总之，本书编著者在本版教材中一如既往地力求提炼共性，突出重点，减少谬误，与时俱进，希望通过以上改进能有助于提高本课程的教学质量。

参加本版编写与修订的是上海交通大学连之伟教授（第1章，第3章3.1.1节和3.4.4节，第5章5.2节，第6~9章），山东建筑大学陈宝明教授（第2章，除3.1.1节和3.4.4节外的整个第3章，第4章，第5章5.1节）。全书由连之伟、陈宝明教授编著，哈尔滨工业大学孙德兴教授主审。

感谢本学科专业指导委员会朱颖心等教授的一贯支持与鼓励；感谢中国建筑工业出版社齐庆梅编审大量的组织和编辑工作；感谢许多院校师生（恕不一一列名）反馈的意见和建议；也感谢上海交通大学等学校的博士生和硕士生做的资料收集与编排工作！

由于编著者水平所限，书中一定还有许多不尽人意之处，恳请读者批评指正，并提出建议。具体意见可发送至作者邮箱 zhiweilian@126.com。您的建议和编著者的新想法，结合本学科技术的不断发展，都将是本书下一版修订的良好基础。如需课件，可发送 email 至 jiangongshe@163.com 索取。

第三版前言

为更好地适应专业教学改革的需要,进一步提高质量,在本书第二版五年多的使用过程中,作者召开了有二十余所高校使用本教材的任课教师参加的研讨会,针对教学过程中存在的问题,以及对第三版改进的建议,大家积极建言献策。同时,作者多次碰头讨论,还发放调查问卷进行了相关的研究和分析,调查面向授课教师和学生,分教师问卷和学生问卷,共有近二十所各级各类学校几十位任课老师和几百位学生参与,获得了大量第一手资料。这些宝贵的建议与资料,再加上作者的亲自授课实践,以及全国高等学校建筑环境与能源应用专业教学指导委员会给予的关心与指导,都给本书第三版的编写和修订奠定了坚实基础。

本版教材主要做了如下改进:

1. 在教材体系方面。

为了使体系更加清楚明了和重点更加突出,将原书整个内容重新编排了章节,并把原第4章的“用固体吸附材料和吸收剂处理空气”偏实际应用的设备与系统的相关内容移到了新编写的第8章“复合式热质交换设备”中。把原第5章的“热质交换设备的分类”移到第1章了。同时,第二版中第3章“固液相变原理和应用”除了“一维固液相变问题”的部分内容调整到本版第2章“相际间的对流传质模型”外,其他内容整体都删除了。

2. 在内容的更新与充实方面。

鉴于本专业近期的发展与未来的动向,吸取了一些成熟的成果编入本书第三版,同时进一步加强理论部分与实际的联系。如增加了第8章“复合式热质交换设备的热工计算”,涉及有蒸发冷却式空调系统和温湿度独立处理空调系统等,以适应同时具有间壁式和混合式设备两者特点的复合式热质交换设备的应用。同时,进一步充实和加强了空气与固体表面之间以及空气与水直接接触时的热质交换机理方面的内容。对于本科生学习有一定难度的内容,将其以“*”标示,供学有余力的学生或其他人员参考。

3. 在符号、单位的统一等方面。

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,本版教材在第二版的基础上进一步力求全书符号的统一与一致。同时,对原书包括正文、例题及附录在内的错误,又做了认真修订。

4. 在多媒体教学课件的引入方面。

在教学手段上,本版教材配置了计算机多媒体辅助教学课件。它基于PowerPoint的演示功能,将原理和设备讲解中的难点通过图形等表示出来,特别是动画的引入更有助于对有关内容的理解。读者可发送电子邮件至jiangongshe@163.com索取。

