

高职高专教材

化 工 原 理

上 册

陆美娟 主编

化学工业出版社

教材出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

化工原理.上册/陆美娟主编. —北京:化学工业出版社,2000
高职高专教材
ISBN 7-5025-3063-0

I. 化… I. 陆… II. 化工原理—高等学校:技术学校—教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 80019 号

高职高专教材

化工原理

上册

陆美娟 主编

责任编辑:骆文敏

封面设计:田彦文

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话:(010) 64982511

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

*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 16½ 字数 403 千字

2001 年 1 月第 1 版 2001 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—3000

ISBN 7-5025-3063-0/G·786

定 价:23.00 元

版权所有,违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

前 言

《化工原理》是化工类专业极为重要的专业基础课程,根据本教材编写大纲,主要介绍化工单元操作的基本原理、计算方法、典型设备以及有关的化工工程实用知识。其编写原则是,从便于自学和实际应用出发,以必需、够用为度,加强运用基本概念和工程观点分析和解决化工实际问题的训练。

为了便于自学,教材内容按“熟练掌握”、“理解”和“了解”三个层次编写,在每章开始的“本章学习要求”中都有明确的说明以分清主次,并通过例题、思考题和习题的反复练习达到理解和熟练掌握的要求。有些地方增加了思考内容或小结;增加了不同层次的实用性的例题和对例题的分析;指出了随学习进度所应完成的习题号并给出习题答案;章末的思考题大多供复习使用,包括必须掌握的概念和专用名词的定义和内涵、研究对象的各种影响因素的分析等方面的内容,有的概念要通过对对比以深入理解其意义和作用,有助于训练分析和归纳问题的能力。

本书的计量单位统一使用我国法定计量单位,但根据当前工程实际,学生还应熟悉各种物理量特别是压强、粘度、能量、传热系数等在不同单位制之间的换算。化工原理教材中历来使用符号较多,本书试图在 GB3100~3102 规定的基础上力求符号的统一。在各章后仍有“本章主要符号说明”,但与前章通用的符号不再重复列出。设备、材料的规格型号尽量采用最新的国标或部颁标准,以利于实际应用。鉴于化工工程计算中有效数字 3~4 位已经足够,对附录中的部分物性数据作了简化。

为了照顾不同类型学制和不同专业的需要,本书部分章节内容列为选学,用“*”号标出(包括部分习题)。因此本书可作为高职高专化(轻)工类专业的教材。

本书分上、下两册出版,由郑州大学陆美娟主编。参加编写人员有:陆美娟(绪论、第一、二、五、九、十章)、叶学军(第三章)、张浩勤(第四、六章)、王红(第七、八章)、赵继红(附录及部分习题的选校)。本书上册由郑州大学朱士亮教授主审,下册由北京化工大学李云倩教授、黄大铨副教授主审。

本书编写过程中,得到了北京化工大学、青岛化工学院、郑州大学各级领导及有关负责同志的大力支持和协助,原化工部属院校的化工原理教研室的老师们对编写大纲提出了许多宝贵意见,在此向他们表示深切的谢意。

由于编者水平有限,错误不当之处在所难免,敬希指正。

编者

绪 论

绪论学习要求

1. 熟练掌握的内容

化工过程的物料衡算与能量衡算的基本概念与计算步骤。

2. 理解的内容

化工生产过程的构成与分类特征;单元操作的概念、单元操作计算的一般内容及其依据的基本规律与基本关系;量纲与量纲一致性、单位与单位一致性。

3. 了解的内容

《化工原理》课程的性质、地位和作用;单元操作与“三传”过程。

* * * *

* * * *

* * * *

一、《化工原理》课程的性质、地位和作用

《化工原理》是化工类及其相近专业的一门基础技术课程和主干课程,它在整个专业培养过程中有其特殊的地位和作用:

(一)在教学计划中,这门课程是承前启后、由理及工的桥梁,又是各种化工专业课程的基础。先行的《数学》、《物理》、《化学》等课程主要是了解自然界的普遍规律,属于自然科学的范畴,而《化工原理》则属于工程技术科学的范畴,学生将从这门课程开始进入化工专业领域的学习。

(二)从学科性质看,《化工原理》是化学工程学的的一个分支,主要研究化工过程中各种**单元操作**,它来自化工生产实践,又面向化工生产实践。可以毫不夸张地说,化工技术工作者无论是从事化工过程的开发、设计还是生产,都必然而且经常会遇到各种单元操作问题,这就必须熟练掌握《化工原理》的基本概念、基本知识和基本方法。

(三)《化工原理》课程具有显著的工程性,要解决的问题是多因素、多变量的综合性的工业实际问题。因此,分析和处理问题的观点和方法也就与理科课程不同。同时,它又是一门计算性较强的课程,要通过一定数量的习题和课程设计以得到工程计算的实际训练。

二、化工过程与单元操作

(一)化工过程的特征与构成

化工过程可以看成是由**原料预处理过程**、**反应过程**和**反应产物后处理过程**三个基本环节构成的。其中,反应过程是在各种反应器中进行的,它是化工过程的中心环节。

反应过程必须在某种适宜条件下进行,例如,反应物料要有适宜的组成、结构和状态,化学反应要在一定的温度、压强和反应器内的适宜流动状况下进行等。而进入化工过程的初始原料通常都会有各种杂质并处于环境状态下,必须通过原料预处理过程使之满足反应所需要的条件。同样,反应器出口的产物通常都是处于反应温度、压强和一定的相状态下的混合物,必须

经过反应产物的后处理过程,从中分离出符合质量要求的、处于某种环境状态下的目的产品,并使排放到环境中去的废料达到环保的规定要求;后处理过程的另一任务是回收未反应完的反应物、催化剂或其它有用的物料重新加以利用。

由此可见,在原料预处理和反应产物后处理过程中都要进行一系列的物理变化过程,如加热、冷却、增减压、使物料发生相变化(如汽化、冷凝、结晶、溶解等)、使均相物料中各组分进行分离、使不同相态的物料彼此分离等。即使在反应器中,为了维持适宜的反应条件,也需组织一系列物理过程,如加入或移走热量、混合、搅拌等。经过长期的化工生产实践发现,各种化工产品的生产过程所涉及的各种物理变化过程都可归纳成为数不多的若干个单元操作。

图 0-1 表示氢氰酸的生产过程。天然气(主要含甲烷)、氧气分别经过滤稳压,液氨经汽化、过滤后,三者以一定配比混合进入反应器,这一部分属于原料预处理阶段。在反应器中进行甲烷部分燃烧反应和 HCN 的合成反应:

