

氮肥工艺设计手册

气体压缩 氨合成 甲醇合成

81.415
8907960

氮肥工艺设计手册

气体压缩 氨合成 甲醇合成

中国寰球化学工程公司 主编

中国石油化工总公司

兰州石油化工设计院 编写

化学工业出版社

内 容 提 要

本书系《氮肥工艺设计手册》的气体压缩、氨合成、甲醇合成分册。主要介绍气体压缩、氨合成、甲醇合成工艺生产过程的设计基础数据、计算方法和计算实用图表等。

本书主要供从事合成氨、合成甲醇的设计和生产技术人员使用，也可供中、高等化工院校师生参考。

氮 肥 工 艺 设 计 手 册

气体压缩 氨合成 甲醇合成

中国寰球化学工程公司 主编

中国石油化工总公司

兰州石油化工设计院 编写

责任编辑：骆文敏

封面设计：任 辉

化学工业出版社出版发行

(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经销

开本787×1092¹/₁₆印张24³/₄字数608千字

1989年1月第1版1989年1月北京第1次印刷

印 数 1—5,000

ISBN 7-5025-0145-2/TQ·107

定 价 8.50元

前 言

氨是氮肥的主要肥料，它可以制造其它氮素肥料或复合、混合肥料，如硫酸铵、硝酸铵、尿素、磷酸铵或氮磷混合肥料，以及氮磷钾混合肥料等。

在工业生产中，氨及氨的加工产品又是合成纤维、塑料和医药的重要原料。此外，在石油炼制、橡胶以及冶金、采矿、制碱、冷冻等工业部门也是不可缺少的。因此，它在国民经济中占有重要的地位。

本分册增写了“甲醇合成”部分，主要考虑甲醇合成生产装置与氨合成生产装置极为相似，且甲醇在有机合成工业中又是重要的有机原料。尤其是近十多年来，随着能源结构的改变，甲醇已从作为化工原料发展为代替石油能源，生产甲醇受到了普遍的重视。因此，增加了这部分的内容，以供从事这方面工作人员参考。

参加本书主编和编写的有中国寰球化学工程公司李贤根和中国石油化工总公司兰州石油化工设计院卢正滔、颜蕴君。完成稿经召开审查会审查定稿。最后由李贤根统一整理和校阅。

本书主要供从事氨合成、甲醇合成的设计和生产技术人员使用，也可供中、高等化工院校师生参考。

本书在编写过程中得到有关单位的大力支持和帮助，谨此表示感谢。

由于我们水平所限、书中不足和错误之处，希广大读者予以指正。

编者 1985年

目 录

第一章 气体的压缩

第一节 压缩机的分类及选用	1
一、压缩机的分类和特点	1
二、活塞式压缩机的分类	1
三、离心式压缩机的分类	1
四、压缩机的选用	2
图 1-1-1 压缩机的适用范围	2
第二节 气体压缩的热力学基础	2
一、气体的状态方程	2
(一) 理想气体的状态方程	2
(二) 实际气体的状态方程	3
表 1-2-1 纯组分的临界性质	6
二、混合气体的热容、焓、熵计算	7
(一) 热容的计算	7
(二) 焓值的计算	7
(三) 熵的计算	7
表 1-2-2 热容系数、基准焓、基准熵	8
第三节 压缩机的工艺计算	8
一、压缩功率及温度的计算——熵平衡、焓校正方法	8
(一) 理论功率及理论温度的计算	8
(二) 实际功率及实际温度的计算	9
二、活塞式压缩机的一般计算方法	9
(一) 功率与温升的计算	9
图 1-3-1 氮气的 Z 、 β 和 B 值	11
图 1-3-2 氢气的 Z 、 β 和 B 值	12
图 1-3-3 甲烷的 Z 、 β 和 B 值	13
图 1-3-4 氢、氮混合气的 Z 、 β 和 B 值	14
图 1-3-5 空气的 Z 、 β 和 B 值	15
图 1-3-6 氧气的 Z 、 β 和 B 值	16
图 1-3-7 一氧化碳的 Z 值	17
图 1-3-8 二氧化碳的 Z 值	17
图 1-3-9 a 压缩系数 Z 与 P_r 、 T_r 的关系 ($P_r=0\sim 0.1$)	17
图 1-3-9 b 压缩系数 Z 与 P_r 、 T_r 的关系 ($P_r=0\sim 1.0$)	18
图 1-3-9 c 压缩系数 Z 与 P_r 、 T_r 的关系 ($P_r=0\sim 10$)	18
图 1-3-9 d 压缩系数 Z 与 P_r 、 T_r 的关系 ($P_r=0\sim 40$)	19
图 1-3-10 常压吸气压缩 1 米 ³ /分气体时的理论功耗 (吸入温度 $t=20^\circ\text{C}$ 时)	19
图 1-3-11 氢氮混合气压缩功率计算	20

