



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

石油化学

工程原理

李阳初 刘雪暖 主编

上册



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

石油化学工程原理

(上册)

李阳初 刘雪暖 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书论述了石油加工和石油化工过程中有关单元过程的基本原理及相关设备,分上、下两册。上册内容包括流体流动、流体输送机械、非均相物系的分离、固体流态化和气力输送、传热、换热器、辐射传热与管式加热炉等章,下册内容包括传质过程概论、蒸馏、气体吸收、萃取、气体传质设备等章。本书力求联系石油加工和石油化工过程的实际,基本概念和基本原理论述由浅入深,并列有必要的例题与习题。

本书可作为高等石油院校化学工程与工艺及相关专业本科生的化工原理教材,也可供石油加工和石油化工行业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据 (上册)

石油化学工程原理/李阳初,刘雪暖主编. —北京:中国石化出版社,2008
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-80229-526-1

I. 石… II. ①李…②刘… III. 石油化工-化学工程-高等学校-教材 IV. TE65

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 031124 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

北京密云红光制版公司排版

北京宏伟双华印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 42 印张 1050 千字
2008 年 4 月第 1 版 2008 年 4 月第 1 次印刷
定价:78.00 元(上、下册)

前 言

本书是《石油加工单元过程原理》的第二版，为与国内这方面的教材名称一致，改名为《石油化学工程原理》。原书自 1996 年出版以来，承蒙广大师生及各界的支持，提出许多宝贵意见。由于石油化学工业的飞速发展，在使用本教材十年的基础上，出版第二版已是十分必要。

本书论述了石油加工和石油化工过程中有关单元过程的基本原理及其相关设备。本书重视基本概念的阐述，叙述由浅入深，力求联系石油化学工业的实际，是我们从事石油化工过程及设备教学和科研数十年的结晶。

本书可作为高等石油院校有关化工和相关专业的化工原理教材，亦可供石油加工和石油化工部门工程技术人员参考。

本书绪论、第三、四、九章由李阳初编写，第一、二、八章由李发永编写，第五、六、七章由刘雪暖编写，第十、十一、十二章由刘艳升、曹睿编写，附录由王万里编写。主编为李阳初教授和刘雪暖教授。本书分上、下两册出版。

在此编者对多年来支持本书修订及发行工作的中国石化出版社和中国石油大学诸多师生深表谢意。恳请各界一如既往地支持本书水平的进一步提高，使之成为石油院校广大师生和石油化学工业广大工程技术人员所喜爱的参考书。

目 录

绪论	(1)
一、化学工程学科的发展	(1)
二、研究对象、内容及任务	(2)
三、研究单元操作的基本方法及基本工具	(3)
四、单位制及单位换算	(7)
参考文献	(8)
习题	(9)
第一章 流体流动	(10)
第一节 流体及其主要物理性质	(10)
一、流体及其特点	(10)
二、连续介质的假定	(10)
三、流体的物理性质	(11)
第二节 流体静力学	(16)
一、流体的静压强	(16)
二、流体静力学基本方程式	(18)
三、流体静力学基本方程式的应用	(19)
第三节 流体动力学	(23)
一、概述	(24)
二、物料衡算——连续性方程式	(26)
三、总能量衡算	(27)
四、机械能衡算	(29)
第四节 流体在管内的流动阻力	(35)
一、流体流动的类型	(35)
二、边界层概念	(38)
三、直管阻力损失和局部阻力损失	(41)
四、直管阻力损失的计算	(41)
五、局部阻力损失的计算	(53)
六、非牛顿型流体的特性	(58)
第五节 管路计算	(59)
一、简单管路的计算	(59)
二、复杂管路的计算	(62)
三、可压缩流体在管内的流动及计算	(68)
第六节 流量测量	(70)
一、孔板流量计	(71)
二、文丘里流量计	(74)
三、转子流量计	(75)

