

PUTONG GAODENG XUEXIAO
JIANZHU HUANJING YU SHEBEI GONGCHENG
XILIE JIAOCAI

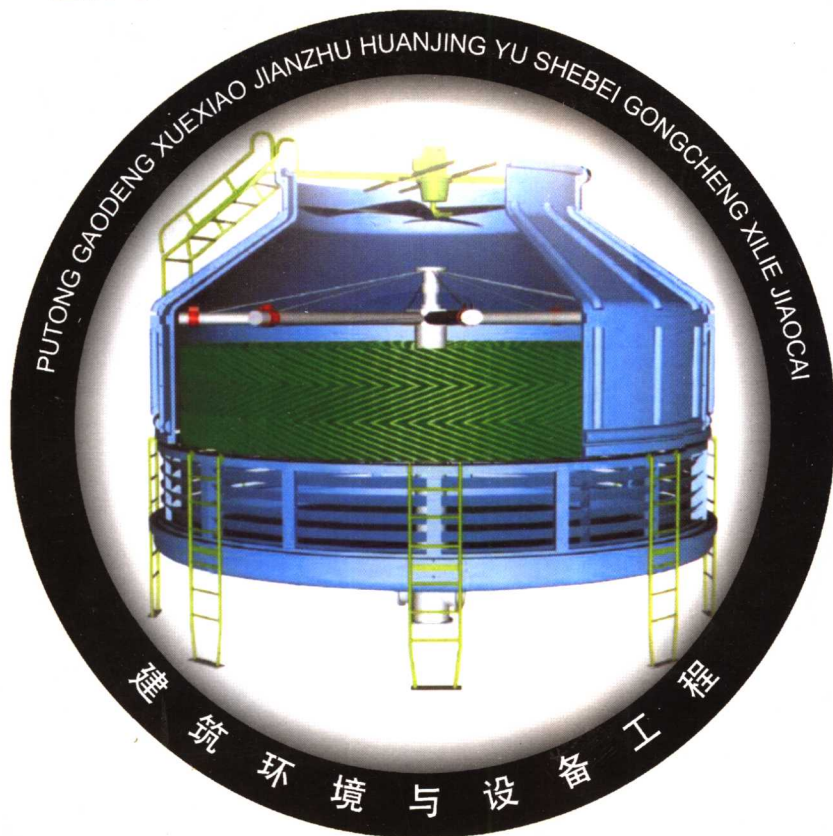


普通高等学校
建筑环境与设备工程系列教材

热质交换原理与设备

REZHI JIAOHUAN YUANLI YU SHEBEI

- 主 编 魏 琪
- 副主编 戴苏明
- 参 编 吴志刚 翁锦萍 胡自成 俞卫刚
- 主 审 金苏敏



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>

JIANZHU HUANJING YU SHEBEI GONGCHENG

PUTONG GAODENG XUEXIAO
JIANZHU HUANJING YU SHEBEI GONGCHENG
XILIE JIAOCAI



普通高等学校
建筑环境与设备工程系列教材

热质交换原理与设备

REZHI JIAOHUAN YUANLI YU SHEBEI

- 主 编 魏 琪
- 副主编 戴苏明
- 参 编 吴志刚 翁锦萍 胡自成 俞卫刚
- 主 审 金苏敏



重庆大学出版社

内 容 提 要

本书是“普通高等学校建筑环境与设备工程系列教材”之一,是建筑环境与设备工程专业“三门”专业基础平台课程之一的配套教材。全书按照新的教学大纲编写而成,包括绪论、传热传质过程、相变热质交换过程与设备、空气与水之间热质交换过程与设备等内容。

书中配有适量的思考题与习题,可供高等学校建筑环境与设备工程和热能与动力工程等专业教学使用,也可供相关工程技术人员、研发人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

热质交换原理与设备/魏琪主编. —重庆:重庆大学

出版社,2007.2

(普通高等学校建筑环境与设备工程系列教材)