图 1-3-12	天然气压缩功率计算	21
图 1-3-13	CO ₂ 气体压缩功率计算	22
图 1-3-14	空气压缩功率计算	23
图 1-3-15	吸入压力P _s 、压出压力P _d 与相对压力损失的关系	24
图 1-3-16	不同对比温度T _r 对比压力P _r 下的绝热指数k _r	25
表 1-3-1	某些气体绝热指数的平均值	25
表 1-3-2	某些气体的绝热指数 k	26
表 1-3-3	多变指数 m 值	26
表 1-3-4	$\frac{k}{k-1}$ 的计算值(或 $\frac{m}{m-1}$)	26
表 1-3-5	不同多变指数时, 容积比值、温度比值和压力比值的关系	27
表 1-3-6	$\varepsilon \frac{k-1}{k} - 1$ 值	27
表 1-3-7	$\frac{k-1}{n k}$ 值	28
表 1-3-8	$\left[\left(\frac{P_{\#}}{P_{\#}} \right)^{\frac{k-1}{n k}} - 1 \right]$ 计算值	28
图 1-3-17	多段压缩的理论功率	29
图 1-3-18	绝热压缩时排气温度与吸气温度T ₁ 及压缩比ε的关系	30
图 1-3-19	最佳压力比的确定	30
图 1-3-20	等温效率与终了压力的关系	31
图 1-3-21	等压力比分配与级数关系	32
(二) 压缩机的输气量和各种效率计算		
图 1-3-22	最终压力、级数与各中间级名义压力选取关系	33
表 1-3-9	吸入口毫米水银柱换算成标准状态的修正系数	34
表 1-3-10	吸入口大气压力换算成标准状态的修正系数	34
图 1-3-23	容积系数λ _v	36
图 1-3-24	m=1.2时, 容积系数及余隙与压缩比的关系	36
图 1-3-25	温度系数与压缩比的关系	37
图 1-3-26	H型四列对称式压缩机	37
表 1-3-11	H型四列对称式压缩机各级泄漏系数的计算	38
三、活塞式制冷压缩机的功率计算		
(一) 制冷机的制冷能力与制冷系数		
(二) 制冷机的功率计算		
表 1-3-12	氨压缩机的理论单位制冷能力 K	40
表 1-3-13	氨的单位容积制冷能力q _v	41
表 1-3-14	立式和V型氨压缩机的输气系数λ	42
表 1-3-15	立式和V型氨压缩机的制冷量换算系数K ₁	43
表 1-3-16	压缩机系列表	44
表 1-3-17	活塞式压缩机选用表	48
四、离心式压缩机一般计算方法		
(一) 离心式压缩机段数的确定和段压比的计算		

图 1-3-27 压缩机段数 J 与省功比 $\Delta \bar{b}$ 的关系	50
(二) 离心压缩机的功率与温升计算	51
图 1-3-28 水力效率与进口流量的关系	52
图 1-3-29 多变能量头与效率、压缩比、分子量及温度的关系	53
(三) 离心压缩机级数与转速的计算	54
图 1-3-30 离心式压缩机估计的特性曲线(吸入温度为40℃)	54
表 1-3-18 a 离心压缩机系列表	55
表 1-3-18 b 离心压缩机选用表	56
第四节 汽轮机的选用	56
一、汽轮机的分类	57
(一) 按级数分类	57
(二) 按缸数分类	57
(三) 按热力过程特性分类	57
二、技术特性	57
表 1-4-1 各种汽轮机的技术特性	57
三、汽轮机的选择	58
(一) 凝汽式汽轮机的选择	58
图 1-4-1 凝汽式透平机的选择图	59
表 1-4-2 质量流量与速度的关系	60
图 1-4-2 进汽压力为29.6大气压时的基本效率	60
图 1-4-3 进汽压力为49.3大气压时的基本效率	60
图 1-4-4 进汽压力为98.7大气压时的基本效率	60
图 1-4-5 速度与效率的关系	60
图 1-4-6 温度与效率的关系	61
(二) 背压式汽轮机的选择	61
图 1-4-7 背压小于19.7大气压汽轮机选择	62
图 1-4-8 背压大于19.7大气压汽轮机的选择	64
表 1-4-3 入口段最大允许速度	65
图 1-4-9 基本效率图	65
图 1-4-10 温度与效率的关系	66
表 1-4-4 a 汽轮机系列表	66
表 1-4-4 b 汽轮机的选用表	67
参考文献	68

第二章 氨 的 合 成

第一节 氨合成过程的物化基础	69
一、氨合成反应的化学平衡与热效应	69
(一) 低压下反应的平衡常数	69
(二) 加压下反应的平衡常数	69
表 2-1-1 常压下不同温度时的平衡常数 K_p	70
表 2-1-2 不同压力下 β 、 I 值	71
表 2-1-3 在不同压力下的 K_p 值 (Larson-Dodge式)	72
表 2-1-4 由实验数据计算的平衡常数 K_p 值	74
图 2-1-1 逸度系数 γ 与对比温度 T_r 、对比压力 P_r 的关系 ($P_r = 0 \sim 4.0$)	75

