

Nicholas P. Cheremisinoff 著

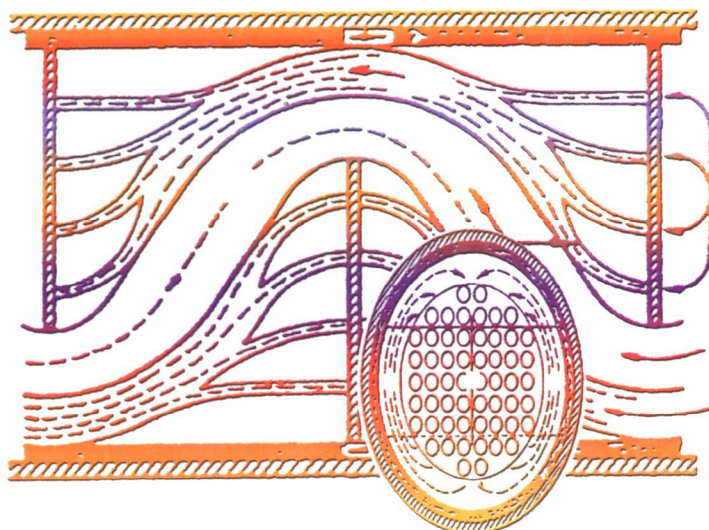


Handbook of Chemical Processing Equipment

化工过程设备

师树才 乔学福 杨盛启 等译

手册



中国石化出版社

化工过程设备手册

Nicholas P. Cheremisinoff 著

师树才 乔学福 杨盛启 等译

中国石化出版社

内 容 提 要

本书介绍了化工过程中各种类型设备的结构形式、工作原理、操作技巧及优化操作方法,尤其是对人们普遍关心的设备能力和特性参数的确定给出了经验公式,为设备设计、优化、采购提供了指导依据,从而使繁杂的计算变得简单易行。本书可供从事设备工作的技术人员和管理人员参考使用。

著作权合同登记 图字:01-2003-1641号

Copyright © 2000 by Butterworth-Heinemann, a member of the Reed Elsevier group. All right reserved.

《化工过程设备手册》(Nicholas P. Cheremisinoff 著)通过了 Elsevier Science Ltd. 的授权,公司地址为: Boulevard, Langford Lane, Kidlington, OX5 1GB, England.

中文版权(2003)为中国石化出版社所有。版权所有,不得翻印。

图书在版编目(CIP)数据

化工过程设备手册/Nicholas P. Cheremisinoff 著,师树才等译.
—北京:中国石化出版社,2003
ISBN 7-80164-463-8

I. 化… II. ①切… ②师… III. 化工设备—技术手册
IV. TQ052-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 093289 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com.cn

北京精美实华图文制作中心排版

北京大地印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

*

787×1092 毫米 16 开本 21.75 印张 563 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月第 1 次印刷

定价:65.00 元

译者前言

众所周知,设备是现代工厂的重要组成部分,特别是在化工及石油化工生产中,设备更是必不可少,且种类繁多。按其自身的工作特点,设备可分为动设备和静设备;按其在化工过程中的作用可分为传质、传热、蒸发、蒸馏、过滤、冷凝、干燥等设备。有关设备种类的书籍已出版了很多,但多数书籍往往只包括设备的几种类型或几种设备,很少见到有这么一本书,将全部(各种类型)设备涵盖进去或者将大多数设备包括在内,从而使从事设备工作的技术人员对设备有一个较全面的了解。

尼奇拉斯·P.车米逊沃夫博士(Nicholas. P. Cheremisinoff)所编纂的《化工过程设备手册》(Handbook of Chemical Processing Equipment)一书,可谓集设备种类之大全者。本手册主要介绍了化工过程中所遇到的各种类型设备的结构形式,简明扼要地叙述了其工作原理、操作技巧及优化操作方法,尤其是对人们普遍关心的设备能力和特性参数的确定给出了经验公式,为设备设计、优化、采购提供了指导依据,且使繁杂的计算变得简单易行。本书所收录的计算公式有很高的应用价值,这些计算公式是从事设备工作技术人员多年辛勤工作的经验积累和智慧结晶。

尼奇拉斯·P.车米逊沃夫博士是一位博学的学者和优秀的工程师,他从浩瀚的介绍设备和机械的书海中,去粗存精、沙里淘金,将通常所说的化工设备分类筛选编纂,沿着化工单元操作的这条线,将其串联起来,编制成册,从而给从事化工设备工作的同仁们提供了一本很好的工具书和参考书。

本手册共分为8章,依次介绍了换热设备、蒸发冷却设备、蒸发干燥设备、蒸馏设备、传质设备、机械分离设备、混合设备以及某些操作参数的计算。每章所介绍的设备都不相同,载入了丰富的设备信息。