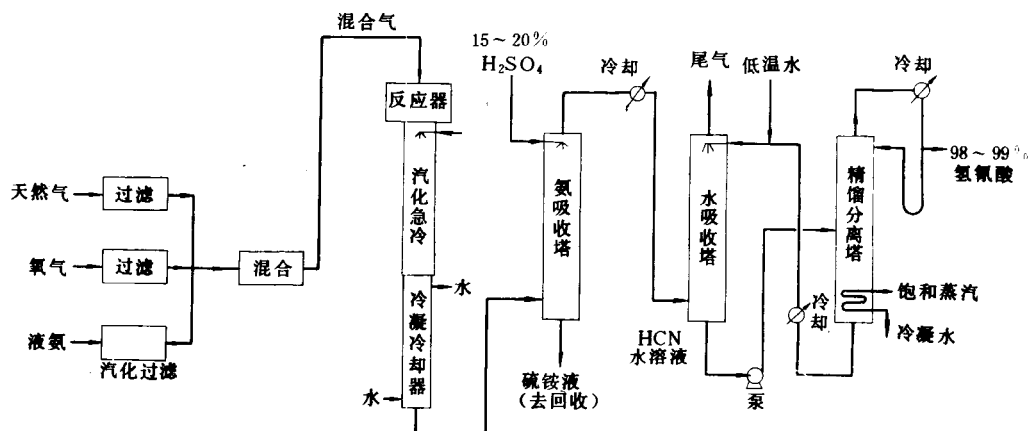
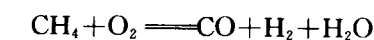


图 0-1 氢氰酸生产流程示意图

反应器出口产物是 1500℃ 左右的含 HCN、CO、H₂O、H₂ 以及未反应完的 CH₄、NH₃、O₂ 的高温气体混合物,先经喷水急冷,利用水的汽化快速降低反应产物的温度以中止反应;然后经冷凝冷却器进入氨吸收塔,用稀硫酸吸收混合气中的氨;脱氨后的气体再经冷却降温进入水吸收塔,用低温水吸收其中的 HCN;吸收后的尾气经碱液洗涤(图中未画出)脱除其中残余的 HCN 后送出供进一步利用;水吸收塔底得到的 1.5%HCN 水溶液经泵加压输送到精馏塔,在塔底加热使溶液部分汽化,利用 HCN 和水的挥发性的差异,富含 HCN 的蒸汽从塔顶排出经冷凝冷却后得到 98~99% 的氢氰酸,塔底排出的含少量 HCN 的水经冷却后回到水吸收塔循环使用。这一部分属于产物的后处理阶段(流程中,原料与产品贮槽、尾气贮柜以及各种中间贮槽均未画出)。

由图 0-1 可见,除反应器中的反应过程外,流程中包括了流体流动、流体输送、过滤、混合、汽化、冷凝冷却、加热、吸收、精馏等物理过程,这些过程都是在特定的设备中进行的。因此也可以说,任何一个化工生产过程都是由若干种完成特定任务的设备(包括反应器、完成各单元操

作的设备和贮料设备)按一定顺序、由各种管道和输料装置连接起来的组合体。

(二)单元操作的研究内容与分类

各种单元操作都是依据一定的物理或物理化学原理,在某些特定的设备中进行的特定的过程。过程和设备是相互依存的,因此《化工原理》也曾称为《化工过程与设备》课程,其研究内容主要是各种单元操作的基本原理与单元操作过程计算、典型单元操作设备的合理结构及其工艺尺寸的设计与计算、设备操作性能的分析以及组织工程性实验以取得必要的设计数据,找出强化过程、改进设备的途径。

一些主要的单元操作按其基本原理和作用分类列表,如表 0-1 所示。这些单元操作在其它工业过程中,也有广泛的应用。在本课程中,主要学习以流动体力过程、传热过程和传质过程(包括热、质同时传递过程)为基本过程的一些主要的单元操作。

根据操作方式,又可将单元操作分为连续操作和间歇操作两类。

表 0-1 单元操作的名称及分类

基本过程	单元操作名称	原 理 及 作 用
流体动力过程 (动量传递过程)	流体输送	利用外力做功将一定量流体由一处输送到另一处。
	沉降	对由流体(气体或液本)与悬浮物(液体或固体)组成的悬浮体系,利用其密度差在力场中发生的非均相分离操作。
	过滤	使液固或气固混合体系中的流体强制通过多孔性过滤介质,将悬浮的固体物截留而实现的非均相分离过程。
	搅拌	搅动物料使之发生某种方式的循环流动,使物料混合均匀或使过程加速。
	混合	使两种或两种以上的物料相互分散,以达到一定的均匀程度的操作。
传热过程 (热量传递过程)	流态化	利用流体运动使固体粒子群发生悬浮并使之带有某些流体的表现特征,以实现某种生产过程的的操作。
	换热 蒸发	使冷热物料间由于温度差而发生热量传递,以改变物料的温度或相态的操作。 使溶液中的溶剂受热汽化而与不挥发的溶质分离,从而得到高浓度溶液的操作。
传质分离过程 (质量传递过程)	吸收	利用气体组分在液体溶剂中的溶解度不同以实现气体混合物分离的操作。
	蒸馏	利用均相液体混合物中各组分的挥发度不同使液体混合物分离的操作。
	萃取	利用液体混合物中各组分在液体萃取剂中的溶解度不同而分离液体混合物的操作。
	浸取	用溶剂浸渍固体物料,将其中的可溶组分与固体残渣分离。
	吸附	利用流体中各组分对固体吸附剂表面分子结合力的不同,将其中一种或几种组分进行吸附分离的操作。
热、质传递过程)	离子交换 膜分离	用离子交换剂从稀溶液中提取或除去某种离子。 利用流体中各组分对膜的渗透能力的差别,用固体膜或液体膜分离气体、液体混合物。
	干燥	加热湿固体物料,使所含湿分(水分)汽化而得到干固体物料的操作。
	增(减)湿	通过热量传递以及水分在液相与气相间的传递,以控制空气或其它气体中的水汽含量的操作。
热力过程	结晶	从气体或液体(溶液或熔融物)混合物中析出晶态物质的操作。
	制冷	加入功使热量从低温物体向高温物体转移的热力学过程。
粉体工程	颗粒分级 粉碎	将固体颗粒分成大小不同的部分。 在外力作用下使固体物料变成尺寸更小的颗粒。

在连续操作中,物料与能量连续地进入设备,并连续地排出设备。过程的各个阶段是在同一时间、在设备的不同空间位置上进行的。例如图 0-1 中的水吸收塔,塔底进入的气体中 HCN 的浓度最高,随着气体在塔内上升,HCN 逐渐溶解到下降的低温水中而使其浓度逐渐降低,在塔的不同高度处吸收处于不同的阶段。

