

# 合成氨工学

第三卷

姜圣阶等 编著

石油化学工业出版社

# 合成氨工业

· · ·

· · · · ·

· · · · ·

81.39  
374  
3:1

# 合成氨工学

第三卷

姜圣阶等 编著

石油化学工业出版社

本书是合成氨工学第三卷，介绍气体压缩与氨的合成。本书共分十章，接第二卷续排章次为第十四章到第二十三章。第十四章介绍压缩原料气的主要设备——活塞式往复压缩机和离心式高压压缩机的工作原理、构造及其设计、操作要点等；第十五章介绍氨的用途和性质；第十六章到第十八章分别阐述氨合成的热力学、动力学和催化剂；第十九章、第二十章叙述氨合成的工艺流程和主要设备；第二十一章到第二十三章分别介绍氨合成的工艺条件选择、以电子数字计算机对氨合成操作行为的分析和工艺计算等。本书最后还有附录图表。本书所列参考文献，全系国内外公开出版的书籍、杂志。

本书由姜圣阶主编。第十四章和第二十章由黄力行、陈仪中、龚克敏等编写，第十四章第六节离心式高压压缩机由兰州化学工业公司化工机械研究所作过补充、修改；其余八章及附录图表由吴锡军编写。冯元琦对本书一部分章节作过审查。本书在编写过程中，得到了南京化学工业公司及其所属研究院、设计院、氮肥厂各级领导的大力支持，以及上海化工学院计算机组 and 无机物教研组，湖北化工设计院，衢州化工厂合成氨车间，化工第六设计院计算机组 and 化学工程组，上海市化工局设计室和南京化学工业公司所属研究院、设计院、催化剂厂等单位的一部分同志的协助。

本书可供从事合成氨工业生产、设计、科研方面的技术人员和中高等化工院校师生阅读参考。

## 合成氨工学

### 第三卷

姜圣阶等编著

\*

石油化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

石油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850×1168<sup>1/32</sup>印张14<sup>3/4</sup>插页1字数389千字印数1—13,500

1977年12月北京第1版1977年12月北京第1次印刷

书号15063·化223 定价1.85元

# 目 录

<b>第十四章 气体的压缩</b> .....	1
<b>第一节 概论</b> .....	1
(一) 压缩工序概述 .....	1
(二) 压缩系统的流程 .....	5
(三) 合成氨工业对压缩机的基本要求 .....	10
(四) 压缩机的分类和特点 .....	11
<b>第二节 活塞式往复压缩机</b> .....	17
(一) 往复压缩机的理论工作过程 .....	17
(二) 影响压缩机性能的因素 .....	25
<b>第三节 压缩机主机的主要部件</b> .....	35
(一) 气缸和缸套 .....	36
(二) 填料函 .....	41
(三) 气阀 .....	46
(四) 活塞 .....	52
(五) 主轴连杆机构 .....	62
<b>第四节 往复式压缩机系统的辅助设备</b> .....	73
(一) 冷却器 .....	73
(二) 缓冲器 .....	83
(三) 气液分离器 .....	85
(四) 润滑油系统 .....	87
(五) 安全和控制装置 .....	91
<b>第五节 高压离心式压缩机</b> .....	93
(一) 引言 .....	93
(二) 高压离心式压缩机的工作原理 .....	94
(三) 高压离心式压缩机的结构 .....	96

32958

(四) 高压离心式压缩机的几个有关问题 .....	110
参考文献 .....	122
<b>第十五章 氨的用途和性质</b> .....	<b>123</b>
第一节 氨的用途 .....	123
第二节 氨的性质 .....	123
(一) 一般性质 .....	123
(二) 液氨的蒸发潜热 .....	124
(三) 氨在水中的溶解度 .....	125
(四) 氨溶于水的溶解热 .....	127
(五) 氨的毒性与腐蚀性 .....	128
(六) 氨的燃点与爆炸极限 .....	129
(七) 氨与其他物质的化学反应 .....	129
<b>第十六章 氨合成反应热力学</b> .....	<b>131</b>
第一节 氨合成反应的平衡 .....	131
(一) 反应平衡常数 .....	131
(二) 气体混合物中的平衡氨含量 .....	135
第二节 有关的物理化学数据 .....	138
(一) 反应热效应 .....	138
(二) 压缩因素 (压缩因子) .....	140
(三) 导热系数、粘度和恒压热容 .....	142
(四) 压缩氢、氮混合气中的蒸气浓度 .....	152
(五) 气体在氨中的溶解度 .....	155
参考文献 .....	159
<b>第十七章 氨合成反应动力学</b> .....	<b>162</b>
第一节 反应机理 .....	162
第二节 化学动力学机理 .....	163
第三节 动力学方程 .....	167
(一) 方程的导出及其理论基础 .....	167
(二) 方程的一般式 .....	169
(三) 有关速度方程的几点分析 .....	175