图 2-1-2	逸度系数 γ 与对比温度 T_r 、对比压力 P_r 的关系 ($P_r=0\sim 20$)	75
图 2-1-3	氮合成反应的 K_p 值与压力和温度的关系	75
表 2-1-5	氮合成反应的 K_p 值	76
表 2-1-6	用公式计算氮合成反应的 K_p 值	76
表 2-1-7	在不同压力下的 K_p 值 (Gillespie-Beattie式)	78
(三) 平衡氨浓度		80
图 2-1-4 a	氢氮混合气中平衡氨含量与温度、压力的关系 ($P=10\sim 1000$ 大气压, $t=200\sim 700^\circ\text{C}$)	82
图 2-1-4 b	氢氮混合气中平衡氨含量与温度、压力的关系 ($P=0\sim 800$ 大气压, $t=200\sim 700^\circ\text{C}$)	82
图 2-1-5	氢氮混合气体及含有惰性气体时, 在不同压力、温度下的平衡氨含量 ($P=0\sim 400$ 大气压, $t=350\sim 550^\circ\text{C}$)	83
表 2-1-8	平衡氨浓度 ($\text{H}_2/\text{N}_2=3$) y_{NH_3} , 分子% (Larson-Dodge数据)	83
图 2-1-6	混合气 $\text{H}_2\text{-N}_2\text{-NH}_3$ 平衡时的列线图	84
表 2-1-9	$P=1\sim 1000$ 大气压, $t=300\sim 640^\circ\text{C}$ 。 $\text{H}_2/\text{N}_2=3$, 无惰性气体存在时, 平衡氨 浓度 y_{NH_3} , 分子%	85
表 2-1-10	$P=100\sim 800$ 大气压, $t=344\sim 600^\circ\text{C}$, 无惰性气体存在时, 平衡氨浓度 ($\text{H}_2/\text{N}_2=3$) y_{NH_3} , 分子%	87
表 2-1-11	不同压力、温度下含有惰性气体时的平衡氨浓度 y_{NH_3} , 分子%	89
表 2-1-12	$P=320$ 大气压, 不同氢氮比下平衡氨浓度 y_{NH_3} , 分子%	95
图 2-1-7	在 $P=300$ 大气压、 $t=500^\circ\text{C}$ 和不同氢氮比下混合气体中的平衡氨浓度	95
(四) 氮合成反应的热效应		95
表 2-1-13	常压下不同温度时氮合成反应热效应 ΔH° 值	96
表 2-1-14	纯 $\text{N}_2:3\text{H}_2$ 气生成 $17.6\%\text{NH}_3+20.6\%\text{N}_2+61.8\%\text{H}_2$ 的混合热 ΔH_M	97
表 2-1-15	不同压力下, 反应最后生成物组成为 $17.6\%\text{NH}_3+20.6\%\text{N}_2+61.8\%\text{H}_2$ 的表现 反应热 ΔH_R	97
表 2-1-16	在 500°C , 不同压力下的反应热	98
图 2-1-8	不同温度、压力下的氮合成反应热 ΔH_F	98
表 2-1-17	不同压力、温度下的反应热 ΔH_F	99
二、汽液相平衡常数及混合气体中饱和氨含量		115
(一) 用经验公式计算混合气体中饱和氨含量		115
表 2-1-18	不同温度、压力下液氨上方混合气体中的饱和氨含量	115
图 2-1-9	混合气体中饱和氨含量与温度、压力的关系 ($P=200\sim 400$ 大气压 (绝), $t=-15\sim 95^\circ\text{C}$)	116
图 2-1-10	混合气体中饱和氨含量与温度、压力的关系 ($P=100\sim 1000$ 大气压, $t=-30\sim 70^\circ\text{C}$)	117
表 2-1-19	饱和氨浓度计算系数	118
表 2-1-20	混合气体中饱和氨含量计算值	118
图 2-1-11	混合气体中饱和氨含量与温度、压力的关系 ($P=100\sim 700$ 大气压, $t=-20\sim 18^\circ\text{C}$)	118
(二) 汽液相平衡常数的计算		118
表 2-1-21	平衡时气相中氨的百分含量, $\text{H}_2:\text{N}_2:(\text{CH}_4+\text{Ar})=3:1:0$, $\text{CH}_4:\text{Ar}=2$	119
表 2-1-22	饱和压力下, 饱和液氨克分子体积及组分的偏克分子体积计算系数	125
表 2-1-23	组分在液氨中亨利常数的系数值	125