间歇操作的特点是操作的周期性。物料在某一时刻加入设备进行某种过程,过程完成后将

物料一次卸出,然后开始新的周期。间歇过程的各个阶段是在同一设备空间而在不同时间进行的。如水壶中烧开水是间歇操作,而工业锅炉中产生水蒸汽则是连续操作。连续操作适于大规模生产,其原料消耗、能量损失和劳动力投入都相对较少,因而操作成本也相应较低,同时也较易实现操作控制与生产自动化。间歇操作的设备比较简单,因而设备的投资较低,操作灵活性较大,适于小批量规模的生产以及某些原料或产品品种与组成多变的场合。

根据设备中各种操作参数随时间的关系,又可将单元操作分为**不定常操作**与**定常操作**两类。在**不定常操作**中,设备中各部分的操作参数随时间而不断变化。这种情况通常是由于同一时间内进入和离开设备的物料量和能量并不相同,且随时间而变化,因而导致设备内部发生物料和能量的正的或负的积累。**定常操作**时,设备内各种操作参数统计地不随时间而变。对**定常操作**的物理过程,进、出设备的物料量或能量应相等,且不随时间而变,设备内部也不发生物料或能量的积累。

间歇操作和连续操作设备的开、停工阶段或处理量变化时都属于**不定常操作**。**定常操作**的计算比较简单,在本书中不作特殊说明时,讨论对象均为**定常操作**。

(三)单元操作与工程观点

前已述及,《化工原理》的内容是从许多具体的化工生产过程中抽象概括出来的,本课程的学习目的就是应用这些具有一般性的基本概念和知识,针对不同场合和不同生产对象,具体地去解决某个特定的化工实际过程中需要配置的各种单元操作过程和设备的开发、设计与操作问题。这些问题都具有强烈的工程性,具体表现在:

1. 过程影响因素多 对于每一种单元操作,其影响因素通常可划分为物性因素、操作因素和结构因素三类:

(1)物性因素 同一类单元设备可用于不同的物系,物料的物理性质(如密度、粘度、表面张力、导热系数等等,这些物料的性质参数都将在以后各章中进行讨论)和化学性质必对过程发生影响。在很多情况下,物系的物性对于单元设备的选型与设备的操作性能有决定性的影响。

(2)操作因素 设备的各种操作条件,如温度、压强、流量、流速、物料组成等,在工业实际过程中,它们经常会发生变化并影响过程的结果。

(3)结构因素 是指单元设备内部与物料接触的各种构件的形状、尺寸和相对位置等因素,它们首先对物料在设备内的流动状况发生影响,并直接或间接地影响传热和传质过程的进行。

2. 过程制约条件多 在工业上要实现一个具体的化工生产过程,客观上存在许多制约条件,如原料来源、冷却水的来源与水温、可供应的设备结构材料的质量和规格、当地的气温和气压变化范围等。同时,单元设备在流程中的位置也制约了设备的进、出口条件。此外,还受安全防火、环保、设备加工、安装以及维修等条件的制约。

3. 效益是评价工程合理性的最终判据 自然科学研究的目的是发现规律,而进行工业过程的目的是为了最大限度地取得经济效益和社会效益,这是合理地组织一个工业过程的出发点,也是评价过程是否成功的标志。

4. 理论分析、工业性试验与经验数据并重 由于工业过程的复杂性,许多情况下,单纯依靠理论分析有时只能给出定性的判断,往往要结合工业性试验、半工业性试验(也称中间试验)才能得出定量的结果。在过程设计与操作分析中也广泛使用各种经验数据,它们是在长期的生产实践中总结出来的,熟练地运用这些经验数据,做到心中有“数”,对提高工作效率和可靠性

将是非常有益的。

综上所述,要做到灵活地运用书本知识去解决工程实际问题,需要了解工程实际问题的特点,从工程实际出发,学会从经济角度去考虑技术问题,这是《化工原理》课程教学过程的一项重要任务。

(四)单元操作与“三传”过程

由表 0-1 可知,在各种单元操作中进行的基本过程主要是**动量传递**过程(包含了流体动力过程)、**热量传递**过程和**质量传递**过程,俗称为“三传”。这三种传递过程往往是同时进行并相互影响的。其中,热量传递与质量传递比较容易理解,例如,在间壁式换热器中,冷、热两流体在金属壁的两侧流动,由于存在温度差而发生热量由热流体向冷流体的自动传递;在静止的单相流体中,某组分在不同位置上的浓度不同,该组分就会在浓度差的推动下,发生由高浓度向低浓度区的质量传递。如一瓶香水开启以后,经过一定时间,远处就会闻到香味,这就是发生了质量传递的结果。在一定的条件下,传递总是以某种速率进行的。当流体间的温度差消失即温度相等时,传热过程到达平衡,传热速率变为零;单相流体中质量传递的结果将使低浓区的浓度升高而使高浓区的浓度降低,当各处浓度达到相等时,宏观的质量传递也就停止了。

至于动量传递的概念,可以通过力学上的牛顿第二定律来理解。根据这一定律,有

$$F=ma \quad (0-1)$$

式中, F 是作用于质量为 m 的物体上的外力,而 a 是在外力 F 作用下引起该物体的加速度。由于加速度 a 定义为速度 v 随时间 τ 的变化率,即 $a=\frac{dv}{d\tau}$,若物体的质量不变,则有

$$F=m \frac{dv}{d\tau} = \frac{d(mv)}{d\tau} \quad (0-2)$$

式中, mv 是质量与瞬间速度的乘积,也就是物体 m 的瞬间动量,而 $\frac{d(mv)}{d\tau}$ 就是物体的瞬间动量随时间的变化率。因此,牛顿第二定律可理解为外力引起物体本身的动量变化并等于其动量变化率,作用于物体的外力可以通过其引起的动量变化率来度量。另一方面,两物体间的力的作用又可看成是物体间发生动量传递的结果。例如,一个具有较高动量的球 A 在某瞬间与一具有较低动量的球 B 发生碰撞,在两球间将发生瞬间由 A 向 B 的动量传递,使这两个球的动量各自随时间而发生变化, A 球将减速(动量减少)而 B 球将增速(动量增加),这就相当于在两个球间发生了力的相互作用。单位时间内物体间的动量传递的速率愈大,相当于两物体间的相互作用力愈大,物体本身的动量变化率也愈大。