四、测速管	(77)
符号说明	(79)
参考文献	(80)
习题	(80)
第二章 流体输送机械	(86)
第一节 液体输送机械	(86)
一、分类	(86)
二、离心泵	(86)
三、往复泵	(108)
四、其他类型的泵	(112)
五、各类型泵的比较	(115)
第二节 气体输送机械	(115)
一、通风机	(116)
二、鼓风机	(118)
三、压缩机	(119)
四、真空泵	(129)
符号说明	(131)
参考文献	(132)
习题	(132)
第三章 非均相物系的分离	(135)
第一节 颗粒与颗粒床层的特性	(135)
一、单颗粒的特性	(135)
二、颗粒群和颗粒床层的特性	(136)
三、流体通过固定床的流动	(139)
第二节 沉降	(142)
一、重力沉降	(142)
二、离心沉降	(149)
第三节 过滤	(154)
一、过滤的基本概念	(154)
二、过滤的基本方程式	(155)
三、过滤常数的测定	(158)
四、过滤设备及其操作	(160)
五、过滤计算	(164)
第四节 离心分离	(171)
一、影响离心分离的主要因素——离心力和分离因数	(171)
二、离心机的结构与操作	(172)
符号说明	(175)
参考文献	(176)
习题	(176)

第四章 固体流态化和气力输送	(179)
(第一节 概述	(179)
(第二节 固体流态化	(180)
(一、流化床的基本概念	(180)
(二、散式流态化与聚式流态化	(181)
(三、流化床的主要特性	(182)
(四、流化床的操作范围	(185)
(五、流化床的密相区高度和分离高度	(188)
(六、高速流化床	(190)
(第三节 气力输送	(192)
(一、气力输送及其优缺点	(192)
(二、密相输送	(193)
(三、稀相输送	(197)
(四、流化装置中的压力平衡	(204)
(五、符号说明	(207)
(六、参考文献	(207)
(七、习题	(207)
第五章 传热	(209)
(第一节 导热	(210)
(一、导热速率方程——傅立叶定律	(210)
(二、导热系数	(211)
(三、通过平壁的稳定导热	(214)
(四、通过圆筒壁的稳定导热	(215)
(第二节 对流传热	(220)
(一、对流传热速率方程——牛顿冷却定律	(220)
(二、对流传热系数的影响因素及无因次准数方程的导出	(221)
(三、流体作强制对流时的传热系数	(224)
(四、自然对流传热系数	(230)
(第三节 沸腾与冷凝传热	(231)
(一、沸腾传热	(231)
(二、冷凝传热	(235)
(第四节 两流体间的传热计算	(240)
(一、热量衡算方程	(240)
(二、传热速率方程	(242)
(三、总传热系数	(243)
(四、平均温度差 Δt_m	(246)
(五、传热单元计算法	(252)
(六、综合传热及设备热损失的计算	(256)
(七、符号说明	(259)
(八、参考文献	(260)

习题	(260)
第六章 换热器	(264)
第一节 间壁式换热器的类型	(264)
一、套管换热器	(264)
二、水箱式冷却器	(264)
三、空气冷却器	(265)
四、管壳式换热器	(265)
第二节 管壳式换热器的选用及校核计算	(267)
一、管壳式换热器的选用及设计原则	(267)
二、无相变时管壳式换热器的对流传热系数	(269)
三、管壳式换热器的平均温度差	(270)
四、换热器的压降	(272)
五、管壳式换热器的选用与设计计算步骤	(274)
六、管壳式换热器的选用示例	(274)
第三节 传热过程的强化及新型换热器简介	(279)
一、强化传热的途径	(279)
二、新型换热器简介	(280)
符号说明	(284)
参考文献	(285)
习题	(285)
第七章 辐射传热与管式加热炉	(287)
第一节 热辐射的基本概念	(287)
一、热辐射的特性	(287)
二、热辐射的吸收、反射和透过	(287)
三、黑体	(288)
四、物体的辐射能力和辐射强度	(289)
第二节 黑体热辐射的基本定律	(289)
一、普朗克(Planck)定律	(289)
二、斯蒂芬-波尔兹曼(Stefan-Boltzmann)定律	(290)
三、兰贝特(Lambert)定律	(291)
第三节 实际固体的热辐射	(291)
一、实际固体的辐射能力、吸收能力及黑度	(291)
二、灰体	(293)
三、克希霍夫(Kirchhoff)定律	(294)
第四节 气体热辐射的特点	(294)
一、气体辐射对波长的选择性	(295)
二、气体的辐射和吸收在整个容积中进行	(295)
第五节 辐射换热	(296)
一、两黑体间的辐射换热和角系数	(296)
二、灰表面间的辐射换热	(302)

