



世纪高等教育建筑环境与设备工程系列规划教材

热质交换原理 与设备

REZHI JIAOHUAN YUANLI YU SHEBEI

闫全英 刘迎云 主编
黄翔 主审



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪高等教育建筑环境与设备工程系列规划教材

热质交换原理与设备

主 编 闫全英 刘迎云
参 编 王学锦
主 审 黄 翔



机械工业出版社

“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技术基础课之一，起着连接本专业基础课和专业课的桥梁作用。本教材是按照该课程教学大纲要求编写的，主要讲述热质交换的基本原理、基本规律和相关设备的理论和实践知识。全书共 10 部分：绪论，质交换过程，动量、热量和质量传递类比，相变热质交换原理与设备，空气与水热质交换原理与设备，干燥剂除湿原理与设备，空气射流及燃料燃烧时的热质交换原理与设备，热质交换设备的热工计算，热质交换设备的优化设计和性能评价，以及附录。本教材将原理与设备有机地结合起来，既符合学生的认识规律，又便于学生学习掌握，并注意与实际工程相结合。

本书适用于普通高等学校的建筑环境与设备工程专业本科生和专科生，也可作为其他相关专业的教学参考书，同时也可供有关工程技术人员和自学者参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

热质交换原理与设备/闫全英, 刘迎云主编. —北京: 机械工业出版社, 2006.6

(21 世纪高等教育建筑环境与设备工程系列规划教材)

ISBN 7-111-19120-X

I. 热... II. ①闫... ②刘... 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 046583 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 刘 涛 版式设计: 冉晓华 责任校对: 张晓蓉

封面设计: 王伟光 责任印制: 李 妍

保定市印刷厂印刷

2006 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 9.25 印张 · 358 千字

定价: 23.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

编辑热线电话 (010) 88379720

封面无防伪标均为盗版

序

建筑环境与设备工程专业是 1998 年教育部新颁布的全国普通高等学校本科专业目录，将原“供热通风与空调工程”专业和“城市燃气供应”专业进行调整、拓宽而组建的新专业。专业的调整不是简单的名称的变化，而是学科科研与技术发展，以及随着经济的发展和人民生活水平的提高，赋予了这个专业新的内涵和新的元素，创造健康、舒适、安全、方便的人居环境是 21 世纪本专业的任务。同时，节约能源、保护环境是这个专业及相关产业可持续发展的基本条件，因而它们和建筑环境与设备工程专业的学科科研与技术发展总是密切相关，不可忽视。

作为一个新专业的组建及其内涵的定位，它首先是社会需求所决定，也是和社会经济状况及科学技术的发展水平相关的。我国的经济持续高速发展和大规模建设需要大批高素质的本专业人才，专业的发展和重新定位必然导致培养目标的调整和整个课程体系的改革。培养“厚基础、宽口径、富有创新能力”，并能符合注册公用设备工程师执业资格并能与国际接轨的多规格的专业人才以满足需要，是本专业教学改革的目的。

机械工业出版社本着为教学服务，为国家建设事业培养专业技术人才，特别是为培养工程应用型和技术管理型人才作贡献的愿望，积极探索本专业调整和过渡期的教材建设，组织有关院校具有丰富教学经验的教授、副教授主编了这套建筑环境与设备工程专业系列教材。

这套系列教材的编写以“概念准确、基础扎实、突出应用、淡化过程”为基本原则，突出特点是既照顾学科体系的完整，保证学生有坚实的数理科学基础，又重视工程教育，加强工程实践的训练环节，

培养学生正确判断和解决工程实际问题的能力，同时注重加强学生综合能力和素质的培养，以满足 21 世纪我国建设事业对专业人才的要求。

我深信，这套系列教材的出版，将对我国建筑环境与设备工程专业人才的培养产生积极的作用，会为我国建设事业作出一定的贡献。

陈在康

2005 年 1 月于长沙

前 言

本书是为普通高等学校建筑环境与设备工程专业“热质交换原理与设备”课程撰写的教材。1998年教育部对本科的专业目录作了部分调整,将“供热、供燃气、通风与空调工程”专业改为“建筑环境与设备工程”专业,新增加了三门专业基础课程——“热质交换原理与设备”、“建筑环境学”和“流体输配管网”。