总之,本书编著者在本版教材中力求提炼共性,突出重点,减少谬误,与时俱进,希望通过以上改进能有助于提高本课程的教学质量。

因工作原因,原编著者清华大学张寅平教授未参加本版的编写工作,但他前期参加第

三版教材研讨会和对大纲的审阅及所提建议，以及允许对原来编写内容的继续使用，本版作者对此致以衷心的感谢。参加本版编写与修订的是上海交通大学连之伟教授（第1章，第3章3.1.1节，第5章5.2节，第6~9章），山东建筑大学陈宝明教授（第2章，除3.1.1节外的整个第3章，第4章，第5章5.1节）。全书仍由连之伟教授主编，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，教学指导委员会主任朱颖心教授等多次询问并审阅第三版编写大纲，提出了许多指导性和建设性的意见；西安工程大学黄翔教授将自己团队关于蒸发冷却多年的研究成果提供出来，作者对此致以由衷的感谢。中国建筑工业出版社齐庆梅副编审做了大量组织和编辑工作；许多院校的有关教师（恕不一一列名），不论是调查问卷还是教材使用过程中存在的问题，都给予了积极的配合和认真的反馈，提出了许多很好的意见和建议；还有上海交通大学等校的部分博士后、博士生、硕士生也做了一些资料收集与编排以及多媒体教学课件的制作，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。您的建议和编著者的新想法，结合本学科技术的不断发展，都将是本书第四版修订的良好基础。

作者

2011年5月

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大量改进意见，其间，全国高等学校建筑环境与能源应用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，吸取正确的意见，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能源应用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5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2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。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。

2006年4月

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，建筑环境与能源应用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能源应用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，起着连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如人意之处，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。

目 录

基本符号表	1
第1章 绪论	3
1.1 建筑环境与能源应用专业涉及的热质交换现象及其设备分类	3
1.2 本门课程在专业中的地位与作用	12
1.3 本课程的主要研究内容与方法	13
思考题	15
第2章 传质的理论基础	16
2.1 传质概论	16
2.2 扩散传质	21
2.3 对流传质	38
2.4 相际间的对流传质模型	59
思考题	64
第3章 传热传质问题的分析和计算	67
3.1 动量、热量和质量传递的类比	67
3.2 对流传质的准则关联式	75
3.3 热量和质量同时进行时的热质传递	79
3.4* 传质应用举例	92
思考题	101
第4章 空气的热湿处理	105
4.1 空气的热湿处理途径	105
4.2 空气与固体表面之间的热湿交换	109
4.3 空气与水直接接触时的热湿交换	116
思考题	128
第5章 吸附和吸收处理空气的原理与方法	130
5.1 吸附材料处理空气的原理和方法	130
5.2 吸收剂处理空气的原理和方法	152
思考题	161
第6章 间壁式热质交换设备的热工计算	162
6.1 间壁式热质交换设备的形式与结构	162
6.2 间壁两侧流体传热过程分析	163
6.3 总传热系数与总传热热阻	164
6.4 间壁式热质交换设备热工计算常用计算方法	166
6.5 表面式冷却器的热工计算	173
6.6 其他间壁式热质交换设备的热工计算	184

思考题	186
第7章 混合式热质交换设备的热工计算	188
7.1 混合式换热器的形式与结构	188
7.2 影响混合式设备热质交换效果的主要因素	195
7.3 混合式设备发生热质交换的特点	196
7.4 喷淋室的热工计算	197
7.5 冷却塔的热工计算	205
7.6 其他混合式热质交换设备的热工计算	211
思考题	219
第8章 复合式热质交换设备的热工计算	220
8.1 影响复合式设备热质交换效果的主要因素	220
8.2 蒸发冷却式空调系统的热工计算	221
8.3 温湿度独立调节空调系统	239
思考题	253
第9章 热质交换设备的优化设计及性能评价	254
9.1* 热质交换设备仿真建模方法	254
9.2 热质交换设备的优化设计与分析	262
9.3 热质交换设备的性能评价	265
9.4 热质交换设备的发展趋势	270
思考题	271
附录	272
附录 2-1 干饱和水蒸气的热物理性质	272
附录 2-2 饱和水的热物理性质	274
附录 3-1 空气的热物理性质	276
附录 3-2 扩散系数	277
附录 4-1 湿空气焓湿图	插页
附录 6-1 有代表性流体的污垢热阻 R_f	279
附录 6-2 总传热系数的有代表性的数值	279
附录 6-3 部分水冷式表面冷却器的传热系数和阻力实验公式	280
附录 6-4 水冷式表面冷却器的 ε_2 值	281
附录 6-5 JW 型表面冷却器技术数据	281
附录 6-6 部分空气加热器的传热系数和阻力计算公式	281
附录 6-7 部分空气加热器的技术数据	282
附录 7-1 喷淋室热交换效率实验公式的系数和指数	283
附录 7-2 湿空气的密度、水蒸气压力、含湿量和焓	284
参考文献	285