三、气体与包壳间的辐射换热	(306)
第六节 管式加热炉概述	(307)
一、管式加热炉的分类和主要工艺指标	(307)
二、管式加热炉的主要类型	(308)
第七节 燃料的燃烧	(310)
一、燃料的种类、组成及发热值	(310)
二、理论空气用量与过剩空气系数	(311)
三、全炉热效率及燃料用量	(313)
四、燃烧产物——烟道气的流量	(317)
第八节 辐射室的传热计算——罗伯-依万斯(Lobo-Evans)方法	(319)
一、辐射室中的传热过程	(320)
二、传热速率方程式	(320)
三、传热速率方程式中各参数的确定	(321)
四、热衡算方程式	(327)
五、用图解法确定辐射室热负荷及烟气在辐射室出口的温度	(327)
六、辐射管表面热强度及主要结构尺寸的确定	(328)
七、辐射传热计算的区域法和蒙特卡洛法简介	(335)
第九节 对流室的传热计算	(337)
一、对流室的热负荷	(337)
二、平均温度差	(337)
三、对流室的主要尺寸	(338)
四、对流管的总传热系数	(339)
五、对流管的全表面积与表面热强度	(345)
第十节 烟囱的设计计算	(348)
一、烟囱的直径	(348)
二、烟囱的高度	(348)
符号说明	(353)
参考文献	(355)
习题	(355)
附录	(358)
1. 单位换算表	(358)
2. 某些气体的重要物理性质	(361)
3. 某些液体的重要物理性质	(362)
4. 某些液体的导热系数	(364)
5. 某些气体和蒸气的导热系数	(365)
6. 某些固体材料的重要物理性质	(366)
7. 水的重要物理性质	(367)
8. 饱和湿空气的性质(101.3kPa)	(368)
9. 空气的重要物理性质(101.3kPa 压力下)	(369)
10. 水的饱和蒸气压(-20~100℃)	(369)

(308) 11. 饱和水蒸气表(按温度排列)	(370)
(309) 12. 饱和水蒸气表(按压力排列)	(371)
(310) 13. 水的黏度(0~100℃)	(374)
(311) 14. 液体黏度共线图	(375)
(312) 15. 气体黏度共线图(常压下用)	(377)
(313) 16. 液体比热容共线图	(379)
(314) 17. 气体比热容共线图(常压下用)	(381)
(315) 18. 液体汽化潜热共线图	(383)
(316) 19. 液体表面张力	(385)
(317) 20. 有机液体的密度	(387)
(318) 21. 无机物水溶液在大气压下的沸点	(389)
(319) 22. 壁面污垢热阻(污垢系数)	(390)
(320) 23. 无缝钢管规格简表	(391)
(321) 24. 离心泵性能表	(392)
(322) 25. 离心通风机综合特性曲线图	(398)
(323) 26. 换热器	(399)
(324) 27. 国产炉管规格	(403)
(325) 28. 管式加热炉炉管内膜结垢热阻	(404)
(326) 29. 气体的发热值	(404)
(327) 30. 常用燃料油性质	(405)
(328) 31. 炼厂燃料气体性质	(406)
(329) 32. 气体热焓公式的系数	(406)
(330)	
(331)	
(332)	
(333)	
(334)	
(335)	
(336)	
(337)	
(338)	
(339)	
(340)	
(341)	
(342)	
(343)	
(344)	
(345)	
(346)	
(347)	
(348)	
(349)	
(350)	
(351)	
(352)	
(353)	
(354)	
(355)	
(356)	
(357)	
(358)	
(359)	
(360)	

绪 论

一、化学工程学科的发展

19世纪90年代国外高等学校相继设置化学工程系,开设的课程都是针对不同化工行业编写的生产工艺学。到20世纪初,逐步认识到化学工程中通用的物理操作的共性。1923年美国麻省理工学院的著名教授W. H. 华克尔等人编写了第一部关于这些物理操作共性的著作——化工原理,并把这些物理操作统称为化工单元操作,从而完成了从化工生产工艺到单元操作的发展,在认识上是一次飞跃。我国于20世纪20年代创办化学工程系,并开设化工原理课程。