ISBN 978-7-5624-2837-4

I. 热... II. 魏... 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142964号

普通高等学校建筑环境与设备工程系列教材

热质交换原理与设备

主 编 魏 琪

副主编 戴苏明

参 编 吴志刚 翁锦萍

胡自成 俞卫刚

主 审 金苏敏

责任编辑:陈红梅 段 凯 版式设计:李长惠 陈红梅

责任校对:邹 忌 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400030

电话:(023)65102378 65105781

传真:(023)65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(市场营销部)

全国新华书店经销

重庆科情印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:11.25 字数:281千

2007年2月第1版 2007年2月第1次印刷

印数:1—3 000

ISBN 978-7-5624-2837-4 定价:17.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

特别鸣谢单位

(排名不分先后)

天津大学

广州大学

湖南大学

东南大学

苏州大学

西华大学

上海理工大学

南京工业大学

华中科技大学

武汉科技大学

山东科技大学

河北工业大学

合肥工业大学

重庆交通大学

重庆科技学院

西安交通大学

西安建筑科技大学

安徽建筑工业学院

重庆大学

江苏大学

南华大学

扬州大学

同济大学

江苏科技大学

中国矿业大学

南京工程学院

南京林业大学

武汉理工大学

天津工业大学

安徽工业大学

广东工业大学

福建工程学院

江苏制冷学会

解放军后勤工程学院

伊犁师范学院

江苏省建委定额管理站

前 言

随着国民经济的发展,要求大学毕业生具有较宽的专业知识面和坚实的专业基础知识,而每门专业课则要求重点突出,减少那些繁琐的细节,达到使学生在掌握要领的同时,又使课程学时有所减少的目的。“热质交换原理与设备”是将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专业平台课程,起着连接本专业基础课与技术课的桥梁作用。它将以往分散在多门专业课程中的热质交换过程与设备问题集中起来,使之在理论上系统化,然后再将理论应用于具体设备。

本书是按照本门课程教学的基本要求而编写的。力图将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有机结合起来,以动量传输、热量传输及质量传输共同构成的传输理论为基础,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。全书共分4章,内容包括绪论、传热传质过程、相变热质交换过程与设备、空气与水之间热质交换过程与设备等,并且每章配有适当的思考题与习题,以适应教学需要。

本书由魏琪(苏州大学)担任主编,并承担第1章,2.5~2.7,3.1,4.1,4.2节的编写工作;戴苏明(苏州大学)担任副主编,并承担2.1~2.4节的编写工作;吴志刚(江苏大学)承担3.3,3.4节的编写工作;翁锦萍(南京林业大学)承担4.4~4.8节的编写工作;胡自成(江苏大学)承担3.2节的编写工作;俞卫刚(苏州大学)承担4.3节的编写工作。

本书由南京工业大学金苏敏教授担任主审。

在本书的编写过程中,参阅了大量的文献资料,在此对各参考文献的作者表示衷心的感谢。

由于时间仓促和编者水平所限,书中难免存在不足和错漏,恳请读者不吝指正,以待第二版时全书更臻完善。

编 者
2006年10月

目 录

1 绪 论	1
1.1 三传现象	1
1.2 热质交换设备概述	2
1.3 本门课程的主要研究内容	5
思考题与习题	5
2 传热传质过程	6
2.1 传质的基本概念	6
2.1.1 浓度	6
2.1.2 整体流动速度与扩散速度	9
2.1.3 分子扩散系数	13
2.2 分子的扩散传递	15
2.2.1 传质微分方程	15
2.2.2 无化学反应的一维稳态分子扩散	18
2.3 对流传质	24
2.3.1 概述	24
2.3.2 层流和湍流边界层及浓度边界层	25
2.3.3 传质边界层的微分方程组	27
2.3.4 边界层积分方程	28
2.3.5 对流传质实验关联式	30
2.3.6 干湿球温度计	34
2.4 动量、热量和质量的传递类比	35
2.4.1 湍流边界层内的三传过程	35
2.4.2 三传问题的类比方法	36
2.5 热质传递模型	42
2.5.1 同时进行传热与传质的过程	42
2.5.2 薄膜理论	42
2.5.3 同一表面上传质速率对传热过程的影响	43
2.5.4 刘伊斯关系式	45
2.6 强化传热和场协同原则	45
2.6.1 强化传热技术	45

