

冷库技术

Lengku Jishu

周前 邢燕 主编

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

冷库技术

主 编 周 前 邢 燕

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书将冷库的制冷负荷的计算、设备的选型计算、制冷系统方案的确定、管径计算及管道布置、机房和库房布置、施工图纸的阅读和绘制、冷库建筑施工、制冷机与制冷设备的安装等内容作为重点来编写,同时还介绍了制冷的基本知识、制冷剂和载冷剂的基本知识、制冷系统的操作运行管理与维护、冷库的安全技术以及主要经济指标分析等方面内容。本书内容全面具体、系统性强,对近年来冷库制冷方面的新技术、新设备和新的研究成果都作了较充分的介绍。

本书是普通高等院校热能与动力工程、低温制冷等专业教学用书,亦可作为从事制冷空调工作的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

冷库技术 / 周前,邢燕主编. —徐州:中国矿业大学出版社,
2009.9
ISBN 978 - 7 - 5646 - 0427 - 1

I. 冷… II. ①周…②邢… III. 冷藏库—制冷技术—高等学校—教材 IV. TB657.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 137622 号

书 名 冷库技术
主 编 周 前 邢 燕
责任编辑 潘俊成
责任校对 杨 洋
出版发行 中国矿业大学出版社(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
排 版 中国矿业大学出版社排版中心
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
经 销 新华书店
开 本 787×1092 1/16 印张 21 字数 524 千字
版次印次 2009 年9月第 1 版 2009 年9月第 1 次印刷
定 价 32.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

随着社会的进步与发展,人们对其生活质量与品质要求越来越高,从而促进了冷藏业的发展。冷库的数量和容量每年都在迅速增长。冷库是发展冷藏业的基础设施,也是在低温条件下贮藏货物的建筑群。目前由于制冷业的发展,需要很多从事制冷、冷藏、冷库行业的高等人才。为培养高等工程技术人才,特组织从事多年一线教学工作的教师及专家参与本书的编写。

本书是为普通高等院校热能与动力工程、低温制冷等专业编写的专业课教材,亦可供从事制冷空调工作的工程技术人员自学和参考使用。

本课程是在学生已经学习了低温制冷原理、制冷机与制冷设备等专业理论基础课程的前提下,从实践的角度出发,去分析和解释实际工程中的问题。本书主要介绍冷库的制冷工艺设计方法和程序,包括制冷负荷的计算、机器设备的选型计算、制冷系统方案的确定、管径计算及管道布置、机房和库房布置、施工图纸的阅读与绘制、冷库建筑施工、制冷机与制冷设备的安装等内容。另外,就制冷系统的操作运行管理与维护、冷库的安全技术以及主要经济指标分析等方面内容也作了相应介绍。本书内容全面具体,系统性强,对近年来冷库制冷方面的新技术、新设备和新的研究成果都有较充分的介绍,便于读者自学设计与研究。

本书由河南城建学院周前、邢燕主编,全书共分十三章。第八章(第二、三、四节)、附录中附表由河南城建学院王增欣教授编写;第二章、第六章、第七章(第三节)、附录中附图由河南城建学院周前副教授编写;第四章、第五章由河南城建学院邢燕副教授编写;第一章、第十三章由河南城建学院蒋建飞编写;第十一章、第十二章由河南城建学院王万召编写;第七章(第四、五节)、第九章由河南城建学院刘恩海编写;第七章(第一、二节)、第十章由河南城建学院虞婷婷编写;第三章(第一、二、三、八节)由河南城建学院宋艳苹编写;第三章(第四、五、六、七、九节)、第八章(第一节)由河南城建学院王红阁编写。

在编写本书过程中,参阅了大量相关书籍和资料,借此向这些作者和单位表示衷心感谢。此外,还得到了河南城建学院领导、教务处教材科领导和建筑环境与能源工程系领导及老师们的大力支持和帮助,在此也向这些关心和帮助过我们的领导、老师致以诚挚的谢意。

限于作者编写水平和时间,书中缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2009年5月

目 录

第一章 制冷的基本知识	1
第一节 制冷的基本原理和方法	1
第二节 制冷的热力学基础和计算	2
第三节 湿空气的物理性质	6
第四节 制冷用传热学的基础知识	8
第二章 制冷剂 and 载冷剂	12
第一节 制冷剂的种类和性质	12
第二节 载冷剂的种类和性质	24
第三节 系统用润滑油的性能	27
第三章 制冷压缩机及制冷设备	31
第一节 活塞式制冷压缩机	32
第二节 螺杆式制冷压缩机	38
第三节 离心式制冷压缩机	42
第四节 冷凝器的类型和构造	48
第五节 冷凝器的设计计算	53
第六节 蒸发器的类型和构造	55
第七节 蒸发器的设计计算	62
第八节 节流机构	63
第九节 辅助设备	67
第四章 冷库建筑的概述	76
第一节 冷库建筑的基础知识	76
第二节 冷库建筑的类型和特点	79
第三节 冷库的隔热、防潮及地坪结构的防冻处理	83
第四节 冷库围护结构隔热层的计算	87
第五节 冷库围护结构隔热、防潮材料及选择	90
第六节 冷库制冷设备和管道的隔热	95
第七节 冷库的平面布置	99
第五章 冷库的辅助建筑	101
第一节 冷库门的使用和构造	101

