

小合成氨工艺计算

江苏科学技术出版社

小合成氨工艺计算

姚虎卿 陈广爱 编

江苏科学技术出版社

小合成氨工艺计算

姚虎卿 陈广爱编

出版：江苏科学技术出版社

发行：江苏省新华书店

印刷：溧阳县印刷厂

开本787×1092毫米 1/32 印张19 插页1 字数400,000

1982年8月第1版 1982年8月第1次印刷

印数1—5,600册

书号：15196·086 定价：1.85元

责任编辑 黄元森

内 容 提 要

本书讲述小合成氨生产过程工艺计算中的基本概念和原理，介绍各生产系统的物料衡算和热量衡算方法，以及各类设备的工艺计算方法，并提供了各种计算公式和数据。

本书主要供小合成氨厂的技术人员和熟练工人阅读，也可供有关设计单位的技术人员和大中专院校无机化工专业的学生参考。

前 言

二十几年来,我国的小合成氨工业不断发展,对农业生产作出了很大的贡献。但是,它还不很完善,还需要在减少能耗、降低成本和改造品种上下很大的功夫。为此还须继续进行工艺和设备的技术改造。而要开展这些工作,都必须通过定量的计算。我们编写此书,就是为了给从事小合成氨工艺的同志提供这方面的系统知识和方法。

本书除介绍了有关化工计算的基本原理和方法外,着重根据小合成氨生产过程,按照各种不同类型的生产工序和设备进行了计算,并注意介绍一些新工艺和新设备的计算方法。为了避免重复,对于同一类型的公式,若在前面章节中已演算过,则在后面的计算中一般都省略计算步骤,只给出最后结果。

在编写过程中,我们得到了江苏省化工厅陈东总工程师的指导,书稿承南京化学工业公司氮肥厂沈浚总工程师和江苏省化工厅王师祥工程师审阅。在此一并致谢。

待书出版后,我们还期望得到广大读者的进一步批评指正。

编 者

1981年5月

目 录

第一章 化工计算基础	1
第一节 气体	1
一、理想气体状态方程式	1
二、气体混合物	4
三、临界状态与对比状态	7
四、实际气体的计算	10
第二节 热力学及其在工艺计算中的应用	16
一、基本概念	17
二、热力学第一定律及其应用	18
三、热力学第二定律及其应用	30
四、自由焓与有用功及化学平衡常数	43
第三节 有效能及化工过程热力学分析	47
一、有效能	47
二、有效能与理想功	57
三、有效能衡算及有效能损失	57
四、化工过程的热力学分析	62
第四节 气液平衡、化学平衡及平衡进行度	71
一、气液平衡	71
二、化学平衡	79
三、平衡进行度	85
第二章 物料衡算与热量衡算	90

第一节 物料衡算与热量衡算的基本概念	90
一、物料衡算	90
二、热量衡算	99
第二节 物料衡算与热量衡算实例	110
一、变换系统锅炉给水加热器的计算	110
二、饱和塔的计算	115
三、变换炉的计算	119
四、变换系统的蒸汽用量与出热水塔变换气温的关系	128
五、固体燃料制气过程的计算	132
六、烃类蒸汽转化制气过程的有关计算	152
七、重油部分氧化法制气过程的计算	159
八、物理法吸收变换气中的二氧化碳时吸收剂用量的计算	167
九、氨水脱除硫化氢的有关计算	171
十、碳化系统的有关计算	176
十一、铜洗系统的有关计算	191
十二、氨合成系统的有关计算	199
十三、联醇系统有关物料量的计算	208
第三章 单元操作及其设备计算	214
第一节 流体力学及流体输送机械	214
一、流速与流量管径的选择	214
二、粘度	216
三、连续性方程式	221
四、柏努利方程式	222
五、阻力计算	227
六、泵与风机	232
七、压缩机的热力计算	243