在流体流动过程中,一般总存在着不同宏观速度的流体层与静止的壁面(可以想象一下河水的流动)、不同速度的流体层之间的作用力以及壁面对流动流体的阻力,它们都是动量传递的结果。这是因为,在流体中总是存在着无数流体分子的随机热运动,在一定条件下,也会存在流体质点(它是由大量分子构成的流体集团,将在第一章第一节中讨论)的随机运动,因此总有一部分流体分子和质点是在垂直于宏观流动方向上运动的,它们带着各自的宏观速度和宏观动量互相碰撞,于是发生动量的传递与交换,也就发生了上述力的相互作用,并会引起不同速度流体层的动量变化,即流动情况的变化。因此,通常把流体流动过程看成是一种动量传递过程。此外,也正是由于流体中存在着分子的随机运动和流体质点的随机运动,使不同温度层或浓度层之间发生了热量传递和质量传递。

大部分单元操作都涉及流体系统,显然,流体的流动情况对热量传递和质量传递的速率以及流动过程中的能量损耗都有显著影响。因此,在各类单元操作设备中,合理地组织这三种传

递过程,达到适宜的传递速率,是使这些设备高效而经济地完成特定任务的关键所在,也是改进设备、强化过程的关键所在。在学习本课程中,必须理解并牢固掌握反映传递速率的通用的宏观关系与计算方法,熟悉它们在不同单元操作中的特定关系和影响传递过程的各种因素。

(五)单元操作计算的基本内容

根据计算要求,各种单元操作的计算可以分为设计型计算与操作型计算两类。为完成规定的设计任务(一定的处理能力和操作要求),计算过程需要的时间、设备的工艺尺寸(如设备的直径、高度等)、外加功率和热量等,属于设计型计算,它是进一步完成设备的机械设计或选型所必须的。对于已有的操作设备(即设备的工艺尺寸一定),核算其在不同情况(操作因素、物性因素变化时)下对操作结果的影响或完成特定任务的能力,都属于操作型计算,它对确定适宜的操作条件、分析操作故障、了解设备性能以及保证设备正常操作都是十分重要的。

尽管各种单元操作的任务与计算要求各不相同,处理对象与设备型式各异,但一般都要涉及以下基本计算,即**物料衡算、能量衡算、过程速率、过程的极限以及物性计算**。

1. 物料衡算 它是以**质量守恒定律**为基础的计算,用来确定进、出单元设备(过程)的物料量和组成间的相互数量关系,了解过程中物料的分布与损耗情况,是进行单元设备的其它计算的依据。

2. 能量衡算 它是以热力学第一定律即**能量守恒定律**为基础的计算,用来确定进、出单元设备(过程)的各项能量间的相互数量关系,包括各种机械能形式的相互转化关系,为完成指定任务需要加入或移走的功量和热量、设备的热量损失、各项物流的焓值等。

3. 传递过程速率的计算 传递过程速率的大小决定过程进行的快慢,其通用表示式如下:

$$\text{传递过程速率} = \frac{\text{传递过程的推动力}}{\text{传递过程的阻力}} \quad (0-3)$$

在各种单元操作中,传递过程的速率对于设备的工艺尺寸以及设备的操作性能有决定性的影响。对于不同的传递过程,其速率、推动力和阻力的内涵及其具体表达式是不同的。例如在传热过程中,传热速率是用单位时间传递的热量来表示,而传热推动力则用温度差来表示。

各种单元操作中传递速率的计算是本课程要解决的重要内容,将在有关章节逐一讨论。需要指出的是,各种单元操作的工艺计算主要是物料衡算、能量衡算和过程速率计算三者的结合。

4. 过程的热力学极限与临界点的计算 当设备或系统内过程达到热力学平衡时,过程就停止了,平衡状态是过程进行的热力学极限。

处于平衡状态的单相物流,其内部各处的热力学强度性质均一,不再存在温度、浓度与压强的差异,宏观的传递过程不再进行。平衡状态下的气相,可以用状态方程来表达其热力学性质间的关系。

两相物流间达到平衡时,一般地有:(1)平衡两相的温度和压强必定相同;(2)平衡两相各组分的组成间存在确定的相平衡函数关系。这时两相间不发生宏观的质量传递与热量传递。

相间平衡计算在传质分离过程和热、质传递过程的各单元操作计算中是十分重要的。对于理想体系的相平衡关系计算,要用到物理化学中熟知的理想气体状态方程、相律、拉乌尔定律、亨利定律等基本定律和关系式,在以后的有关单元操作中都将遇到。

过程的临界点是指当过程的操作条件发生变化达到某个临界条件时,过程的状态和行为以及所遵循的动力学规律都将发生质的变化,有时甚至无法进行正常操作。这种临界点也可看成是原过程的一种动力学极限。如在气液逆流流动的吸收塔中,气体自下而上、液体依靠重力

自上而下流动,当气体或液体量逐渐增加到某一程度时,液体将被气体托住而停止下流,并在设备内迅速积累,甚至向上溢出,原来的逆流流动被破坏,吸收过程无法再正常进行。因此,了解并预测各类单元操作中过程的临界点(动力学极限),对于正确进行过程计算、保证过程在正常范围内操作也是十分重要的。

5. 物性计算 上述各项计算中都会涉及物系的某些物理和物理化学性质,它们既随不同物系而变化,又随物系的相状态、温度、压强而变化。不同物系的物性,有的可从有关手册上查得(参见本书部分附录),有的需用各种物性关系式来进行估算。一般在进行单元操作计算时,应先将各已知条件范围内的有关物性查算出来。

三、单元操作的物料衡算与热量衡算

(一)物料衡算要点

1. 根据衡算对象,选定适当的衡算系统。衡算系统可以是一个单元设备或若干个单元设备的组合,也可以是设备的某一部分或设备的微分单元。衡算系统也可称为控制体。

2. 选定物料衡算基准 选定基准包括选定一股基准物流及其数量,它是物料衡算的出发点,其目的是为了保证物料衡算计算的一致性。对于间歇操作,常取一批原料或单位质量(或摩尔量)原料为基准;对于连续操作,通常取单位时间(如 1h、1min 等)内处理的物料量为基准。基准的选择有一定的任意性,其原则是使计算尽量简化。

3. 列出物料衡算式 单元操作涉及的是物理过程,不发生化学反应。根据质量守恒定律可以直接写出物理过程物料衡算的文字表达式

$$\begin{array}{ccc} \text{进入系统的} & \text{离开系统的} & \text{系统中物料的} \\ \text{各股物流量} & \text{各股物流量} & \text{积累量} \end{array} \quad (0-4)$$

上式可以用质量单位(如 kg 或 kg/s 等),也可用物质的量单位(如 kmol 或 kmol/s 等),但必须注意保持式中各项的单位一致。

由于物流常常是多组分的混合物,因此可以按进、出衡算系统的各物流的总物料量列出总衡算式,也可按各物流中的各组分分别列出组分衡算式。此外,物流中各组分的质量分数 ω_i 和摩尔分数 x_i 之和均等于 1,即有 $\sum \omega_i = 1, \sum x_i = 1$,这称为组成归一性方程,在物料衡算中也经常要用到。