第二节 辅助用房	105
第三节 穿堂及装卸月台的设计	107
第四节 冷库内运输设施	111
第五节 食品贮存的机械设备	112
第六章 冷库设计基础	114
第一节 冷库库房容量和冷加工能力的设计	114
第二节 冷库制冷热负荷的设计	117
第三节 冷库冷却设备负荷和机械负荷的设计	122
第四节 冷库制冷设备的选择	124
第五节 冷库制冷系统辅助设备的选择	128
第七章 冷库制冷系统	132
第一节 冷库制冷系统	132
第二节 机房系统和设备	137
第三节 冷库制冷系统的融霜	143
第四节 氨制冷系统的设计	145
第五节 氟制冷系统的设计	147
第八章 食品的冷加工技术	152
第一节 食品的热物理特性	152
第二节 食品的低温贮藏	154
第三节 食品冷加工原理	157
第四节 食品冷藏条件	162
第九章 食品的冷冻工艺和设备	166
第一节 食品的冷冻工艺	166
第二节 食品的冷却方法和设备	168
第三节 食品的冻结方法和装置	174
第四节 食品解冻	183
第十章 气调贮藏和设备	187
第一节 果蔬的组成和特性	187
第二节 气调冷库的建筑特点	189
第三节 果蔬的气调贮藏和设备	191
第四节 气调贮藏的管理	197
第十一章 商业冷冻和冷藏运输设备	202
第一节 食品冷藏链概述	202

第二节 商业和家用冷冻冷藏设备·····	204
第三节 冷藏运输技术和设备·····	216
第十二章 制冰的原理和设备·····	229
第一节 冰的分类和制冰方法·····	229
第二节 间接冷却制冰·····	230
第三节 直接冷却制冰·····	239
第四节 冰的贮藏·····	246
第十三章 冷库技术的发展·····	249
第一节 装配式冷库·····	249
第二节 夹套冷库·····	256
第三节 气调冷库·····	259
第四节 立体式自动化冷库·····	268
第五节 制冷装置的运行和维护·····	274
第六节 冷库的管理和节能·····	277
参考文献·····	287
附录 1 ·····	289
附录 1 ·····	313

第一章 制冷的基本知识

第一节 制冷的基本原理和方法

一、概述

制冷技术是冷库技术的基础。用人为的方法消耗一定的外界能量,迫使热量从需要冷却的物质转移给温度较高的周围介质,从而获得人们所需要的各种低温的过程称为制冷过程,简称为“制冷”,其相对应的技术即为“制冷技术”,冷库是制冷方面的应用。制冷有三种形式:冷却、冷藏、冷冻。使高温物体降温到常温状态为冷却;使物体的温度低于常温保存为冷藏;而冷冻是指从物体吸走热量,使物体中的水分成为冻结状态。

制冷技术的发展与应用源远流长。早期的制冷是利用天然冷源制冷,即利用天然冰的融化吸热和低温深水井的吸热升温,使环境中的介质冷却下来。天然冷源的制冷受到地区、季节和贮存条件的限制,难以实现 0°C 以下的制冷要求,使用局限性大。随着工农业的发展和科学技术的进步,人工制冷的方法代替了天然冷源制冷,得到了越来越广泛的应用。目前,冷库技术中的冷源均为人工制冷。

人工制冷的方法很多,常见的有液体汽化制冷、气体膨胀制冷、涡流管制冷和热电制冷。其中液体汽化制冷的应用最为广泛,它是利用液体汽化时的吸热效应而实现制冷的。蒸汽压缩式、吸收式、蒸汽喷射式和吸附式制冷都属于液体汽化制冷方式。由于蒸汽压缩式制冷具有制冷设备体积较小、调节控制方便、运行可靠、制冷量较大等特点,因而是冷藏、冷冻中的主要制冷方式。