2.6.2	场协同原则	50
2.7	间壁式换热器及其热工计算方法	51
2.7.1	间壁式换热器的热工计算	51
2.7.2	空气加热器的热工计算	60
2.7.3	散热器的热工计算	60
	思考题与习题	61
3	相变热质交换过程与设备	65
3.1	沸腾和凝结换热基础	65
3.1.1	大容器饱和沸腾	65
3.1.2	大空间蒸汽凝结过程	69
3.2	管内外强迫流动时的沸腾和凝结换热	71
3.2.1	管内沸腾过程	71
3.2.2	管内外凝结换热	74
3.3	固液相变热质交换	78
3.3.1	一维固液相变的基本原理及其分析方法	79
3.3.2	多维固液相变问题	86
3.3.3	冰蓄冷系统	88
3.4	冷凝器和蒸发器	92
3.4.1	冷凝器的种类和基本构造	92
3.4.2	蒸发器的种类和基本构造	97
3.4.3	蒸发器和冷凝器的热工计算	101
3.4.4	强制通风空气冷却式冷凝器的设计及计算举例	105
3.4.5	表面式蒸发器的设计与计算举例	112
3.4.6	蒸发器的积霜工况及融霜方法	115
	思考题与习题	117
4	空气与水之间热质交换过程与设备	119
4.1	空气与水表面之间热质交换	119
4.2	吸收的基础理论	123
4.2.1	概述	123
4.2.2	相律	123
4.2.3	拉乌尔定律	124
4.2.4	亨利定律	124
4.2.5	吸收剂处理空气的方法	126
4.3	吸附的基础理论及其应用	127
4.3.1	吸附现象	127
4.3.2	物理吸附与化学吸附	127
4.3.3	对固体吸附剂的要求	128
4.3.4	吸附时的传质及其主要影响因素	129

4.3.5 固体吸附减湿	129
4.3.6 吸附式制冷系统	130
4.4 冷却塔	132
4.4.1 冷却塔的构造及其工作过程	132
4.4.2 冷却塔内水的降温过程	133
4.4.3 冷却塔的热工计算	134
4.5 喷雾室	136
4.5.1 喷雾室构造及材料选择	136
4.5.2 喷雾室的热工计算	138
4.6 表冷器	141
4.6.1 表冷器的结构和材料	141
4.6.2 表冷器的热工计算	142
4.7 液体除湿设备	149
4.7.1 液体吸湿剂的性质与吸湿原理	149
4.7.2 液体吸湿剂减湿系统	150
4.7.3 液体吸湿过程与计算	151
4.8 蒸发式冷凝器	153
4.8.1 蒸发式冷凝器的种类与结构	153
4.8.2 蒸发式冷凝器的工作原理和特点	154
4.8.3 蒸发式冷凝器的设计计算	155
思考题与习题	160
附 录	162
附录1 双组分系统中气相扩散系数 D_{AB}	162
附录2 部分水冷式表冷器的传热系数和阻力实验公式	163
附录3 水冷式表面冷却器的 E' 值	164
附录4 JW 型表面冷却器技术数据	164
参考文献	165

1 绪 论

1.1 三传现象

当流体中存在速度、温度和浓度的梯度时,就会分别发生动量、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。

当流体中各层的流速不同(即存在速度梯度时),就会引起宏观的动量传递现象,即在相邻两流层之间的接触面上,分子传递的结果形成一对阻碍两流层相对运动的切应力。切应力 τ_0 可由流体力学中的牛顿内摩擦定律表示:

$$\tau_0 = -\mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1.1)$$

式中 u ——速度, m/s;

y ——垂直于运动方向的坐标, m;