对于定常操作过程,系统中物料的积累量为零。

例 0-1 两股物流 A 和 B 混合得到产品 C。每股物流均由两个组分(代号 1、2)组成。物流 A 的质量流量为 $G_A = 6160 \text{ kg/h}$,其中组分 1 的质量百分数 $\omega_{A1} = 80\%$;物流 B 中组分 1 的质量百分数 $\omega_{B1} = 20\%$;要求混合后产品 C 中组分 1 的质量百分数 $\omega_{C1} = 40\%$ 。试求:①需要加入物流 B 的量 $G_B, \text{kg/h}$;②产品量 $G_C, \text{kg/h}$ 。

解 ①按题意,画出混合过程示意图,标出各物流的箭头、已知量与未知量,用闭合虚线框出衡算系统。(见图 0-2)。

②过程为连续定常,故取 1h 为衡算基准。

③列出衡算式:

总物料衡算 $G_A + G_B = G_C$,代入已知数据得

$$6160 + G_B = G_C \quad (A)$$

组分 1 的衡算式($G_A \omega_{A1} + G_B \omega_{B1} = G_C \omega_{C1}$,代入已知数据得

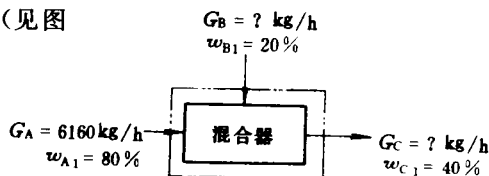


图 0-2 例 1 附图

$$6160 \times 0.80 + G_B \times 0.20 = G_C \times 0.40 \quad (B)$$

联解式(A)、(B)得

$$G_B = 12320 \text{ kg/h}, G_C = 18480 \text{ kg/h}.$$

据组成归一性方程,物流组分质量分数之和为1,即 $w_{A1} + w_{A2} = 1, w_{B1} + w_{B2} = 1, w_{C1} + w_{C2} = 1$,因此也可列出组分2的衡算式:

$$G_A(1 - w_{A1}) + G_B(1 - w_{B1}) = G_C(1 - w_{C1}) \quad (C)$$

在(A)、(B)、(C)三个衡算式中,只有两个方程是独立的。例如,由式(B)与式(C)相加即可得到式(A)。多余的一个衡算式可以用来检验计算结果是否正确。由此可以推得:对于组分数为 k 的系统,可以列出 k 个组分衡算式和一个总衡算式,即有 $k+1$ 个物料衡算方程,其中只有 k 个方程是独立的。

例 0-2 在连续干燥器中,用热空气将含水 10% 的湿固体物料干燥到含水 1% (均为质量%)。进口热空气中含水汽量为 0.01 kg 水汽/kg 干空气,若要求出口废气中的水汽量不超过 0.12 kg 水汽/kg 干空气,求空气的单耗, kg 空气/kg 湿物料。

解 ①题意分析:*a.* 过程是定常的;*b.* 衡算目的是求算每干燥 1 kg 湿物料所消耗的原始空气量,而不需求出各股物流的实际量;*c.* 固体物料中水分含量是用质量%表示的,而空气中的水汽含量是用质量比表示的。

②具体计算:

a. 画出衡算系统的示意图,标出各物流的箭头、已知量和未知量。(图 0-3)

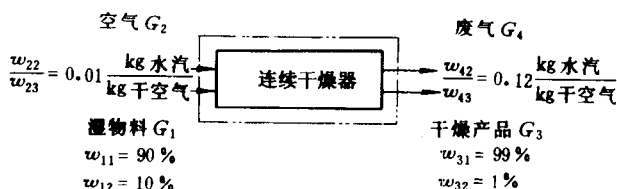


图 0-3 例 2 附图

系统中共有四股物流,分别用第一下标 1、2、3、4 代表;共有三个组分,即干物料、水分、干空气,分别用第二下标 1、2、3 代表。如 w_{12} 表示湿物料(第 1 股物流)中含有水分(第二组分)的质量%, w_{31} 则表示干燥产品中含有水分的质量%。

已知用质量比表示的空气中水汽含量,即每 kg 干空气带有的水分量,它也就是空气中水汽的质量分数与干空气的质量分数之比。对于入口热空气, $\frac{w_{22}}{w_{23}} = 0.01 \frac{\text{kg 水汽}}{\text{kg 干空气}}$,而对出口废气 $\frac{w_{42}}{w_{43}} = 0.12 \frac{\text{kg 水汽}}{\text{kg 干空气}}$ 。

b. 选取衡算基准,以虚线框为衡算系统,列出衡算式。

解法一: 由于题中未给出物流的实际量,故可选取 $G_1 = 100 \text{ kg}$ 作为基准物流量。将所有物流的组成统一用质量分数求解。

各物流中各组分的质量分数之和为 1,故对入口空气有:

$$w_{22} + w_{23} = 1$$

$$w_{23} = 1 - w_{22} = 1 - \frac{w_{22}}{w_{23}} \times w_{23} = 1 - 0.01 w_{23}$$

所以

$$w_{23} = \frac{1}{1.01} = 0.9901$$

$$w_{22} = 1 - 0.9901 = 0.0099$$

同理,可得

$$w_{43} = 0.8929, w_{42} = 0.1071$$

干物料在干燥过程中由进料全部转移至干燥产品中,它是不变组分,可列出干物料的衡算式:

$$G_1 w_{11} = G_3 w_{31} \quad (A)$$

即
$$G_3 = G_1 \cdot \frac{w_{11}}{w_{31}} = 100 \times \frac{0.90}{0.99} = 90.91 \text{ kg}$$

列出水分衡算式:

$$G_1 w_{12} + G_2 w_{22} = G_3 w_{32} + G_4 w_{42} \quad (B)$$

即
$$100 \times 0.1 + G_2 \times 0.0099 = 90.91 \times 0.01 + G_4 \times 0.1071$$

列出干空气衡算式:在进出口气体中,干空气也是不变组分,即

$$G_2 w_{23} = G_4 w_{43} \quad (C)$$

联解(B)和(C),可得 $G_2 = 83.49 \text{ kg}$ 。

所以,空气单耗为

$$\frac{G_2}{G_1} = \frac{83.49}{100} = 0.8349 \frac{\text{kg 空气}}{\text{kg 湿物料}}。$$

解法二:本题只要求算空气单耗,而干空气在过程中为不变量,因此可选取 100 kg 干空气量为衡算基准,即 $G_{23} = 100 \text{ kg}$,则

$$G_{23} = G_{43}, \quad G_{22} = G_{23} \frac{w_{22}}{w_{23}}$$

而
$$G_2 = G_{22} + G_{23} = G_{23} \frac{w_{22}}{w_{23}} + G_{23} = G_{23} \left(\frac{w_{22}}{w_{23}} + 1 \right) = 100(0.01 + 1) = 101 \text{ kg}$$