基本符号表

符号	物理量, 常用单位	符号	物理量, 常用单位
A	面积, 米 ² (m ²)	M	质量, 千克 (kg)
a	导温系数 (热扩散系数), 米 ² /秒 (m ² /s)	M_A	组分 A 的质量, 千克 (kg)
a_A	组分 A 的质量分数	M_A^*	组分 A 的摩尔质量, 千克/千摩尔 (kg/kmol)
B	大气压强, 巴 (bar), 牛顿/米 ² (N/m ²), 千克/(米·秒 ²) [kg/(m·s ²)]	m_A	组分 A 的质量通量, 千克/(米 ² ·秒) [kg/(m ² ·s)]
C	摩尔浓度, 千摩尔/米 ³ (kmol/m ³)	m	混合物的总质量通量, 千克/(米 ² ·秒) [kg/(m ² ·s)]
c	比热, 焦耳/(千克·度) [J/(kg·°C)]	n	物质的量 (以摩尔计), 千摩尔 (kmol)
C_A	组分 A 的浓度 (摩尔浓度), kmol/m ³	n_A	组分 A 物质的量 (以千摩尔计), 千摩尔 (kmol)
D	质扩散系数, 米 ² /秒 (m ² /s)	N_A	组分 A 的摩尔通量, 千摩尔/(米 ² ·秒) [kmol/(m ² ·s)]
d	直径或含湿量, 米 (m) 或 千克/千克干空气 (kg/kg 干空气)	N	混合物的总摩尔通量, 千摩尔/(米 ² ·秒) [kmol/(m ² ·s)]
f	摩擦系数	p	压力, 帕 (Pa), 巴 (bar), 牛顿/米 ² (N/m ²)
G	质流量, 千克/秒 (kg/s)	Q	热流量, 焦耳/秒 (J/s)
G_A	组分 A 的传质速率 (流量), 千克/秒 (kg/s)	q	热流通量, 瓦/米 ² (W/m ²)
H	高度, 米 (m)	R	热阻, 米 ² ·度/瓦 (m ² ·°C/W)
h	对流换热系数, 瓦/(米 ² ·度) [W/(m ² ·°C)]	r	半径, 米 (m)
h_m	对流传质系数, 米/秒 (m/s)	r	汽化潜热, 焦耳/千克 (J/kg)
h_{md}	对流传质系数 (以空气含湿量差为基准), 千克/(米 ² ·秒) [kg/(m ² ·s)]	S	距离, 米 (m)
h_{mp}	对流传质系数 (以空气水蒸气分压力差为基准), 米千克/(牛·秒) [kg/(N·s)]	S_p	颗粒表面积, 米 ² (m ²)
h_w	冷却剂侧的对流换热系数, 瓦/(米 ² ·度) [W/(m ² ·°C)]	s_v	单位体积表面积, 米 ² /米 ³ (m ² /m ³)
i	焓, 焦耳/千克 (J/kg)	T	热力学温度, 开尔文 (K)
j	质量通量, 千克/(米 ² ·秒) [kg/(m ² ·s)]	t	摄氏温度, 度 (°C)
J	摩尔通量, 摩尔/(米 ² ·秒) [mol/(m ² ·s)]	U	周边长度, 米 (m)
j_A	组分 A 的质量通量, 千克/(米 ² ·秒) [kg/(m ² ·s)]	u	速度, 米/秒 (m/s)
J_A	组分 A 的摩尔通量, 千摩尔/(米 ² ·秒) [kmol/(m ² ·s)]	V	容积, 米 ³ (m ³)
K	传热系数, 瓦/(米 ² ·度) [W/(m ² ·°C)]	v	速度, 米/秒 (m/s)
l	长度, 米 (m)	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

