

化学工人自学丛书



化工单元操作

传热及换热器

中国化工学会科普工作委员会组织编写

李云倩 编

化学工业出版社



化学工人自学丛书

化工单元操作

传热及换热器

中国化工学会科普工作委员会组织编写

李云倩编

化学工业出版社

本书系供工人阅读的化学工人自学丛书化工单元操作中的一本，共九章。其中包括热传导、对流传热、辐射传热等概念的介绍；加热、冷却和冷凝的各种方法；平均温度差、传热系数及传热面积等的计算；各种换热器的结构和选择以及蒸发过程及其计算和设备结构等。本书通俗易懂便于工人自学。

可供初中以上文化水平的化工类企业的工人阅读，也可供化工类企业以及科研、设计单位的管理干部阅读。

DL49/30

化学工人自学丛书
化工单元操作
传热及换热器

中国化工学会科普工作委员会组织编写

李云倩 编

责任编辑：谢丰毅

封面设计：许立

化学工业出版社出版

（北京和平里七区十六号楼）

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本787×1092¹/₃₂印张6¹/₄字数137千字印数1—8,170

1985年9月北京第1版1985年9月北京第1次印刷

统一书号15063·3693定价1.00元

0120128

《化学工人自学丛书》

出版说明

为了普及化工生产技术知识及理论知识，提高我国化工企业广大工人的科学技术水平，以适应加速实现化学工业现代化的需要，特组织编写出版这套《化学工人自学丛书》。

这套丛书的内容包括化学、化工技术，基础理论以及化工生产工艺和设备，并反映当代新技术、新工艺、新设备、新材料。叙述力求深入浅出，理论联系化工生产实际，便于自学。根据化学工业多行业、多工种的特点，本丛书除分册出版无机化学、有机化学、化工生产原理等基础理论和基础技术读物外，还将陆续出版主要化工生产的工艺操作、主要化工设备机器的安装和检修、生产分析、化工仪表及自动化等方面的图书。

本丛书主要供化工企业具有初中以上文化程度的工人和其他有关人员自学。通过自学，达到或接近中等专业学校毕业的水平。也可作为各化工企业的技工学校教学参考书和考工评级的参考读物；还可供化工中等专科学校教师和学生学习参考。

前 言

提高全国人民的科学文化水平是实现我国社会主义现代化建设的当务之急。化学工业及化工类型生产的操作工，在进行安全教育及熟悉工艺流程与反应条件，能按操作规程于本岗位进行熟练操作后，都必须进一步地具备化工单元操作知识。

化工单元操作是从各种化工生产过程中将以物理变化为主的处理方法，概括出其共同特点的基本操作。其内容可归纳为：流体流动过程；传热过程；传质过程；机械过程等操作。目前这方面的书籍大都是各级教材，内容侧重于理论和计算。这套化学工人自学丛书中的《化工单元操作》则以具有初中水平的在职操作工为对象，使他们以多年实践经验，结合化工单元操作的理论学习，可提高生产操作水平，而且可应用本岗位的数据，验算设备能力，既能挖潜，又能避免超负荷运转，做到心中有数。

由于我们初次组织编写这类图书，缺点与不妥之处在所难免，希广大读者提出宝贵意见，以便今后再版时修订。

拟出版的这套《化工单元操作》丛书有：《化工计算》、《流体输送》、《传热及换热器》、《蒸馏和吸收》、《萃取》、《干燥》、《冷冻》。

目 录

第一章 传热过程浅说	1
第一节 传热过程在化工中的应用	1
第二节 工业上常用的换热方法	3
第三节 传热基本方程式	5
第二章 传热量的计算	10
第一节 常用的参数	11
第二节 热负荷的计算	14
第三章 热传导	21
第一节 热传导在化工中的应用	21
第二节 热传导基本定律	22
第三节 导热系数	23
第四节 平壁稳定热传导的计算	26
第五节 圆筒壁稳定热传导的计算	29
第四章 对流传热	34
第一节 对流传热方程式	35
第二节 影响对流传热膜系数的因素	36
第三节 对流传热膜系数经验公式简介	37
第五章 热辐射	52
第一节 热辐射的基本概念	52
第二节 热辐射的基本定律	55
第三节 两固体物面间的辐射传热	59
第四节 设备热损失的计算	65
第六章 传热平均温度差的计算	69
第一节 平均温度差的计算	69