令空气单耗为 $B \frac{\text{kg 空气}}{\text{kg 湿物料}}$, 即有 $B = \frac{G_2}{G_1}, G_1 = \frac{101}{B}$ 。

列出干物料衡算式:

$$G_1 w_{11} = G_3 w_{31} \quad (D)$$

即
$$G_3 = \frac{w_{11}}{w_{31}} G_1 = \frac{0.90}{0.99} \times \frac{101}{B}$$

空气经干燥器增加的水分量为

$$G_{43} \frac{w_{42}}{w_{43}} - G_{23} \frac{w_{22}}{w_{23}} = 100(0.12 - 0.01) = 11 \text{ kg}$$

列出水衡算式:

空气中增加的水分量 = 物料中减少的水分量

即
$$G_1 w_{12} - G_3 w_{32} = \frac{101}{B} \times 0.10 - \frac{0.90}{0.99} \times \frac{101}{B} \times 0.01 = 11 \quad (E)$$

由式(E)解得: $B = 0.8347 \frac{\text{kg 空气}}{\text{kg 湿物料}}$ 。

两种解法的结果基本相同,误差很小。由此可见:*a.* 存在于一股进料物流中且完整不变地转入一股流出物流中的组分称为**不变组分**,故不变组分衡算式只有两项,计算比较简便。在物料衡算时,可先观察一下是否存在不变组分,并选用不变组分衡算式。*b.* 选用衡算基准有一定的灵活性,应根据题意选择适当的基准以简化计算。解法一列出了三个独立衡算式,并需联立求解全部未知物流量;由于本题只需求空气单耗,用解法二就只需列出两个独立衡算式,且可顺序求解。*c.* 在计算过程中,各物流的组成表示可能并不相同,但必须保证各衡算式中每一项的单位一致,以避免出错。*d.* 在工程计算中不要追求过多的有效数字位数,物料衡算中一般可取三至四位。

物料衡算基本步骤小结:

- (1) 针对提出的实际问题, 首先弄清楚衡算目的、已知量和未知量。
- (2) 根据问题的类型和性质, 确定需要补充哪些数据, 并设法从各种渠道去得到这些数据。例如, 了解原料或产品的数量、规格和组成, 查算有关的物性数据和相平衡关系数据, 根据生产经验或工业试验结果选定某些操作条件等。
- (3) 用流程示意图表示衡算对象, 即将问题的文字描述转化为图形描述。用闭合线框出衡算系统, 注明进、出系统各物流及其组分的名称或代号、相状态、流量和组成(包括已知量和未知量, 必要时将它们换算为统一单位)。
- (4) 确定衡算基准, 即选定其中某一物流及其数量作为计算基准。原则是: *a.* 可按衡算目的和流程顺序选取数量已知的原料物流或产品物流; *b.* 选取含未知量最少的物流; *c.* 对间歇操作过程, 可选一个操作周期或一批物料量; *d.* 选用相对数量较大的物流(可能会减少计算误差); *e.* 基准物流的数量通常选用物流的实际量。在有些情况下, 也可选用 100 或 1 个单位量作基准(如例 2), 这时, 相当于减少了计算中的一个未知量, 使计算简化。
- (5) 按框出的衡算范围, 列出独立的物料衡算式。为简化计算过程, 应当选用含未知量最少的衡算式, 尽量避免求解联立方程组。其中总衡算式和不变组分衡算式(见例 2)是经常被使用的。计算中要检查各式中的单位是否一致。
- (6) 利用多余的物料衡算式和组成归一性方程来检验计算结果是否正确, 并对计算结果的合理性进行分析。

按照物料衡算的基本步骤, 养成规范化的解题习惯, 有助于使解题思路清晰, 避免出错。

(二) 热量衡算要点

热量衡算是化工计算中最常遇到的一种能量衡算。在很多单元操作如换热、蒸发、吸收、蒸馏、干燥等过程中, 主要涉及物料温度和焓的变化以及热量的传递, 需要通过热量衡算来计算过程进行所必须加入或移走的热量、加热剂或冷却剂的用量以及系统的热量损失, 有时也用来计算系统某一物流的焓值及其温度。热量衡算是在物料衡算基础上进行的。进行热量衡算时, 首先也要划定衡算范围、选取衡算基准。与物料衡算不同的是, 衡算基准除了选取时间基准或物料量基准外, 还需选取物流焓的基准态。

物流焓的基准态包括物流的基准压强 p_0 、基准温度 t_0 和基准相状态 ϕ_0 :

- (1) 基准压强通常取 $p_0 = 100\text{kPa}$, 一般在压强不高的情况下, 压强对焓的影响常可忽略。
- (2) 基准温度可取 0°C 。这是因为, 从手册中可以查到的有关数据如比焓、比内能、平均等压比热容等数据通常都是以 0°C 为基准的。采用同一基准温度, 便于直接引用手册上的数据。有时也可取某一物流的实际温度作为基准温度, 如果忽略压强的影响, 则这一股物流的焓值为零, 可使热量衡算适当简化。

(3) 物流的基准相态的选择可视具体情况而定, 例如当进、出系统的物流都是液相时, 基准相态以取液态为宜。

根据能量守恒定律, 若忽略物流的位能、动能和与外界交换的功量, 热量衡算的文字表达式为:

$$\begin{aligned} \text{物流带入的焓} + \text{传入系统的热量} = & \text{离开系统物流的焓} + \text{传出系统的热量} \\ & + \text{系统内部物料焓的积累量} \quad (0-5) \end{aligned}$$

对连续定常过程, 系统内焓的积累量为零。

例 0-3 在一加热器中, 用 0.1kg/s 、 100°C 的饱和水蒸汽通过间壁加热常压下 25°C 的空

气,空气流量为 10kg/s 。水蒸汽在加热器中冷凝并在 90°C 下排出,加热器的热量损失为 15kJ/s 。求空气的出口温度。

已知空气的平均等压比热容 $\bar{c}_{p1}$ 为 $1.015\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$,水在 0°C 时的比汽化焓 h_{v0} 为 2490kJ/kg 。

解 ①画出过程示意图,框出衡算范围,标出物流的量、温度及其焓值。

②确定衡算基准 过程为定常,时间基准可取为 1s 。空气进、出口均为气态,选 0°C 空气为基准态;水蒸汽在系统内发生相变,取 0°C 液态水为基准态。

由手册查得 $0\sim 100^\circ\text{C}$ 间水蒸汽的平均等压比热容 $\bar{c}_{p2}^g = 1.86\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$, $0\sim 90^\circ\text{C}$ 间液态水的平均等压比热容 $\bar{c}_{p2}^l = 4.186\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 。