二、蒸汽压缩式制冷原理

液体汽化形成蒸汽。当液体处在密闭的容器内时,若容器内除了液体及液体本身的蒸汽外不存在任何其他气体,那么液体和蒸汽在某一压力下将达到平衡,这种状态称为饱和状态。此时容器中的压力称为饱和压力,温度称为饱和温度。饱和压力随温度的升高而升高。如果将一部分饱和蒸汽从容器中抽出,液体中就必然要再汽化一部分蒸汽来维持平衡。液体汽化时,需要吸收热量,该热量称为汽化潜热。液体所吸收的热量来自被冷却的对象,因而使被冷却的对象变冷,或者使它维持在环境温度以下的某一低温。

为了使上述过程能够连续进行,必须不断地从容器中抽走蒸汽,再不断地将液体补充进去。通过一定的方法把蒸汽抽走,并使它凝结成液体后再回到容器中,就能满足这一要求。若容器中的蒸汽自然流出,直接凝为液体,则要求冷却介质具有的温度比液体蒸发的温度还要低,这种冷却介质显然无法寻觅,所以我们希望蒸汽的冷凝过程在常温下进行,产生制冷效应,又在常温、高压下冷凝,向环境温度的冷却介质排放出热量。由此可见,液体汽化制冷循环由工作介质(简称工质)低压下汽化、蒸发升压、高压气体液化和高压液体降压 4 个基本过程组成。

蒸汽压缩式制冷系统如图 1-1 所示。系统由压缩机、冷凝器、膨胀阀和蒸发器组成,用管道将其连成一个封闭的系统。工质在蒸发器内与被冷却对象发生热量交换,吸收被冷却对象的热量并汽化,产生的低压蒸汽被压缩机吸入,经压缩后以高压排出。压缩过程需要消耗能量。压缩机排出的高温高压气态工质在冷凝器中被常温冷却介质(水或空气)冷却,凝结成高压液体。高压液体流经膨胀阀时节流,变成低压、低温湿蒸汽,进入蒸发器,其中的低压液体在蒸发器中再次汽化制冷,如此周而复始。

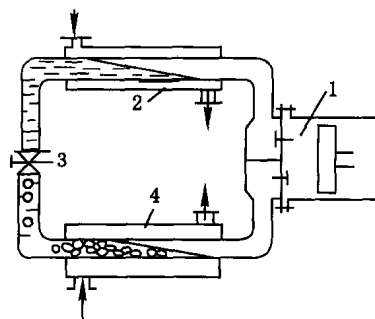


图 1-1 蒸汽压缩式制冷系统

1——压缩机;2——冷凝器;3——膨胀阀;4——蒸发器

在蒸汽压缩式制冷系统中,制冷剂从某一状态开始,经过各种变化状态,又回到初始状态。在这个周而复始的热力过程中,每一次都消耗一定的机械能(电能)从低温物体中吸出热量,并将此热量转移到高温物体。改变制冷剂状态,完成制冷剂作用的全过程被称为制冷循环。

① 蒸发过程——节流降压后的制冷剂液体(混有饱和蒸汽)进入蒸发器,从周围介质吸热蒸发成气体,实现制冷。在蒸发过程中,制冷剂的温度和压力保持不变。从蒸发器出来的制冷剂已成为干饱和蒸汽或稍有过热度的过热蒸汽。物质由液态变成气态时要吸热,这就是制冷系统中使用蒸发器吸热制冷的原因。

② 压缩过程——压缩机是制冷系统的核心,在压缩机完成对蒸汽的吸入和压缩过程中,把从蒸发器出来的低温、低压制冷剂蒸汽压缩成高温高压的过热蒸汽。压缩蒸汽时,压缩机要消耗一定的外能,即压缩功。

③ 冷凝过程——从压缩机排出来的高温高压蒸汽进入冷凝器后与冷却剂进行热交换,使过热蒸汽逐渐变成饱和蒸汽,进而变成饱和液体或过冷液体。冷凝过程中制冷剂的压力保持不变。物质由气态变为液态时要放出热量,这就是制冷系统要使用冷凝器散热的道理。冷凝器的散热常采用风冷或水冷的形式。

④ 节流过程——从冷凝器出来的高压制冷剂液体通过减压元件(膨胀阀或毛细管)被节流降压,变为低压液体,然后再进入蒸发器重复上述的蒸发过程。

上述 4 个过程依次不断循环,从而达到制冷的目的。

第二节 制冷的热力学基础和计算

一、热力学状态参数

自然界的物质的基本状态分为气态、液态和固态 3 种,它们在一定的条件下可以相互转化。气体是物质 3 种基本状态中的一种。为了描述气体的各种特征,必须用某些物理量来确定和描述气体的性质,这些物理量称为气体的状态参数。热力学中常用的状态参数有温度、压力、体积、内能、焓、熵。其中,温度、压力和体积是基本状态参数,它们在制冷技术中有