20世纪人们逐步认识到,纷杂的化工生产工艺都是由化学反应和物理操作有机组合而成,而物理操作的本质是动量传递、热量传递和质量传递三个传递过程,而且它们之间有很多可以类比之处。20世纪60年代,科学家提出了“三传一反”的概念。1962年美国科学家C. D. 本奈特等编写了“动量、热量和质量传递”。这些研究工作开辟了化学工程发展过程的第二个历程。

20世纪70年代以后,随着科学技术和计算机应用的快速发展,使化学工程成为更完整的体系,并走向了“化工优化集成”、“分子模拟”的新阶段。同时,化学工程与相邻学科相融合形成了若干的分支,诸如生物化学工程、分子化学工程、环境化学工程、能源化学工程、计算化学工程等。

进入21世纪后,化学工程学科发展具有下述特征:

(一) 化学工程基础研究的重要性将更加突出

随着知识与经济的全球化,对知识产权保护意识的加强和全球科学技术的高度发展,从基础研究到创新所获得的成果,其市场价值将很快被知识创新转化为生产力,并且加以严格保护。所以,加强诸如催化、生物、材料等工艺性基础研究和多相湍流、相界面物理化学等工程性基础研究是十分重要的。

(二) 化学工程与化学工艺的研究更加紧密结合

20世纪50年代,化学工程学科重组为化学分离工程与化学反应工程两大门类,到20世纪末,已经显示出必须将工程与工艺密切结合,才能使分离工程和反应工程有更高水平的发展。所以必然会发生新的学科重组,譬如重组为“化学分离工程与工艺”和“化学反应工程与工艺”两个研究方向。

(三) 过程集成化和“生态工业园区”的建立

在21世纪,由于清洁生产需要,应该在可持续发展理论和系统论等普遍方法论的指导下,将不同尺度上的技术和工具集成起来,除了在微观层次上采用产品革新、原料替代、工艺过程改进等方法进行改造外,还要认识到任何一个工业系统都不是孤立的,而是与周围其他系统相关联的。生态工业追求整个系统从原料、中间产物、废物到最终产品的物质循环。也就是说,一个完整的生态系统在一定外部能量输入的条件下是没有严格的原料、产品、废物之分的,即一个生产过程的废物可以作为另一个过程的原料。生态工业涉及系统科

学与工程、生态学、环境科学与工程、化学工程与工艺等，是一个跨学科的交叉领域，可解决环境和经济的协调问题。

以石油和天然气为起始原料生产各种化工产品成为化学工业的重要组成部分。石油化学工程学科既具有化学工程的普遍性，又具有特殊性。石油化学工程原理是石油化学工程学科极为重要的专业技术基础课。

二、研究对象、内容及任务

石油化工工业是由许多生产过程所构成的。此生产过程在教科书上称为工艺过程，它是指将一定的物料经过多种物理的和化学的加工过程，制造成合乎一定要求的各种产品或中间产品的过程。例如炼油工业中的常压蒸馏，就是将原油经过脱盐、脱水、换热、加热和蒸馏等过程的处理，以得到汽油、煤油、柴油、重馏分油的生产过程，其原理流程如图1所示。