③列出热量衡算式

$$G_1 h_1 + G_2 h_2 = G'_1 h'_1 + G'_2 h'_2 + Q_L \quad (A)$$

式中, Q_L 为基准时间内系统对外热损失, kJ/s 。

各物流的比焓计算如下(单位为 kJ/kg):

入口空气: $h_1 = \bar{c}_{p1}(t_1 - 0) = \bar{c}_{p1}t_1$

出口空气: $h'_1 = \bar{c}_{p1}(t'_1 - 0) = \bar{c}_{p1}t'_1$ (忽略平均比热容的变化)

入口水蒸汽: $h_2 = h_{v0} + \bar{c}_{p2}^g(t_2 - 0) = h_{v0} + \bar{c}_{p2}^g t_2$

出口冷凝水: $h'_2 = \bar{c}_{p2}^l(t'_2 - 0) = \bar{c}_{p2}^l t'_2$

假定物料无损耗,则 $G'_1 = G_1$, $G'_2 = G_2$,代入式(A)得

$$G_1(h'_1 - h_1) + G_2(h'_2 - h_2) + Q_L = 0$$

或

$$G_1 \bar{c}_{p1}(t'_1 - t_1) + G_2(\bar{c}_{p2}^l t'_2 - h_{v0} - \bar{c}_{p2}^g t_2) + Q_L = 0$$

代入已知量得

$$10 \times 1.015(t'_1 - 25) + 0.1(4.186 \times 90 - 2490 - 1.86 \times 100) + 15 = 0$$

解得

$$t'_1 = 46.2^\circ\text{C}。$$

题中空气进、出口均为气态,也可选入口 25°C 常压空气为基准态,则此时: $h_1 = \bar{c}_{p1}(t_1 - 25) = 0$, $h'_1 = \bar{c}_{p1}(t'_1 - 25)$

可得

$$G_1(h'_1 - h_1) = G_1 \bar{c}_{p1}(t'_1 - 25)$$

其结果与取 0°C 空气为基准态时是相同的,说明基准温度可以任意选取,但对同一组分必须保证采用相同的基准态。

热量衡算基本步骤小结:

(1)根据题意画出衡算示意图,注明各物流的数量、组成、温度、相状态及焓值。一般热量衡算均在物料衡算基础上进行。

(2)确定衡算基准,计算各物流的焓值。这里,除确定物料衡算的基准(时间或物流量)外,还要选择各物流组分焓的基准态。由于焓是相对值,基准态的选择有一定任意性。在压强不高时,主要是确定基准温度和基准相态。各组分的基准态可以不同,但同一组分必须在同一基准

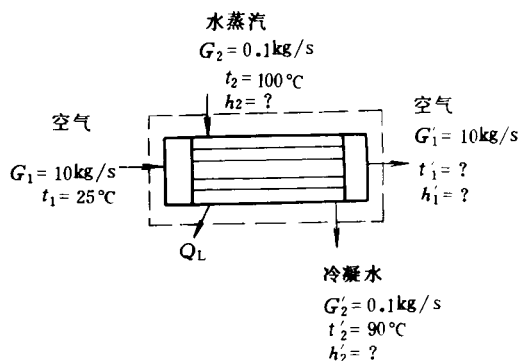


图 0-4 例 3 附图

态下进行计算。

组分无相变时在实际温度 T 下的比焓 h 或摩尔焓 H_m 可按式计算:

$$h = \int_{T_0}^T c_p dT = \bar{c}_p (T - T_0)$$

$$H_m = \int_{T_0}^T C_{pm} dT = \bar{C}_{pm} (T - T_0)$$

式中 c_p, C_{pm} ——组分的等压比热容、等压摩尔热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、 $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$, 它们一般是绝对温度的函数;

$\bar{c}_p, \bar{C}_{pm}$ ——在 $T_0 \sim T$ 温度之间的平均等压比热容、平均等压摩尔热容(单位同上);

T_0, T ——基准温度、实际温度, K , 也可用相应的 t_0, t $^{\circ}\text{C}$ 来表示。一般基准温度常选择 273K (或 0°C)。

当组分的基准相态与实际相态不同时, 物流焓值中应计入相变焓(如例 3 中水蒸汽的焓值 h_2 的计算)。一般可取 273K (即 0°C) 的液态为基准相态。

(3) 列出热量衡算式, 求解未知量。一个衡算系统只能列出一个热量衡算式, 对于某些复杂过程, 热量衡算常需与物料衡算方程联立求解。

四、量纲一致性与单位一致性

物理量通过几个基本物理量的幂次方的乘积来表达的关系称为物理量的量纲(过去称为因次)。单位制不同, 选用的基本物理量不同, 物理量的量纲表达式也不同。

按我国法定单位制的规定, 基本物理量有长度(L)、时间(T)、质量(M)、温度(θ)、物质的量(N)等七个, 括号内的符号是这些基本物理量的基本量纲。任何物理量的量纲都可用这些基本量纲的幂次方的乘积来表示。如速度是单位时间走过的距离(长度), 其量纲为 LT^{-1} ; 加速度是速度随时间的变化率, 其量纲为 LT^{-2} ; 力的量纲可通过质量与加速度的量纲的乘积来表示, 即 MLT^{-2} ; 功与能量的量纲可用力与距离(长度)的量纲的乘积来表示, 即 ML^2T^{-2} 等。

在一个完整的物理方程中, 各项的量纲必定相同, 这称作量纲一致性。

例 0-4 质量为 m 的物体在空气中下落, 写出其运动方程, 并证明其量纲的一致性。

解 作用在物体上的力有物体所受的重力 mg 和物体下落时受到空气的阻力 F , 物体将以一定的加速度 a 运动, 按牛顿第二定律可以写出其运动方程:

$$mg - F = ma$$

式中各项量纲为: $[mg] = MLT^{-2}$, $[F] = MLT^{-2}$, $[ma] = MLT^{-2}$ 。可见, 各项量纲完全一致, 均为 MLT^{-2} 。

掌握量纲与量纲一致性的概念在单元操作的计算与研究中是很有用的:

(1) 量纲一致性是判断一个物理方程是否正确的一个重要判据。方程正确, 必定量纲一致。

(2) 在《化工原理》中, 常要用到各种无量纲数(又称无因次数或无因次数群)的概念来反映过程或事物的某些基本特征。无量纲数是与过程有关的若干物理量的幂次方的乘积的组合, 组合的结果使基本量纲可以互相消去而没有量纲, 即得到一个纯数。例如任何圆的周长与其直径 d 之比, 即 $\frac{\pi d}{d} = \pi$ 是一个无量纲数, 它反映了圆的基本几何特征。