μ ——动力粘度, Pa·s。

当流体中各部分温度不同,即存在温度梯度时,就会引起宏观的传热现象,分子传递的结果使热量从高温处传向低温处。热流量 q 由传热学中的傅里叶定律表示:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \quad (1.2)$$

式中 T ——温度, K;

y ——温度发生变化方向的坐标, m;

λ ——导热系数, W/(m·K)。

在多组分的混合流体中,当其中某种组分的浓度不均匀(即存在浓度梯度)时,分子传递的结果便引起宏观的扩散传质现象。扩散速率 N 可由斐克定律表示:

$$N = -D \frac{\partial c}{\partial y} \quad (1.3)$$

式中 c ——浓度, m³/s;

y ——浓度发生变化方向的坐标, m;

D ——质量扩散系数, m²·s。

由式(1.1)~式(1.3)可见,3种分子传递的机理是相同的,它们遵循的规律也是类似的。因此,都可以用“传递速率 = 扩散率 × 传递推动力”的形式表示。

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合运动也会引起动量、热量和质量的湍流传递,从表象上看,其结果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”。仿照分子传递性质的定律可以建立湍流传递性质的公式,即:

$$\tau_t = -\mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (1.4)$$

式中 \bar{u} ——时均速度, m/s;
 y ——垂直于运动方向的坐标, m;
 μ_t ——湍流动力粘度, Pa·s。

$$q_t = -\lambda_t \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \quad (1.5)$$

式中 \bar{T} ——时均温度, K;
 y ——温度发生变化方向的坐标, m;
 λ_t ——湍流导热系数, W/(m·K)。

$$N_t = -D_t \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \quad (1.6)$$

式中 \bar{c} ——时均浓度, m³/s;
 y ——浓度发生变化方向的坐标, m;
 D_t ——湍流质量扩散系数, m²/s。

应该指出,这些从表象出发建立的公式,即式(1.4)~式(1.6),并没有根本解决湍流传递的计算问题。因为分子传递系数 μ, λ 和 D 只取决于流体的热物理性质,而湍流传递系数 μ_t, λ_t 和 D_t 则取决于流体的宏观运动,故确定湍流传递系数 μ_t, λ_t 和 D_t 较确定分子传递系数 μ, λ 和 D 困难得多。

正是由于湍流传递有上述特点,使得湍流流动的理论分析至今仍未解决,目前主要还是依靠实验来解决这一问题。

1.2 热质交换设备概述

热质交换设备的分类方法很多,可按工作原理、流体流动方向、设备用途、传热传质表面结构、制造材质等分为各种类型。

(1) 按工作原理分类

按不同的工作原理,热质交换设备可分为:间壁式、直接接触式、蓄热式和热管式等类型。

①间壁式又称表面式。在此类热质交换设备中,冷、热介质是在各自的流道中连续流动,最终完成热量传递任务,彼此不接触、不掺混。它是应用最广泛,使用数量最大的一类。例如,锅炉设备中的过热器、省煤器和制冷系统中的冷凝器和蒸发器等。

②直接接触式又称为混合式。在此类热质交换设备中,2种流体直接接触并允许相互掺混,经过热量和质量的传递,再各自全部或部分地分开,因而传热传质效率高。例如,电站设备中的冷却塔、热力除氧器等。

③蓄热式又称为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,冷、热流体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,热量储存于蓄热体内,随即冷流体流过,吸收蓄热体通管壁放出的热量。例如,电站锅炉设备中的空气预热器及全热回收式空气调节器等。

热管换热器是以热管为换热元件的换热器。它由若干支热管组成的换热管束通过中间隔板置于壳体内,中间隔板与热管热段、冷却段及相应的壳体空腔分别形成冷、热流体通道,冷、热流体在通道中横掠热管束,在连续流动中实现热量传递任务。目前,该类换热器多用于各种余热回收工程。