第二节 换热器的工艺计算	256
一、传热计算基础	257
二、套管式换热器的计算	275
三、列管式换热器的设计计算	281
四、喷淋式水冷器的计算	292
五、蛇管式氨冷器的计算	297
六、螺旋板式换热器的计算	300
七、废热锅炉的计算	309
八、蒸气冷凝给热及冷却冷凝器的计算	313
九、间壁式换热器的最佳计算方法	325
第三节 气体的吸收和调湿设备的计算	335
一、气体吸收过程的基本概念	335
二、填料吸收塔的计算	348
三、板式吸收塔的计算	365
四、湍球吸收塔的计算	379
五、鼓泡式碳化塔的计算	386
六、气体调湿过程的基本概念	391
七、调湿过程填料塔的计算	398
八、波纹板式饱和塔的计算	407
第四章 气固相催化反应过程与反应器的计算	414
第一节 气固相催化反应动力学	414
一、化学反应速度的表示方法	414
二、基元反应的规律	418
三、吸附等温方程	420
第二节 气固相催化反应器工艺计算基础	432
一、气固相催化反应器	432

二、固定床的流体力学与传热过程	452
三、变换反应及氨合成反应的动力学方程	462
第三节 变换器的工艺计算	482
一、工艺条件的确定	482
二、变换器工艺计算	486
第四节 氨合成塔工艺计算	499
一、概述	499
二、微分法	501
三、计算氨含量法	536
四、换热器工艺计算	551
五、塔阻力计算	554
附录 常用物性数据	562
附图	590
参考文献	598

第一章 化工计算基础

小合成氨生产过程所处理的物料绝大部分是气体混合物。要进行工艺计算，就必须掌握有关气体性质及计算的知识。此外，由于化工生产中，无论是流体的流动过程，传热和传质过程，以及化学反应过程，都伴随着能量的变化。因此，掌握研究各种过程中能量转换规律的科学——热力学的知识也是必要的。本章将介绍有关气体计算及热力学第一定律和第二定律，使读者掌握有关功和热的计算以及过程的能量利用率的概念。对有效能的计算和化工过程的热力学分析，化学平衡与气液平衡等也予以介绍。

第一节 气体

小合成氨生产中所处理的气体都是真实气体，真实气体在低压、高温下与理想气体的性质相近，故理想气体的规律在一定的条件下可适用于真实气体，所以为了研究问题的方便，我们先把理想气体做为讨论对象，并在此基础上，再讨论真实气体。

一、理想气体状态方程式

(一) 状态方程式

理想气体状态方程式一般具有如下形式：

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

式中 p ——气体的压力(绝压);

V ——气体的体积;

n ——气体摩尔数;

R ——通用气体常数;

T ——绝对温度。

由于理想气体状态方程式能很好地反映在较高温度和较低压力下的实际情况,特别是它形式简单,便于计算,故常用它计算低压气体的性质。

(二)通用气体常数

式(1-1)中的 R , 对应于方程式中各项选用的单位, 具有固定数值, 而与气体的种类和量的多少无关, 因而称为通用气体常数。

将式(1-1)移项得

$$R = \frac{pV}{nT} \quad (1-2)$$

现将常用的 R 值与 pVn 的单位之间的关系整理如表 1-1 所示。

表 1-1

压力 p	体积 V	数量 n	R
大气压	升	摩尔	0.082 大气压·升·摩尔 ⁻¹ ·度 ⁻¹
公斤/米 ²	米 ³	千摩尔	848 公斤·米·千摩尔 ⁻¹ ·度 ⁻¹
	焦耳	摩尔	8.3143 焦耳·摩尔 ⁻¹ ·度 ⁻¹
	卡	摩尔	1.987 卡·摩尔 ⁻¹ ·度 ⁻¹

T 都用绝对温度 K 来表示。

上述各 R 的数值在计算气体的压力和体积的关系时, 多用 0.082 大气压·升/(摩尔·度), 计算热效应和能量时用

1.987 卡/(摩尔·度)，而在气体压缩及增减湿过程的计算中则用 848 公斤·米/(千摩尔·度)。

(三) 气体常数

当利用气体状态方程式计算气体的重量时，可将式(1-1)改写为如下形式：

$$pV = G \frac{R}{M} T \quad (1-3)$$

式中 G ——气体重量，

M ——气体分子量。

令 $R_g = \frac{R}{M}$ ，则得

$$pV = GR_g T \quad (1-4)$$

式(1-4)中的 R_g 称为气体常数，显然，气体常数是与气体的种类有关的。表 1-2 列出了常用气体的气体常数。

表 1-2

气 体	H ₂	N ₂	CO	CO ₂	CH ₄	O ₂	水蒸气	空气
R_g 公斤·米/ (千摩尔·度)	420.3	30.26	30.28	19.25	52.90	26.05	47.06	29.27