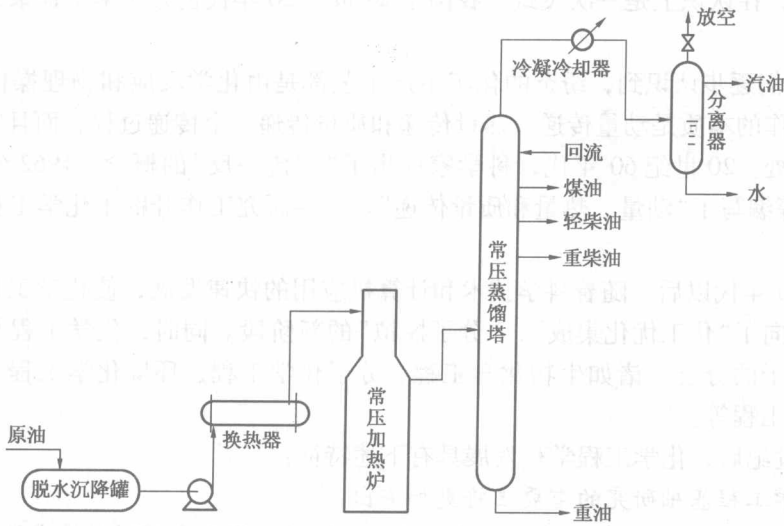


图1 原油常压蒸馏原理流程

再如石油化工中的裂解分离装置，就是将原料油（汽油及柴油）经过加热、高温裂解、压缩、低温分离，以得到乙烯和丙烯等化工原料的生产过程，其原理流程见图2。

炼油与石油化工工业中的生产过程是很多的。随着科学技术的发展，会不断提出新的要求，新的生产过程会不断出现。但经过分析会发现，各种工艺过程是由一些原理上相同的基本单元所构成的。上面所举的两个工艺过程是由物料沉降、压缩和输送、加热和冷却、蒸馏、干燥、化学反应等基本单元所组成。组成工艺过程的基本单元即称为单元过程或单元操作。在炼油与石油化工工业中，除了化学反应外，原料和反应产物的提纯、精制、加热和冷却等单元操作基本上是纯物理过程，按其操作目的可分为五类：①物料的增压、减压和输送，如流体输送、气体压缩、固体流态化及气力输送等；②物料的混合或分散，如搅拌；③物料的加热或冷却，如加热、冷凝、冷却、蒸发等；④非均相混合物的分离，如沉降、过滤、离心分离等；⑤均相混合物的分离，如蒸馏、吸收、萃取、吸附等。

就各单元操作的内容而言，它们都包括过程与设备两个方面。研究各单元操作就是为了掌握过程的规律，并设计设备的结构和大小，以使过程在有利的条件下进行。

本书重点介绍石油加工及石油化工有关单元过程的基本原理、计算方法及其设备的结

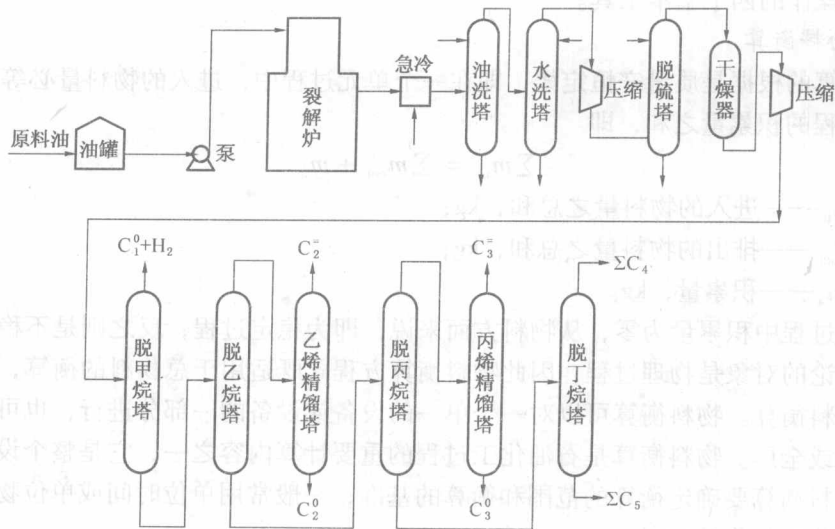


图2 烯烃生产原理流程图

构、操作方法、选型与发展方向等，培养学生运用这些基本理论分析和解决石油化工单元过程中各种工程实际问题的能力。因此，《石油化学工程原理》与《化工原理》、《单元操作》等属于同一学科，是石油院校化学工程与工艺、环境工程、应用化学、过程装备与控制工程、自动化等专业的重要技术基础课，对于独立工作能力、解决实际问题的能力培养以及进行科学研究、发展新的技术和设备是很重要的。

要特别强调的是，希望读者通过对本书的学习，重视有关基本概念、基本知识以及基本方法的牢固掌握和结合工程实际的灵活运用。至于涉及本书各章更为深广的介绍，除有关的专题文献以外，一般可参阅《化学工程手册》^[5]。

三、研究单元操作的基本方法及基本工具

对石油化工工业中的单元操作进行研究是生产发展的需要。在许多单元操作的研究过程中，人们逐渐认识到它们物理作用的本质只是动量传递、热量传递和质量传递三个传递过程，因此传递现象是研究各单元操作的关键所在。各单元操作也就有着共同的研究方法。