着非常重要的意义。

1. 温度

温度是物体冷热程度的度量,它取决于物体内部分子运动的速度。分子运动的速度越快,物体的温度就越高。表示温度的标尺称为温标,常用的有摄氏温标、华氏温标和热力学温标。

① 摄氏温标 t ,单位是 $^{\circ}\text{C}$,把标准大气压下纯水结冰时的温度定义为 0°C ,沸腾的温度定义为 100°C ,中间作100等份,每一等份称为 1°C 。

② 华氏温标 t_F ,单位是 $^{\circ}\text{F}$,把纯水在标准大气压下的冰点定义为 32°F ,沸点定义为 212°F ,中间作180等份,每一等份称为 1°F 。华氏温标分度较细,欧美国家采用较多。

华氏温标与摄氏温标之间的换算关系为:

$$t = \frac{5}{9}(t_F - 32) \quad (1-1)$$

③ 热力学温标 T ,又称开氏温标,单位是K。热力学温标选用水的气、液、固三相平衡共存的状态点为基准点,并规定其温度为 273.16 K 。其分度与摄氏温标基本相同,将纯水的冰点和沸点之间的温度分为100等份,每一等份称为 1 K 。即摄氏温度的零点($t=0^{\circ}\text{C}$)相当于热力学温度的 273.15 K ,而沸点($t=100^{\circ}\text{C}$)相当于 373.15 K ,两种温标的温度间隔完全相同。根据热力学理论, 0 K 时物质内分子热运动的速度为零。通用的国际单位制温度以开尔文(K)表示。

开氏温标与摄氏温标之间的换算关系为:

$$T = t + 273.15 \quad (1-2)$$

2. 压力

压力是均质流体对其容器壁的单位面积所施加的垂直作用力,又称压强。在国际单位制中,压力的单位为 Pa (帕斯卡), $1\text{ Pa}=1\text{ N/m}^2$ 。

大气层中的空气由于其重量而产生的施加在地球表面上的压力,称为大气压(p_b)。一个标准大气压(1 atm)一般用施加在海平面上的大气压力来衡量,经过测量得出这个数值大约等于 $1.01 \times 10^5\text{ N/m}^2$ 。容器内工质的实际压力称为绝对压力,以 p 表示。热力计算中所用到的压力均为绝对压力。测量压力的仪器通常是用来测量流体的压力与大气压之间的差值,而不是流体的绝对压力。测出的高于大气压的压力称为表压力(p_g)。绝对压力、表压和大气压三者之间的关系为:

$$p = p_b + p_g \quad (1-3)$$

当流体产生的压力低于当地大气压时,这个压力与大气压之间的差值就称为真空度(p_v)。绝对压力、大气压和真空度三者之间的关系为:

$$p_v = p_b - p \quad (1-4)$$

任何气体在分子运动时都具有一定的压力。湿空气由于空气和水汽组成,它们都具有各自的压力,叫做分压力,二者之和组成空气的总压力。水汽分压力的大小反映了空气中含有水汽量的多少,水汽的最大压力称为对应温度下水汽饱和压力。空气温度越高,则空气中水汽的饱和压力越大。空气中水汽达到饱和分压力,则空气不再吸收水分,称为饱和空气。

3. 比容和密度

比容 v 指单位质量工质所占据的容积,单位是 m^3/kg ;密度 ρ 是某种物质单位体积的质

量,单位是 kg/m^3 。

$$\nu = \frac{V}{m} \quad (1-5)$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-6)$$

式中, V 为体积, m 为工质质量。

物质的密度和比容会随着温度和压力的变化而变化,尤其是液体和气体。

4. 内能

内能就是物质内部的能量。广义地说,它包括分子的内位能、内动能、原子能、化学能、电能等。就热力学的范围来说,内能就是分子的内动能与内位能之和。内动能是分子由于运动而具有的能量,只与物质的温度有关。内位能是分子间由于相互作用而具有的能量,主要与物质的比体积有关。由于理想气体的分子间没有作用力,所以理想气体的内能只取决于气体的温度。

内能的单位是 kJ 。单位质量工质的内能称为比内能,用 U 表示,单位是 kJ/kg 。内能的绝对值无法测定,在热力计算中也并不需要。工程上常把某一温度,如 0 K 或 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 时气体的内能定为 0 ,以此进行内能变化时的计算。

5. 焓

焓 H 是物质所含有的内能和推动功(压力位能)之总和。它是一个复合的状态参数,对于描述流动工质的能量关系非常有用,是一个非常重要的概念。焓的单位是 J 或 kJ 。单位质量工质的焓称为比焓 h ,单位是 kJ/kg 。

$$H = U + pV \quad (1-7)$$

$$h = u + pv \quad (1-8)$$

式中, pV 为推动功; pv 为比推动功。

由焓的定义可知,当 1 kg 工质通过一定的界面流时,如热力系统,储存于它内部的内能 u 和它从后面获得的推动功 pv 一起都被带进了系统,也就是带进了焓,而不仅仅是内能。在热力设备中,工质总是不断地从一处流到另一处,所以在热力工程的计算中,焓比内能有更加广泛的应用。