受中国石化出版社委托,由多年从事设备开发、引进设备国产化、有着丰富设备管理经验的齐鲁石化分公司主管设备的副经理师树才同志,组织从事设备管理和工程设计工作的人员对本手册进行了翻译。参加翻译的同志有师树才、乔学福、杨盛启、王继昌、王清荣、王晓茸、朱明丽、朱藏柱、孙桂娟、孙学波、刘敬源、张春燕、宫宏、贾冬梅、耿卫东、韩立君、庞磊。因译者的外文和专业知识所限,不当之处在所难免,敬请读者谅解和指正。

作者简介

Nicholas P. Cheremisinoff 是许多组织和私人公司的一名顾问。在他的客户中,有世界银行组织(the World Bank Organization)、国际金融公司(the International Finance Corporation)、国际发展计划署驻美办事处(the United States Agency for International Development)、Chemonics 国际组织、Booz-Allen&Hamilton 合资公司和若干个私人公司。他有着广博的业务发展领域、项目融资能力,这些得益于他在前苏联一些国家的丰富工程经验。他还帮助一些公司进行私有化改组,开展设备改装工业特别是环保方面的建设。虽然他的职业是化学工程师,但他的工程和咨询经验还涉及另外一些工业领域,其中包括汽车制造、采矿、气体处理、塑料和石油炼制。他被公认为污染防治方面的权威,目前正领导着一项计划的实施,这个计划包括污染防治审查、环境管理培训、环境管理计划的开发以及通过国际信贷机构对环境项目的投资进行技术和可行性的研究。他对工业出版社作出了巨大的贡献,已编著、合著或编辑了 100 多部技术书籍,Cheremisinoff 已被 Clarkson 工学院授予学士、硕士和物理学博士学位。

序 言

化学工业每年有 4550 亿美元的业务,其产品范围从地质开发到油品、塑料、药品、保健品、食品添加剂及许多其他种类。随着市场占有率的迅速增长及世界上许多地区局势动荡,化学工业也在不断发生变化。纵观这些变化的工业领域,基本的单元操作工艺和设备仍应用于日常的生产中。尽管主要的工艺技术有了革新,但设备许多部件的工程学原理依旧基于 50 年前的研制结果。

《化工过程设备手册》可作为工艺工程师的基本参考书。尽管本书主要是为化工设备工程师而编写,但由于该书内容全,且有着深入的背景和原理介绍,因此其他行业的生产和工艺工程师也可借鉴其中。

本手册共分 8 章。第 1 章~第 3 章论述了应用于各类工业的换热设备,其范围包括工艺过程热交换、蒸发冷却、干燥和溶剂回收利用、湿度控制、结晶及其他设备。第 4 章和第 5 章其内容为多级传质设备,具体地说,第 4 章的内容为蒸馏,第 5 章的内容为吸收、吸附、萃取和膜技术等传统的传质设备。第 6 章主要讨论用物理或机械法进行质量分离的设备,这也包括沉降、离心分离和过滤分离的设备。第 7 章介绍混合设备和气-固流化床这样的各类连续接触设备。最后一章即第 8 章给读者提供了常用工艺过程的简便计算方法,其计算方法可以在个人计算机标准软件扩展表上方便地建立起来。

为了更深入地了解设备,每章提供了参考文献,包括关键网址。它可为用户提供更详尽的资料和设备选用原则。在一些章节中的示例计算,可以指导读者进行设计,并指导读者按比例的放大有益于设备规格的确定,以及初步设计的建立方面的有关方程式。

虽然作者尽力确保本书中所述内容准确无误,但均不能保证该书的内容可作为任何设计的理论依据。最后作者对 Butterworth-Heinemann 出版社精心出版本书表示衷心感谢。

第一章 换热设备	(1)
前言	(1)
热传递的基本概念	(3)
空冷式换热器	(7)
管壳式换热器	(15)
螺旋板式换热器	(22)
板 - 框式换热器	(25)
换热管的开裂	(27)
冷凝器	(31)
蒸汽驱动吸收冷却	(36)
结语	(37)
术语	(37)
参考文献	(38)
第二章 蒸发冷却设备	(40)
前言	(40)
热特性	(40)
结构设计	(43)
结构部件及材料	(46)
风机、电机和传动装置的应用	(49)
水处理设施	(53)
术语解释	(55)
参考文献	(57)
第三章 蒸发干燥设备	(58)
前言	(58)
蒸发器	(58)
干燥设备	(78)
结晶	(97)
参考文献	(102)
第四章 蒸馏设备	(103)
前言	(103)
蒸馏概述	(103)
碳氢化合物的基本特性	(115)



石油炼制	(127)
石油产品	(139)
醇类产品	(149)
结语和推荐网址	(151)
第五章 传质设备	(153)
前言	(153)
吸收设备	(153)
吸附设备	(171)
溶剂萃取	(198)
反渗透	(202)
参考文献	(204)
第六章 机械分离设备	(207)
前言	(207)
过滤设备	(207)
沉降设备	(248)
离心分离设备	(261)
参考文献	(274)
第七章 混合设备	(276)
前言	(276)
机械混合设备	(276)
搅拌设计	(286)
气-固接触	(302)
参考文献	(308)
推荐网址	(308)
第八章 过程计算	(310)
前言	(310)
真实气体热容比	(310)
气-液分离器尺寸的确定	(310)
多级锅炉的总效率	(311)
泵功率计算	(311)
泵效率的计算	(311)
石灰窑预涂助滤剂过滤机的估算	(312)