由于实际生产问题的复杂性，诸如设备的几何形状、被处理物料的物性的千变万化，要对一个个具体设备中的生产过程进行真实的数学描述并求解方程将是十分困难的。人们只能采用两种研究方法：一种方法是用实验研究方法直接测取各变量之间的关系，得出经验公式，从而避免了复杂的数学描述。但是这种经验公式的应用范围常常是极为局限的，而且不能反映过程的实质，只有在用别的方法均无法表达时才采用此类经验公式。另一种方法是数学模拟法，即在对过程细致观察的基础上，对实际问题的描述在保证主要部分准确的基础上进行合理的简化，从而建立起数学模型，然后进行实验，测定由上述数学模型所得出的方程式中的系数和指数。这种方法是半经验的，但是它基本上反映了过程的真实面貌，由此得出的半经验公式的应用范围便比较广，也在一定程度上反映了过程的实质，在化工计算中应用的大多数公式属于此类公式。

研究单元操作时，要用到四个基本概念，即质量守恒、能量守恒、相平衡关系和过程速率。化工计算中的物料衡算和能量衡算是前两个概念的应用，这两个衡算和相平衡、速率构

成研究单元操作的四个基本工具。

(一) 物料衡算

物料衡算的根据是质量守恒定律，即在一个单元过程中，进入的物料量必等于排出的物料量与该过程的积累量之和，即

$$\sum m_{in} = \sum m_{out} + m_a \quad (1)$$

式中 $\sum m_{in}$ ——进入的物料量之总和，kg；

$\sum m_{out}$ ——排出的物料量之总和，kg；

m_a ——积累量，kg。

如果在过程中积累量为零，从物料方面来说，即为稳定过程，反之则是不稳定过程。由于此处所讨论的对象是物理过程，因此物料衡算方程式既适用于总物料的衡算，也适用于某一组分的物料衡算。物料衡算可以对一个单一的设备或设备的一部分进行，也可以包括全流程、全车间或全厂。物料衡算是石油化工过程的重要计算内容之一，它是整个设计计算的基础。进行物料衡算要确定衡算的范围和衡算的基准，一般常用单位时间或单位物料质量为基准。采用单位时间作基准时：

$$\sum W_{in} = \sum W_{out} + \frac{dm_a}{d\tau} \quad (2)$$

式中 $\sum W_{in}$ 、 $\sum W_{out}$ ——进入及排出的物料质量流量的总和，kg/s；

$\frac{dm_a}{d\tau}$ ——物料质量积累速率，kg/s。

在连续稳定过程中，设备内应无物料积累增量，即 $\frac{dm_a}{d\tau} = 0$ ，故 $\sum W_{in} = \sum W_{out}$ 。

【例1】 在某连续萃取设备中，用循环使用的煤油提取废蜡纸中的蜡，每小时废蜡纸处理量为200kg，其中含25%（质量分数，下同）的蜡及75%的纸。循环使用过的煤油中含3%的蜡。操作达到稳定后，由实验测得处理过的纸上沾有11.3%的煤油，此外还含有0.199%的蜡，余下的为纸，同时还测得用过的煤油中含蜡量增加到40.26%。试求每小时：

- (1) 从废蜡纸中提取蜡的质量数；
- (2) 循环煤油量；
- (3) 所获得的含蜡煤油量。

解：先依题画出示意图，如图3

所示：

- (1) 每小时从废蜡纸中提取蜡的质量数

在萃取的过程中，纯纸的质量不会变化，故在物料计算中，以1kg纸为基准会使计算变得比较简单。

废蜡纸中含纸的质量数：

$$200 \times 0.75 = 150 \text{ kg/h}$$

废蜡纸中蜡对纯纸的质量比：

$$25/75 = 0.3333 \text{ kg 蜡 / kg 纸}$$

处理过的纸中蜡对纯纸的质量比：

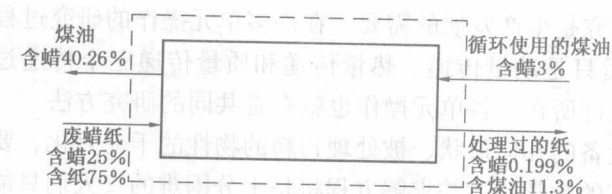


图3 例1附图

$$\frac{0.199}{100 - 0.199 - 11.3} = 0.00225 \text{ kg 蜡 / kg 纸}$$

每小时提取蜡的质量数:

$$150 \times (0.3333 - 0.00225) = 49.66 \text{ kg/h}$$

(2) 每小时循环煤油量

对图中虚线框作物料衡算, 以 1h 作为基准。

总物料衡算:

$$200 + W_1 = W_3 + W_2 \quad (\text{A})$$

蜡的衡算

$$200 \times 0.25 + 0.03W_1 = 0.00199W_3 + 0.4026W_2 \quad (\text{B})$$

式中 W_1 ——每小时循环煤油量, kg/h;