(四) 速度数据在设计工业合成塔时的应用 .....	179
(五) 其他动力学方程 .....	186
<b>第四节 宏观动力学</b> .....	188
(一) 氨合成过程中内扩散的阻滞 .....	192
(二) 氨合成催化剂的内表面利用率 .....	195
(三) 氨合成过程的实验方程及其应用 .....	200
<b>第五节 工艺条件对氨合成反应效率的影响</b> .....	201
(一) 温度的影响 .....	201
(二) 压力的影响 .....	205
(三) 空速的影响 .....	206
(四) 气体组分的影响 .....	207
<b>参考文献</b> .....	210
<b>第十八章 氨合成催化剂</b> .....	213
<b>第一节 氨合成催化剂发展简述</b> .....	213
<b>第二节 催化剂还原前的结构</b> .....	220
<b>第三节 催化剂的还原</b> .....	225
<b>第四节 催化剂还原后的结构</b> .....	231
<b>第五节 催化剂的表面特性和促进剂的作用</b> .....	236
<b>第六节 合成氨原料气中的杂质对催化剂的影响</b> .....	239
(一) 含氧化物 .....	239
(二) 硫、磷和砷的化合物 .....	242
(三) 其他含毒物质 .....	243
<b>第七节 预还原催化剂</b> .....	243
<b>第八节 催化剂的使用和维护</b> .....	244
(一) 催化剂的运输、保管和装填 .....	244
(二) 生产操作中应注意的问题 .....	245
<b>第九节 工业用氨合成催化剂的生产方法</b> .....	245
<b>参考文献</b> .....	246
<b>第十九章 氨合成生产的工艺流程和设备</b> .....	249
<b>第一节 氨合成生产的流程</b> .....	249

(一) 典型工艺流程 .....	250
(二) 新型工艺流程 .....	257
第二节 氨合成生产的主要设备 .....	263
(一) 氨合成塔 .....	263
(二) 冷却分离设备 .....	294
第三节 抗氢、氮材料 .....	306
参考文献 .....	312
<b>第二十章 高压容器及高压管道</b> .....	<b>315</b>
第一节 概述 .....	315
第二节 筒体的结构型式 .....	316
(一) 整体锻造式 .....	316
(二) 层板包扎式 .....	317
(三) 绕带式 .....	322
(四) 扁平钢带式 .....	323
(五) 热套式 .....	324
(六) 绕板式 .....	326
(七) 电渣焊成型式 .....	327
(八) 单层焊接式 .....	329
(九) 其他型式 .....	329
(十) 筒体的法兰和封头 .....	329
第三节 密封结构的型式 .....	331
(一) 平垫式密封 .....	331
(二) 卡扎里密封 .....	332
(三) 双锥面密封 .....	333
(四) 组合式密封 .....	334
(五) G形环密封 .....	334
(六) O形环密封 .....	335
(七) B形环密封 .....	336
(八) 三角垫密封 .....	336
第四节 高压管道 .....	337