与内能一样,在热力过程的计算中,焓的绝对值无关紧要,也无法计算,只计算其变化值。

6. 熵

熵 S 是一个导出的状态参数,在热力学中熵的定义式为:

$$ds = \frac{dq}{T} \quad (1-9)$$

式中, ds 为可逆过程的比熵变化量; dq 为可逆微元过程的传热量; T 为工质绝对温度。

式(1-9)表明,在微元过程中,工质熵的变化等于工质在微元可逆过程中与外界交换的热量与传热时工质的热力学温度的比值,表征了工质状态变化时其热量传递的程度。熵是热力状态自发实现可能性的度量,也用来度量工质不可用能的大小。

二、物态、状态及其变化

1. 物态及其变化

物质有三种不同的存在形式(也称作相):固态、液态和气态。在一定的条件下,三态

(相)之间可以互相转化,这就是物态变化。通常气体变为液体的过程称为冷凝或液化,并在过程中放出热量;液体变为固体的过程称为凝固,同样放出热量;固体变为液体的过程称为熔(融)化或熔解,并伴随吸收热量;液体变为气体的过程称为汽化或蒸发,汽化过程也是吸热过程;固体直接变为气体的过程称为升华,升华过程也伴随吸热。物质在状态变化过程中总伴随着吸热或放热现象。

汽化有蒸发和沸腾两种方式。液体表面的分子由于热运动而离开液面,逸入空间,称为蒸发。液体的蒸发在任何实际条件下均能发生。液体表面和内部的分子同时发生汽化现象,称为沸腾。这种现象只有在分子热运动的平均动能达到一定强度,即液体的温度达到沸点时才会发生。在不同压力下,有不同的沸腾温度。液体在一定压力下,加热到一定温度时发生沸腾,此时所对应的温度称为相应压力下的饱和温度。液体在沸腾过程中温度始终不变。

冷凝与蒸发是工质相反的两个可逆过程。在同一条件下,冷凝潜热等于汽化潜热。气体在冷凝过程中温度始终不变。同一物质在同一压力条件下,气体的冷凝温度即液体的蒸发温度,譬如在蒸发过程中,锅内水蒸气压力为1个标准大气压时,100℃既是蒸发温度,也是冷凝温度。

2. 饱和、过冷和过热状态

发生沸腾的温度和压力条件称为饱和状态,沸点从技术角度而言指的就是饱和温度和饱和压力。在饱和状态下,物质存在的状态可以是液体、蒸汽或气液混合物。在饱和状态下的蒸汽称为饱和蒸汽,饱和状态下的液体称为饱和液体。

饱和蒸汽是处于沸腾温度时的蒸汽,饱和液体是处于沸腾温度时的液体。饱和液体与饱和蒸汽的混合物称为湿蒸汽。饱和蒸汽在湿蒸汽中的质量比例,称为干度。当蒸汽的温度高于饱和温度(沸点)时,就称为过热蒸汽,而当液体温度低于饱和温度时就称为过冷液体。过热蒸汽与饱和蒸汽温度之差称为过热度。

对于给定的压力,过热蒸汽和过冷液体可以处于许多不同的温度,但是,饱和蒸汽或液体对于给定的压力只存在一个对应的温度值。

工程上已经制作了许多物质的饱和参数表,列出了这些物质的饱和温度和相应的饱和压力以及其他一些饱和状态的参数。水的饱和参数表常被称作饱和蒸汽表,书后附录中可以查到水的饱和参数表。

三、热力学基本定律

1. 热力学第一定律

热力学第一定律是能量守恒和转换定律在热力学中的具体体现和应用,是热力学基本定律之一。热力学第一定律说明了热能和机械能之间相互转换的关系,其意义是:在所有情况下,当一定量的热能消失时,则必定产生一定量的机械能,反之亦然。也就是说,能量的形式可以相互转换,其总量保持不变。

热力学第一定律指出了热力过程中能量平衡的基本关系,是进行热力分析和计算的基础。

2. 热力学第二定律

热力学第二定律的表述方法有很多种,常见的有两种:

① 克劳修斯说法——不可能把热从低温物体传到高温物体,而不引起其他变化。克劳

修斯的表述也相当于:不可能制造成这样一台机器,在一个循环动作后,只是将热量从低温物体传送到高温物体而不产生其他影响,这种机器就是制冷机。

② 开尔文说法——不可能从单一热源吸取热量使之完全变成功,而不发生其他变化。从单一热源吸热做功的循环热机称为第二类永动机,所以开尔文说法的意思是第二类永动机无法实现。