多效蒸发器的节汽估算.....	(313)
饱和蒸汽温度和潜热的估算.....	(314)
闪蒸罐凝液的估算.....	(314)
空气管路的线速度.....	(315)
气体的热导率.....	(316)
准临界特性值的确定.....	(317)
换热器温度的估算.....	(319)
气体粘度的估算.....	(320)
机械过热(蒸汽)降温器的估算.....	(322)
负吸入压力下泵的压头估算.....	(323)
背压式透平的计算.....	(323)
换热器管程污垢系数.....	(324)
管内介质流速的计算.....	(325)
多组分蒸馏的回收计算.....	(330)
估算平衡曲线.....	(330)
液化气体蒸发损失的估算.....	(330)
燃烧用空气的计算.....	(331)
搅拌罐中温度分布的估算.....	(331)
压缩机通用方程.....	(332)
间歇式蒸馏:瑞利(Rayleigh)方程式的应用.....	(334)

第一章 换热设备

前 言

在 19 世纪以前,人们就相信,一个物体的冷热程度可以通过这个物体所包含的“热”的多少来确定。热可以认为是从一个热物体流向一个冷物体的流体。此无重的流体叫做“热量”。人们认识到热和温度的区别,是在 Joseph Black(1728—1799)发表了论著后,Black 在他的论著中将热的量值(热量)和强度(温度)区分开来。1798 年, Benjamin Thomson 和 Count Rumford 发表一篇题为“关于由摩擦产生热源的讨论”的文章。Rumford 注意到,当在一根粗短管上钻孔时会产生大量的热。他怀疑一种物质流进了这根粗短管,并得出了以下结论:“对我来说很难理解的是:除了运动外,在这些试验中,还激发和传递了热,这样可能形成一种特殊理论,即任何物质能够进行激发并立即被传递。”

J. P. Joule 在 1847 年发表了一篇权威性的论文,将热的概念加以更正和澄清, Joule 断然指出,热是一种形式的能。Rumford, Joule 以及其他人的实验,论证了不同形式的能可以相互转换(Helmholtz 于 1847 年作了明确的阐明)。

当热转换成其他形式的能,或者其他形式的能转换成热能时,系统中能的总量(热加其他形式的能)是不发生变化的,这就是众所周知的热力学第一定律,即能量守恒定律。换句话说,能不是以机械能、热能、化学能出现就是以其他形式的能存在。要获得永动机,即一种能自身创造能量的机械是绝对不可能的。

围绕机器如何运行也可以进行第二种表述。一台蒸汽机利用热源去产生功,它能否将热能全部转化为功,使之有 100% 的效率呢?这可以用热力学第二定律来解释:任何循环机器都不可能将热能全部转化成其他形式的能,不可能制造一台机器,它不做其他功而产出热能并将热能转化为机械能。即使有那么一种循环机,它不做其他功而能将机械能转化为热能,则热力学第二定律仍然意味着某些过程是不可逆过程。譬如,将全部热能转化为机械能的过程。

Sadi Carnot (1796—1832) 对热机的效率进行了理论研究(一台将部分热转化为有用功的机器)。他试图做一台有可能达到最大效率的热机。Sadi Carnot 的理论成果为蒸汽机的实际改进以及热力学打下了基础。他描述了一台称之为 Carnot 机的理想发动机,也就是他所制造的最有效的发动机。他指出这台机器的效率可用下式表示:

$$\text{效率} = 1 - T''/T'$$

公式中的温度 T' 和 T'' , 分别指机器运转状态下冷和热的“储存库”,在此温标下,一台热机当它的最冷储存库为零度时其工作效率为 100%,这是零温度的定义。温度值采用绝对热力学或开氏温标。

根据温度的微观解释,气体温标和热力学温标表示方法是等同的。温度是一个微观测量值,它是由组成系统的微观粒子的不规则运动产生的结果。

几乎在热力学形成的同时, James Clerk Maxwell (1831—1879) 和 Ludwig Boltzmann (1844—1906) 研究开发了一种新理论, 即描述分子运动方式的理论——分子力学。指出组成理想气体的分子不停地运动, 就像台球一样彼此碰撞, 并从盛装气体的容器表面弹出, 伴随运动产生动能, 而这种运动接近理想气体状态, 从微观上得出了温度概念的解释。

每个分子所具有的动能的大小是其速度的函数。对于气体中的大量分子来说(即使在低压下), 其速度随时都会发生变化。许多粒子的速度变化非常快, 不可能出现两个粒子速度恰好一样的情况, 有些运动的可能非常快, 而其他的可能非常慢。