W_2 ——每小时获得含蜡煤油量, kg/h;

W_3 ——处理过的纸量(包括所含的蜡及煤油), kg/h。

前面已算得纯纸量为 150kg/h, 因此

$$W_3 = \frac{100}{100 - 0.199 - 11.3} \times 150 = 169.5 \text{ kg/h}$$

将 W_3 的值代入(A)、(B)两式, 联解求出每小时循环煤油量 $W_1 = 100.3 \text{ kg/h}$ 。

(3) 每小时所获得的含蜡煤油量

将 W_1 的值代入式(A)可得 $W_2 = 130.8 \text{ kg/h}$ 。

【例 2】 某炼油厂管式加热炉采用减压渣油作为燃料, 测得烟道气的体积组成(干基, 即不计烟道气中的水蒸气)为 $\text{CO}_2 12.9\%$ 、 $\text{O}_2 3.8\%$ 、 $\text{N}_2 83.3\%$ 。烟道气的温度为 623K, 绝对压强可视为与当地气压相同, 为 101.33kPa, 设外界空气含水蒸气量可忽略不计, 且燃料油中只含碳和氢, 试求:

(1) 实际空气用量与理论空气用量之比;

(2) 烟道气的湿基(即包括水蒸气在内)组成。

解: 取 100kmol 干烟道气为基准。

(1) 实际空气用量与理论空气用量之比

烟道气中的氮完全来自空气, 空气中含氮 79% (体积分数), 故产生 100kmol 的干烟道气所需的实际空气量为

$$100 \times \frac{0.833}{0.79} = 105.4 \text{ kmol}$$

由于烟道气中有氧存在, 但并无 CO 存在, 因此空气用量是过剩的, 100kmol 烟道气中氧含量为 $100 \times 0.038 = 3.8 \text{ kmol}$ 。相当的过剩空气量为

$$\frac{3.8}{0.21} = 18.1 \text{ kmol}$$

理论空气用量为 $105.4 - 18.1 = 87.3 \text{ kmol}$ 空气

实际空气用量与理论空气用量之比为

$$\frac{105.4}{87.3} = 1.21$$

(2) 烟道气的湿基组成

空气总消耗量中氧的含量 = $105.4 \times 0.21 = 22.13 \text{ kmol}$

干基烟道气中氧的含量 = $100 \times 0.129 + 100 \times 0.038 = 16.7 \text{ kmol}$

两部分相差的氧必与燃料油中的氢化合而生成水蒸气，其量为

$$(22.13 - 16.7) \times 2 = 10.86 \text{ kmol}$$

烟道气总量 = $100 + 10.86 = 110.86 \text{ kmol}$

烟道气的湿基组成为：

$$\text{H}_2\text{O} \quad \frac{10.86}{110.86} \times 100\% = 9.8\%$$

$$\text{CO}_2 \quad \frac{12.9}{110.86} \times 100\% = 11.6\%$$

$$\text{O}_2 \quad \frac{3.8}{110.86} \times 100\% = 3.4\%$$

$$\text{N}_2 \quad \frac{83.3}{110.86} \times 100\% = 75.2\%$$

(二) 能量衡算

根据能量守恒定律，对于连续、稳定操作过程，输入系统的总能量必等于输出系统的总能量。在这里，输入系统的总能量包括输入物料带进系统的能量及外界传入系统的热量，输出系统总能量包括输出物料带走的能量及系统对外界所做的功。

由于在许多化工设备中，主要涉及机械能和热能，因此本书主要涉及机械能衡算和热量衡算，其计算方法与物料衡算基本相同，也要确定衡算范围和基准，通常用单位质量或单位体积的总物料或单位时间作为能量衡算的基准。在热量衡算中基准温度的选定是十分重要的，从参考资料中查取热焐数值时，一定要注意其基准。因为化工计算中的焐值定义为物料所携带的热量，与物料的状态有关，是相对值，因此，在计算入方与出方物料的热焐时也必须保持相同的基准。