第五节 高压管件和阀件.....	339
<b>第二十一章 氨合成工艺条件选择</b> .....	<b>345</b>
第一节 循环气的组成及对工艺流程的要求.....	345
(一) 氢氮比 .....	345
(二) 惰性气含量 .....	346
(三) 催化剂毒物 .....	347
(四) 循环气中的氨含量 .....	348
第二节 催化剂的负荷及耐热性.....	348
第三节 填充床的分层.....	350
第四节 催化剂的还原、钝化和再升温.....	351
(一) 还原 .....	351
(二) 钝化和再升温 .....	353
第五节 催化剂的卸出.....	354
<b>第二十二章 氨合成系统的操作行为</b> .....	<b>355</b>
第一节 系统的数学模拟.....	355
(一) 系统概述 .....	356
(二) 定常态和动态模型 .....	358
第二节 系统的行为.....	365
(一) 定常态的热稳定性和参数灵敏度 .....	365
(二) 操作裕度 .....	373
(三) 动态特征 .....	375
第三节 实例分析.....	377
(一) 模型的检验 .....	377
(二) 分析对象的各种参数 .....	379
(三) 参数变化的影响 .....	380
(四) 操作弹性 .....	386
参考文献.....	395
<b>第二十三章 氨合成系统的工艺及设备计算</b> .....	<b>396</b>
第一节 系统的物料和能量衡算.....	396
(一) 物料衡算 .....	396

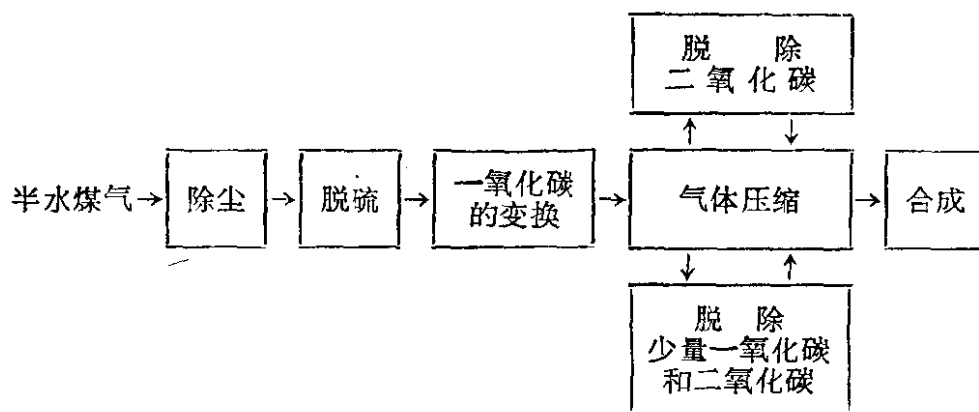
(二) 合成塔的热量衡算 .....	399
第二节 氨合成塔内件的设计计算 .....	401
(一) 平衡氨含量的计算 .....	402
(二) 反应速度的计算 .....	404
(三) 传热计算 .....	406
(四) 催化剂颗粒内氨含量分布及 内表面利用率的计算 .....	415
(五) 微分方程组的积分 .....	417
(六) 床外热交换器的计算 .....	422
(七) 床层阻力计算 .....	424
第三节 计算示例 .....	425
参考文献 .....	427
附 图 .....	428
附 表 .....	450

## 第十四章 气体的压缩

### 第一节 概 论

#### (一) 压缩工序概述

在合成氨生产过程中，原料气的净化和氨的合成都一定的压力下进行，因此，在原料气净化和氨合成之前，需要对气体进行压缩，以获得所需要的压力状态，同时完成各工序之间原料气体的输送。故气体的压缩在合成氨生产工艺过程中，是一道主要的中间工序。不同的工艺流程对压缩工序有不同的要求，这与合成氨用原料气的制备及氨的合成工艺方法有密切关系。在以固体燃料气化所制得半水煤气中含有许多杂质（包括气态与固态杂质），在氨的合成之前必须进行净化处理，其流程有如图(Ⅲ-14-1)所示。



图(Ⅲ-14-1) 以半水煤气为原料气制取合成氨流程示意图

原料气经除尘、脱硫之后，在 $0.3$ 公斤/厘米<sup>2</sup>压力下进行一氧化碳的变换。经过变换后的气体称为变换气，经压缩到 $19$ 公斤/厘米<sup>2</sup>进行水洗，以脱除二氧化碳。水洗后的气体称为水洗

气，再经压缩到 125 公斤/厘米<sup>2</sup>进行铜洗、碱洗以脱除少量一氧化碳和二氧化碳。经铜洗、碱洗处理后的气体称为精炼气（或铜洗气），再经压缩到 320 公斤/厘米<sup>2</sup>送往合成系统。