Maxwell 指出可以用一个函数来表示速度的分布, 这个函数叫做 Maxwell 分布函数。容器中分子的碰撞可产生气体的压力, Boltzmann 对分子碰撞施加到容器壁上的平均力进行了研究, 证明分子的平均动能恰好与测量的压力相匹敌, 平均动能越大, 压力越高。

由 Boyles 的定律可以知道, 压力与温度直接成比例。因此, 表明分子的动能直接与气体的温度有关, 用一个简单的热力学关系式表示, 即为:

$$\text{分子的平均动能} = 3kT/2$$

式中 k 为 Boltzmann 常数, T (温度)是对热运动能量的衡量。在温度为零时, 能量达到最小值(量子力学, 零指运动保持在 0K)

大约 1902 年, J.W. Gibbs (1839—1903) 引入了统计力学, 利用统计力学。他表明, 利用大量相同系统(称为集合)出现的某些参数, 并对这些参数的概率值进行分析, 可以预测一个系统参数具有什么样的平均值。另一方面, 用统计力学解释热力学时, 关键参数用温度表示, 此温度可以用 Maxwell 分布及理想气体法则直接与热力学温度相关联。

温度既可以用微观热力学的一个确定值来表示, 如热和功, 也可以用描述系统中粒子之间能量分布的一个等效式或等同值来表示。根据对此温度概念的理解, 可以解释为温度是多少热(热能)从一个物体流向另一个物体。

运动的分子携带热能, 通过分子碰撞, 部分能量可以转移到与之相连接的另一种物体的分子中, 这种转移热能的方式叫传导。

第二种热传递方式叫对流, 这可以用一壶放在炉子上加热到沸腾的水来证明。靠近火苗的热水不断上升并与壶顶部附近的冷水混合。对流包含了液体或气体中高能分子的自身运动。热能从一个物体转移到另一个物体的第三种方式是辐射, 太阳晒暖地球即是这种方式。阳光从太阳辐射到地球上, 地球吸收部分热能并导致表面温度升高。

在化学工业中, 主要设备(如热交换器, 或叫换热器)的设计、应用以及运转以这些经典的基本概念为基础。这些设备种类繁多而且应用也很广泛。然而, 这些设备的设计结构较普通, 即这些设备在一个工厂里不是特殊设备。1988 年, 在美国的化学工业中, 花费在与传热有关的设备上的费用就大于 7 亿美元, 其中, 大部分费用是由一个正不断发展壮大的环境立法(美国空气清洁法修正案)组织造成的。例如, 排放冷凝器的应用正在增加, 而排放冷凝器就是利用换热器来减少泄放量。过度排放使环境污染日趋严重, 换热器制造商已经对此做出了相应的反应, 他们正在开发一种无泄漏换热器, 这种换热器可避免工艺流体和挥发性有机化合物泄漏到大气中。弹性材料的多样性和其质量的提高使其用于换热器密封联结的垫片设计多样化, 而且其质量也在不断改善, 这引起了垫片密封换热器应用的不断增加。此外, 焊接连接(而非垫片连接)的换热器也能减少工艺物料泄漏的可能性。在 1990 年一年的时间里, 换热器已经引入到了非传统的应用领域。随着各种各样的设计革新, 在换热器选型方面, 给化工工程师提出了比以前更为广阔的选择空间。操作条件(易于检查和维护)以及与工

艺物料的适应性仅仅是化工工程师在确定换热器型式时所必须考虑的部分参数。其他因素还有：最大设计压力和温度；加热或冷却作用；维护要求；材料与工艺物料的适应性；垫片与工艺物料的适应性；物流清洁度以及温度趋近值等。本章介绍的是设备的一般概况，重点给出了这些系统的实际特征，并对工艺应用中的典型示例进行了讨论。

热传递的基本概念

在讨论化学工业中通常使用的典型设备之前，首先回顾一些与热传递有关的基本概念和定义。“热”这个术语，其物理意义是指：由于温度的不同，能量从物体的一部分传到另一部分(或者从一个物体传递给另一个物体)。倘若物体的体积保持不变，热会从具有较高温度的物质向具有较低温度的物质流动。若不出现其他形式的能量转换，如做功，热将不会从低温处向高温处流动。

19 世纪初以前，人们一直认为热是一种被称作热量的不可见物质，认为一个具有较高温度的物体比一个低温物体包含着更多的热量。然而，英国物理学家 Benjamin Thompson 和英国化学家 Sir Humphry Davy 分别于 1798 年和 1799 年提出了热(像功一样)是一种能量传递形式的论点。在 1840 年至 1849 年间，英国物理学家 James Prescott Joule 通过一系列的实验，断然证明了热是能量变换的一种形式，而且可以像功一样进行变化。

冷暖的感觉是由温度引起的。给一种物质加热不仅可以提高它的温度，而且还可以使它的某些性质发生改变，如物体的膨胀或收缩、电阻的变化、当物质是气态时还会发生压力变化。今天使用的温标有五种形式，它们是：摄氏、华氏、开氏、兰金以及国际热力学温标。