基本符号表

续表

符号	物理量, 常用单位	符号	物理量, 常用单位
φ	相对湿度	λ	导热系数, 瓦/(米·度) [$W/(m \cdot ^\circ C)$]
β	肋化系数	μ	分子量
β	容积膨胀系数, 1/开 (1/K)	μ	动力黏度, 牛顿·秒/米 ² ($N \cdot s/m^2$)
δ	厚度, 米 (m)	ν	运动黏度, 米 ² /秒 (m^2/s)
ε	换热器效能	ρ	密度, 千克/米 ³ (kg/m^3)
Δ	差值	ρ_A	组分 A 的质量浓度, 千克/米 ³ (kg/m^3)
η	效率	τ	时间, 秒(s), 时(h)
θ	过剩温度, 度 ($^\circ C$)	τ	剪切应力, 巴(bar), 牛顿/米 ² (N/m^2)

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。在建筑环境与能源应用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能源应用工程领域里的动量、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能源应用工程等对于气体、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^[1]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 建筑环境与能源应用专业涉及的热质交换现象及其设备分类

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^[2]

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 τ ——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 ；
 μ ——流体的动力黏性系数， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；
 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， $1/\text{s}$ 。

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，而该部分流体又把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 τ 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 μ 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， $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ；
 λ ——导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ；
 t ——流体的温度， $^\circ\text{C}$ ；
 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， $^\circ\text{C}/\text{m}$ 。

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斐克定律描述。它是指在不总体流动或静止的双组分混合物中，若组分 A 的质量分数 ρ_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：

$$j_A = -D_{AB} \frac{d\rho_A}{dy} \quad (1-3)$$

式中 j_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 ;

ρ_A ——扩散组分 A 在某空间位置上的质量浓度, kg/m^3 ;

y ——组分 A 在密度发生变化的方向上的坐标, m ;

$\frac{d\rho_A}{dy}$ ——组分 A 的质量浓度梯度, $kg/(m^3 \cdot m)$ 。

式 (1-3) 表示质量传递正比于其浓度梯度。负号表示质量传递的方向是浓度梯度的负方向, 或者说质量是朝浓度降低的方向传递的。同样, 不同的物体有不同的传递质量的能力, 这种性质用物体的分子扩散系数来反映。

由式 (1-1) ~ (1-3) 可见, 表示三种分子传递性质的数学关系式是类似的, 因而这三个传递公式可以用如下的统一公式来表示:

$$FD\phi' = -C \frac{d\phi}{dy} \quad (1-4)$$

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 (1-4) 中的 $FD\phi' = j_A$, $\phi = \rho_A$, $C = D_{AB}$, 则得质量传递公式 (1-3)。

若令式 (1-4) 中的 $FD\phi' = q$, $\phi = t$, $C = \lambda$, 则得能量传递公式 (1-2)。

若令式 (1-4) 中的 $FD\phi' = \tau$, $\phi = u$, $C = \mu$, 则得动量传递公式 (1-1)。

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; 热量交换传递的量是物质每单位容积所具有的能量; 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。显然, 这些量的传递速率都分别与各量的梯度成正比。比例系数均表示了物体具有的扩散性质。

前面我们以分子传递为例, 从微观的角度考察了当流场中速度、温度、浓度分布不均匀时, 它们动量交换、热量交换、质量交换的规律可以类比。现在我们再简单考察一下流体湍流中的传递现象, 也可以发现这三种传递现象存在着这样的类比关系。