第二节 流体流动方向的选择	77
第七章 传热系数及传热面积的计算	81
第一节 传热系数	81
第二节 传热面积	99
第三节 传热过程的强化	99
第八章 加热、冷却和冷凝	106
第一节 加热	106
第二节 冷却	112
第三节 冷凝	113
第九章 换热器	116
第一节 换热器的分类	116
第二节 列管式换热器	118
第三节 其它类型换热器	135
第四节 换热器的选择	148
第十章 蒸发	150
第一节 概述	150
第二节 单效蒸发	153
第三节 多效蒸发	165
第四节 真空蒸发	173
第五节 蒸发器及其选型	175
第六节 蒸发器的附属设备	189

第一章 传热过程浅说

第一节 传热过程在化工中的应用

在日常生活中，人们都知道一杯热水置于空气中过一段时间就会变凉，这是因为热量从热水传给周围的空气，热水因失去热量而变凉，周围空气则得到热量，但因热水放的热量很少且空气量很大，所以空气变热的不明显。可见，在自然界里热量总是从高温物体自动地传给低温物体，这是一种普遍的自然现象。这种热量的传递过程称为传热过程。

传热过程，就是对某一物体供给热量，或者从其中移走热量的过程，也就是热量的传播过程。在日常生活中的传热现象是极其普遍。在很多工业中，特别是化学工业生产中，传热过程占有很重要的地位。首先是因为所有的化学反应都要求在一定的温度条件下进行，而反应过程中不是放出热量，就是要吸收热量。为了使化学反应过程能维持一定的温度，就必须及时地供给所需要的热量或移走所放出的热量。因此，在化工厂中反应器的外部或内部常装有换热设备^①，而反应器本身也常常需要保温。例如，氮肥生产中，氮气与氢气的混合气体要在500[°C]左右的高温(加上一定的压力)

① 换热设备又称换热器或热交换器，即加入热量或移走热量所用设备的统称。

才能在催化剂的作用下合成氨，而氨与未反应的氮、氢气体的分离，则需通过冷却与冷凝的办法把混合气体中的氨以液体的形式分离出来。可见，这一生产过程中就有原料气体的被加热和反应气体的被冷却、冷凝等传热过程。又如，在酒精生产中，酒精精馏塔在操作时，原料液需预热，釜底液体需在再沸器中加热，塔顶产生的蒸汽需冷凝，这些都属传热过程。其次，因为化学工业是耗能较大的工业之一，注意节省能源会使生产成本下降，为此，常常将排出的高温气体或液体中的热量加以回收，这均需要用换热设备来完成。近几年来低品位能源的利用日益被人们所重视，如 $80\sim 100^{\circ}\text{C}$ 的热水的利用，海水温差发电，地下热水的发电等，这些过程的进行都离不开换热器，而且多数情况均需要高效换热器。因此，传热过程的研究，高效换热器的研制，均是化学工业中不可缺少的一项重要工作。

在化工生产过程中，经常遇到的传热问题有以下两种情况：一种是要求传热过程情况良好，即要求热量传递的快，这样可使完成某一换热任务时用的换热器面积少，从而换热器体积小，制造该设备的费用也就低些。众所周知，一个化工厂里要用很多换热器，设法降低换热器的制造成本，则会减少建厂的投资；另一种情况是要求传热情况“不好”，即要求热量传递的慢，这是因为化工厂里有高温设备及输送高温流体的管道，这些设备及管道的外部皆需穿上“棉衣”进行保温，以防热量散失，还有些低温设备及输送低温流体的管道，其外部也需包上厚厚的一层隔热材料，防止外界的热量传进去，等等。

怎样才能根据生产上的需要使热量传递的快些或慢些呢？这就要求我们通过有关章节的学习，初步掌握热量传递

0420128

的基本原理及了解影响热量传递快慢的因素，从而能基本掌握一般换热器的运行规律，以维持换热设备的正常运转；能对现有的换热设备进行一定的改进；对一些较简单传热问题具有一定的分析和计算能力。