阻尼是指某种物体或物质阻止或反抗电子流动的特性，阻尼的单位是 ohm(欧姆)。阻尼的缩写用“ R ”表示，欧姆用希腊字符“ Ω ”表示。为了某些计算方便，将阻尼用其倒数表示，即 $1/R$ ，此倒数称为传导率(G)。传导率的单位为 mho(也就是 ohm 的倒写)，单位符号为“ $1/\Omega$ ”。

压力，从力学上来讲，是指一种液体或气体作用在某个物体或表面上的单位面积上的力，此力与作用面垂直而且在整个范围内大小相等。在美国，压力一般用 lbf/in^2 ^① (psi)^② 表示，国际上的习惯是用 kgf/cm^2 (或 atm ^③)表示。在国际公制单位制(SI)中，压力用 N/m^2 表示(国际单位制)。大多数压力表显示流体压力与当地大气压的差值。常见压力表的形式有：U 形管压力计，用于压差较小时的测量；布尔登压力计，用于较高压差时测量；压电计或静电传感计，可以迅速显示压力的变化；麦克里德气压计，用于气压非常低时的测量；辐射、电离或分子效应压力计可用于测量低气压(采用真空技术)。在大气中，减少具有一定高度的气柱的重量会导致其本身大气压力的降低。分压是混合气体中某单一气体施加的有效压力。大气中，总压力等于分压之和。

热量的多少可以用 cal 表示。1 cal^④ 是指 1 g 水在一个大气压下温度从 15 ℃ 升高到 16 ℃ 所需要的热量。此单位有时也叫小卡(或克卡)，以便将它与大卡(或千卡)^⑤ 区别开。1 大卡等于 1000 小卡。小卡在营养学的研究中经常用到。在工程实际中，英国和美国通常

① 1 in = 2.536 cm，以下同。② 1 lbf/in^2 (psi) = 6894.757 Pa，以下同。③ 1 kgf/cm^2 = 98.0665 kPa，以下同。④ 1 atm = 101.325 kPa，以下同。⑤ 1 cal = 4.1855 J，以下同。⑥ 1 kcal = 4.1868 kJ，以下同。

把热量用英热量单位(Btu)^①表示。1 Btu 等于给 1 lb^②水升高 1 °F^③所需的热量。1 Btu 等于 252 cal。

潜热^④也与我们的讨论有关。固体变成气体的过程叫做升华；固体变成液体叫溶解；液体变成蒸气叫蒸发。而产生这些相变所需的热量叫潜热。在一个大气压下，将盛装在开口容器中的水煮沸后，不管怎样给它加热，水温也不会超过 100 °C (212 °F)。这部分被吸收后而没有引起温度变化的热就是潜热。潜热不会消失，而是消耗在水变为蒸汽的相变中。

相律是一个描述平衡状态下化学系统特征的数学表达式。一个化学系统由多种化学物质组合而成，这些物质以气态、液态或固态存在。相律只适用于多元系统，且此多元系统由处于平衡状态的两种或多种不同性质的相组成。一个系统中所包含的气相不能多于一种，但可以包含其他任何数量的液相和固相。利用相律可以对大量的物理数据进行简单的关联，并对化学系统的特性进行有限的预测。此定律尤其适用于合金制备、化学工程以及地质学中。

热传递是指在不同温度下，热能在物体与物体之间，或同一物体的不同部位之间相互转换的过程。热传递一般通过辐射、对流或传导进行，也可能三者同时进行。

传导是绝缘固体热传递的惟一方法。如果一根金属棒一端的温度升高，热就会传到较冷的一端。人们认为，固体的热传导机理部分原因是由于固体中电子的自由运动引起的，这一理论更好地说明了电的良导体也往往是热的良导体。1882 年，法国数学家 Jean Baptiste Joseph Fourier 正式提出了一条定律，即，热通过一个物体某一区域的传导速率与此物体温度的变化成反比。如果将两个物体接触，传导也会在这两个物体之间发生。在固体表面与流动的液体或气体之间发生的传导叫对流。流体的运动可以是自然流动也可以是强制流动。如果给某一液体或气体加热，它的单位体积的质量一般会减少。如果给处于重力场中的物质加热，较轻的组分就会上升并扩散到较冷的区域，而较重的组分就会沉降，这种运动称为自然对流。将流体放入到不同的压力间就可获得强制对流，也就是按照流体力学定律使流体发生强制流动。

辐射既不同于传导，也不同于对流，因为辐射在交换热量时不需要物质之间的接触，甚至在真空隔离时也能实现。1900 年，德国物理学家 Max Planck 阐明了一个法则，指出：任何物质只要它具有一定的热力学温度值，都能够发出部分辐射能。温度越高，放出的能量就越大。物质除了能够发射能量外，还可以吸收辐射能。物质的吸收、反射及传播性能取决于辐射的波长。