将气体的气体常数算出后，利用式(1-4)计算气体的重量是方便的。

气体湿含量的定义是：气体中所含水蒸气的重量与气体中干气体重量的比值。即

$$x = \frac{G_{\text{汽}}}{G_{\text{干气}}} \quad (1-5)$$

将气体作为理想气体，则对于 V 米³的气体中的水蒸气和干气体可分别写为：

$$p_{\text{汽}}V = G_{\text{汽}}R_{\text{汽}}T$$

$$p_{\text{干气}}V = G_{\text{干气}}R_{\text{干气}}T$$

两式相除，移项得

$$\frac{G_{\text{汽}}}{G_{\text{干气}}} = \frac{p_{\text{汽}}R_{\text{干气}}}{p_{\text{干气}}R_{\text{汽}}}$$

由此便可得气体湿含量的计算式为：

$$x = \frac{p_{\text{汽}}R_{\text{干气}}}{p_{\text{干气}}R_{\text{汽}}} \quad (1-6)$$

式中 $p_{\text{汽}}$ ——湿气体中水蒸气的分压，

$p_{\text{干气}}$ ——湿气体中干气体的分压，

$R_{\text{汽}}$ ——水蒸气的气体常数，

$R_{\text{干气}}$ ——干气体的气体常数。

例 已知湿空气的总压为 7 公斤/厘米²，湿空气中水蒸气分压为 0.0433 公斤/厘米²，问此湿空气的湿含量为若干？

解 自表 1-2 中查得 $R_{\text{汽}} = 47.06$ ， $R_{\text{空气}} = 29.27$ ，则

$$\begin{aligned} x &= \frac{p_{\text{汽}}R_{\text{干气}}}{p_{\text{干气}}R_{\text{汽}}} = \frac{0.0433 \times 29.27}{(7 - 0.0433) \times 47.06} \\ &= 0.00387 \text{ 公斤水/公斤空气} \end{aligned}$$

如所处理的是气体混合物，则应求出气体混合物的气体常数。其方法是根据气体混合物的组成将其平均分子量 M_m 求出，然后用平均分子量去除通用气体常数 R 即可。即

$$R_{\text{混}} = R/M_m$$

二、气体混合物

在实际生产中所处理的主要是气体混合物，对气体混合物的组成及其性质是一定要掌握的。

(一) 摩尔分率

各组分在气体混合物中的浓度多用相对百分数表示。如

气体分析数据中的体积百分数就是表示气体混合物组成的一种方法。而在工艺计算中则常用摩尔分率来表示气体混合物的组成。

摩尔分率的定义是：气体混合物中某组分的摩尔数与气体混合物总摩尔数的比值。

若气体混合物中含有 i 种组分，它们的摩尔数为 n_1 、 n_2 、 \dots 、 n_i ，气体混合物的总摩尔数为 n 。则

$$n = n_1 + n_2 + \dots + n_i$$

各组分的摩尔分率为

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= \frac{n_1}{n} \\ y_2 &= \frac{n_2}{n} \\ &\dots \\ y_i &= \frac{n_i}{n} \end{aligned} \right\}$$

并有 $\Sigma y = y_1 + y_2 + \dots + y_i = 1$ (1-7)