应当指出：本书的讨论对象仅限于热量自发地从高温物体传给低温物体。

人们根据长期实践观察和理论分析，指出热量传递是通过热传导、对流和辐射三种基本方式进行的。详见第三、四、五章。

第二节 工业上常用的换热方法

在化工生产中遇到的换热过程大多为两股流体之间的换热。尽管各自的换热目的不同，具体换热的工作条件亦不一样（流体的种类、操作压力及温度等），但就其工作原理和所用的换热设备的类型来说通常可分为以下三类。

一、混合式换热

这种换热过程是使冷、热流体直接接触，在混合过程中进行传热。例如酒精精馏塔，塔釜中液体可以采用间接蒸汽加热，亦可采用直接蒸汽加热。当采用直接蒸汽加热时，即蒸汽直接加入釜内液体中，蒸汽冷凝放出的热量来加热液体。生产中常用的混合式换热器有冷水塔、湿式混合冷凝器等。图1-1所示为一湿式混合冷凝器。

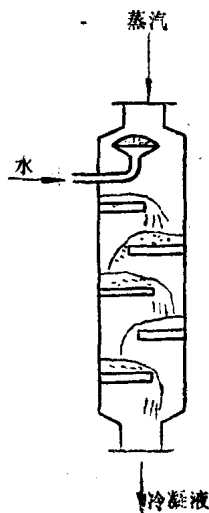


图 1-1 湿式混合冷凝器

二、蓄热式换热

这种换热过程是在一个蓄热器内进行，如图1-2所示。蓄

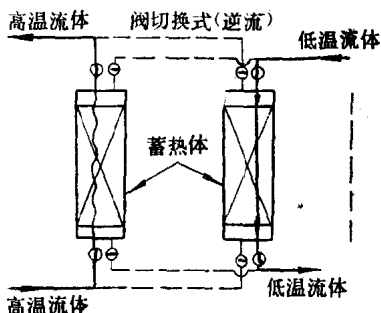


图 1-2 蓄热式换热器

热器内装有耐火砖之类的蓄热介质（填充物）。通常有两个换热器（蓄热器）交替使用，即切换操作。对其中一个蓄热器来讲是属于间歇操作的换热设备，操作时一会儿热流体通过蓄热器将固体蓄热介质加热，蓄热介质温度升高，即贮存了热量，一会儿再通入冷流体，把热量从填充介质中取走，这样反复进行，利用蓄热介质来蓄积和释放热量而达到冷、热两股流体交换热量的目的。蓄热式换热器在石油裂解和冶金工业中多见，而在化工生产中应用的并不广泛，其主要原因是在化工生产中多数情况下不允许两种流体在换热过程中有混合现象发生。

三、间壁式换热

这种换热器又称为表面式换热器或间接式换热器。在这类换热器中，冷、热两种流体被一个固体壁面隔开，而热量是通过固体壁面由一侧传至另一侧，这样既可避免两种流体

相混合，又能达到两种流体换热的目的，所以此种换热器在化学工业和石油工业中应用极广。间壁式换热器种类很多，其中应用最多的是列管式换热器，又称为管壳式换热器，如图1-3即为一列管式换热器示意图。它主要由壳体、平行排列的管束（换热管）、固定管束的管板、折流板及端盖（又称封头）等组成。在操作时，假定热流体在管内流过放出热量由管壁传至管外，冷流体在管外流过将热量取走，这样在两种流体不混合的条件下进行了热量交换。这种换热方式及所用的换热设备将在以后详述。

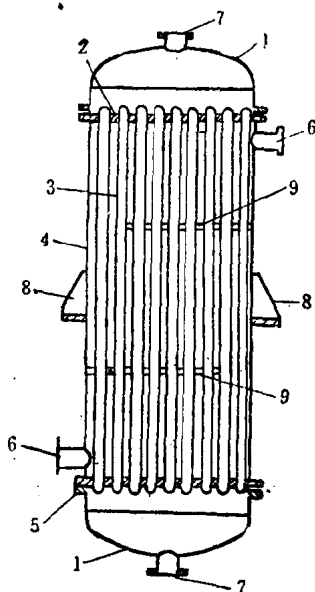


图 1-3 列管换热器

- 1—盖（或底）；2—管板（花板）；3—管子；4—外壳；5—法兰；6、7—连接管；8—支座（或支架）；9—折流板（挡板）

第三节 传热基本方程式

图1-4所示为一套管式换热器，这是一种间壁式换热器。它由内管和套管组成。假定热

流体在内管中流动放出热量，温度由 T_1 下降到 T_2 ；冷流体在内管与外管之间的环隙中流动吸收热量，温度由 t_1 被加热到 t_2 ，在单位时间内（通常为1小时），热流体通过内管壁面传给冷流体的热量，与内管壁的面积成正比，即与传热面积成正比，与冷、热流体之间的温度差成正比。由于温度差沿