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。由流体力学的知识我们知道, 可用湍流动量传递时均化变化方程描述它们的动量传递规律, 相应地, 可用湍流黏度系数表示流体的这种湍流动量传递性质。同样, 由传热学的知识我们知道, 可用湍流能量传递时均化变化方程描述它们的能量传递规律, 相应地, 可用湍流导热系数表示流体的这种湍流能量传递性质。同样, 由后面介绍的传质学的知识我们知道, 可用湍流质量传递时均化变化方程描述它们的质量传递规律, 相应地, 可用湍流扩散系数表示流体的这种湍流质量传递性质。

如果再来考察两相间的传递现象, 仍可发现这三种传递现象存在这样的类比关系。由流体力学的知识可知, 可用相际动量传递来描述两相间的动量传递规律, 相应地, 引入摩擦因子来表示这种相际间的动量传递性质。同样, 由传热学知识知道, 可用相际能量传递来描述两相间的能量传递规律, 相应地, 用传热系数来表示这种相际间的能量传递性质。

同样,由传质学知识知道,可用相际质量传递来描述两相间的质量传递规律,相应地,用传质系数来反映这种相际间的质量传递性质。

上述传递现象的组织系统关系可归纳为表 1-1 所示。

几种典型的传递现象组织系统类比关系^[1]

表 1-1

传递类型	动 量	能 量	质 量
分子传递	黏度 牛顿黏性定律 黏度与温度、压强、组成的关系 黏度的分子运动论	导热系数 傅立叶导热定律 导热系数与温度、压强、组成的关系 导热系数的分子运动论	扩散系数 斐克扩散定律 扩散系数与温度、压强、组成的关系 扩散系数的分子运动论
湍流中的传递	湍流动量传递时均化变化方程 湍流黏度系数 湍流速度分布	湍流能量传递时均化变化方程 湍流导热系数 湍流温度分布	湍流质量传递时均化变化方程 湍流扩散系数 湍流浓度分布
两相间的传递	相际动量传递 摩擦因子 无因次关联式	相际能量传递 传热系数 无因次关联式(强制和自然对流)	相际质量传递 传质系数 无因次关联式(强制和自然对流)

以后我们将会看到,正是由于这三种传递现象基本传递公式的类似性,将导致它们传递过程具有一系列类似的特性。

1.1.2 本专业中的典型热质交换现象

建筑环境与能源应用工程专业主要是研究供热、供燃气、通风与空调工程及城市燃气工程的设计、施工、监理及设备研制等相关理论、方法和工艺的学科。其内容包括民用与工业建筑、运载工具及人工气候室中的温湿度、清洁度及空气质量的控制,为实现此环境控制的采暖通风和空调系统,与之相应的冷热源及能量转换设备,以及燃气、蒸汽及冷热水输送系统。它涉及建筑、热工、机械、环境、能源、自控等多个领域,无论是在专业理论的广度还是在专业技能的多样化上,都具有一定的特殊性。

然而在本专业广泛的专业方向上,如供暖工程、区域供热、工业通风、空气调节、制冷技术、锅炉及锅炉房设备、燃气燃烧与输配等,均伴随有热质交换现象的存在,有大量的内容涉及热质传递原理及其应用。比如制冷工程里制冷剂在冷凝器里的冷凝过程,空调工程中空气的热质处理方法,冷却塔中水与空气间的热质交换,甚至房间里污染物的散发与扩散……这些都是本专业典型的同时也是引起人们极大关注的热质交换现象。

图 1-1 所示为制冷设备中常用的卧式冷凝器中制冷剂氟利昂的冷凝过程^[3]。图中氟利昂蒸气在管外凝结,管内流着冷却水,制冷剂蒸气凝结时所放出的热量穿过管壁而传到冷却水中被带走,从而实现热量的转移。