(二) 气体混合物的平均分子量

气体混合物的总重量 g 除以总摩尔数 n 即为气体混合物的平均分子量

$$M_m = \frac{g}{n} \quad (1-8)$$

而气体混合物的总重量为各组分重量之和

$$g = g_1 + g_2 + \dots + g_i$$

各组分的重量等于该组分的摩尔数与分子量的乘积， $g_i = n_i M_i$ 。所以平均分子量为

$$M_m = y_1 M_1 + y_2 M_2 + \dots + y_i M_i = \Sigma y_i M_i \quad (1-9)$$

(三)道尔顿分压定律

理想气体混合物的总压力等于各气体组分的分压力之和。这就是道尔顿分压定律，其数学式可表示为

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_i \quad (1-10)$$

所谓各气体组分的分压就是各气体组分在温度不变时，单独占据气体混合物的全部体积时所具有的压力。

理想气体状态方程式既适用于个别气体，也适用于气体混合物。则气体组分的分压 p_i 和气体混合物的总压 p 可分别表示为：

$$p_i = \frac{n_i RT}{V} \quad (1-11)$$

$$p = \frac{nRT}{V} \quad (1-12)$$

式(1-11)除以式(1-12)并移项，得

$$p_i = \frac{n_i}{n} p = y_i p \quad (1-13)$$

式(1-13)说明气体混合物中各组分的分压等于该组分在气体混合物中的摩尔分数与气体混合物总压力的乘积。

(四)阿末格分体积定律

阿末格分体积定律的内容是，气体混合物的总体积等于各气体组分的分体积之和。可用下式表示：

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_i \quad (1-14)$$

式中 V 是气体混合物在压力为 p ，温度为 T 时所具有的体积，而分体积 V_i 是某气体组分在与气体混合物压力、温度相同的条件下，单独存在时所占有的体积。

阿末格分体积定律与道尔顿分压定律相对应，利用同样的推导方法可得如下关系式：

$$V_i = y_i V \quad (1-15)$$

通过对气体混合物性质的讨论，使我们得出如下两个结论：

1. 在一定温度、压力下，气体混合物中某气体组分的分压分数，分容分数及摩尔分数三者相等。即

$$y_i = \frac{p_i}{p} = \frac{V_i}{V} = \frac{n_i}{n} \quad (1-16)$$

2. 在一定温度、压力下，气体混合物中任意两种气体组分之间的分压比、分容比、摩尔数比及摩尔分数之比四者均相等。即

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{y_1}{y_2} \quad (1-17)$$

三、临界状态与对比状态

(一) 临界温度与临界压力

实验证明：单凭降低温度可以使气体液化，而单凭加大压力却不一定能使气体液化，还需看当时的温度条件。各种气体液化时，都有一个温度的限制，在这个温度以上，无论加多么大的压力进行等温压缩，都不能使气体液化。这个温度称为临界温度 T_c 。在临界温度下，使气体液化所需要的最小压力称为临界压力 P_c 。在临界温度和临界压力下，1 摩尔分子物质所占有的体积称为临界体积 V_c 。气体处于临界温度和临界压力下，称为处于临界状态。在工艺计算中，除经常用到临界温度和临界压力外，还要用到临界导热系数 (λ_c)、临界粘度 (μ_c) 等。附表 1 列出了小合成氨工艺计算中常用气体的临界参数。现将 H_2 、 N_2 、 NH_3 的临界温度和临界压力摘录

于表 1-3。

表 1-3

	T_c		P_c
	$^{\circ}\text{C}$	K	大气压
H_2	-239.3	33.2	12.8
N_2	-147.0	126.2	33.5
NH_3	132.4	405.5	117.5

(二) 气体混合物的临界参数

气体混合物的临界参数采用参数混合的方法来求取。即采用将气体混合物看作一个整体，并假想气体混合物这个整体有一个临界状态和一组临界参数。假想临界参数并不等于气体混合物的真正参数，而应将其看成是没有简单物理意义的辅助性质。假想临界参数是气体混合物组成的函数，求取它的规则是纯经验规则。假想临界参数又称为虚拟临界参数、折合临界参数等。

假想临界温度可用下式表示：

$$T_c' = \sum (T_c)_i \cdot y_i \quad (1-18)$$

式中 T_c' ——气体混合物的假想临界温度，K；

$(T_c)_i$ ——组分 i 的临界温度，K；

y_i ——组分 i 的摩尔分率。

假想临界压力与式(1-18)有相似的计算式，即

$$P_c' = \sum (P_c)_i \cdot y_i \quad (1-19)$$

例 已知气体混合物的组成为含 NH_3 10%， H_2 68%， N_2 22%。求该气体混合物的假想临界参数。

解 查表 1-3 得 NH_3 、 H_2 和 N_2 的临界温度和临界压力，然后分别利用式(1-18)和式(1-19)计算。

求气体混合物的假想临界温度