表 2-1-24	组分在液氨中的自交互作用系数值	125
图 2-1-12	在 $H_2/N_2=3$ 时氨混合物中氨的相平衡常数K值	126
图 2-1-13	在 $H_2/N_2=3$ 时氨混合物中氢的相平衡常数K值	127
图 2-1-14	在 $H_2/N_2=3$ 时氨混合物中氮的相平衡常数K值	128
图 2-1-15	甲烷在氨中的平衡常数K值	129
图 2-1-16	氩在氨中的相平衡常数K值	130
图 2-1-17 a	在 $H_2/N_2=3$ 时氨混合物的近似露点	131
图 2-1-17 b	在 $H_2/N_2=3$ 时氨混合物的近似泡点	132
表 2-1-25	氨的相平衡常数K值 $H_2:N_2:(CH_4+Ar)=3:1:0, CH_4:Ar=2$	133
表 2-1-26	氢、氮、氩及甲烷的K值 ($P=75\sim 500$ 大气压, $t=-30\sim 50^\circ C$)	136
	(三) 不同温度、压力下混合气体中饱和水蒸汽含量	139
表 2-1-27	不同温度、压力下混合气中饱和水蒸汽含量	139
图 2-1-18	压缩氮氢混合气中饱和水蒸汽含量	139
三、氨合成反应动力学		139
	(一) 动力学方程式的应用及反应速度常数的计算	140
图 2-1-19	函数值 $\varphi(t)$ 与温度及活化能的关系 ($t=370\sim 450^\circ C, E$ 取 E_1 值)	146
图 2-1-20	函数值 $\varphi(t)$ 与温度及活化能的关系 ($t=450\sim 540^\circ C, E$ 取 E_2 值)	147
表 2-1-28	$y_{I_0}=0.05$ 时函数 $F(y_{NH_3}^{\bullet})$ 与 $y_{NH_3}^{\bullet}$ 之间的关系	148
表 2-1-29	$y_{I_0}=0.10$ 时函数 $F(y_{NH_3}^{\bullet})$ 与 $y_{NH_3}^{\bullet}$ 之间的关系	148
表 2-1-30	$y_{I_0}=0.15$ 时函数 $F(y_{NH_3}^{\bullet})$ 与 $y_{NH_3}^{\bullet}$ 之间的关系	149
表 2-1-31	$y_{I_0}=0.05$ 时函数 $F(y_{NH_3})$ 与 y_{NH_3} 之间的关系	149
表 2-1-32	$y_{I_1}=0.10$ 时函数 $F(y_{NH_3})$ 与 y_{NH_3} 之间的关系	149
表 2-1-33	$y_{I_1}=0.15$ 时函数 $F(y_{NH_3})$ 与 y_{NH_3} 之间的关系	149
表 2-1-34	$y_{I_1}=0.05$ 时函数 $G(y_{NH_3})$ 与 y_{NH_3} 之间的关系	150
表 2-1-35	$y_{I_1}=0.10$ 时函数 $G(y_{NH_3})$ 与 y_{NH_3} 之间的关系	150
表 2-1-36	$y_{I_1}=0.15$ 时函数 $G(y_{NH_3})$ 与 y_{NH_3} 之间的关系	150
表 2-1-37	温度 $450^\circ C$ 时不同压力的k值, 大气压 $^{0.5}$ /时	150
表 2-1-38	不同压力下, A_{106}, A_{109} 型催化剂的 k_T 计算值	151
表 2-1-39	压力300公斤/厘米 2 下, A_{106} 催化剂的 k_T 值, 大气压 $^{0.5}$ ·秒 $^{-1}$	151
表 2-1-40	压力300公斤/厘米 2 下, A_{109}, A_{110-1} 催化剂的k值, 大气压 $^{0.5}$ ·时 $^{-1}$	151
图 2-1-21	A_6, A_9 型催化剂速度常数与温度的关系	153
表 2-1-41	函数 $f(y_{NH_3}) = \frac{y_{NH_3}(1-y_{NH_3})^{1.5}}{(1+y_{NH_3})^3[L^2(1-y_{NH_3})^4-y^2_{NH_3}]}$ 值	154
表 2-1-42	积分值 $I(y_{NH_3}) = \int_0^{y_{NH_3}} \frac{y_{NH_3}(1-y_{NH_3})^{1.5} dy_{NH_3}}{(1+y_{NH_3})^3[L^2(1-y_{NH_3})^4-y^2_{NH_3}]}$	158
表 2-1-43	不同压力、温度下的 $I_{y_{NH_3}} \cdot 10^3$ 值 ($P=300$ 大气压, 200 大气压, 100 大气压)	163
图 2-1-22 a	函数值 $f(y_{NH_3})$ 与氨含量及平衡氨浓度的关系($y^*_{NH_3}=0.15\sim 0.31$)	166
图 2-1-22 b	函数值 $f(y_{NH_3})$ 与氨含量及平衡氨浓度的关系($y^*_{NH_3}=0.32\sim 0.37$)	167
图 2-1-22 c	函数值 $f(y_{NH_3})$ 与氨含量及平衡氨浓度的关系($y^*_{NH_3}=0.38\sim 0.49$)	168
图 2-1-22 d	函数值 $f(y_{NH_3})$ 与氨含量及平衡氨浓度的关系($y^*_{NH_3}=0.50\sim 0.60$)	169

图 2-1-23	积分值 $I(y_{\text{NH}_3})$ 与混合气中氨含量 y_{NH_3} 及平衡氨含量 $y^*_{\text{NH}_3}$ 的关系 ($y_{\text{NH}_3}=5\sim 30\%$, $y^*_{\text{NH}_3}=12\sim 62\%$)	170
图 2-1-24 a	积分值 $I(y_{\text{NH}_3})$ 与混合气中氨含量及平衡氨含量的关系 ($y_{\text{NH}_3}=2\sim$ 16% , $y^*_{\text{NH}_3}=22\sim 40\%$)	171
图 2-1-24 b	积分值 $I(y_{\text{NH}_3})$ 与混合气中氨含量及平衡氨含量的关系 ($y_{\text{NH}_3}=$ $6\sim 30\%$, $y^*_{\text{NH}_3}=22\sim 40\%$)	171
图 2-1-24 c	积分值 $I(y_{\text{NH}_3})$ 与混合气中氨含量及平衡氨含量的关系 ($y_{\text{NH}_3}=16\sim 30\%$; $y^*_{\text{NH}_3}=42\sim 54\%$)	172
图 2-1-24 d	积分值 $I(y_{\text{NH}_3})$ 与混合气中氨含量及平衡氨含量的关系 ($y_{\text{NH}_3}=6\sim 30\%$; $y^*_{\text{NH}_3}=42\sim 60\%$)	172
图 2-1-24 e	积分值 $I(y_{\text{NH}_3})$ 与混合气中氨含量及平衡氨含量的关系 ($y_{\text{NH}_3}=18\sim 30\%$; $y^*_{\text{NH}_3}=42\sim 60\%$)	172
图 2-1-25 a	$P=135$ 大气压, A_0 型催化剂的活性曲线 (温度 $t=380\sim 500^\circ\text{C}$)	173
图 2-1-25 b	$P=135$ 大气压, A_0 型催化剂的活性曲线 (温度 $t=410\sim 520^\circ\text{C}$)	174
图 2-1-26	$P=250$ 大气压, A_0 型催化剂函数值 $\frac{1}{\gamma}$ 与温度的关系	175
图 2-1-27	$P=250$ 大气压, A_0 型催化剂函数值 $\frac{1}{\gamma}$ 与温度的关系	176
图 2-1-28	$P=300$ 大气压, A_0 型催化剂函数值 $\frac{1}{\gamma}$ 与温度的关系	177
图 2-1-29	$P=300$ 大气压, A_0 型催化剂函数值 $\frac{1}{\gamma}$ 与温度的关系	178
图 2-1-30	$P=300$ 大气压, A_0 型催化剂 $\frac{1}{\gamma}-t$ 列线图	179
图 2-1-31	$P=300$ 大气压, A_0 型催化剂 $\frac{1}{\gamma}-t$ 列线图	179
(二) 催化剂内表面利用率的计算		180
表 2-1-44	催化剂内表面利用率 ζ 与 ψ 的关系	181
表 2-1-45	$-f'(y_{\text{NH}_3}S)$ 值用2-1-103式计算	181
表 2-1-46	不同粒度催化剂的当量直径	181
表 2-1-47	一定气体成分下的压缩因子 Z	182
表 2-1-48	不同组分下的 $D^{\circ}_{\text{NH}_3}$ 值	182
表 2-1-49	不同温度下的 M 值 $1/\text{米}^2$	183
表 2-1-50	$P=300$ 公斤力/厘米 ² , 不同温度下催化剂的内表面利用率 ζ (惰性气含量 15% , 颗粒 $3.3\sim 4.7$ 毫米, $\text{H}_2/\text{N}_2=3$, 气体成分如表2-1-48)	183
表 2-1-51	工业生产条件下催化剂的内表面利用率 ζ	184
表 2-1-52	催化剂内表面利用率 ζ 计算参考值	184
(三) 最适宜温度的计算		184
表 2-1-53	在 $P=320$ 公斤力/厘米 ² , $\text{H}_2/\text{N}_2=3$, $Y_{\text{I}_0}=0.15$ 逆反应活化能 $E_2=41990$ 千卡/ 公斤分子, 最适宜温度 T_{opt} 与平衡温度 T^* 之间的关系	185
(四) 动力学计算的近似式		185
第二节	氨合成催化剂	186