(2) 按照冷、热流体的流动方向分类

按照冷、热流体的流动方向,可分为:顺流式、逆流式、叉流式和混流式等类型。

①顺流式。在顺流式换热器中,若2股流体从同一端进入,沿着相同方向平行流动,从另一端出来,见图1.1;流体温度的变化可理想化地认为是一维的,见图1.2。对于单程换热器,在相同的传递速率、比热容量(质量与比热容的乘积)和传热面积下,这种换热器的换热效率最低;同时,由于进口端的温差较大,可能导致换热器的进口壁面热应力较高。尽管这种换热器的应用不是很广泛,但具有以下优点:

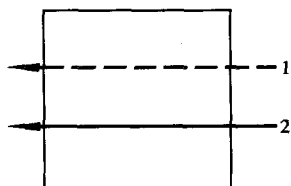


图 1.1 顺流式换热器示意图

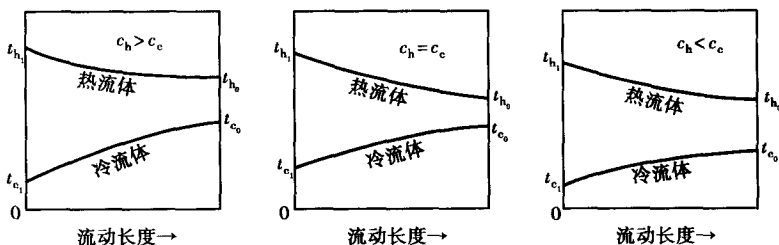


图 1.2 顺流方式的温度分布示意图

a. 这种流动形式下,沿传热管纵向的壁面温度分布均匀,而在逆流换热器中,管子的壁面温度会过高或过低;

b. 当热流体的温度可能达到其露点时,这种换热器较合适;

c. 用于沸腾时,能使核态沸腾提早。

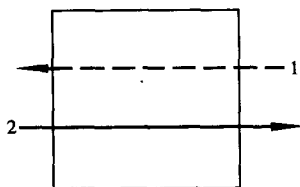


图 1.3 逆流式换热器示意图

②逆流式。即2种流体平行流动,但它们的流动方向相反,如图1.3所示。温度分布可以认为是一维的,如图1.4所示。在理想情况下,单流道的这种流动方式的换热器在相同参数时换热效率最高。当横截面面积一定时,换热器壁面的温差最小,因而相比其他流动方式,同等性能下该换热器的壁面热应力最小。

③叉流式(错流式)。即2种流体的流动方向互相垂直交叉,如图1.5所示。叉流换热器的热效率在顺流与逆流的情况之间。在这种情况下,可大大简化封头的设计(采用逆流式其进出口的封头结构复杂)。因此,它是延伸表面换热器中最常用的一种流动形式。如果要求换热器的换热效率大于80%,那么设计成错流将可能导致设备尺寸过大,这种情况下选择逆

流较好。

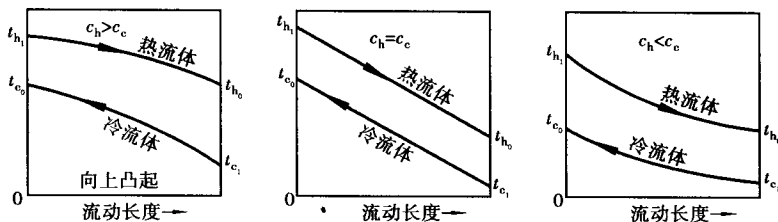


图 1.4 逆流方式的温度分布示意图

④混流式。即 2 种流体在流动过程中既有顺流部分,又有逆流部分。

在各种流动形式中,顺流和逆流可以看作是 2 个极端情况。顺流时,冷流体的出口温度总是低于热流体的出口温度;逆流时,冷流体的出口温度却可能超过热流体的出口温度。因此,换热器应尽量布置成逆流,并尽可能避免顺流布置。但逆流布置也有其缺点,即冷流体和热流体的最高温度发生在换热器的同一端,使得该处的壁温很高。对于高温换热器来说,应予以避

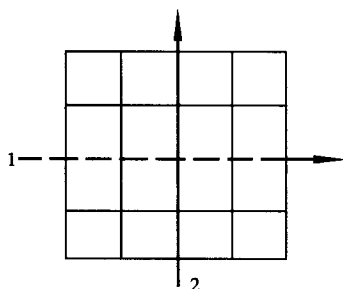


图 1.5 叉流式换热器示意图

免。同时,为了降低这里的壁温,有时甚至有意改用顺流,如锅炉中的高温过热器就有这种布置方式。

(3) 按设备用途分类

按设备用途可分为:预热器、加热器、过热器、冷凝器、蒸发器等。

预热器用于预先加热流体,提高热能利用率,以使整套工艺装置效率得以改善;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;过热器用于加热饱和蒸汽到其过热状态;冷凝器用于冷却凝结性饱和蒸汽,使之放出潜热而凝结液化;蒸发器用于加热液体,使之蒸发汽化,或利用低压液体蒸发汽化以吸收另一种流体的热量。

(4) 按制造材质分类

按照制造热质交换设备的材料分为: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、铜及其合金等制造的换热器。

由于石油、化学、冶金等工业中的许多工艺过程多在高温、高压及强腐蚀性等条件下进行,金属材料换热器已不能满足需要,因而开始研制和生产由陶瓷、石墨、塑料、玻璃等制造的非金属材料换热器。

石墨具有优良的耐腐蚀及传热性能,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,它几乎可以处理除酸的氧化物以外的一切酸碱溶液。

用于制造换热器的工程塑料很多,目前以聚四氟乙烯为最佳,其性能可与金属换热器媲美,但具有特殊的耐腐蚀性,主要用于硫酸厂的酸冷却。

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,如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而成的,但其价格昂贵,使用范

围受限。对于该类换热器,目前应用较多的是钛金属换热器。

1.3 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:传热传质过程、相变热质交换过程与设备、空气与水之间热质交换过程与设备等。

传热传质过程部分,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、传热强化和场协同原则、间壁式换热器及其热工计算方法。

相变热质交换过程与设备部分,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,介绍专业中常见的冷凝器和蒸发器种类和基本构造、传热热阻和热工计算等。

空气与水之间热质交换过程与设备部分,主要包括空气与水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、冷却塔、喷雾室、表冷器、液体除湿设备、蒸发式冷凝器等热质交换设备的系统构成、材料选择及相应的热工计算方法。

对于本课程内容,要求学生了解本课程在专业中的地位与重要性;在掌握了传热学知识的基础上,进一步掌握传质学的相关理论,并掌握动量、能量及质量传递间的类比方法;熟悉在相变换热情况下发生的以制冷剂为主的热质交换的物理机理和沸腾与凝结的影响因素;掌握空气与水表面间热质交换的基本理论和基本方法,熟悉用固体吸附和液体吸收对空气处理的机理与方法;了解本专业常用热质交换设备的结构型式,掌握其热工计算方法,并具有对其进行性能评价和优化设计的初步能力。最终通过本课程的系统学习,达到掌握在传热传质同时进行时发生在建筑环境与设备中的热质交换的基本理论及相应的设备热工计算方法,并具有对其进行性能评价和优化设计的初步能力,为进一步学习创造良好的建筑室内环境打下基础。

思考题与习题

- 1.1 试简述三传过程中的传递率的计算公式及所用到的各物理量及符号的意义。
- 1.2 动力粘度、导热系数和扩散系数的计量单位各是什么,各具有什么物理意义?
- 1.3 概述热质交换设备的分类方法。请列举日常生活中见到的或用到的几种热质交换设备,并说明这些热质交换设备的类型及其功用。
- 1.4 直接接触式热质交换设备最主要的特点是什么?
- 1.5 按照热、冷流体的流动方向,热质交换设备有哪几种流动形式?说明流动形式对其工作性能的影响。

2 传热传质过程

2.1 传质的基本概念

2.1.1 浓度

浓度是一种重要的表示组成成分的形式,在传质问题中占有重要的地位。

在由 A, B 两种组分所组成的混合物中,在单位混合物中所含组分 A, B 的量,分别称为组分 A, B 的浓度。浓度的表达形式主要有质量浓度和物质的量浓度 2 种。

1) 质量浓度

由于各组分分子具有一定的质量,所以每个组分均存在着质量浓度。例如,组分 A 的质量浓度 ρ_A 是指单位容积混合物中含有组分 A 的质量,单位为 kg/m^3 。而混合物的总质量浓度(即密度) ρ 可表示为:

$$\rho = \sum_{i=1} \rho_i$$

组分 A 的质量分数定义为其质量浓度与总质量浓度之比,即:

$$w_A = \frac{\rho_A}{\sum_{i=1} \rho_i} = \frac{\rho_A}{\rho}$$

由定义得知,质量分数的总和必为 1,即:

$$\sum_{i=1} w_i = 1$$

2) 物质的量浓度

组分 A 的物质的量浓度 c_A 是指单位混合物中含有组分 A 的物质的量,单位为 mol/m^3 。由此可见,1 mol 物质组分所含的质量数等于其分子量数。质量浓度和物质的量浓度之间的关系为:

$$c_A = \frac{\rho_A}{M_A}$$

式中 M_A ——组分 A 的分子量。

对于理想气体混合物中的组分 A, 由于遵从克拉贝龙方程, $p_A V = n_A RT$, 故物质的量浓度为:

$$c_A = \frac{n_A}{V} = \frac{p_A}{RT}$$

式中 p_A ——混合物中组分 A 的分压力;

n_A ——组分 A 的物质的量;

V ——气体容积。

因此, 混合物的总的物质的量浓度 c 为:

$$c = \sum_{i=1} c_i$$

由于混合气体遵守理想气体状态方程, 所以:

$$c = \frac{n}{V} = \frac{p}{RT}$$

式中 p ——混合气体的总压力;

n ——混合气体的物质的量。

组分 A 的物质的量浓度与总物质的量浓度之比, 称为摩尔分数, 用 y_A 表示:

$$y_A = \frac{c_A}{c}$$

由理想气体状态方程, 有:

$$y_A = \frac{c_A}{c} = \frac{p_A / (RT)}{p / (RT)} = \frac{p_A}{p}$$

可见, 摩尔分数 y_A 可写成表示组分的分压力与总压力的比。

由定义得知, 各组分摩尔分数的总和必为 1, 即:

$$\sum_{i=1} y_i = 1$$

表 2.1 给出了双组分理想气体各种浓度之间关系。

表 2.1 双组分混合物的浓度及相互关系

质量浓度		物质的量浓度	
混合物的质量浓度	ρ	混合物的物质的量浓度	$c = \frac{n}{V} = \frac{p}{RT}$
组分 A, B 的质量浓度	ρ_A, ρ_B	组分 A 的物质的量浓度	$c_A = \frac{n_A}{V} = \frac{p_A}{RT}$
组分 A 的质量分数	$w_A = \frac{\rho_A}{\rho}$	组分 A 的摩尔分数	$y_A = \frac{c_A}{c} = \frac{n_A}{n} = \frac{p_A}{p}$
关系式	$\rho = \rho_A + \rho_B$ $w_A + w_B = 1$	关系式	$c = c_A + c_B = \frac{p_A}{RT} + \frac{p_B}{RT} = \frac{p}{RT}$ $y_A + y_B = 1$
浓度关系的换算		$\rho_A = c_A M_A$ $y_A = \frac{w_A / M_A}{\frac{w_A}{M_A} + \frac{w_B}{M_B}}$ $w_A = \frac{y_A M_A}{y_A M_A + y_B M_B} = \frac{y_A M_A}{y_A M_A + (1 - y_A) M_B}$	

【例 2.1】空气可以视为仅由氧气和氮气组成的混合物,其组成为 1 mol 氧气对应于 3.189 4 mol 氮气。求空气的摩尔质量 M , 气体常数 R_g 及质量分数。

【解】空气中氧和氮气的摩尔分数为:

$$y(\text{N}_2) = \frac{3.1894 \text{ mol}}{(3.1894 + 1) \text{ mol}} = 0.7613$$

$$y(\text{O}_2) = \frac{1 \text{ mol}}{(3.1894 + 1) \text{ mol}} = 0.2387$$

氮气和氧气的摩尔质量分别为:

$$M(\text{N}_2) = 28.02 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$$

$$M(\text{O}_2) = 32.00 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$$

空气的摩尔质量 M 为:

$$\begin{aligned} M &= M(\text{N}_2)y(\text{N}_2) + M(\text{O}_2)y(\text{O}_2) \\ &= 28.02 \times 10^{-3} \text{ kg/mol} \times 0.7613 + 32.00 \times 10^{-3} \text{ kg/mol} \times 0.2387 \\ &= 28.97 \times 10^{-3} \text{ kg/mol} \end{aligned}$$

空气的气体常数 R_g 为:

$$R_g = \frac{R}{M} = \frac{8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})}{28.97 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}} = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

质量分数为:

$$w(\text{N}_2) = \frac{M(\text{N}_2)}{M} y(\text{N}_2) = \frac{28.02 \text{ g/mol}}{28.97 \text{ g/mol}} \times 0.7613 = 0.7363$$

$$w(\text{O}_2) = \frac{M(\text{O}_2)}{M} y(\text{O}_2) = \frac{32.00 \text{ g/mol}}{28.97 \text{ g/mol}} \times 0.2387 = 0.2637$$

即:
$$\sum y_i = \sum w_i = 1$$

2.1.2 整体流动速度与扩散速度

1) 整体流动速度

对于多组分混合气体,由于各组分具有不同的浓度梯度,因此在扩散过程中质量移动将破坏各部分的压力平衡。为此,除了质量移动之外还有气体的整体移动,即在扩散过程中要产生混合气体的整体流动。

混合气体的整体流动速度应视为混合气体中各组成气体速度的平均值。如果规定沿某方向(如 x 方向)的速度为 u ,则整体流动的质量平均速度为:

$$u = \frac{\sum_{i=1} \rho_i u_i}{\rho}$$

式中 $\rho_i u_i$ ——组分 i 的质量通量,用 $\phi_{m,i}$ 表示。

整体流动的物质的量平均速度为:

$$u_M = \frac{\sum_{i=1} c_i u_i}{c}$$

式中 $c_i u_i$ ——组分 i 的物质的量通量,用 $\phi_{n,i}$ 表示。

2) 扩散速度

某一组分的速度与整体流动的平均速度之差,称为该组分的扩散速度。其中, $u_i - u$, $u_i - u_M$ 分别为组分 i 相对于整体流动的质量平均速度、物质的量平均速度的扩散速度。

3) 扩散通量

扩散通量(又称扩散速率)是指在垂直于速度方向上,单位面积单位时间内所通过的物质的量,如质量通量或物质的量通量等。从扩散通量的单位可以看出,扩散通量是浓度和速度的乘积,其单位由相应的浓度和速度的单位决定,如 $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] = [\text{kg}/\text{m}^3] \cdot [\text{m}/\text{s}]$ 。

在双组分混合物(如组分 A 和组分 B)中,总扩散通量定义为:

$$\begin{aligned} \phi_m &= \phi_{m,A} + \phi_{m,B} = \rho u && (\text{总质量通量}) \\ \phi_n &= \phi_{n,A} + \phi_{n,B} = c u_M && (\text{总物质的量通量}) \end{aligned}$$

4) 斐克第一定律

在仅由浓度差引起的扩散条件下,物质的扩散通量依据斐克(Fick)定律确定。稳态条件下双组分混合物中物质的分子扩散通量与扩散方向上的浓度梯度成正比,组分 A 沿 z 方向向组分 B 的分子扩散,以物质的量浓度为例,可以表示为:

$$j_{n,A} = -D_{AB} \frac{dc_A}{dz} \quad (2.1)$$