

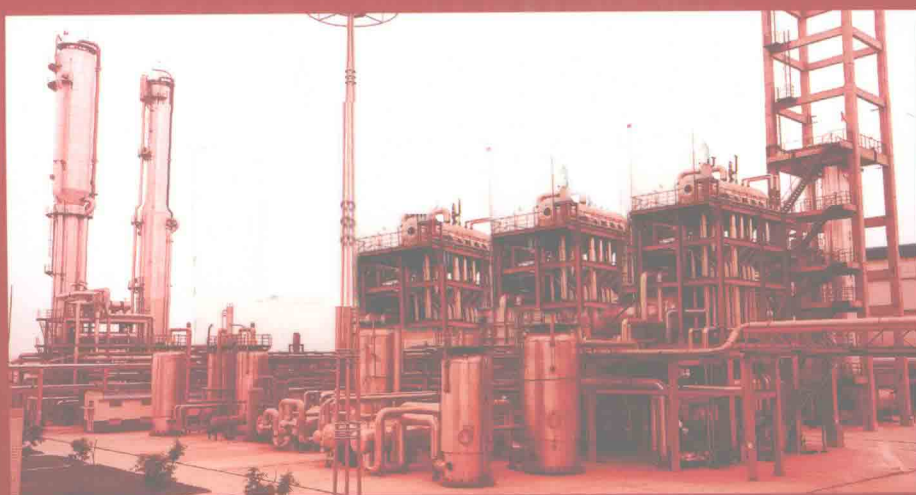
普通高等教育规划教材

HECHENGAN
SHENGCHAN JISHU

合成氨生产技术

第二版

张子锋 主编 郝启刚 主审



化学工业出版社

中国氮肥工业发展史话

合成氨生产技术

第二版

王树勋 主编 王树勋 王树勋 王树勋 王树勋



普通高等教育规划教材

合成氨生产技术

第二版

张子锋 主编 郝启刚 主审



化学工业出版社

·北京·

本书是在合成氨工艺发生重大变革的背景下,根据我国合成氨行业的发展状况,以及高等院校教学改革的要求编写的,用以作为高等院校的教材。

本书主要阐述合成氨的生产方法、基本原理、工艺条件的选取、工艺流程及主要设备,并对各工序的操作要点、生产中经常出现的问题及处理方法作了简单介绍。力求做到层次清楚,重点突出,理论联系实际和通俗易懂。为了提高学生的安全意识,本书在第九章详细讲述了安全知识和预防措施。

为了培养有创新能力的,高素质、应用型化工人才,本书作为高等院校化学工程及工艺专业课教材,与传统教材最大的区别在于加入了更多实践的内容,同时也可作为高职高专化工类专业以及从事合成氨生产、管理的一线技术人员和技术工人培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

合成氨生产技术/张子锋主编. —2版. —北京:
化学工业出版社, 2011.8

普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-122-11916-2

I. 合… II. 张… III. 合成氨生产-生产工艺-
高等学校-教材 IV. TQ113.26

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第144840号

责任编辑:张双进

装帧设计:张 辉

责任校对:陈 静

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张16½ 字数411千字 2011年8月北京第2版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:32.00元

版权所有 违者必究

前 言

本书是在合成氨工艺发生重大变革的背景下，根据我国合成氨行业的发展状况，以及高等院校教学改革的要求编写的，用以作为高等院校的教材。

本书主要阐述合成氨的生产方法、基本原理、工艺条件的选取、工艺流程及主要设备，并对各工序的操作要点、生产中经常出现的问题及处理方法作了简单介绍。力求做到层次清楚，重点突出，理论联系实际和通俗易懂。

近几年由于石油日趋紧张，合成氨又重新回到以固体为原料的生产方法上来，出现了以节能降耗减排为目的的双甲替代铜洗的新工艺。因此本书对此内容介绍比较详细。为了提高学生和职工的安全意识，本书在第九章详细讲述了安全知识和预防措施。

为了培养有创新能力的，高素质、应用型化工人才，本书作为化学工程及工艺专业的授课教材，与传统教材最大的区别在于加入了更多实践的内容。建议富有经验的任课教师，根据自身的教学实践，妥善利用本教材安排教学。

本书由张子锋编写绪论，山西天泽煤化工集团股份公司张泉林编写第一章，兰花科创一化分公司李虎、陈志伟、王维兵共同编写第二章和第三章，山西兰花集团化肥公司二甲醚分公司杨国祥编写第四章，吕梁学院薛淑平编写第五章和第六章，吕梁学院王丽芳和薛月圆共同编写第七章、第八章和第九章，全书由张子锋统稿并任主编，杨国祥、李虎任副主编，由山西省化工设计院总工郝启刚主审。