一、氨合成催化剂的基本组成、规格与使用条件	186
表 2-2-1 A ₁₀₆ 、A ₁₀₉ 、A ₁₁₀₋₁ 型催化剂的温度特性	187
表 2-2-2 A ₁₀₆ 、A ₁₀₉ 、A ₁₁₀₋₁ 型催化剂的活性	187
表 2-2-3 A ₁₁₀₋₁ 型催化剂的耐热性	187
表 2-2-4 国外氨合成催化剂主要性能	187
二、催化剂的物理性能	189
三、催化剂的还原条件	189
表 2-2-5 A ₁₀₆ 型催化剂还原条件	189
表 2-2-6 A ₁₀₉ 型催化剂还原条件	190
表 2-2-7 A ₁₁₀₋₁ 型催化剂还原条件	190
四、催化剂的还原及出水量计算	190
第三节 氨合成系统工艺流程及主要设备	191
一、工艺流程	191
图2-3-1 中置式体外副产蒸汽氨合成流程	192
表2-3-1 图2-3-1的工艺物料数据表 (以年产氨5万吨计算)	193
图2-3-2 双级氨冷式氨合成流程	194
表2-3-2 图2-3-2的工艺物料数据表 (以年产氨30万吨计算)	195
图2-3-3 三级氨冷式氨合成流程	196
表2-3-3 (一) 图2-3-3的工艺物料数据表 (一)(以年产氨30万吨计算)	197
表2-3-3 (二) 图2-3-3的工艺物料数据表 (二)(以年产氨30万吨计算)	197
图2-3-4 四级氨冷式氨合成流程	198
表2-3-4 图2-3-4的工艺物料数据表 (以年产氨30万吨计算)	199
图2-3-5 溴化锂吸收低温制冷式氨合成流程	200
表2-3-5 图2-3-5的工艺物料数据表 (以年产氨30万吨计算)	201
表2-3-6 各流程的工艺操作指标	201
表2-3-7 各流程的热量回收及冷量消耗	201
二、主要设备	202
(一) 氨合成塔	202
图2-3-6 三套管式氨合成塔	202
(二) 废热锅炉	202
(三) 开工加热器	202
图2-3-7 双层径向合成塔	203
图2-3-8 轴向冷激式氨合成塔	203
表2-3-8 氨合成塔的主要工艺参数比较	204
图2-3-9 中置式废热锅炉	204
图2-3-10 开工加热器	205
(四) 其它设备	205
表2-3-9 换热设备类	205
第四节 氨合成系统的工艺计算	205
一、物料衡算	205
(一) 初始数据	205
(二) 氨合成塔进出口的物料衡算	206
图2-4-1 氨产量与合成率之间的关系	206
图2-4-2 氨合成塔进气量与合成率的关系	207