以上两种叙述,由于观察的现象不同,一个是热能的转移,一个是能量的转换。形式虽然不同,但其实质都是一样的,阐明的都是能量存在着质的差别和能量的质的变化规律。

在制冷工程中,正是按照热力学第二定律所揭示的原理,消耗一定的能量(机械能、电能或其他形式能量),使得热量从低温热源(蒸发器)转移到高温热源的(冷凝器)。

四、热效率和制冷系数

根据热力学第二定律可知,当以热能转为机械能做功时(即热机或发动机),总要损失一定的热量。如果消耗了 Q 热量,其中转换成机械功为 W ,可建立式(1-10)。

$$\eta = \frac{W}{Q} \quad (1-10)$$

式中, η 称为热机的热效率, η 总是小于 1, 是评价热机工作性能好坏的重要参数。

对于反向工作的制冷机来说,如果制冷机将 Q_c 的热量从低温物体中排至高温物体中,消耗的机械功为 W ,则可建立式(1-11)。

$$\epsilon = \frac{Q_c}{W} \quad (1-11)$$

式中, ϵ 称为制冷机的制冷系数,可大于 1,也可小于或等于 1,是衡量制冷循环和经济性的重要指标。

第三节 湿空气的物理性质

当周围的空气是由于空气和水蒸气组成的混合物时,称为湿空气。用湿空气作干燥介质时,湿空气应是不饱和的热空气,其水汽分压低于同温度下的饱和蒸汽压。干燥操作压力通常都较低(常压或减压操作),可将湿空气按理想气体处理。在对流干燥中,湿空气中水蒸气的含量是随干燥过程的进行逐渐增加的,但其中的干空气的数量是不变的,因而湿空气的性质都以单位质量干空气为基准进行计算。

1. 绝对湿度

绝对湿度 ρ_w 表示 1 m^3 的湿空气中所含水分的质量,常用单位为 g/m^3 。绝对湿度只能说明湿空气中实际所含水蒸气的多少,而不能说明湿空气所具有的吸收水蒸气的能力大小。

$$\rho_w = \frac{1}{v_w} = \frac{p_w}{R_w T} \quad (1-12)$$

式中 p_w ——湿空气中水蒸气的分压力, Pa;

v_w ——湿空气中水蒸气的分压力, m^3/kg ;

T ——湿空气的绝对温度, $^{\circ}\text{C}$;

R_w ——水蒸气的气体常数, $R_w = 461.5 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

由于在湿空气的状态变化过程中,其体积和质量是变化的,即使湿空气的水汽含量不

变,由于温度变化其体积也会随着变化,绝对湿度用体积作为参数,所以绝对湿度也随着变化,这样就不能反映空气中的水汽含量的多少。

绝对湿度的最大限度是饱和状态下的最高湿度。绝对湿度只有与温度一起才有意义,因为空气中能够含有的湿度的量随温度而变化。在不同的高度,绝对湿度也不同,因为随着高度的变化,空气的密度也在变化。但绝对湿度越靠近最高湿度,随高度的变化就越小。

2. 相对湿度

相对湿度 ϕ 又称相对湿度百分数,是指在一定总压下,湿空气中水蒸气分压 p 与同温度下的饱和水蒸气压 p_s 之比,称为湿空气的相对湿度:

$$\phi = \frac{p}{p_s} \times 100\% \quad (1-13)$$

相对湿度表明了湿空气的不饱和程度,反映了湿空气吸收水分的能力。 ϕ 值越大,表示空气越潮湿,吸收水分的能力越差。 $\phi=100\%$ 时,空气已被水蒸气饱和,不能再吸收水汽。 ϕ 越小,即 p 与 p_s 差距愈大,表示湿空气偏离饱和程度愈远,空气越干燥,能够吸收越多的水分。 $\phi=0$ 时,为干空气。

通常可用干球温度 t 、湿球温度 t_w 来确定湿空气的相对湿度。

用普通温度计测得的湿空气的温度称为干球温度,用 t 表示,单位有 $^{\circ}\text{C}$ 或 K 。干球温度为湿空气的真实温度。

用水润湿的纱布包裹温度计的感温球,湿纱布的一端浸入水中,使之始终保持湿润,这样就构成湿球温度计。将它置于一定温度和湿度的流动的空气中,达到稳态时所测得的温度称为空气的湿球温度,以 t_w 表示。湿球温度是说明湿空气所处状态的物理量,不代表湿空气的真正温度。

根据测得的干球温度和湿球温度,可用式(1-14)计算出空气的相对湿度:

$$\phi = \frac{p_{w.b} - A(t - t_w)p}{p_b} \quad (1-14)$$

式中 $p_{w.b}$ ——湿球温度 t_w 下的饱和蒸汽分压力, Pa ;

p_b ——干球温度 t 下的饱和蒸汽分压力, Pa ;

p ——测量地点实际大气压力, Pa ;