热传递除了能够导致物质升温或降温之外，还可以引起物质的相变，如冰的溶化。在工程中，通常用这种性能来设计热传递工艺。例如：由于太空舱在返回大气时的速度非常快，我们通常在太空舱上装设一个隔离罩，通过隔离罩的熔化来防止太空舱内部过热。由大气产生的摩擦热，将使固体防护罩熔化成液体，而不会引起舱体温度的升高。

挥发是在不产生沸腾的情况下，液体向气体的逐渐变化。任何液体的分子都在不停的运动。分子的平均速度取决于温度，但有的分子的运动速度可能比平均速度要快的多，而有的就要慢许多。在温度低于沸点时，靠近液体表面且运动速度较快的分子可能会有足够的能量

① 1 Btu = 1055.056 J，以下同。② 1 lb = 0.45359237 kg，以下同。③ $\frac{1}{°F} = \frac{9}{5} \frac{1}{°C} + 32 = \frac{9}{5} \frac{1}{K} - 459.67$ ，以下同。

④ “潜热”现称为“相变焓”，以下同。

使之摆脱液面而变为气体分子。由于逃脱的只是速度较快的分子,从而导致剩余分子的平均速度降低,而由分子的平均速度决定的液体的温度也会随之降低。

从介绍的角度出发,我们对隔热材料这一题目进行讨论。隔热材料可以用来减少冷热区间的热量流动,例如,我们经常在蒸汽和热水管线上设置包覆层来减少热量向外散失,而在冷冻机外壁设置隔热材料是为了防止外部热量传进系统内部以保证冷冻机的制冷效果。

一般情况下,保暖层必须具有下列三项功能的一项或多项:减少在材料中以分子或电子作用进行传热的热传导;降低空气或液体空间所能引起的热的对流流动;减少以电磁波形式进行热能传递场合的辐射热传递。在真空中,传导和对流可以得到遏止,辐射就成为传递热的惟一方式。如果表面具有非常高的反射性,也可以降低辐射。例如,在建筑物墙壁上采用铝箔纸、屋顶上采用反光材料来尽可能地减少太阳的热效应。保温瓶和真空瓶通过采用两层器壁并将两壁之间抽空以及在器壁上涂上水银或铝涂层来达到保温目的。空气对热流的阻力比一种良导体的阻力高约 15000 倍,而像水银比玻璃高约 30 倍。

因此,典型的保温材料通常用充满了小气穴的非金属材料制成。这些材料包括:碳化镁、软木、毡、棉球、石棉或玻璃棉以及硅藻土等。石棉曾经广泛用于保温,但由于已经发现它对健康有害,因此美国已经禁止它在新工程应用。

在建筑材料中,内部空穴能进一步提高空心玻璃砖、保温玻璃(由 2~3 层中间留有一定空间的玻璃板组成)以及局部空心混凝土砖等材料的保温性能。如果空气空间大到足以引起对流,或者说如果水分渗入并充当了导体的话,保温性能就会降低。例如,干衣服之所以保温,是由于纤维将空气裹住的缘故,如果衣服中有水分,它的保温性能就会大大降低。适当的建筑保温可以减少家庭供暖以及空气调节的费用。在寒冷地区,推荐的保温厚度是:墙壁大约在 8 cm(约 3 in)厚,房顶大约在 15~23 cm(约 6~9 in)厚。对热流的有效阻力通常用它的 R 值(阻尼值)表示,墙壁保温的 R 值大约是 10,而房顶大约是 19~31。

现在,已经研制出了主要用于太空的超绝缘材料,此材料在太空中可以有效地抵制外部接近于绝对零度的低温,从而为太空舱提供必要的保护。超绝缘纤维是由镀铝聚酯薄膜复合板组成的,每层镀铝聚酯薄膜厚约 0.005 cm(约 0.002 in),聚酯薄膜之间用非常薄的隔垫隔开,薄隔垫大约每 cm20~40 层(约每 in 50~100 层)。

换热器的基本公式

当一股热物流与一股冷物流(两股物流之间用一导热壁隔开)进行热交换时,通过一个微分单元所传递的热量可以用公式(1-3)表示(见图 1-1):

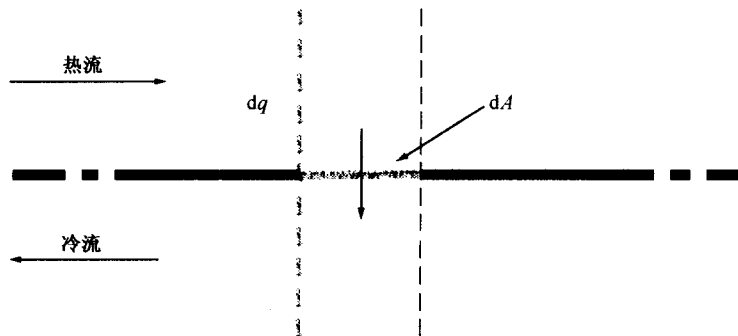


图 1-1 通过换热器一个微分单元的热交换

$$dq = U \Delta t dA$$

式中 dq ——通过微分单元 dA 所传递的热量, W;