有些工厂，对半水煤气进行除尘、脱硫处理后，先压缩到 7~8 公斤/厘米<sup>2</sup>压力，并在这个压力下进行一氧化碳的变换及二氧化碳的脱除，再压缩提高压力到 125 公斤/厘米<sup>2</sup>进行铜洗、碱洗，最后压缩到 320 公斤/厘米<sup>2</sup>送往合成系统。

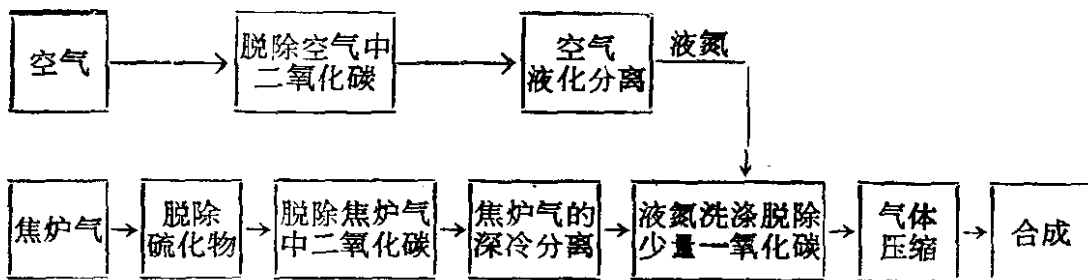
也有把变换压力进一步提高到 19 公斤/厘米<sup>2</sup>进行操作的。这就是通常所说的加压变换、水洗、铜洗流程。

另外，也可以在 125 公斤/厘米<sup>2</sup>的压力下，使气体通过合成甲醇的方法进行一氧化碳的脱除，然后经压缩到 320 公斤/厘米<sup>2</sup>，送往氨合成系统。这就是所谓“联醇法”。

还有一些工厂将半水煤气经除尘、脱硫、变换后，压缩到 7~8 公斤/厘米<sup>2</sup>压力，用制碳酸氢铵的方法来脱除二氧化碳，然后压缩到 125 公斤/厘米<sup>2</sup>进行铜洗、碱洗（或氨洗），再压缩到 320 公斤/厘米<sup>2</sup>压力送往合成系统。这就是许多中小型氮肥厂常用的“碳化法合成氨联合流程”。

半水煤气经除尘、脱硫、压缩后用中温、低温变换及脱碳、甲烷化等过程，最后再压缩至 320 公斤/厘米<sup>2</sup>送合成系统。这样就构成了低温变换甲烷化流程。

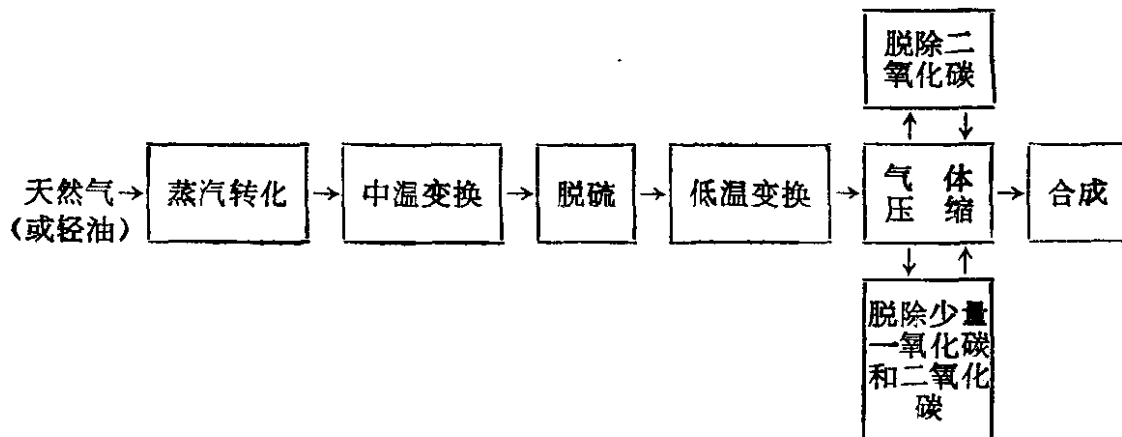
用深度冷冻法分离焦炉气或石油加工副产气做为合成氨的原料气体，其流程示意如图（Ⅲ-14-2）。



图（Ⅲ-14-2）以焦炉气为原料制取合成氨的流程示意图

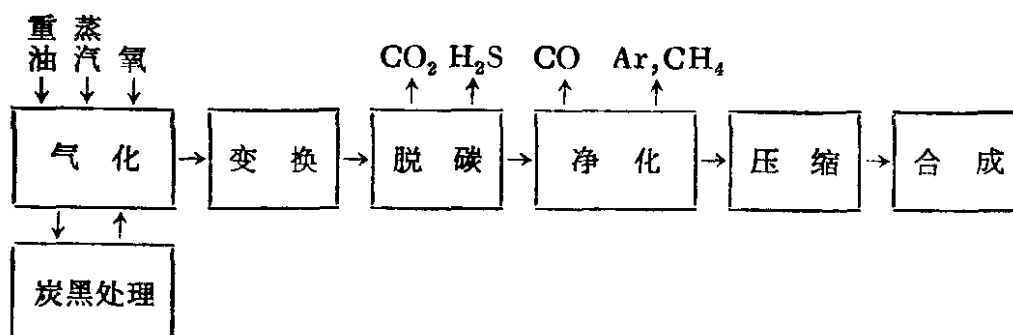
这种流程对压缩工序来讲，只是单纯提高气体压力，不同时进行工艺处理。

当以天然气或轻油为原料时，多采用加压蒸汽转化、两次变换（中温变换和低温变换）、脱碳及甲烷化的低温变换甲烷化流程。如图(Ⅲ-14-3)所示。



图(Ⅲ-14-3) 以天然气或轻油为原料制取合成氨的流程示意图

重油气化制取合成氨原料气的示意流程如图(Ⅲ-14-4)所示。



图(Ⅲ-14-4) 以重油为原料制取合成氨的流程示意图

随着合成氨生产工艺流程的不同，对压缩工序的压力、流量要求也不一样；而且，还由于对气体的不同处理方法，其压力也有所不同，以致使得压缩过程变得复杂起来。不同的工艺过程，采用不同型号的压缩机。

国产2N45(I)-156/320型压缩机，供以煤、焦为原料的合成氨生产使用。这种压缩机是由2200千瓦电动机带动的两列卧式六缸六级压缩机，一级吸气量为9360米<sup>3</sup>/小时，转速为150

转/分，冷却水用量为 300 米<sup>3</sup>/小时，润滑油用量 2.5 公斤/小时。此机可用在常压变换水洗、铜碱洗流程。经适当改动后的变型产品，可供水洗、加压变换流程使用。

国产 6 D 32-250/320-1 型压缩机是由 4000 千瓦电动机带动的六列对称平衡 M 型八缸六级压缩机，一级吸气量为 15000 米<sup>3</sup>/小时，转速为 250 转/分，冷却水用量为 570 米<sup>3</sup>/小时，润滑油用量 2.5 公斤/小时。此机供加压变换流程使用。

国产 3 M22-13/13.5-320 型压缩机是由 1600 千瓦电动机带动的三列 M 型三缸三级压缩机，一级吸气量为 9600 标准米<sup>3</sup>/小时，转速为 300 转/分。此机供以天然气为原料制取合成氨的工艺流程使用。

3 D 22(II)-14.45/14-320 型压缩机是由 1800 千瓦电动机带动的 3 列 M 型三缸三级压缩机，一级吸气量 11000 标准米<sup>3</sup>/小时，转速 333 转/分，冷却水用量 153 米<sup>3</sup>/小时，润滑油用量 1.18 公斤/小时。此机供重油气化制合成氨原料气，配合甲烷化或铜洗流程之用。

L 3.3-13/320(L 3.3-17/320)型压缩机由 200 (320) 千瓦电动机带动的 L 型 4 列六缸六级压缩（七缸七级压缩），转速 375 转/分(500 转/分)，一级吸气量 780 米<sup>3</sup>/小时 (1040 米<sup>3</sup>/小时)，冷却水用量 30 米<sup>3</sup>/小时，润滑油用量 0.4 公斤/小时，供吸氢氮混合气、半水煤气、变换气配合水洗碳化流程、加压变换流程或加压碳化流程之用。