“热质交换原理与设备”课程是将本专业中的“传热学”、“流体力学”、“工程热力学”、“供热工程”、“通风工程”、“空调工程”、“制冷技术”、“空调冷热源工程”、“工业锅炉设备”及“燃气燃烧”等课程中有关流体的传热传质原理及相关设备的内容取出,经整理、归纳、精炼而形成的一门技术基础课,它是建筑环境与设备工程专业的主干专业基础课之一。

“热质交换原理与设备”是以动量传递、热量传递和质量传递的传输理论为基础,研究发生在本专业中的热、质交换现象、原理、规律以及热质交换设备的选择和计算,为学生进一步掌握专业知识打下良好的基础。

本书是针对普通高等学校建筑环境与设备工程专业的本科生,定位明确,区别于现有同类教材。本书的特点包括:

1) 消化吸收了同类教材的经验和特点,并加以扩展和更新,增添了部分新内容。

2) 打破以往教材先讲原理后讲设备的传统体系,将原理与设备有机地结合起来讲授,符合学生的认识规律,便于学生学习掌握。

3) 注重与“传热学”及各门相关专业课,如“空调工程”、“工业

锅炉设备”、“制冷技术”、“燃气燃烧”、“通风工程”等课程的衔接，避免了内容的大量重复，重点突出，目的明确。

4) 强调了热质交换设备的热工计算方法，将其专门列为一章，加强了对学生计算能力的训练，有利于提高学生的实际应用能力。

5) 增加了热质交换设备的优化设计和评价的内容，单设一章，使学生能了解热质交换设备优化方法和性能评价指标，从技术经济角度对热质交换设备进行综合设计和评价，提高学生系统、综合的分析能力，并使学生掌握技术经济的基本分析方法。

6) 本书中所用到的专业术语符合最新的暖通空调术语标准。

7) 本书尽量加入与本学科相关的热质交换设备的新进展和新技术，使学生能够及时了解本专业前沿领域的新知识。

8) 力求全书中用到的符号及其物理意义前后统一起来，便于学生理解和记忆。

9) 本书各章节后均配有习题和思考题，参考文献单独置于每章之后，便于学生查阅参考，同时给出了教材中常用物理量的符号表。

本书由闫全英、刘迎云主编。全书共8章。绪论，第3章，第4章中4.3节，第5章中5.7节，第6章中6.3、6.4节，第7章和第8章由北京建筑工程学院的闫全英副教授执笔；第1章和第2章由河北建筑工程学院的王学锦执笔；第4章中4.1、4.2节，第5章5.1节~5.6节和第6章中6.1、6.2节由南华大学的刘迎云副教授执笔。全书由闫全英统稿。

本书诚请西安工程大学黄翔教授细致审阅，黄翔教授对本书的大纲、指导思想和内容等提出了许多宝贵的意见，谨此表示衷心的感谢。西安建筑科技大学张强教授也对本书提出了修改意见，谨致谢意。

由于编者水平有限，书中错误和不妥之处，请读者予以批评指正。

编者

基本符号表

m	质扩散通量	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
N	摩尔扩散通量	$\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
n	物质的量浓度	kmol/m^3
C_i	某组分的质量浓度	kg/m^3
h_m	对流质交换系数	m/s
h_{md}	传质系数或蒸发系数	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
α	表面传热系数	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
D	扩散系数	m^2/s
a	热扩散率	m^2/s
ν	运动粘度	m^2/s
μ	摩尔质量	g/mol
Q	传热量	W
q	热流密度	W/m^2
u	x 方向速度	m/s
v	y 方向速度	m/s
A	面积	m^2
K	传热系数	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
λ	热导率	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
d	含湿量	$\text{kg}(\text{水蒸气})/\text{kg}(\text{干空气})$
h	比焓	kJ/kg
c	比热容	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
μ	动力粘度	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
w	水流速	m/s
T	热力学温度	K
t	摄氏温度	$^{\circ}\text{C}$
p	压力、压强	Pa, bar
ϵ	换热器效能	