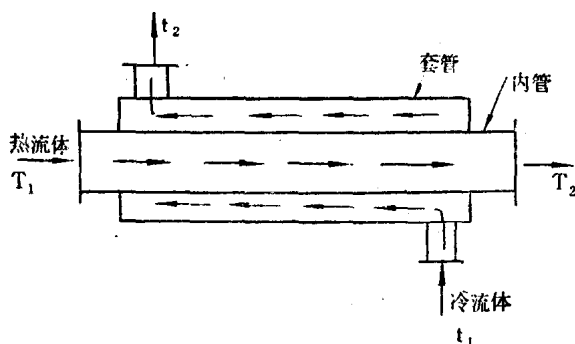


图 1-4 套管式换热器示意图

着传热面是变化的，若冷、热流体是相反方向流动（称为逆流流动），则换热器两端的温度差分别为：热流体进口与冷流体出口处的温度差为 $\Delta t_1 = T_1 - t_2$ ，热流体出口与冷流体进口处的温度差 $\Delta t_2 = T_2 - t_1$ （见图1-4），一般在计算中取温度差 Δt_1 、 Δt_2 的算术平均值，用 Δt_m 表示，则 $\Delta t_m =$

$\frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2}$ 。将上述关系用数学式表示为：

$$q = KA\Delta t_m \quad (1-1)$$

式 (1-1) 称为传热基本方程式。

式中 q ——冷、热流体通过换热器交换的热量，又称传热速率，单位是〔千卡/小时〕，

A ——传热面积，单位是〔米²〕，

Δt_m ——冷、热流体温度差的平均值，其单位是〔℃〕。

在具体计算时，如两端温度差相差不到一倍时，即 $\Delta t_1 / \Delta t_2 < 2$ ，可取进、出口温度差的算

术平均值，即 $\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2}$ ，当两端的温

度差相差一倍以上时，即 $\Delta t_1/\Delta t_2 > 2$ ，计算方法详见本书第六章；

K ——比例系数，称为传热系数，单位是〔千卡/米²·小时·℃〕。传热系数 K 的物理意义是：当冷、热流体之间的温度差为1〔℃〕；每一小时通过每一平方米传热面积所传递的热量。

在换热器中，传热系数 K 值的范围变化很大，如何合理地确定 K 值，是计算换热器中的一个重要问题。影响 K 值大小的因素是十分复杂的，以后还要作专门讨论。传热系数 K 通常用下式计算：

$$K = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \frac{b}{\lambda} + \frac{1}{a_2}} \quad [\text{千卡/米}^2 \cdot \text{小时} \cdot \text{℃}] \quad (1-2)$$

式中 a_1 ——一侧流体的对流传热膜系数，其单位是〔千卡/米²·小时·℃〕；

a_2 ——另一侧流体的对流传热膜系数，单位是〔千卡/米²·小时·℃〕；

λ ——换热器材质的导热系数，单位是〔千卡/米·小时·℃〕；

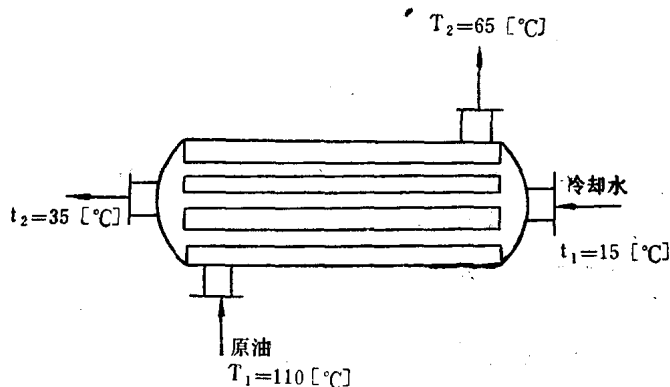
b ——传热壁的厚度，单位是〔米〕。

由式(1-2)可见，传热系数 K 值的大小与换热器中两种流体的对流传热及热传导情况密切相关（将在第三、四章详述），计算 K 值必先计算出 a_1 、 a_2 及选定 λ 。