(三) 新鲜气体加入量与弛放气体量的计算	207
图2-4-3 当 $Y_{NE,Ar}=0.4\%$ 和 $30^{\circ}C$ 时 $Y_{NE,CH_4}, Y_{O_2}, Y_{O,CH_4}, V_{O,Y}$ 之间的关系	208
图2-4-4 当 $Y_{NE,Ar}=0.4\%$ 和 $30^{\circ}C$ 时 $Y_{NE,CH_4}, Y_{O_2}, Y_{O,Ar}, V_{NE}$ 之间的关系	209
(四) 溶解气量的计算	210
图2-4-5 汽液平衡示意图	210
表2-4-1 汽液相组成计算表	211
表2-4-2 汽液相组成计算表	211
(五) 氨合成系统物料衡算步骤	211
二、热量平衡的计算	211
(一) 氨合成塔的热量衡算	212
图2-4-6 合成塔进出口温差与氨合成率的关系	212
(二) 中置式废热锅炉回收热量流程, 从塔内一段换热器出来气体的最佳温度计算	212
图2-4-7 不同的塔最终出口温度下, 一次引出温度与副产蒸汽压力及气量的关系	214
图2-4-7 a 塔最终出口温度为 $90.5^{\circ}C$ 时	214
图2-4-7 b 塔最终出口温度为 $100^{\circ}C$ 时	214
图2-4-7 c 塔最终出口温度为 $110^{\circ}C$ 时	214
图2-4-7 d 塔最终出口温度为 $120^{\circ}C$ 时	215
图2-4-7 e 塔最终出口温度为 $130^{\circ}C$ 时	215
图2-4-7 f 塔最终出口温度为 $140^{\circ}C$ 时	215
(三) 热量回收器 (或废热锅炉) 回收热量与出二段换热器 (或热热换热器) 的气体温度关系	216
图2-4-8 回收热量与合成塔出口温度的关系	216
(四) 液氨焓值的计算	217
表2-4-3 纯液氨的焓值	217
第五节 主要设备的工艺计算	218
一、氨合成塔催化剂层的计算	218
(一) 绝热反应催化剂层的计算	218
图2-5-1 绝热反应时催化剂层中温度与氨含量的关系	220
(二) 双套管和三套管内部连续换热式催化剂层的计算	220
(三) 单管并流与单管逆流内部连续换热式催化剂层的计算	221
(四) 冷激式催化剂层的计算	222
图2-5-2 冷激式催化剂层的物料分布	223
(五) 催化剂床层与冷却壁间的给热系数	224
图2-5-3 $N_u=0.023Re^{0.8}\cdot Pr^{0.4}$ 算图	226
(六) 内部换热式催化剂管冷管分布均匀度的计算	226
图2-5-4 冷管排列方案	227
表2-5-1 冷管分布均匀度系数 β_1	227
二、氨合成塔内气体流动阻力的计算	228
表2-5-2 国内催化剂的A值	229
表2-5-3 K值与催化剂颗粒大小之间的关系	229
图2-5-5 空间速度与压力降的关系($1000\sim 30000\text{时}^{-1}$)	229
图2-5-6 空间速度与压力降的关系($20000\sim 60000\text{时}^{-1}$)	230
图2-5-7 管壁影响的修正系数	230
三、废热锅炉的计算	230

图2-5-8 摩擦系数与雷诺准数的关系	231
四、开工加热器的计算	232
(一) 电加热器的计算	232
图2-5-9 电炉功率、床层温度、出水率与时间的关系	233
表2-5-4 电热元件单位表面容许负荷计算程序	234
(二) 燃料加热炉的计算	235
图2-5-10 电热元件的结构形式	236
图2-5-11 燃料加热炉的结构形式	236
图2-5-12 燃烧烟气量、理论空气量、燃料油低发热值及过剩空气系数的关系	237
图2-5-13 燃料中H/C原子比和燃烧产物及其中CO ₂ 及H ₂ O的含量关系	238
图2-5-14 a 单排光滑管水冷壁的角系数	241
图2-5-14 b 直径不同的光滑管构成的单排管水冷壁的角系数	241
图2-5-14 c 双排光滑管水壁的角系数	241
图2-5-15 三原子气体的辐射减弱系数	242
图2-5-16 a 介质黑度与KPS之间的关系	243
图2-5-16 b 炉子黑度的求法	244
图2-5-17 炉子黑度、理论燃烧温度与炉子出口处烟温关系	245
图2-5-18 辐射给热系数与烟温及壁温的关系	246
图2-5-19 a 介质横向流过顺列光滑管束时的对流给热系数	247
图2-5-19 b 介质横向流过错列光滑管束时的对流给热系数	248
图2-5-19 c 空气及烟气作纵向流动时的给热系数	249
图2-5-20 a 燃用固体燃料时, 对于错列管束的污染系数	251
图2-5-20 b 燃用固体燃料时, 对于顺列管束的污染系数	251
图2-5-20 c 燃用固体燃料时, 镶成横向鳍片的管束的污染系数	251
表2-5-5 燃用液体燃料、气体燃料及木材的污染系数	252
参考文献	252

第三章 甲醇的合成

第一节 甲醇合成过程的物化基础	254
一、甲醇合成反应的化学平衡与热效应	254
(一) 常压下反应平衡常数	254
表3-1-1 常压下甲醇合成反应平衡常数计算值	255
表3-1-2 Ewell的平衡常数值	257
图3-1-1 甲醇合成反应平衡常数与温度的关系	257
表3-1-3 不同温度下逆变换反应的平衡常数值	258
(二) 加压下反应平衡常数	258
图3-1-2 H ₂ 、CO及CH ₃ OH的逸度系数	259
表3-1-4 不同温度及压力下的K _p 值	260
图3-1-3 不同压力、温度下, CO+2H ₂ =CH ₃ OH反应的K _p 值 (P=0~1000大气压)	261
图3-1-4 不同温度、压力下, CO+2H ₂ =CH ₃ OH反应的逸度比 (P=50~300大气压)	262
图3-1-5 不同温度、压力下, CO+2H ₂ =CH ₃ OH反应的逸度比 (P=0~700大气压)	263
表3-1-5 在H ₂ /CO=2, 无惰性气体时, 不同压力、温度下的K _p 值	264
表3-1-6 不同压力、温度下的K _p 值	266
图3-1-6 压力P=100~120大气压下平衡常数与温度的关系	269