U ——总传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

Δt ——通过单元 dA 的温差, K;

dA ——微分单元的传热面积, m^2 。

忽略 U 随温度或位置的变化, 并进行简化, 此公式可以对整个换热器进行积分计算。

据此, U 的平均值可以适用于整个换热器, 从理论上来说, 热物流损失的热量全部传递给了冷物流, 因此积分的结果可用下式表示:

$$q = UA \Delta t_{lm}$$

式中 A ——总的传热面积, m^2 ;

q ——总的传热量, W;

U ——总传热系数, 假定其值在整个换热器中不变, $W/(m^2 \cdot K)$;

Δt_{lm} 是指对数温度差(K), 它可用下面的公式来确定:

$$\Delta t_{lm} = \Theta / \Gamma$$

式中 $\Theta = (t_{h,in} - t_{c,out}) - (t_{h,out} - t_{c,in})$

$$\Gamma = \ln[(t_{h,in} - t_{c,out}) / (t_{h,out} - t_{c,in})]$$

总传热系数 U 是衡量介于冷热物流之间的所有材料导热性的尺度。在稳定状态下, 热传递是通过以下几个阶段来实现的: 首先通过换热管外壁的对流膜, 然后穿过管壁, 最后通过对流管内壁的对流膜。总的传热系数可以表示为:

$$1/U = A/h_1 A_1 + A \Delta x / k A_{lm} + A/h_2 A_2$$

式中 A ——参照面积, m^2 ;

h_1 ——管内侧的传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

A_1 ——管内侧面积, m^2 ;

Δx ——管子壁厚, m;

k ——管子的热导率, $W/(m \cdot K)$;

h_2 ——管外侧的传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

A_2 ——管外侧面积, m^2 ;

A_{lm} 是管子的对数平均面积, 可由下式确定:

$$A_{lm} = (A_1 - A_2) / \ln(A_1 / A_2)$$

当物料在管内作强制对流时, 传热系数通常可以根据一些经验公式来估算, 其中最著名的公式是:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.33}$$

式中 Nu 指努塞尔数(Nusselt number), 是一个用来说明传热膜系数与管壁导热性之间相关意义的无量纲系数。 Re 是雷诺数(Reynolds number), 它可以说明内力和粘滞力之间的关系, 并由此表示出流动体系的类型特征。 Pr 指的是普兰德特数(Prandtl number), 它可以说明物料的热特性与管子导热性之间的关系。

通过对传热的研究得知: 物料的传热系数 h_1 与物料流速 v 的 0.8 次幂成正比。如果其他参数保持不变, 可以得出 $1/v^{0.8}$ 对 $1/U$ 的曲线图是一条有截距的直线, 此截距表示气膜热导率与壁热导率之和。若已知壁热导率, 就可以通过截距值来确定气膜热导率。在经验公式

中,许多参数都是温度的函数。一般情况下,可以利用物料的平均温度(如管内外两侧的平均温度)来求得上述经验公式所需估算的参数。但是对水来说需要增加一个温度校正值。水的温度校正曲线图是 $1/(1+0.011t)v^{0.8}$ 对 $1/U$ (其中 t 是所测定的物料的平均温度,单位 $^{\circ}\text{F}$),对每一种蒸气分压所得到的曲线都是线性的,这样就产生了一系列具有相同倾角的直线,这些直线具有不同截距,是压力的函数。

需要讨论的另一个问题是传热效率。效率是指一台机器实际性能与理想性能的比值(也就是所具有的最大传热能力),换热器的最大传热能力是建立在具有最小热容量的流体上的。也就是流体质量流量与比热容乘积的最小值。如果流体达到了传热能力的最大值,此流体就会以其他流体的入口温度离开换热器。对于热流体,其效率可表示为:

$$e = C_{p,h}m_h(t_{h,in} - t_{h,out}) / [(C_p m)_{\min}(t_{h,in} - t_{c,in})]$$

而对于冷流体:

$$e = C_{p,c}m_c(t_{c,in} - t_{c,out}) / [(C_p m)_{\min}(t_{h,in} - t_{c,in})]$$

式中 e ——换热器效率;

$t_{h,in}$ ——热流体的入口温度, K;

$t_{c,out}$ ——冷流体的出口温度, K;

$t_{h,out}$ ——热流体的出口温度, K;

$t_{c,in}$ ——冷流体的入口温度, K;

$C_{p,h}m$ ——热流体热容与质量流量的乘积;

$C_{p,c}m$ ——冷流体热容与质量流量的乘积;