进行换热器的设计，应包括两方面的内容：一是换热器的工艺尺寸设计，即用式(1-1)计算出传热面积，另一方面的内容是根据计算出的传热面积进行换热器的结构设计

(后一部分内容本书不予介绍)。就传热面积的计算而言,应根据生产任务的要求先计算出换热器的传热速率 q 、传热平均温度差 Δt_m 和传热系数 K ,再用式(1-1)算出传热面积 A 。下面将分别讲述 q 、 Δt_m 及 K 的计算方法。

〔例题 1.1〕 如图示,有一列管式换热器,管内通入冷却水,进口温度为 $15[^\circ\text{C}]$,出口温度为 $35[^\circ\text{C}]$,流量为 13000 〔公斤/小时〕。管外原油被冷却,原油进口温度为 $110[^\circ\text{C}]$,出口温度降到 $65[^\circ\text{C}]$,油水呈逆流流动。已知传热系数 $K=250$ 〔千卡/米²·时· $^\circ\text{C}$ 〕,水的平均比热 $c_p=1$ 〔千卡/公斤· $^\circ\text{C}$ 〕。试求此换热器的传热面积为若干?



例题 1.1 附图

〔解〕 计算传热速率 q 。此值可通过冷却水吸收的热量来计算。

$$\begin{aligned} Q &= Wc_p(t_2 - t_1) \\ &= 13000 \times 1 \times (35 - 15) \\ &= 2.6 \times 10^5 \text{〔千卡/时〕} \end{aligned}$$

两种流体的平均温度差。 $\Delta t_1 = 110 - 35 = 75[^\circ\text{C}]$, $\Delta t_2 =$

65 - 15 = 50[°C], 因 $\Delta t_1 / \Delta t_2 = 75 / 50 < 2$, 故 Δt_m 可用算术平均值。

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2} = \frac{75 + 50}{2}$$

$$= 62.5[^\circ\text{C}]$$

由式 (1-1) 可求出传热面积 A

$$\begin{aligned} A &= \frac{q}{K \Delta t_m} \\ &= \frac{2.6 \times 10^5}{250 \times 62.5} = 16.64[\text{米}^2] \end{aligned}$$

第二章 传热量的计算

图2-1所示为一蛇管式换热器。假定蛇管内通入饱和水

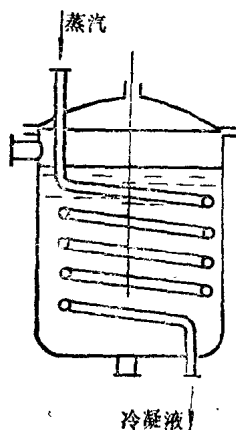


图 2-1 蛇管式换热器

蒸汽,管外为被加热的流体。水蒸汽进入管内冷凝成水后放出热量,此热量通过管壁传至管外,用来加热管外的流体。精馏塔的再沸器即是这种情况。我们将热流体放出的热量或冷流体所需要的热量称为该换热器的热负荷。热负荷是由工艺决定的,是根据生产任务对换热器提出的要求。例如,某一生产中要求每小时将5000〔公斤〕的苯由20〔℃〕加热至70〔℃〕,为完成此任务所需的热量即为热负荷,以 Q 表示。

在进行热负荷的计算时,如果不考虑热量损失(实际上必定有热量损失),当流体在传热过程中没有相变化即没有液体变为气体,或气体变为液体等,若以 Q_1 表示热流体降温所放出的热量,以 Q_2 表示冷流体升温所吸收的热量,则 $Q_1 = Q_2$ 。当流体在传热过程中有相变化时,则 Q_1 (或 Q_2)为相变潜热^①。这种计算方法即 $Q_1 = Q_2$ 是从热量守恒的概念出发

① 相变潜热见本章第一节。