A ——干湿球温度计系数,可按照式(1-15)计算。

$$A = 0.000\,01 \left(65 + \frac{6.75}{w} \right) \quad (1-15)$$

式中, w 为流过湿球表面的风速, m/s 。

3. 含湿量

湿空气的含湿量 d ,指 1 kg 干空气中所含的水蒸气质量,表示湿空气的湿度:

$$d = 1\,000 \frac{m_w}{m_a} = 1\,000 \frac{\rho_w}{\rho_a} \quad (1-16)$$

式中 m_w ——湿空气中含有的水蒸气的质量, kg ;

m_a ——湿空气中含有的干空气的质量, kg 。

当空气在含湿量不变的情况下进行冷却,因为表面的空气含湿量超过了饱和含湿量,空气中的水凝结出来,直到 $\phi=100\%$ 时,所对应的温度即为露点温度。显然,空气的露点温度只取决于空气的含湿量。含湿量不变,露点温度也不变,含湿量降低,露点温度也降低。常

采用冷冻水的温度低于空气的露点温度,将空气中的水蒸气凝结出来,以达到干燥空气的目的。

4. 湿空气的密度

湿空气的密度用 1 m^3 湿空气中含干空气的密度和水蒸气的密度的总和来表示。当大气压力和绝对温度 T 不变时,湿空气的密度将永远小于干空气的密度,即湿空气比干空气轻。同时,湿空气的密度随着相对湿度的增大而减小。

5. 湿空气的焓

湿空气的焓为 1 kg 干空气的焓与其所带 $0.001d \text{ kg}$ 水蒸气的焓之和,单位为 kJ/kg 。湿空气的焓近似为:

$$h = h_a + 0.001d h_v = 1.005t + 0.001d(2501 + 1.89t) \quad (1-17)$$

式中 h_a —— 1 kg 干空气的焓;

h_v —— 1 kg 水蒸气的焓。

湿空气各性质参数之间相互关联,因而可以用曲线在坐标轴上表示其相互关系,所得坐标图在工程上称为湿空气的湿度图。用焓—湿度图可以确定空气状态点,查取湿空气的状态参数。

第四节 制冷用传热学基础知识

温差是推动热量传递的动力。凡是有温度差的地方,就会有热量自发地从高温物体传向低温物体,或是从物体的高温部分传到物体的低温部分。自然界中温差无处不在,所以热量传递就是自然界和生产技术中一种普遍存在的现象。自然界中存在三种基本的热量传递方式:热传导、热对流、热辐射。这三种方式可能单独存在,也可能以不同的组合形式存在。

一、热传导(导热)

热传导指物体各部分无相对位移或不同物体直接接触时依靠分子、原子以及自由电子等微观粒子热运动而进行的热量传递现象。

当物体内部存在温度差(也就是物体内部能量分布不均匀)时,在物体内部没有宏观位移的情况下,热量会从物体的高温部分传到低温部分。此外,不同温度的物体互相接触时,热量也会在相互没有物质转移的情况下,从高温物体传递到低温物体。

热传导可以在固体、液体、气体中发生。在引力场下,单纯的导热一般只发生在密实的固体中,这是因为在有温差的情况下,液体和气体有可能出现热对流而难以维持单纯的导热。

傅立叶定律是分析研究导热问题的基础。傅立叶定律的数学表达式为:

$$q = -\lambda \text{grad } t = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} n \quad (1-18)$$

或

$$\Phi = -\lambda A \text{grad } t = -\lambda A \frac{\partial t}{\partial n} n \quad (1-19)$$

式中 $\text{grad } t$ ——空间某点的温度梯度;

n ——通过该点的等温线上的法向单位矢量,并指向温度升高的方向;

q ——为该点的热量密度矢量,单位时间内通过单位面积的热量, W/m^2 ;

Φ ——热流量,单位时间内通过某一给定面积的热量, W ;

A ——垂直于导热方向的面积, m^2 ;

λ ——材料的导热系数(或称热导率),代表单位温差、单位厚度在单位时间内所传导的热量, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

负号代表热流密度与温度梯度的方向刚好相反。傅立叶定律直接给定了热流密度和温度之间的关系。

导热系数 λ 表示材料导热能力大小,是物理参数,其数值一般由实验确定。不同的物质有不同的导热系数,即使是同一种材料,还与温度、湿度、密度等因素有关。一般说来,良导体也是良导热体,金属的导热系数最高,液体的导热系数次之,气体的导热系数最小。例如,20℃时,纯铜的导热系数是398 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,水为0.6 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。由此可见,不同形态的物质的导热系数的量级不一样。