准确地进行某装置或某一范围的能量衡算，对于石油化工工程师是非常重要的，它可以提供设备内气液相流率大小的数据，也可以了解生产操作中能量利用和损失情况，以便确定设备的能力。

(三) 相平衡关系

在炼油和石油化工生产中，涉及相间物质传递的单元操作很多，其中主要有蒸馏、吸收、吸附和萃取等。当不平衡的两相接触时在相间将发生物质交换，直至各相的性质（如温度、压力和组成等）不再变化为止。当达到这种状态时，我们称两相处于平衡状态。此时各相的组成通常是不相同的，各种分离过程正是利用这种平衡组成的差别来进行分离的。由于平衡状态是物质传递过程可能达到的极限程度，因此，表示平衡两相组成之间的关系可以用来判断传质过程进行的方向和可能达到的限度。

(四) 过程速率

过程速率即单位时间通过某一指定面积的物质量或热量。过程速率是决定过程设备尺寸的重要因素。任何一个体系，如果不是处于平衡状态，就必然向平衡状态变化，以多大的速率趋向平衡，这在工程上是极为重要的问题，它取决于体系的不平衡程度及影响过程变化的许多其他因素。体系的不平衡程度称为过程的推动力，而影响过程的其他因素则为过程阻力。过程的速率与推动力成正比，推动力的性质取决于过程的内容。动量传递过程的推动力是速度差；热量传递过程的推动力是温度差；质量传递过程的推动力是相浓度差。过程速率与过程阻力成反比，这种关系类似于电学中的欧姆定律。

在研究单元操作时，除了应用以上四个基本规律研究过程的变化和进行设备的设计计算以外，还要进行技术经济分析，以确定最优的过程方案。

四、单位制及单位换算

(一) 单位与单位制

一个物理量的大小是通过数值和单位来表示的。由于各种物理量之间存在着客观的联系，因此不必对每个物理量都单独进行选择，通常是选定几个必不可少的独立物理量，称之为基本量，所规定的基本量的单位则称为基本单位。其他物理量的单位可根据其定义或物理方程导出，所以这些物理量被称为导出量，其单位称为导出单位。例如当选定时间和长度为基本量，选定秒和米为基本单位时，速度便是导出量，其单位则为导出单位，在这里可以由定义写出为米/秒。

基本单位和导出单位的总和称为单位制。由于从不同的角度对基本量及其单位进行选择，就有了不同的单位制。在我国，根据国务院于1984年2月27日发布的《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》，以国际单位制单位为基础，除保留少数国内外习惯或通用的非国际单位制的单位外，不允许再使用非法定计量单位。本书采用法定计量单位。过去我国采用的单位制为绝对单位制和工程单位制，为了便于读者查阅科技资料，有必要对此作一简单介绍，并应熟练掌握它们之间的换算。

1. 绝对单位制

厘米·克·秒制(简称CGS制)基本单位中，长度单位是厘米，质量单位是克，时间单位是秒。其他单位可由定义或物理方程导出。

米·千克·秒制(简称为MKS制)基本单位中，长度单位是米，质量单位是千克，时间单位是秒。

2. 工程单位制

绝对单位制过去常用于科学实验和数据手册中；而工程上则通用工程单位制，其基本单位中，长度单位是米，力的单位是公斤，时间单位是秒，在此制中，质量的单位就变为导出单位。

3. 国际单位制

过去由于各种不同的单位制混合使用，致使一个物理量常常有多种单位，这显然不利于科学技术的发展和国际交流。1960年10月第十一届国际计量会议制定了一种国际上统一的国际单位制，其代号为SI。国际单位制的基本量及其单位、辅助单位以及化工中常用的具有专门名称的导出单位分别列于表1及表2。

表1 国际单位制的基本单位和辅助单位

类别	物理量	单位名称	单位符号
基本单位	长度	米	m
	质量	千克	kg
	时间	秒	s
	电流	安[培]	A
	热力学温度	开[尔文]	K
	物质的量	摩[尔]	mol
辅助单位	发光强度	坎[德拉]	cd
	平面角	弧度	rad
	立体角	球面度	sr

注：[]内的字，在不致混淆的情况下可以省略。