(3) 量纲和量纲一致性是量纲分析法(或称因次分析法)的基础, 而量纲分析法是指导工程性实验、建立各种过程影响因素的经验关联式的一个重要手段, 这些经验关联式通常表示为几个无量纲数之间的函数关系。这部分内容将在有关章节作具体介绍。

物理量的单位是表征物理量大小的要素。任何物理量都可用一个纯数和一个单位的乘积来表示。单位制不同,物理量的单位也随之变化。我国目前使用的是以国际单位制为基础的法定计量单位。

在具体计算时,一个计算式中各项的单位必须一致,这称作**单位一致性**,它是检验计算正确性的一项判据。因此,养成在计算时写出每一物理量的单位、并检查单位一致性的习惯是有益的。

绪论是全书的总纲。要注意把绪论内容与各章学习结合起来,使读者能从总体上把握各章内容,逐渐理解课程的工程特点,掌握解决工程问题的方法,养成规范化的正确解题习惯。

思考题

1. 指出下列各组中的概念的内容、基本特点和区别。

$\left\{ \begin{array}{l} \text{连续操作} \\ \text{间歇操作} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{定常操作} \\ \text{不定常操作} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{设计型计算} \\ \text{操作型计算} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{量纲} \\ \text{单位} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{热力学极限} \\ \text{动力学极限(临界点)} \end{array} \right.$

2. 化工过程的特点是什么? 化工过程的基本构成是什么?

3. 化工单元操作计算的基本内容是什么?

4. 下列概念的意义是什么?

单元操作 基本量纲与量纲一致性 组成归一性方程 传递过程速率

5. 物料衡算与热量衡算的依据和基本步骤是什么? 为什么要选择物料衡算基准和焓的基准态? 如何选择?

6. 对于物理过程,如果物流量用物质的量(mol 或 kmol)取代质量,用摩尔分数取代质量分数,其总物料衡算式和组分衡算式的形式有何不同? 若总组分数为 k ,独立的物质的量的衡算式有几个? 如果发生了化学反应,情况会有什么变化?

7. 对于一定量的 100°C 的饱和水蒸汽在等压下的冷凝过程,若已知该温度下水的比汽化焓 h_v 以及液态水与水蒸汽在 $0\sim 100^\circ\text{C}$ 间的平均等压比热容 $\bar{c}_p$ 与 $\bar{c}_{p,v}$,则当基准态分别取 0°C 液态或 100°C 气态时,其热量衡算式有什么不同? 放出的热量是否相同?

8. 在压强差作用下,液体经管口喷出,其喷出速度 $u=c\sqrt{\Delta p/\rho}$,式中 Δp 为压强差, ρ 是液体的密度,则常数 c 的量纲是什么? (式中压强是单位面积上受的力,密度是单位体积液体具有的质量)。

习 题

1. 某湿物料原始含水量为 10% ,在干燥器内干燥至含水量为 1.1% (以上均为质量%)。试求每吨湿物料除去的水量。〔答: 90kg 〕

2. 采用两个连续操作的串联蒸发器以浓缩 NaOH 水溶液,每小时有 10 吨 12% 的 NaOH 水溶液送入第一个蒸发器,经浓缩后的 NaOH 水溶液再送入第二个蒸发器进一步浓缩至 50% 的碱液(以上均为质量%)排出。若每个蒸发器蒸发水量相等,试求送入第二个蒸发器的溶液量及其组成(用 NaOH 的质量%表示)。〔答: 6200kg/h , 19.4% 〕

3. 一间壁式换热器用冷却水将间壁另一侧 1500kg/h 、 80°C 的某有机液体冷却到 40°C ,冷却水的初温为 30°C ,出口温度为 35°C ,已知该有机液体的平均定压比热容为 $1.38\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 。试求冷却水用量。〔答: 3956kg/h 〕

4. 在一预热器(间壁式换热器)内,用饱和水蒸汽将 2000kg/h 、含水汽 1% 的湿空气从 20°C 加热到 120°C 。饱和水蒸汽的压强为 300kPa (绝压),冷凝水在饱和温度下排出。假设保温良好,试求每小时的蒸汽耗量。〔答: 94.9kg/h 〕

第一章 流体流动

本章学习要求

1. 熟练掌握的内容

流体的主要物性(密度、粘度)和压强的定义、单位及其换算;流体静力学基本方程、连续性方程、机械能衡算方程及其应用;流体的流动类型、雷诺准数及其计算;流体在圆形直管内的阻力及其计算。

2. 理解的内容

边界层的基本概念;非圆形管内阻力的计算,当量直径;局部阻力的计算;简单管路的计算;测速管,孔板流量计、文氏流量计与转子流量计的基本结构,测量原理及使用要求。

3. 了解的内容

圆形管内流动的速度分布;复杂管路的计算。

* * * *

* * * *

* * * *

第一节 概 述

在化工生产过程中所处理的物料大多数为流体(气体和液体)。按化工生产工艺要求,物料由一个设备送往另一个设备,从上一道工序转移到下一工序,逐步完成各种物理变化和化学变化,得到所需要的化工产品。因此,化工过程的实现都会涉及到流体输送、流量测量、流体输送机械所需功率的计算及其选型等问题,要解决这些问题必须掌握流体流动的基本原理、基本规律和有关的实际知识。同时,多数单元操作都与流体流动密切相关,传热、传质过程也大多是在流体流动条件下进行的。因此,流体流动是本课程中的一个重要基础内容。

化工生产中常见的流体流动形式有管流、绕流、射流和自由流动等。管流是指流体在闭合的固体边界通道中的流动,且流体充满整个通道,如流体在管道、设备通道内的流动;而绕流是指流体绕过物体的流动,物体被流动流体所包围,如流体掠过换热器的管束、固体颗粒和液滴在气流中的沉降等;射流是指一股流体以一定速度射入另一股流体中时发生的流动,如在水喷射式真空泵、气升泵中的流动;自由流动主要指液体在流动方向上存在一个自由表面,在表面上方的压强基本保持不变,如液膜沿表面的下落、水在明渠中的流动等。本章主要讨论流体的管流问题。

一、流体的连续介质模型

流体是由许多离散的即彼此间有一定间隙的、作随机热运动的单个分子构成的。但从工程实际出发讨论流体流动问题时,常把流体当作无数流体质点组成的、完全充满所占空间的连续介质,流体质点之间不存在间隙,因而质点的性质是连续变化的。这里所谓质点,它是由大量分子构成的流体集团(或称流体微团),其大小与容器或管道的尺寸相比是微不足道的,但比起分子平均自由程则要大得多。对流体作这样的连续性假定后,才能把研究流体的起点放在流体