H 228-18.5/4-320 型氮氢混合气压缩机是由 2800 千瓦电动机带动的四列对称平衡 H 型四缸四级压缩机，一级吸气量 13500 标准米<sup>3</sup>/小时，转速 333 转/分，供重油部分氧化法制气，加压变换，化学吸收法脱二氧化碳及甲烷化流程使用。

此外，还有许多种类型的压缩机供各种不同的工艺流程使用。

在各不同的工艺流程中，本工序与动力(包括电力、水)、制气、变换、净化有着密切的联系。

## (二) 压缩系统的流程

本节以半水煤气常压变换、水洗、铜碱洗流程及配合使用的 2N45(I)-156/320 型压缩机为例, 来叙述压缩系统的流程及有关问题。

2N45(I)-156/320 压缩机的主要规格和性能列于表(Ⅲ-14-1)、(Ⅲ-14-2)。

表(Ⅲ-14-1) 2N45(I)-156/320型压缩机的主要规格

压 缩 机		电 动 机	
一级吸气量	9360米 <sup>3</sup> /时	功率	2200千瓦
转速	150转/分	电压	6000伏特
冲程	800毫米		
最终压力	320公斤/厘米 <sup>2</sup>		
压缩机的级数	6级		
气缸排列	双列卧式		

表(Ⅲ-14-2) 2N45(I)-156/320型压缩机的主要性能

段数	进口气体压力	出口气体压力	压缩比	进口气体温度, °C		气缸直径 毫米
	绝对大气压	绝对大气压		进口	出口	
I	0.95	2.4~2.6	2.65	35	<130	1100
II	2.0	7~7.3	3.55	35	<160	710
III	6.40	19~20	3.10	35	<175	570
IV	18	48~49.5	2.70	35	<135	325
V	45	124~127	2.80	35	<180	185
VI	120	363	3.0	35	<150	105

### 一、正常生产时的流程

正常生产时的流程见图(Ⅲ-14-5)<sup>[1]</sup>, 由变换气气柜送来300毫米水柱压力(表压), 10~15°C温度的变换气引入一级水封槽1后, 被吸入压缩机一级气缸I, 并在其中被压缩到1.8~2.0公斤/

厘米<sup>2</sup>，温度上升到 100°C 以上，进入一级立式冷却分离器 2，经冷却及油水分离后，气体进入二级气缸 II，在其中被压缩到 6.3~7.3 公斤/厘米<sup>2</sup>，温度上升到 130°C 以上，进入二级立式冷却分离器 3，经冷却及油水分离后，气体进入三级气缸 III，在其中被压缩到 20~21 公斤/厘米<sup>2</sup>，温度上升到 150°C 左右，进入三级冷却分离器 4，经冷却及油水分离后，气体送往水洗塔以除去绝大部分 CO<sub>2</sub> 气体，水洗气中 CO<sub>2</sub> 含量在 1% 左右通过四级前水分离器除去水分后进入四级气缸 IV，在其中被压缩到 50~54 公斤/厘米<sup>2</sup>，温度上升到 100°C 以上，进入四级缓冲器 5、四级水冷却器 6 及四级油水分离器 7，分离掉所夹带的油分和水分后，便进入五级气缸 V 进行压缩，升压到 140~145 公斤/厘米<sup>2</sup>，温度上升到 150°C 左右进入五级缓冲器 8、五级水冷却器 9 及五级油