把导热系数小的材料称为保温材料(或隔热材料、绝热材料)。我国规定,凡是平均温度不高于350℃时导热系数不大于0.12 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的材料称为保温材料。

下面介绍常用的导热公式。

通过多层大平壁的导热公式:

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (1-20)$$

式中 q ——热流密度,单位时间内通过单位面积的热流量, W/m^2 ;

λ_i ——第 i 层平壁的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

δ_i ——第 i 层平壁厚度, m ;

t_1, t_{n+1} ——多层平板两侧温度,℃。

通过多层圆筒壁的导热公式:

$$\Phi = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi\lambda_i l} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} \quad (1-21)$$

式中 l ——圆筒壁长度, m ;

d_i, d_{i+1} ——第 i 层圆筒壁的内、外径, mm 。

二、热对流和对流传热

由于流体的宏观运动,从而使流体各部分之间发生相对位移,冷热流体相互掺混所引起的热量传递过程称为热对流。热对流仅发生在流体中。由于流体中不可避免地存在温差,对流的同时必伴随着导热现象。流体总是要和固体壁面相接触,在工程中应用最广的是流体与固体壁面直接接触时的换热过程,称为对流传热。

由于流动起因的不同,对流传热可以区别为强制对流传热与自然对流传热两大类。强制对流中流体的流动是由于泵、风机或其他外部动力源所造成的;而自然对流是由于流体内部的密度差所引起。两种流动的成因不同,流体中的速度场也有差别,所以换热规律不一样。在换热过程中,如果流体发生相变,则为有相变的对流传热,若沸腾或凝结,流体相变热(潜热)的释放或吸收起主要作用。无相变的对流传热,其热量交换过程由于流体显热的变

化而实现的。

计算对流传热热流量的基本关系式为牛顿冷却定律：

$$q = h\Delta t \quad \text{或} \quad \Phi = Ah\Delta t \quad (1-22)$$

式中 h ——比例系数(表面传热系数), $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

Δt ——壁面温度与流体温度的差值,取正值, $^{\circ}\text{C}$ 。

表面传热系数为单位温差作用下通过单位面积的热流量。表面传热系数的大小与传热过程中的许多因素有关。它不仅取决于物体的物性、换热表面的形状、大小相对位置,而且与流体的流速有关。

一般地,就介质而言,水的对流传热比空气强烈;就换热方式而言,有相变的对流传热强于无相变的;强制对流传热强于自然对流。对流传热的这些规律在制冷技术中得到了广泛的应用。各种泵和风机就是用来加快流体流速、增大表面传热系数的常用设备。

三、热辐射和辐射传热

物体通过电磁波来传递能量的方式称为辐射。因热的原因而发出辐射能的现象称为热辐射。辐射与吸收过程的综合作用造成了以辐射方式进行的物体间的热量传递,称为辐射换热。辐射换热是一个动态过程,当物体与周围环境温度处于热平衡时,辐射换热量为零,但辐射与吸收过程仍在不停地进行,只是辐射热与吸收热相等。

只要温度大于零就有热辐射,物体的辐射能力与其温度性质有关。热辐射不需中间介质,可以在真空中传递,而且在真空中辐射能的传递最有效,又称为非接触性传热。在辐射换热过程中,不仅有能量的转换,而且伴随着能量形式的转化。在辐射时,辐射体内热能转换为辐射能;在吸收时,辐射能转换为受射体的体内热能,因此,辐射换热过程是一种能量互变过程。

把吸收率等于1的物体称为黑体,它是一种假想的理想物体。黑体在单位时间内发出的辐射热量服从于斯特藩—玻耳兹曼定律,即:

$$\Phi = A\sigma T^4 \quad (1-23)$$

式中 Φ ——物体自身向外辐射的热流量,而不是辐射换热量;

T ——黑体的热力学温度, K ;

σ ——斯特藩—玻耳兹曼常数(黑体辐射常数), $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;

A ——辐射表面积, m^2 。

实际物体的辐射热流量根据斯特藩—玻耳兹曼定律的经验修正形式求得:

$$\Phi = \epsilon A\sigma T^4 \quad (1-24)$$

其中, ϵ 为实际物体的发射率(黑度),其大小与物体的种类及表面状态有关。

要计算辐射换热量,必须考虑投到物体上的辐射热量的吸收过程,即收支平衡量。

四、传热过程

热量由壁面一侧的流体通过壁面传到另一侧流体中去的过程称传热过程。对于稳态的传热过程,当固体壁面为平壁时,其计算公式为:

$$\Phi = \frac{A(t_{f1} - t_{f2})}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} \quad (1-25)$$

当固体壁面为圆筒壁时,其计算公式为: