

高等学校教学参考书

工业化学与化工计算

陈之川 主编
胡修慈 审定

化学工业出版社

化
工

Q015
15

版
社

高等学校教学参考书

工业化学与化工计算

陈之川 主编

胡修慈 审定

化学工业出版社

(京)新登字039号

内 容 提 要

本书是高等学校化工设备与机械专业的教学参考书。

全书共分七章。第一章为工业化学与化工计算的基础知识,介绍有关的基本概念、化工生产过程的基本组成及部分通用化工机械与设备。第二章至第五章为工业化学部分,分别介绍硫酸、纯碱、合成氨和石油加工等典型的生产工艺,阐明生产方法的基本特点,主要工艺条件及其确定的原则,生产流程的安排,主要设备的基本结构等,并对每种产品的工艺过程特点作综合评述。第六章和第七章为化工计算部分,分别介绍物料衡算与能量衡算的基本概念和基本方法,并结合生产实际列举较多的例题。

本书可作为化工设备与机械专业的教学参考书,也可供有关方面的技术人员参考。

高等学校教学参考书 工业化学与化工计算

陈之川 主编

胡修慈 审定

责任编辑:王素文

封面设计:任 辉

化学工业出版社

(北京市朝阳区惠新里1号)

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787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张10 $\frac{3}{4}$ 字数264千字

1992年5月第1版 1994年5月北京第2次印刷

印 数 4,201—6,700

ISBN 7-5025-0981-X/G·261

定 价 7.90元

前 言

本书是根据1988年11月全国高等学校化工设备与机械专业教学指导委员会审定的《工业化学与化工计算》教学参考书编写大纲编写的。

本书作为化工机械类专业学生所使用的化工工艺方面的教材，其主要特点是重点突出、深入浅出、并密切联系生产实际，能够使学生在较短的时间内，了解化工生产的概貌，掌握化工计算的基本方法，为化工机械的设计奠定必要的基础。考虑到本课程在学生生产实习之前讲授，且有的高校该专业不设化学课，有的则学时较少，学生对有关化学及化工生产的知识了解较少，故第一章为工业化学与化工计算基础，介绍与化工生产及计算有关的基本概念，包括化学平衡、相平衡和反应速度等基本内容，并简述化工生产过程的基本组成、主要操作参数、化工单元操作的分类及一些通用化工机械与设备。第二章至第五章为工业化学部分，本书选择硫酸、纯碱、合成氨及石油加工等较典型的基础化工产品生产工艺作为教学对象，阐明生产方法的基本特点，主要工艺条件及其确定原则、生产流程的安排，主要设备的基本结构等，并对每种产品的工艺过程特点作综合评述，使学生对化工生产的特点有个清晰的印象，利于举一反三，掌握化工生产的概貌。第六章、第七章为化工计算，其中包括物料衡算及能量衡算，着重介绍有关基本概念及基本方法，并联系生产实际列举较多的例题。特别注意选用工业化学中提及的典型工艺过程作为计算实例，以加深对化学工艺的理解，使全书前后呼应。本书是按40学时编写的。

本书由河北工学院陈之川副教授主编，河北工学院胡修慈教授审定。书中绪论、第一章至第五章由陈之川副教授编写，第六章、第七章由河北工学院刘遵仁副教授编写。河北工学院黄子恒副教授对第五章进行了审阅并提出了宝贵意见。

本书虽经多次审稿、定稿，但由于水平有限，书中还会有错误和不妥之处，欢迎广大师生及读者批评指正，编者谨表衷心感谢。

编者

目 录

绪论	1
一、工业化学	1
二、化学工业	1
三、化工计算	3
第一章 工业化学与化工计算基础	5
第一节 化工生产中的一些基本概念	5
一、化工生产中的主要操作变量	5
二、化学反应的分类	9
三、化学反应速度与化学平衡	10
四、相平衡	12
第二节 化工生产中的一些通用机械与设备	14
一、化工生产过程的基本组成	14
二、流体输送机械	15
三、换热设备	17
四、传质设备	17
复习题	19
第二章 硫酸工业	20
第一节 概述	20
一、用途广泛的基础化工产品——硫酸	20
二、生产硫酸的原料	20
三、硫铁矿生产硫酸的主要工艺过程	20
四、我国的硫酸工业	21
第二节 二氧化硫炉气的制备	21
一、硫铁矿焙烧反应的特点	21
二、沸腾焙烧与焙烧炉	22
三、沸腾焙烧炉的主要操作条件	24
第三节 炉气的净化	25
一、炉气净化的主要方法	25
二、炉气净化的流程	27
第四节 二氧化硫的氧化和三氧化硫的吸收	28
一、反应的化学平衡	28
二、二氧化硫氧化反应催化剂	29
三、二氧化硫催化氧化的工艺条件	30
四、二氧化硫转化器	32
五、二氧化硫催化氧化的工艺流程	33

六、三氧化硫的吸收.....	34
第五节 硫酸生产工艺的基本特点综述.....	35
一、硫酸生产流程的基本特点.....	35
二、三个主要反应过程的比较.....	35
三、反应热的利用.....	35
四、“三废”治理.....	36
复习题.....	37
第三章 纯碱工业	38
第一节 概述.....	38
一、纯碱的主要用途和我国的纯碱工业.....	38
二、氨碱法生产纯碱的主要过程.....	38
第二节 石灰石的煅烧和盐水吸氨.....	39
一、石灰石煅烧过程的主要特点.....	39
二、石灰窑的结构及其主要操作指标.....	40
三、盐水的精制和吸氨.....	42
第三节 氨盐水碳酸化和重碱的过滤.....	45
一、氨盐水碳酸化过程的特点及工艺条件分析.....	45
二、碳酸化工艺流程和碳化塔.....	46
三、重碱的过滤.....	48
第四节 重碱的煅烧和氨的回收.....	49
一、重碱煅烧过程的特点和煅烧炉.....	49
二、氨的回收过程及蒸氨塔.....	51
三、蒸氨塔的主要操作条件.....	53
第五节 氨碱法纯碱生产工艺的基本特点综述.....	53
一、制碱生产总流程及其基本特点.....	53
二、五个主要反应过程的比较.....	55
三、氨碱法制碱的难题与联合制碱法的开发.....	56
复习题.....	57
第四章 合成氨工业	58
第一节 概述.....	58
一、合成氨及其在国民经济中的重要地位.....	58
二、我国的合成氨工业.....	58
三、合成氨的生产方法.....	58
第二节 固体燃料气化制半水煤气.....	59
一、半水煤气的工业生产方法.....	60
二、间歇式制半水煤气的工作循环.....	61
三、间歇式制取半水煤气的工艺流程及操作条件.....	61
四、煤气发生炉.....	63
第三节 气态烃蒸汽转化制原料气.....	64
一、气态烃蒸汽转化反应的特点.....	64

二、生产合成氨原料气的工业方法	65
三、天然气蒸汽转化的工艺流程	66
四、一段转化炉	67
第四节 原料气的变换与净化	68
一、原料气的脱硫	68
二、一氧化碳的变换	68
三、二氧化碳的脱除	71
四、少量一氧化碳等的脱除	71
第五节 氨的合成	72
一、反应的化学平衡	72
二、催化剂及氨合成的工艺条件	72
三、原料气的压缩和氨合成工艺流程	75
四、氨合成塔	78
第六节 合成氨生产工艺的基本特点综述	81
一、合成氨工艺流程的基本特点	81
二、合成氨生产中几个气-固相催化反应过程的比较	81
三、合成氨装置的大型化及主要节能措施	82
复习题	82
第五章 石油加工工业	84
第一节 概述	84
一、工业的血液——石油	84
二、我国的石油加工工业	84
三、石油的组成和油品的主要类别	84
四、石油加工的工艺方案	87
第二节 石油的蒸馏	88
一、原油蒸馏的基本概念	88
二、原油精馏的特点及工艺流程	89
三、原油精馏塔	91
第三节 催化裂化	92
一、催化裂化的目的及主要步骤	92
二、催化裂化反应过程的特点	93
三、催化裂化的工艺流程及主要设备	95
四、催化裂化的主要操作条件	96
第四节 催化重整	97
一、催化重整的目的及主要步骤	97
二、催化重整反应过程的特点	98
三、催化重整的主要操作条件	99
四、催化重整的工艺流程和主要设备	101
第五节 石油加工工艺的基本特点综述	102
一、石油加工工艺的基本特点	102

二、关于热量的综合利用	102
复习题	103
第六章 物料衡算	104
第一节 物料平衡方程式	104
一、系统与环境	104
二、稳定过程与非稳定过程	104
三、物料平衡方程式	104
第二节 物料衡算的基本方法	106
一、系统的划分	106
二、计算基准的选取	108
三、物料衡算方程式的建立	110
四、物料衡算的基本程序	116
第三节 带有循环过程的物料衡算	119
一、循环过程放空量的计算	119
二、循环物料的计算	120
第四节 物料衡算的综合分析	124
一、物料衡算中的变量与方程	124
二、物料衡算的综合分析及举例	125
复习题	127
第七章 能量衡算	130
第一节 能量平衡方程式	130
一、能量的形式	130
二、能量平衡方程式	131
三、热量平衡方程式	134
第二节 焓与热	135
一、焓的基本性质	135
二、焓差与热交换量的关系	135
三、热量的分类与计算	137
第三节 非反应过程的热量衡算	141
一、非反应过程的热量衡算式	141
二、热量衡算的步骤及举例	142
第四节 化学反应过程的热量衡算	145
一、基本方法	145
二、工业反应器的热量衡算	148
复习题	151
参考文献	153
附录	154
附录一 国际原子量表	154
附录二 各种单位换算表	154
附录三 常压下某些单质和化合物的真实摩尔热容	155

附录四	常压下某些气体在25~1300℃之间的平均摩尔热容.....	157
附录五	某些单质和化合物的物理性质数据.....	157
附录六	常压下某些气体的焓值.....	159
附录七	常压下某些气体的统一基准焓.....	159
附录八	饱和水与饱和水蒸汽表(按温度排列).....	160

绪 论

一、工业化学

20世纪以来,全世界化学工业取得了飞速的发展。其增长速度比整个工业高得多。据粗略统计,1899年至1970年,世界工业总产值增长了17倍,而化学工业的产值提高了94倍。由于生产实践的需要,围绕化工生产的各种基础理论和应用科学也取得了巨大的进展,并建立了多种学科,工业化学就是其中之一。

工业化学是研究原料经过化学和物理变化生成产品的方法和过程,包括实现这一转变的全部措施。其具体研究内容有:化工生产中原料和生产方法的选择;生产流程的设计;所用设备的结构、材质和操作;催化剂及其它物料的影响;操作条件的确立;生产过程的控制;产品的规格及副产品的分离和利用;安全技术、产品的技术经济指标和环境保护等。“工业化学”与“化学工艺学”、“化工生产技术”等学科,在研究内容上并无原则的区别。作为一门学科,工业化学具有下列特点:

(1) 从整体上说,工业化学属于应用科学的范畴。

(2) 以工业规模的具体产品的生产过程为主要研究内容,较侧重于分析研究产品生产过程的“特性”,在研究多种生产过程的特性中体现化工生产的“共性”。

(3) 化工生产过程中一般具有化学反应,这也是与其它生产过程的最大不同点。因而,化学反应过程必然是工业化学的研究重点。

本书将选择具有典型化工过程及设备的产品作为教学内容,每种产品大体按实际生产流程的顺序进行介绍,由于篇幅所限,着重阐明主要工艺过程和设备的特点,使之对每一生产过程有清晰的概念。通过几个典型产品生产过程的综述与比较,了解化工生产的概貌和特点。

二、化学工业

工业化学作为一门应用学科,必然以实际化工生产过程为依托。而实际化工生产所形成的庞大生产系统就是化学工业。所以,工业化学的体系必与化学工业相对应。

化学工业的定义是:以天然物质或其它物质为原料,通过化学和物理的方法使其性质及形态发生变化,而成为生产资料或生活消费品的一种工业。作为化学工业基本原料的天然物质,按其形态分类主要有:

(1) 气体:如空气、天然气、油田伴生气等;

(2) 液体:如水、海水、盐湖水、石油等;

(3) 固体:如煤、食盐、石灰石、以及含有不同化学成分的各种矿物。

此外,粮食与农产品的废料、木材加工中的副产物等,也可作为化工原料。

由上述基本原料,可生产出大量的基础化工原料,如硫酸、纯碱、烧碱、合成氨、电石、乙烯、丙烯、二丁烯、苯、甲苯和二甲苯等。进一步加工,可生产各种化学制品,如化学肥料,塑料,合成纤维,合成橡胶,以及各种生活消费品。仅就我国统计,化工产品已达37000种。而世界范围内的化工产品,则超过50000种。

由于化工产品种类繁多,通常要进行分类。不同国家或不同部门,分类方法也不尽相

同。本书将参照目前国内较为一致的分类法并适当考虑教学特点，按产品的性质及加工过程比较相似的原则进行分类。大体上，化学工业可分为17个分支：

1. 化学肥料工业：包括合成氨、氮肥、磷肥、钾肥、复合肥料、微量元素肥料等产品的生产；
2. 硫酸工业；
3. 制碱工业：包括纯碱和烧碱等产品的生产；
4. 无机盐工业：其产品包括钡盐、铬盐、硼盐等各种无机盐，金属钠等各种单质，除硫酸、纯碱、烧碱以外其它无机酸、无机碱等；
5. 燃料化学工业：包括煤的气化、干馏、液化及其副产品的加工，电石，石油炼制等；
6. 石油化工及有机原料工业：包括石油或其它油品的裂解、产物的分离及有机产品的合成，重要的有机原料如有机酸、酯、醚、酮、和醛等的生产；
7. 橡胶工业：包括天然橡胶的加工及产品的制造，合成橡胶的生产及产品的制造；
8. 合成纤维工业：包括聚酯类的涤纶、聚酰胺类的锦纶、聚乙烯醇类的维尼纶等产品的生产；
9. 合成树脂和塑料工业：其产品包括多种高分子聚合物，如聚氯乙烯、聚苯乙烯等，以及各种日用及工程塑料制品，离子交换树脂等；
10. 国防化工：包括炸药，为核工业、航天航空工业配套的化工产品，如同位素、推进剂、强氧化剂、密封材料、特种涂料、高性能的复合材料等的生产；
11. 农药工业：其产品包括杀虫剂、杀菌剂、杀螨剂、杀鼠剂、除草剂、植物生长调节剂等；
12. 染料工业：包括纺织、轻工、食品等多种用途的染料的生产；
13. 涂料和颜料工业：包括颜料、油料、填充料、溶剂、油漆、建筑物的内外墙涂料等的生产；
14. 医药工业：包括各种天然药物及合成药物的生产；
15. 感光材料和磁性记录材料：包括片基、感光乳剂，磁性材料及添加剂等的生产；
16. 化学试剂工业：包括各种等级的化学试剂的生产；
17. 精细化学品工业：其产品包括催化剂，助剂，以及表面活性剂、粘合剂、添加剂、水处理剂、香料、皮革、造纸等工业用化学品。

在上述17种化工行业中，前9种可归属于基础化学工业。其特点是对资源、能源的依赖程度较高，生产规模较大，多数产品可作为其它行业的原材料。因此，基础化学工业属于生产生产资料的重化学工业。后7种行业，可归属于轻化学工业。其特点是对资源与能源的依赖程度较小，生产批量不大，品种繁多，产品附加价值较高等。有的国家或某些作者，将上述后7种行业泛称为精细化学工业。国防化工则兼有轻、重化学工业的特点。

必须指出，冶金（包括钢铁、有色金属及稀有金属的冶炼）、硅酸盐（玻璃、水泥、陶瓷、耐火材料等）、造纸及制糖等工业，其生产过程虽然与化学工业相似。但由于上述工业的产品产量大，产值高，在国民经济中具有其重要性，习惯上已从化学工业中分离出来，分属冶金工业与轻工业。有些本属化工范围的产业，为便于行政或经济管理也隶属于其它部门，如石油加工工业属能源部门，国防工业属国防部门，医药工业属卫生医药部门等。故从行政或经济管理方面看，化学工业的范围要狭窄一些。上述17个行业，再加上已从化学工业分离出的冶金、轻工等行业中与化工相似部分，可认为是广义化学工业。化工机械专业的设

置，是面向广义化学工业的。

与其它工业比较，化学工业从整体上来说具有如下特点：

1. 生产过程中物料之间存在化学反应，故其生产一般是以一个或多个反应装置为骨干，由一系列化工设备及管道组合起来，构成相互衔接、紧密联系的生产流程来实现的。这一特点使化学工业较易实现连续化生产。

2. 化学工业是资金密集度及技术密集度均较高的工业。对需要量很大的基础化工产品，不仅生产厂的烧碱较大，而且还采用了比较完善的生产流程和先进的生产装置。对轻化学工业，虽产量较小，但品种繁多，而且需要不断更新，以适应市场的需要，故一般属于技术密集型工业。

3. 化学工业是一种原料、生产方法和产品多样性的工业。化学工业可从不同原料出发制造同一产品，也可用同一原料制造许多不同产品。应用同一原料制造同种产品时，还可采用多种不同的生产路线。从这个意义上说，化学工业是一种灵活性很强的多功能的工业。

4. 化学工业的产品与国民经济及人民生活有着密不可分的联系。如化肥、农药及塑料薄膜三大农用物资，合成树脂、合成纤维和合成橡胶等三大合成材料，石油炼制工业生产的液化石油气及各种油品，染料、涂料及各种精细化学品等，对工农业生产及丰富人民物质生活均具有重要作用。

5. 化学工业中的多种产业是“能耗大户”。大宗的基础化工产品，如化学肥料、电石、石油化工及有机原料工业，大都以煤、石油、天然气为原料，而这些原料又是宝贵的能源。在化工生产中，往往需要在较高的温度、压力下操作，有的甚至采用电解、电热等操作，因而对热能、电能的需要量较大。被加热了的物料往往还要进行冷却，需要大量的冷却水，故化学工业也是用水大户。以1983年为例，我国化学工业耗原煤5180万吨，居全国各工业第二位（仅次于冶金工业）；电耗493亿度，列全国各工业之首。因而，化学工业中节约能源及水资源，进一步综合利用各种资源和能源，具有十分重要的意义。这也是化工科学技术领域中长期的研究课题。

6. 安全生产和环境保护，是化学工业中普遍关注的问题。化工生产中一些物料具有易燃、易爆及有毒的性质，在一些设备中物料处于高温、高压的工艺状况，因而，如何安全地进行生产是个首要的问题。这就要求从工程设计、设备制造与安装、生产操作及企业管理等方面都有相应的得力措施，以确保生产能安全、正常地进行。

此外，在通过化学反应的方法生产产品时，不可避免地要出现一些人们不期望的副产品，有些还对环境造成污染。与其它工业比较，化学工业的废气、废液和废渣等“三废”较多。因而必须执行国家有关环境保护的法律和规定，进行有效的治理及综合利用，以保证化学工业的顺利发展。

三、化工计算

化工生产过程中，物料将发生一系列的物理、化学变化。物料的组成、各种组分的数量、反应系统的温度等将随之变化。与此同时，由反应物料所构成的系统，必与外界存在各种能量的交换。

化工计算的基本内容，包括物料衡算和能量衡算两部分。物料衡算是以质量守恒定律为基础，结合化学反应、相变化等有关基本定律或关系进行的定量计算，以确定工艺过程中物料组成及各组分的量等。能量衡算则是根据能量守恒定律，结合化学反应、相变化中能量变化关系进行的定量计算，以确定工艺过程中所交换的能量及有关操作指标的变化。因而，化

工计算是以质量及能量守恒定律为主要依据，对化工过程的物料及能量进行的定量计算。

化工计算的主要目的是：

（1）取得设备设计所需要的基础数据。化工计算是整个化工设计的基础部分，必须在设备设计或选型之前完成。

（2）为生产过程中各种操作参数的调节与控制提供定量的依据。正常生产中，反应物的配比，各种物料的流量，包括循环量、放空量等，均可通过化工计算确定。在实际生产中，以化工计算的结果为依据，规定某些操作参数的允许变化范围，使生产得以稳定、均衡地进行。

（3）提供工艺过程中原材料消耗量，中间产品和产品生成量的数据，估算能量（如电、水蒸汽、燃料等）的消耗量及冷却水的需要量，并对生产过程进行一定的技术经济分析。

本书第六、七章将对物料及能量衡算进行论述，并结合典型化工过程进行演算，以期掌握化工计算的基本概念及主要计算方法。

第一章 工业化学与化工计算基础

第一节 化工生产中的一些基本概念

一、化工生产中的主要操作变量

为了确保化工生产稳定、正常进行，必须严格控制过程中各种操作变量（或称操作参数）。对化工生产具有重要影响的操作变量主要有：温度、压力、流量、流速和物料的组成等。现对上述变量的意义及其单位简介于后。

1. 温度

温度的高低起源于人们对冷热的感觉。其本质是物质内部分子不规则运动强度的一种反映。为了统一的表示物体温度的高低，须对温度的基点及分度方法作出规定，这种规定称为温标。摄氏温标（ t ）规定常压下水的正常冰点为 0°C ，水的正常沸点为 100°C 。国际单位制（SI制）中采用热力学温标（ T ）（或称绝对温标），单位为K（开尔文），并将水的三相点（水—水蒸汽—冰同时存在的状态）的温度作为基点，定义该点温度为 273.16K （摄氏温标为 0.01°C ），水的正常沸点为 373.15K 。因此，两种温标的关系为：

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

此外，在英制单位中有华氏温标（ $^{\circ}\text{F}$ ），这种温标与热力学温标的换算可参考附录二。

2. 压力

也称压强，是均匀垂直地作用于单位面积的力。SI制中压力的单位是Pa（帕斯卡）。1Pa表示作用于 1m^2 面积上的力为1N。在米制及工程单位制中，压力的单位有：标准大气压（atm）、工程大气压（at）、巴（bar）、毫米汞柱（mmHg）及毫米水柱（mmH₂O）等。此外，还有英制单位（psia），即磅力/英寸²（绝）。目前化工生产中，沿用工程大气压者仍较多。1工程大气压表示 1cm^2 的面积上承受的力为1(kgf)（即9.807N）。主要换算关系有：

$$1(\text{at}) = 1(\text{kgf/cm}^2) = 0.9807 \times 10^5 \text{Pa} = 0.09807 \text{MPa}$$

$$1(\text{atm}) = 760(\text{mmHg}) = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa} = 0.101325 \text{MPa}$$

工艺上有时将 0.1MPa 近似的视为1(at)或1(atm)。其它压力单位的换算关系可参考附录二。在化工生产中，常将上述的压力概念称为绝对压力。此外还有表压力和真空度两种表示法。表压力系指一般压力计表示的高于当地大气压力的数值，而真空度则表示低于当地大气压力的数值。其关系为：

$$p_g = p_{ab} - p_{at} \quad (1-2)$$

$$p_v = p_{at} - p_{ab} \quad (1-3)$$

式中 p_g ——表压力；
 p_{ab} ——绝对压力；
 p_v ——真空度；
 p_{at} ——当地大气压力。

不同压力表示法的关系如图1-1所示。通常如未指明当地大气压力数值，则可近似地取该值

为0.1MPa (或1atm、1at) 对工程大气压, 绝对压力用 (ata) 表示, 表压力用 (atg) 表示。

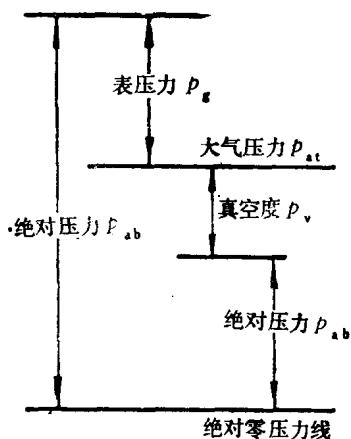


图 1-1 不同压力表示法的关系

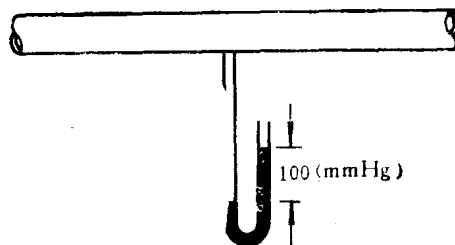


图 1-2 U型管压差计

〔例 1-1〕 安装在某管路中的开口式U型管压差计, 其液面高度差为100 (mmHg), 已知当地大气压力为0.10133MPa (1atm), 试计算管内的绝对压力。

〔解〕 U型管压差计中装入汞, 由于管内压力与大气压力不等而形成液位差。该液位差也即管内的表压力。管内绝对压力等于U型管液位差所产生的表压力与当地大气压力之和。按式 (1-2) 有:

$$\begin{aligned} p_{ab} &= p_g + p_{at} \\ &= 100 \times 1.3332 \times 10^2 + 0.10133 \times 10^6 \\ &= 0.11466 \text{MPa} \end{aligned}$$

即管内绝对压力为0.11466MPa。

〔例 1-2〕 某真空管路上压力表的读数为真空度 0.8 (kgf/cm²)。已知当地大气压力为0.1MPa。试计算该管路中的绝对压力。

〔解〕 已知真空度 p_v 为0.8 (kgf/cm²)，按式 (1-3):

$$\begin{aligned} p_{ab} &= p_{at} - p_v \\ &= 0.1 \times 10^6 - 0.8 \times 0.9807 \times 10^5 \\ &= 2.16 \times 10^4 \text{Pa} \end{aligned}$$

即管内绝对压力为 $2.16 \times 10^4 \text{Pa}$, 或21.6kPa。

3. 流量和流速

生产线中单位时间物料的输送量称为流量。时间可取s、min或h。物料量可用质量、体积、mol 或 kmol 等来表示。物料为气体时, 由于其体积随温度、压力的不同而有较大的变化, 故气体的体积流量应指明所处的温度、压力条件。为方便起见, 将0℃、0.101325MPa (1atm) 时的体积称为标准状态体积, 其流量称为标准体积流量。单位为 m³(标)/s, 其中 m³(标) 为标准立方米。

流速是指一定流量的气体或液体在单位时间内沿流动方向流过的距离。若流量为 $V (\text{m}^3/\text{s})$, 设备或管道的截面积为 $A (\text{m}^2)$, 则流体的流速 v 为:

$$v = \frac{V}{A}, \quad \text{m/s} \quad (1-4)$$

4. 物料组成

化工生产中, 物料多为混合物, 如混合气或由溶质和溶剂构成的各种溶液。混合物的组成或混合物中各组分的浓度, 可用下述方法表示:

(1) 质量分数或质量百分数

以混合物总质量为基准表示的组成。设混合物中任一组分 i 的质量为 G_i , 混合物的总质量为 G , 则 i 组分的质量分数 w_i 为:

$$w_i = \frac{G_i}{G} \quad (1-5)$$

质量分数乘以 100%, 即为质量百分数。质量分数或百分数多用于溶液。如 96% 硫酸, 17% 氨水, 分别表示溶液中 H_2SO_4 和 NH_3 的质量百分数。

(2) 体积分数或体积百分数

以混合物的总体积为基准表示的组成。设混合物中 i 组分的体积为 V_i , 混合物总体积为 V , 则 i 组分的体积分数 φ_i 为:

$$\varphi_i = \frac{V_i}{V} \quad (1-6)$$

体积分数乘以 100% 即为体积百分数。混合气体多用此表示法。

对气体来说, 当压力不太高时, 不同气体只要温度、压力相同, 则每摩尔气体的体积就相同。低压下气体的 P - V - T (即压力-体积-温度) 关系符合理想气体定律。即:

$$pV = nRT \quad (1-7)$$

式中 p —— 压力, Pa;

V —— 体积, m^3 ;

T —— 温度, K;

n —— 气体的摩尔数, mol;

R —— 通用气体常数, $R = 8.314 J / (mol \cdot K)$ 。

若 p , V 单位与上述不同, 则 R 值应进行单位换算。气体在 273.15 K、0.101325 MPa (1 atm) 时, 1 mol 的体积约为 22.4 L。将式 (1-7) 移项得:

$$V = (RT/p)n \quad (1-8)$$

对于一定的 p 、 T , (RT/p) 项为常数。故气体摩尔数 n 与体积 V 具有对应关系。将式 (1-8) 代入式 (1-6) 中得:

$$\varphi_i = \frac{V_i}{V} = \frac{(RT/p)n_i}{(RT/p)n} = \frac{n_i}{n} \quad (1-9)$$

可见, 混合气中气体的体积分数 (或体积百分数) 等于其摩尔分数 (或摩尔百分数)。例如, 空气的大致组成为: O_2 21% (体积), N_2 79%, 此值也是空气中 O_2 和 N_2 的摩尔百分数。

(3) (ppm) 和 (ppb)

(ppm) 为百万分数, 英文 parts per million 的缩写。1 (ppm) 表示百万分之一 (即 10^{-6})。 (ppb) 为十亿分数, parts per billion 的缩写。1 (ppb) 表示十亿分之一 (即 10^{-9})。对气体来说, 大多指体积。对固体或液体, 则多指质量。(ppm) 和 (ppb) 常用来表示物料中杂质的含量。

(4) 溶液中物质的量浓度

表示单位体积溶液中组分 i 的摩尔数。设溶液中组分 i 的摩尔数为 n_i , 溶液总体积为 V , 则溶液中组分 i 的物质的量浓度 c_i 为:

$$c_i = \frac{n_i}{V} \quad (1-10)$$

c_i 的单位为 mol/L。例如, 氨水浓度为 10 (NH₃) mol/L, NH₃ 的摩尔质量为 17 g/mol, 故 1L 溶液中含氨 170g。因此有:

$$c_i = \frac{m_i}{M_i V} \quad (1-11)$$

式中 m_i ——溶液中物质 i 的质量, g;

M_i ——物质 i 的摩尔质量。

此外, 还有用其它单位表示混合物中组分的浓度, 如 g/L, kg/m³, g/m³ 等。

〔例 1-3〕测得某锅炉的烟道气组成为: O₂ 15.2% (体积), N₂ 68.6%, CO 4.4%, CO₂ 11.8%。试换算成质量分数浓度。

〔解〕以 1mol 烟道气为计算基准。将某组分的摩尔分数 (即体积分数) 乘其摩尔质量, 可得烟道气中该组分摩尔质量, 再除以烟道气的平均摩尔质量即为所求。混合气的平均摩尔质量可用下式计算:

$$\bar{M} = \sum_{i=1}^n \varphi_i M_i \quad (1-12)$$

式中 $\bar{M}$ ——混合气的平均摩尔质量;

M_i ——组分 i 的摩尔质量;

φ_i ——组分 i 的体积分数或摩尔分数;

n ——混合气中的组分数。

按式 (1-12) 计算烟道气的平均摩尔质量:

$$\begin{aligned} \bar{M} &= 0.152 \times M_{O_2} + 0.686 \times M_{N_2} + 0.044 \times M_{CO} + 0.118 \times M_{CO_2} \\ &= 0.152 \times 32 + 0.686 \times 28 + 0.044 \times 28 + 0.118 \times 44 \\ &= 30.496 \end{aligned}$$

即 1mol 烟道气的质量为 30.496g。

烟道气中各组分的质量分数为:

$$\begin{aligned} O_2 &= 0.152 \times 32 / 30.496 = 0.16 \\ N_2 &= 0.686 \times 28 / 30.496 = 0.63 \\ CO &= 0.044 \times 28 / 30.496 = 0.04 \\ CO_2 &= 0.118 \times 44 / 30.496 = 0.17 \end{aligned}$$

〔例 1-4〕已知浓硫酸的密度为 1.84 (kg/L), 其中 H₂SO₄ 含量为 95% (质量), 求该硫酸溶液中 H₂SO₄ 的浓度 (mol/L)。

〔解〕硫酸的摩尔质量: $M_{H_2SO_4} = 1.008 \times 2 + 32.07 + 15.994 \times 4 = 98.08 \text{ g/mol}$

以 1L 溶液为计算基准, 由式 (1-11) 得:

$$\begin{aligned} C &= \frac{1.84 \times 1000 \times 0.95}{98.08 \times 1} \\ &= 17.9 \text{ mol/L} \end{aligned}$$

即该硫酸溶液的浓度为 17.9 mol/L。