$(C_p m)_{\min}$ ——流体热容与质量流量乘积的最小值。

知道了效率,人们就可以用它对其他流体和物料的换热器性能进行预测。效率是根据可能传递的最大热量来确定的:

$$q = e(C_p m)_{\min}(t_{h,in} - t_{c,in})$$

空冷式换热器

空冷式换热器一般用于将工艺物料的热量传到环境大气中。工艺物料流经换热管内部,而作为冷却介质的常压空气垂直穿过换热器管以将热量带走。在典型的空冷式换热器中,采用一台或几台风机,强制或诱发空气垂流流动,使之穿过水平管组,以达到换热的目的。当用于冷凝场合时,可以将管束倾斜或立式布置。同样对于较小的空冷式换热器,也可以将管束立置,而使空气横向穿过管束。

为了改善空冷器的传热性能,人们在换热管的外侧设置了翅片,这些翅片大大增加了空冷器的换热面积。空冷器的管束长度、宽度以及管子的排放随空冷器用途的不同以及翅片管设计的不同而发生相应变化。

是否采用空冷器,从本质上说是一个经济问题,它不仅包含首次费用(或投资费用)、操作和维修费用、空间要求以及环境要求,而且还包括对采用空气冷却的优点和缺点进行权衡决策。

通过对空气冷却和水冷却方案的比较,可以看出空气冷却的优点。空冷器的主要优缺点在表 1-1 中进行了概括。通过对这些问题的逐一分析,可以评价空冷系统在用于所设计的

工况时是否经济、可行。一些特殊的系统在本章的后面进行讨论。空冷器的主要组成包括：翅片管、管束、风机及驱动系统、通气室以及所有的结构组件。下面是对每一个组件的简要描述：

表 1-1 空冷式换热设备的优点和缺点

优 点	缺 点
由于不用水作冷却介质，消除了用水的缺点	空气的传热性能比水差，若要达到与水同样的效果需要考虑增大空冷器的传热面积，这样空冷器所占用的空间相对较大
避免了水的高成本(包括水处理费用)	
避免了水源的热和化学污染	
由于不需要冷却水管，简化了安装	一般情况下，空冷器工艺物料的出口温度与环境温度之间的温度差大约在 10 ~ 15 K，而水冷器可以达到 3 ~ 5 K。当然，在设计空冷器时，也可以达到此值，但从经济上考虑，这样做通常是不合算的
空冷器的安装位置不受水源的影响	
由于水易结垢，水冷器需要频繁清洗，而空冷器避免了这一点，减少了维修量	
即使在电动机发生故障时，由于辐射以及空气的自然对流循环，空冷器仍能够连续操作(只不过能力稍低而已)	冬季，空冷器在室外操作时，需采取必要手段，以防止管内物料冻结或管外结冰
利用风门片，可以调节间距式扇叶、变速驱动机，或者在需要时关闭复合扇叶的叶片，可以很容易地实现对工艺物料的温度控制	要使大量冷却空气运动，必须由大直径的扇叶在高速转动时才能完成，由于空气的湍流以及叶片端部的速度非常快，因此就会产生较大的噪音

翅片管

对于空冷式换热器来说，最普通的是换热管，工艺物料从其内部流动，空气从管外侧穿过。为了补偿空气的不良传热性能，减少换热器的整体尺寸，在管子的外侧增设了翅片。空冷器中采用的翅片管是多种多样的，这些翅片管在几何形状、材料以及制造方法等方面的不同，不仅会影响到空气侧的传热性能，也会对空气侧的压力降产生影响。另一方面，特殊的材料组合以及(或者)翅片的连接方法决定了管子的最高设计温度以及管子的适用环境。是否采用特殊的翅片管，取决于空冷器生产厂家与用户的协议。翅片管的制造方法可以不同，人们正是利用这些不同方法将翅片与光管连接在一起。

事实上，连接可以是机械连接，也可以是冶金连接。冶金连接又有两种方法：一种是用钎料将翅片和光管钎接在一起(如铜钎焊、锡钎焊等)；另一种是将翅片直接与光管相焊。翅片管既可以是整体结构(其翅片是通过管子母体的加工而成)，也可以用某种冶金连接将翅片与光管连接在一起。机械连接的翅片管有两种类型：第一种是嵌入管(或槽形管)，其制造方法是沿管子的长度方向加工一条螺旋状沟槽，将翅片置入沟槽中沿管子缠绕，翅片底部管材会产生变形，从而将翅片固定并连接到管子上。

机械连接管也可用下述方法制得，即，用机械方法给翅片和(或)管子加压，使两种元件在压应力状态下彼此连接在一起。所谓拉伸缠绕翅片管就是在沿管子长度方向上，将处于拉伸状态下的翅片螺旋状缠绕在光管上制成的。

这种方法使翅片材料处于受力状态下，维持翅片与管子的连接。为防止翅片管脱落，翅片的端部必须固定。固定方法有卡子固定、钎焊(如铜钎焊、锡钎焊)、焊接等。

个别翅片可以在先预制并嵌入到管子上以后，通过翅片收缩将翅片与管子固定；或者使管子径向膨胀，产生一定压应力来使管子与翅片完成机械连接。管子的膨胀可以用液压方式