(续)

ε_1	热交换效率系数	
ε_2	接触系数	
G	空气流量	kg/s
W	水流量	kg/s
r	汽化热	kJ/kg
ξ	析湿系数或热扩大系数	
R	气体常数	kJ/(kg·K)
R_0	摩尔气体常数	kJ/(kmol·K)
ρ	密度	kg/m ³
V	体积	m ³
\dot{m}	质量流量	kg/s
η	换热器效率	
η	肋壁效率	
R	热阻	m ² ·K/W
d	直径	m
δ	壁厚	m

目 录

序	
前言	
基本符号表	
绪论	1
参考文献	8
第 1 章 质交换过程	9
1.1 传质基本概念	9
1.2 分子扩散传质	12
1.3 对流质交换	20
复习思考题和习题	30
参考文献	30
第 2 章 动量、热量和质量传递类比	31
2.1 对流质交换过程的相关准则	31
2.2 动量、热量、质量传递方程	32
2.3 三传类比规律	34
2.4 热质传递模型	39
复习思考题和习题	48
参考文献	49
第 3 章 相变热质交换原理与设备	50
3.1 液体沸腾换热	50
3.2 蒸汽凝结换热	55
3.3 固-液相变	58
3.4 相变热质交换设备和系统	62
复习思考题和习题	74
参考文献	75
第 4 章 空气与水热质交换原理与设备	77
4.1 空气与固体表面之间的热质交换	77
4.2 空气与水直接接触时的热质交换	82

4.3 空气热质处理设备	84
复习思考题和习题	107
参考文献	107
第5章 干燥剂除湿原理与设备	109
5.1 常用除湿方法	109
5.2 干燥剂除湿过程	115
5.3 固体吸附除湿原理及方法	116
5.4 固体吸附除湿设备	127
5.5 液体吸收除湿原理及方法	131
5.6 液体吸收除湿设备	139
5.7 溶液除湿空调系统	142
复习思考题和习题	146
参考文献	147
第6章 空气射流及燃料燃烧时的热质交换原理与设备	148
6.1 空气射流的热质交换	148
6.2 燃料燃烧时的热质交换	158
6.3 液体燃烧器	173
6.4 气体燃烧器	180
复习思考题和习题	193
参考文献	193
第7章 热质交换设备的热工计算	194
7.1 间壁式热质交换设备的热工计算	194
7.2 混合式热质交换设备的热工计算	222
7.3 燃烧装置的热工计算	241
复习思考题和习题	257
参考文献	258
第8章 热质交换设备的优化设计和性能评价	259
8.1 热质交换设备的优化设计与分析	259
8.2 热质交换设备的性能评价	264
复习思考题和习题	276
参考文献	276
附录	278
附录 A 散热器组装片数修正系数	278

附录 B 散热器连接形式修正系数	278
附录 C 散热器安装形式修正系数	278
附录 D 一些铸铁散热器的传热系数公式	278
附录 E 一些钢制散热器的传热系数公式	279
附录 F 局部阻力系数	279
附录 G 空气加热器传热系数和阻力损失	279
附录 H 空气冷却器的接触系数	280
附录 I JW 型空气冷却器技术数据	281
附录 J 部分水冷式空气冷却器的传热系数和阻力公式	281
附录 K 喷淋室热交换效率实验公式的系数和指数	282
附录 L 冷却塔局部阻力系数	282

绪 论

传热现象和传质现象是自然界和工程技术领域普遍存在的现象。在建筑环境与设备工程专业领域，传热和传质现象广泛发生在能量交换设备中，所以学习传热和传质的基本规律以及它们在专业中的应用是十分重要的。

过去本专业的学生在学习相关的传热传质知识以及它们在设备中的应用是零散的，分布在不同的专业课中，缺乏统一系统的了解和学习。热交换设备如水加热器、散热器、喷射泵等的结构形式和热工计算在“供热工程”课程中讲述；空气热质处理设备如空气冷却器、喷水室等的结构形式和热工计算在“空调工程”中讲述；燃料燃烧现象和燃烧器结构及应用在“工业锅炉设备”中讲述，还有其他几门专业课中也涉及到相关传热传质的内容。这样的安排使学生不能系统地掌握进而熟练应用传热传质知识。

“热质交换原理与设备”是将专业课和专业基础课中有关流体的传热传质原理及相关设备的内容取出，经整理、归纳、精炼而形成的一门技术基础课。它是以前动量传递、热量传递和质量传递的传输理论为基础，论述了发生在本专业中的热质交换现象、原理、设备的选择和计算，为学生进一步掌握专业知识打下良好的基础。

1. 本课程的主要内容

本课程主要讲述热质交换的基本原理、基本规律和相关设备的理论和实践知识，为日后实际应用提供基础和依据。本书的主要内容包括质交换过程，动量、热量和质量传递类比，相变热质交换原理与设备，空气与水热质交换原理与设备，干燥剂除湿原理与设备，空气射流的热质交换，燃料燃烧时的热质交换原理及设备，热质交换设备的热工计算以及热质交换设备的优化设计和性能评价等。

(1) 传递基本规律 物质的分子总是处于不规则的热运动中，两种或两种以上组分组成的混合物中如果存在浓度差，物质的分子就会从浓度高的地方向浓度低的地方转移，进而产生质量的传递。质量传递基本方式包括分子扩散和对流扩散。由于分子的微观运动引起的质量传递称为分子扩散，它存在于固体、静止流体或层流流体中。由于流体微团的宏观运动引起的质量传递称为对流扩散，它存在于紊流流体中，但单纯的对流扩散是不存在的，总是伴随着分子扩散，二者的

共同作用称为对流质交换^[1]。

分子扩散传质可以用菲克定律来描述：在浓度场不随时间而变化的稳态扩散条件下，当无整体流动时，组成二元混合物中组分 A 和 B 发生互扩散，组分 A 向组分 B 单位时间内在垂直于扩散方向的单位面积上扩散的质量或物质的量与组分 A 的浓度梯度成正比，方向指向浓度降低的方向，用公式表示为

$$m_A = - D_{AB} \frac{dC_A}{dy}$$

或

$$N_A = - D_{AB} \frac{dn_A}{dy}$$

式中 D_{AB} ——扩散系数 (m^2/s)；

C_A ——组分 A 的质量浓度 (kg/m^3)；

n_A ——组分 A 的物质的量浓度 (kmol/m^3)；

m_A ——组分 A 的质扩散通量 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]；

N_A ——组分 A 的摩尔扩散通量 [$\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]。

当流体中存在速度梯度或温度梯度时，则会发生动量传递和热量传递。三种传递现象——质量传递、动量传递和热量传递是类似的。动量传递的分子传输规律可以用牛顿粘性定律来描述，即两个作直线运动的流体层之间的切应力与垂直于运动方向的速度梯度成正比，用公式表示为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

式中 τ ——切应力 (N/m^2)；

μ ——动力粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)；

u ——流体的速度 (m/s)。

热量传递的分子传输规律可以用傅里叶定律来描述，即在均匀各向同性材料内的一维温度场内，通过导热方式单位时间内在垂直于传热方向上单位面积内传递的热量与温度梯度成正比，方向指向温度降低的方向，用公式表示为

$$q = - \lambda \frac{dt}{dy}$$

式中 q ——热流密度 (W/m^2)；

λ ——流体的热导率 [$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$]。

对于紊流流动的流体，动量、热量和质量的传递是由流体微团的不规则掺混运动引起的。依照分子传递规律，也可以近似建立紊流传递规律，在这里定义了紊流动力粘度 μ_t 、紊流热导率 λ_t 和紊流扩散系数 D_{ABt} ，则描述动量、热量和质量传递的公式可以写作

$$\tau_t = \mu_t \frac{d\bar{u}}{dy}$$

$$q_t = -\lambda_t \frac{d\bar{t}}{dy}$$

$$m_{At} = -D_{Abt} \frac{d\bar{C}_A}{dy}$$

式中 τ_t ——紊流切应力 (N/m^2);
 \bar{u} ——紊流平均速度 (m/s);
 q_t ——紊流热流密度 (W/m^2);
 \bar{t} ——紊流平均温度 ($^{\circ}\text{C}$);
 m_{At} ——紊流质扩散通量 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$];
 \bar{C}_A ——紊流平均质量浓度 (kg/m^3)。

对于分子传递和流体微团宏观运动共同作用引起的总动量、热量和质量传递量可认为是分子扩散和对流扩散引起的扩散量之和。在充分发展的紊流中，紊流作用远远大于分子传递作用，所以总传递量近似认为等于紊流传递量，而忽略分子传递量。

除此之外，动量、热量和质量传递现象的微分方程和边界条件也是类似的，所以三种传递现象是可以类比的^[2]。基于这个原理，可以把动量传递和热量传递的一些类比律和准则关联式推广应用到传质现象上，用来计算对流质交换系数。

(2) 热质传递现象 本专业中涉及到的热质传递现象包括相变传热、空气与水的换热、干燥剂与空气的换热、空气射流与室内空气的换热和燃料燃烧现象。

相变传热包括液体沸腾换热、蒸汽凝结换热，以及固-液相变传热。固体壁面与液体接触时，当固体表面温度大于液体压力下的饱和温度就会发生沸腾现象。固体壁面与液体之间的换热量与温差和壁面与液体之间的表面传热系数成正比。沸腾现象的发生必须有汽化核心的存在，汽化核心越多，沸腾现象越剧烈。

固体壁面与蒸汽接触，当固体表面温度低于蒸汽的饱和温度时，蒸汽就会在壁面上凝结。根据液膜与壁面的润湿情况，凝结有膜状凝结和珠状凝结两种形式。在实际工业应用上往往实现的是膜状凝结，所以膜状凝结表面传热系数的计算是很重要的。

空气与水之间的热质交换现象主要发生在空调系统对空气进行热湿处理时。为满足房间舒适度的要求，无论是在夏季还是在冬季，必须对室外空气进行各种热湿处理过程，达到送风参数后，再送入室内。在冬季，室外空气主要进行加热加湿处理，在夏季主要进行降温减湿处理。这些处理过程涉及空气与水表面或水

滴之间的热质交换。

空气在与水直接接触时,如果二者之间存在温度差,会产生热传递。空气把热量传递给水,这就是空气降温过程;水把热量传递给空气,这就是空气加热过程。紧靠水表面的空气层可以认为是温度等于水温的饱和空气层,如果与水接触的空气中水蒸气分压力(或浓度)与水表面饱和空气层的水蒸气分压力(或浓度)不等,则会产生质量扩散。水表面向空气传递水蒸气,则是空气加湿过程,反之则是空气除湿过程。

通常空气与水直接接触时,热交换和质交换是同时存在的。既存在由温差引起的显热交换,又存在由浓度差引起的潜热交换,二者的代数和为空气与水之间的总热交换。总热交换的推动力是空气与水表面饱和空气的焓差。

空气与水通过壁面进行热质交换时,如果壁面温度低于空气的露点温度,则空气被冷却的同时也被除湿,水蒸气发生凝结,并在表面形成水膜,热质交换同时存在,传递规律和公式与上述空气与水直接接触的情况类似。如果壁面温度高于空气露点温度而小于空气温度时,则空气只被冷却而含湿量不变。如果壁面温度大于空气温度,则空气被加热,含湿量不变。

对空气进行除湿处理除了采用冷却凝结的方法,还可以使用干燥剂进行除湿。干燥剂包括固体吸附剂和液体吸收剂。干燥剂的除湿或加湿是由于干燥剂的表面蒸汽压与被处理空气的蒸汽压差造成的,当干燥剂表面蒸汽压小于被处理空气的蒸汽压时,则干燥剂吸收空气中的水蒸气,空气被除湿,反之则空气被加湿。干燥剂处理空气时,当吸收一定量的水蒸气后,其表面蒸汽压增大到等于空气的蒸汽压,则干燥剂丧失除湿能力,这时应该对干燥剂进行再生处理,排除水蒸气,降低蒸汽压,使它重新具有除湿能力。