表3-1-7	100~120大气压下K _p 的实验值	269
	(三) 平衡甲醇浓度的计算	269
表3-1-8	在H ₂ /CO=2, 无惰性气体时, 不同压力、温度下的Y _M 值	270
表3-1-9	不同H ₂ /CO, 惰性气体含量和不同压力、温度下的平衡甲醇浓度Y _M 值	272
	(四) 甲醇合成反应的热效应	301
图3-1-7	反应热与反应温度和压力的关系	302
图3-1-8	在压力P=300大气压, 起始组成H ₂ /CO=4~4.6, 不同甲醇合成率时, 气体混合物的焓值	302
表3-1-10	甲醇合成反应热效应	303
	二、混合气体中饱和甲醇含量	315
图3-1-9	混合气中甲醇含量随温度和甲醇分压的变化	315
图3-1-10	压力P=300大气压, 混合气中甲醇冷凝温度与含量的关系	315
图3-1-11	混合气中甲醇含量与温度、压力的关系	316
	三、甲醇合成反应的动力学	316
	(一) Померанцев-Мухленов-Грабер (巴米拉采夫-蒙柯列诺夫-特拉贝尔) 方程	316
图3-1-12	气体组成为H ₂ 65%; CO14%; CO ₂ 1.0%; N ₂ +CH ₄ 20%时, 不同温度下	
	$\frac{1}{(1+2Y_M)^2\varphi_M}$ 值	318
表3-1-11	压力P=250大气压, 气体组成: CO26%; H ₂ 68.5%; CO ₂ 1.5%; (N ₂ +CH ₄)4%, 不同甲醇浓度下的φ _m 和	
	$\frac{1}{(1+2y_m)^2\varphi_m}$ 值	319
表3-1-12	当空速V ₀ =20000时 ⁻¹ , 图解积分得到的反应速度常数k _r 值大气压 ⁻¹ 时	319
表3-1-13	压力P=300大气压, 甲醇合成反应速度与温度的关系(一)	319
表3-1-14	压力P=300大气压, 甲醇合成反应速度与温度的关系(二)	320
图3-1-13	M-2型催化剂, 压力P=300大气压, 甲醇合成反应速度与温度的关系(一)	322
图3-1-14	M-2型催化剂, 压力P=300大气压, 甲醇合成反应速度与温度的关系(二)	323
图3-1-15	M-2型催化剂, 压力P=300大气压, 反应速度的倒数与温度的关系(一)	324
图3-1-16	M-2型催化剂, 压力P=300大气压, 反应速度的倒数与温度的关系(二)	325
图3-1-17	甲醇合成反应速度理论值与工业反应器实际值的比较	326
图3-1-18	甲醇合成反应速度计算值与工业反应器实际值的比较	327
	(二) Natta(纳塔)公式计算甲醇合成反应速度	327
图3-1-19	ZnO-Cr ₂ O ₃ 催化剂活性常数K	328
图3-1-20	ZnO-Cr ₂ O ₃ 催化剂活性常数A、B	328
图3-1-21	ZnO-Cr ₂ O ₃ 催化剂活性常数C、D	328
表3-1-15	ZnO-Cr ₂ O ₃ 催化剂利用系数η	329
图3-1-22	ZnO-CuO-Cr ₂ O ₃ 催化剂活性常数A、B	329
图3-1-23	ZnO-CuO-Cr ₂ O ₃ 催化剂活性常数C、D	330
	(三) Чередвиченко-Темкин 方程	330
第二节	甲醇合成催化剂	331
	一、甲醇合成催化剂的类型	331
	二、甲醇合成催化剂的性能	331
表3-2-1	化学活性	331
表3-2-2	粗甲醇的质量	331

图3-2-1 气体空速40000时 ⁻¹ , 压力350大气压, 不同温度下的催化剂生产能力曲线	332
图3-2-2 350大气压、温度390℃不同空速下, 粒度0.5~1毫米的催化剂生产能力	332
图3-2-3 不同压力和温度下, 粒度0.5~1和4~5毫米的催化剂生产能力对比关系	332
图2-2-4 不同压力和温度下, 空速40000时 ⁻¹ , 粒度0.5~1.0毫米催化剂生产能力	332
三、催化剂的升温还原	332
(一) 反应机理	332
(二) 催化剂还原工艺条件	333
表3-2-3 催化剂升温还原时, 升、降温速度, 空间速度与出水速率	333
表3-2-4 某厂甲醇催化剂活化控制指标(催化剂量4.6吨)	333
(三) 催化剂升温还原过程中出水量的计算	334
图3-2-5 M-2型甲醇催化剂升温还原曲线	335
四、国外甲醇合成催化剂	336
表3-2-5 国外低、中压甲醇合成催化剂一览表	336
第三节 甲醇合成系统工艺流程及主要设备	336
一、工艺流程	336
(一) 高压法甲醇合成流程	336
图3-3-1 高压法甲醇合成流程	337
(二) 低压法冷激式甲醇合成流程	337
表3-3-1 图3-3-1的工艺物料数据表	338
图3-3-2 低压法冷激式甲醇合成流程	339
(三) 低压法副产蒸汽甲醇合成流程	339
表3-3-2 图3-3-2的工艺物料数据表	340
图3-3-3 低压副产蒸汽甲醇合成流程	341
表3-3-3 图3-3-3的工艺物料数据表	342
二、主要设备	344
(一) 甲醇合成塔	344
图3-3-4 高压单管式合成塔	344
图3-3-5 四层冷激式合成塔	345
图3-3-6 管式合成塔	346
(二) 其它设备	346
表3-3-4 甲醇合成附属设备主要参数	346
第四节 甲醇合成系统的工艺计算	346
一、物料平衡计算	346
(一) 初始条件	346
(二) 物料平衡的基本关系式	347
(三) 循环气中氮气含量的计算	347
(四) 弛放气量及新鲜气加入量的计算	347
(五) 生成的甲烷量	347
(六) 进行逆交换反应消耗的CO ₂ 量	347
(七) 新鲜气中CO的含量	347
(八) 塔出口甲醇浓度与入塔气量之间的关系	348
(九) 甲醇浓度与进气中CO含量间关系及CO转化率	348
图3-4-1 塔出口甲醇浓度与入塔气量之间的关系	349
表3-4-1 气体中甲醇含量与克分子浓度之间的关系	350