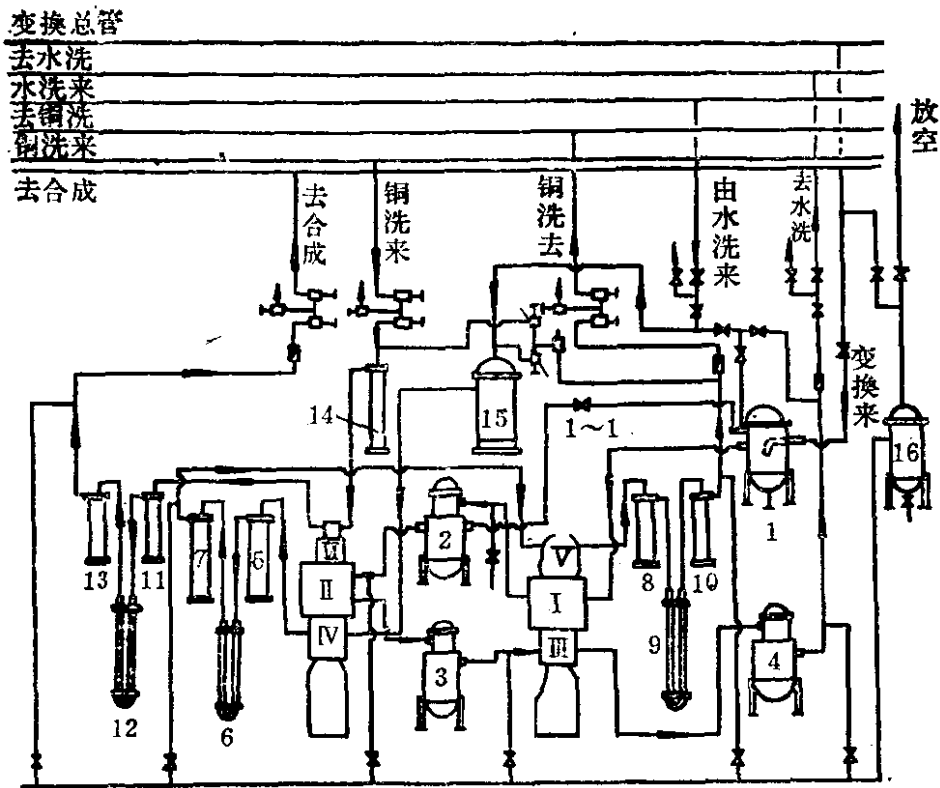


图 (III-14-5) 压缩系统工艺流程图

- 1—一级水封槽；2—一级冷却分离器；3—二级冷却分离器；4—三级冷却分离器；5—四级缓冲器；6—四级水冷却器；7—四级油水分离器；8—五级缓冲器；9—五级水冷却器；10—五级油水分离器；11—六级缓冲器；12—六级水冷却器；13—六级油水分离器；14—六级前碱液分离器；15—四级前水分离器；16—事故吹除槽



水分离器 10 分离掉所夹带的油分和水后，送往铜液塔及碱液塔，以进一步除去  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  及  $\text{O}_2$  等杂质，洗涤后的净化气体仅含少量  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ ，其总和小于 20 p.p.m.，通过碱液分离器 14，除去气体夹带的碱液雾滴，再进入六级气缸进行压缩，升压到 320~350 公斤/厘米<sup>2</sup>，温度上升到 100°C 以上，进入六级缓冲器 11、六级水冷却器 12 及六级油水分离器 13，分离掉所夹带的油分和水后，进入氨合成系统。

## 二、气体循环时的流程

当压缩机开车、停车、试车以及生产系统发生故障，都可能要求压缩工序暂时全部或局部切断与其他工序的联系，气体仅通过压缩系统本身的设备管道进行循环。

利用近路管道系统，可以将一级吸入的气体按正常工作压力逐级进行压缩，最后由六级出口经卸压后回到一级进口，构成自身的循环。其流程为：气体从三级冷却器出来后，不送往水洗塔，而在去水洗塔的控制阀前面经过近路管直接引入四级气缸 IV，同样经过五级压缩、五级缓冲、冷却及油水分离器，此气体不送往铜洗、碱洗，而经过近路管直接引入六级气缸 VI。六级压缩后的气体，同样经过缓冲、冷却、分离之后，不送往合成系统，经过减压后由近路管回到一级进口。

在这种情况下，气体从三级气缸出来后，没有经过水洗脱二氧化碳，而使将近气体总体积 28~30% 的无用成分 ( $\text{CO}_2$ ) 一起送入四级气缸，造成四级气缸负荷过大。因此，除按正常体积的吸气体量吸纳之外，多余的这部分气体就由近路回到一级入口。在操作上称为“三回一”。同样，五级出来的气体，没有经过铜碱洗工序精制，也就有一部分“多余”的气体必须经卸压后排放或回到一级入口。

每级出口都有放空阀作为各级气缸本身卸载或调节压力之用，各级放空管线都接入放空总管，再从此排空或回到一级进口管道。这样，可以在需要回收气体时，作为近路系统使用。

在一级出口和三级出口都有近路管连到一级进口，用以调节