(3) 热质交换设备的种类和用途 热质交换设备的种类很多。按工作原理分包括间壁式、混合式、蓄热式和热管式等^[3]。

间壁式热质交换设备中,冷热两种流体被壁面隔开,在各自的流道中连续流动,彼此不混合进行热量交换。例如空气加热器、空气冷却器、散热器、冷凝器、蒸发器等,这类设备在本专业中应用最广。

混合式热质交换设备是指冷热两种流体直接接触,相互混合进行热量或质量的传递。这种设备传热传质效率高。如喷水室、喷射泵、加湿器、冷却塔等都属于混合式热质交换设备。

蓄热式换热器是借助固体填充物组成的蓄热体作为中间介质传递热量。冷热流体依次流过蓄热体,热流体在流过时放出热量,把热量储存在蓄热体中。当冷流体流过时,吸收蓄热体放出的热量。蓄热式换热器的热传递过程属于非稳态过程,蓄热体不停地、周期性地加热冷却,换热器内温度场处于不停的变化中。如炼铁厂的热风炉、锅炉中的中间蓄热式空气预热器和全热回收式空气调节器属于

此类换热器。

热管式换热器以热管为换热元件。换热器由多根热管组成的换热管束通过中隔板置于壳体内，中隔板与加热段、冷却段及相应的壳体内腔形成冷热流体通道，流体在通道内横掠管束时进行换热。该类换热器用于余热回收中。

按冷热流体流动方向分，热质交换设备有顺流式、逆流式、叉流式和混流式。

顺流式换热器内冷热流体平行沿同一方向流动，如图 0-1 所示。冷热流体同向流动时，可以用平壁隔开，但通常是用同心管隔开，冷热流体由同一端进入，向着同一方向流动，由另一端离开。

逆流式是两种流体流动方向相反，且平行流动，如图 0-2 所示。冷热流体从换热器不同的两端进入，相对逆向流动，再由相对的两端流出。

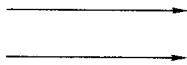


图 0-1 顺流式示意图

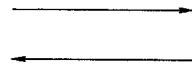


图 0-2 逆流式示意图

叉流式则是两种流体的流动方向互相交叉垂直，如图 0-3a 所示。这种流动方式主要是气体横向掠过管内流动液体的管束。管束有带肋片的，也有不带肋片的。对于带肋片的交叉流动，管束外气体流股和管束内的液体都是不混合的，如图 0-3b 所示。如果管束不带肋片，则管束外的流体会在横向进行混合，如图 0-3c 所示。

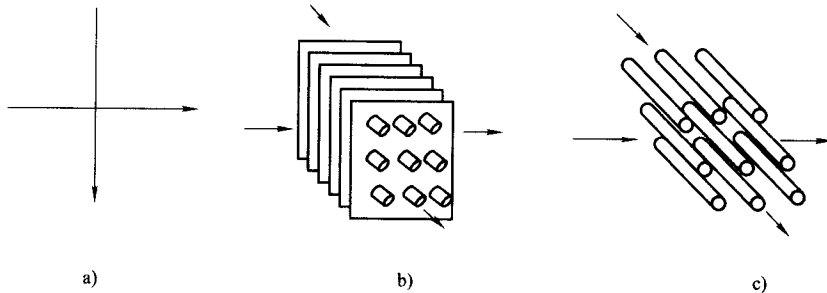


图 0-3 叉流式示意图

混流式是指流动方式既有顺流，又有逆流，也可能有交叉流，如图 0-4 所示。当冷热流体交叉次数较多，如 4 次以上，则可根据流动的总趋势，将流动看作逆流或顺流来对待。

按用途分类，热质交换设备有水加热器、空气加热器、空气冷却器、预热器、过热器、喷水室、冷凝器、蒸发器、散热器、喷射泵、加湿器、暖风机等。

水加热器是利用蒸汽或热水作为热媒加热低温水的设备，分汽水加热器和水