图3-4-2 a	气体中甲醇含量与克分子浓度之间的关系	350
图3-4-2 b	进塔气中CO含量与其平衡转化率之间的关系	351
图3-4-2 c	甲醇克分子浓度与CO转化率之间的关系	352
二、	热量平衡计算	353
(一)	合成塔热平衡计算	353
(二)	各组分比热的计算	355
(三)	其它设备的热平衡计算	355
附录		357
附表 1	工业用甲醇标准 GB338-76	357
附表 2	苏联及美国标准	357
附图 1	甲醇物理-化学性质列线计算图	358
附图 2	气体在甲醇中的溶解度与温度的关系	358
附图 3	甲醇水溶液汽液平衡图	359
附图 4	甲醇水溶液密度列线计算图	359
附图 5	甲醇水溶液粘度列线计算图 (一)	360
附图 6	甲醇水溶液粘度列线计算图 (二)	360
附图 7	低于大气压下, 甲醇水溶液沸点列线计算图	361
附图 8	甲醇水溶液的饱和蒸汽压列线计算图	361
附图 9	甲醇水溶液导热系数列线计算图	362
附图 10	甲醇水溶液热容量列线计算图	362
附图 11	甲醇水溶液克分子体积列线计算图	363
附图 12	甲醇水溶液电容率列线计算图	363
附图 13	甲醇合成用锌-铬催化剂生产能力列线计算图	364
附图 14	CHM-1催化剂的生产能力修正系数列线计算图	365
附图 15	当惰性组分浓度为15% (体积) 时, CHM-1催化剂的生产能力 q' (吨/米 ³ ·日) 与循环气组成的关系曲线图	366
附图 16	当惰性组分浓度为17.5% (体积) 时, CHM-1催化剂的生产能力与循环气组成的关系曲线图	366
附图 17	当惰性组分浓度为20% (体积) 时, CHM-1催化剂的生产能力与循环气组成的关系曲线图	367
附图 18	当惰性组分浓度为25% (体积) 时, CHM-1催化剂的生产能力与循环气组成的关系曲线图	367
附图 19	当惰性组分浓度为30% (体积) 时, CHM-1催化剂的生产能力与循环气组成的关系曲线图	368
附图 20	当惰性组分浓度为35% (体积) 时, CHM-1催化剂的生产能力与循环气组成的关系曲线图	368
附图 21	贮罐气中的H ₂ 含量与其在循环气中的分压的关系曲线图	369
附图 22	贮罐气中CO ₂ 和CH ₄ 的含量与其在循环气中的分压的关系曲线图	369
附图 23	贮罐气中CO和N ₂ 的含量与其在循环气中的分压的关系曲线图	369
参考文献		369
附表	常用单位换算表	370

第一章 气体的压缩

在氮肥工艺生产过程中，气体压缩是个不可少的工序。尤其是在合成氨的工艺生产的各个过程，需要将气体压缩至一定的压力。因此，气体的压缩工序是合成氨工艺生产过程的心脏。

国内过去所建的中、小型合成氨厂多采用活塞式压缩机。60年代起由于合成氨生产能力的不断扩大，国外普遍采用离心式压缩机。由于离心式压缩机具有输气量大、机组外形尺寸小、重量轻以及连续运转平稳等许多优点。更为有利的是采用了蒸汽透平来带动压缩机，而所需的蒸汽又是合成氨生产过程中的自产蒸汽，从而显著地提高了热能利用率。

本章重点介绍合成氨厂使用的活塞式压缩机和高压离心式压缩机。

第一节 压缩机的分类及选用

一、压缩机的分类和特点

压缩机的种类很多，按其工作原理可分为两大类：容积型和速度型。容积型压缩机，压力的提高是依靠将气体的体积压缩实现的。而在速度型压缩机中，则在高速旋转叶轮的作用下，使气体分子得到高速，然后在扩压器中使之急剧下降，把动能转换成压力能。

容积型压缩机通常使用的有活塞式、螺杆式；速度型压缩机常使用的是离心式。离心式压缩机适用于大流量，中、低压力，可靠性好。但由于小流量时，离心式压缩机的叶轮制造困难，工作情况不稳定，因此，在一定压缩比下，当流量较小时，可选用活塞式或螺杆式压缩机。

现将合成氨厂使用的活塞式压缩机和离心式压缩机的分类如下：

二、活塞式压缩机的分类

(一) 按排气压力分

1. 低压压缩机 $2 \text{ 公斤力/厘米}^2 < P \leq 10 \text{ 公斤力/厘米}^2$ 。
2. 中压压缩机 $10 \text{ 公斤力/厘米}^2 < P \leq 100 \text{ 公斤力/厘米}^2$ 。
3. 高压压缩机 $100 \text{ 公斤力/厘米}^2 < P \leq 1000 \text{ 公斤力/厘米}^2$ 。

注：以上进气压力均指1个大气压（绝）。

(二) 按气缸中心线相对位置分

1. 立式：气缸中心线与地面垂直。
2. 卧式：气缸中心线与地面平行。
3. 角度式：气缸中心线彼此成为一定角度。
4. 对置式：它是卧式压缩机的发展。气缸分布在曲轴的两侧。

三、离心式压缩机的分类

(一) 按压缩机的气缸结构分

1. 垂直剖分型高压离心式压缩机：压缩机多段气缸采用垂直剖分，两端有端盖。