此外在编写过程中曾得到兰花科创、吉林长山化肥厂、山西化肥厂、山西煤化研究所、中国化学工业第二设计院、山西省化工设计院、山西焦化厂合成氨分厂等单位 and 同志热情支持与大力帮助，在此表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，加之时间仓促，书中难免存在不妥之处，希望使用本书的读者和同行批评指正。

编者

2011 年 6 月

目 录

绪论	1
一、氨和二氧化碳的性质	1
二、合成氨的历史	3
三、世界合成氨生产及市场分析	4
四、中国合成氨工业生产发展概况	7
五、氨的用途	13
六、本课程的学习方法	14
第一章 造气	15
第一节 概述	15
一、对固体原料性能的要求	15
二、半水煤气的组成	16
第二节 间歇式固定床煤气的制取	17
一、煤气制取的基本原理	17
二、间歇法制取半水煤气的工艺条件	23
三、煤气制取各过程的分配	25
四、间歇法工艺流程叙述	27
第三节 烃类造气	31
一、气态烃蒸汽转化制气	33
二、重油部分氧化法制气	39
第四节 氧气-蒸汽连续气化法	42
一、固定床加压气化法（鲁奇加压煤气化）	42
二、流化床加压连续气化法	44
三、气流床加压气化	47
第五节 各种煤气发生炉的比较	47
一、固定床	47
二、流化床	51
三、气流床气化	52
四、熔池床气化	52
第六节 间歇式固定床造气岗位的操作	52
一、任务	52
二、正常操作要点	52
三、开停车操作	53
四、常见事故及处理	57
五、节能降耗的具体措施	60

第七节 吹风气余热锅炉操作	60
一、任务	60
二、工艺流程	60
三、设备一览表	61
四、工艺指标	61
五、不正常情况及处理	62
第八节 热管锅炉在造气生产中的应用	62
一、热管技术应用与进展	62
二、热管的工作原理	62
三、热管的特性	63
四、联合热管废热锅炉结构	63
第九节 造气生产中的三位一体技术	63
一、造气生产综合优化控制技术	64
二、造气机电一体化自动加煤技术	65
三、造气炉油压控制系统的优化	65
第十节 间歇法制半水煤气的工艺计算	69
一、气化指标的计算	69
二、简单的物料衡算	73
复习题	75
第二章 脱硫	76
第一节 湿法脱硫	76
一、湿法氧化法脱硫的基本原理	77
二、栲胶脱硫法	77
三、其他脱硫法简介	79
第二节 干法脱硫	82
一、活性炭法脱硫	82
二、铁钼加氢转化法	83
三、氧化锰脱硫法	84
四、氧化锌脱硫法	84
第三节 净化岗位操作要点	86
一、电除尘器的工作原理及工艺	86
二、净化岗位工艺流程	90
三、净化岗位主要设备性能	91
四、净化岗位正常操作要点	91
五、一般事故分析及处理	93
六、紧急事故处理	94
七、静电除尘器的维护与保养	94
第四节 半水煤气脱硫岗位操作	94
一、任务	94
二、反应方程式	94

三、工艺流程	95
四、主要设备	95
五、操作要点	95
六、开停车操作	96
七、不正常情况及处理	99
第五节 硫黄的制取	101
一、任务	101
二、工作原理	101
三、工艺流程	101
四、主要设备性能一览表	101
五、正常操作要点	101
六、开、停车步骤	101
七、安全操作注意事项	102
八、环保注意事项	102
第六节 原料气的脱硫生产控制指标的计算	102
一、工艺参数	102
二、生产控制指标的计算	103
复习题	103
第三章 一氧化碳的变换	104
第一节 基本原理	104
一、CO 变换的化学平衡	104
二、影响变换反应平衡的因素	105
三、变换反应机理	106
第二节 一氧化碳变换催化剂	107
一、中温变换催化剂	107
二、低温变换催化剂	109
第三节 一氧化碳变换工艺条件的选择	110
一、中温变换工艺条件	110
二、低温变换工艺条件	111
第四节 变换工段的工艺流程及操作要点	111
一、任务	111
二、变换工段工艺流程	111
三、变换工段的主要设备	113
四、正常操作要点	115
五、开、停车操作	116
六、故障情况及处理	118
七、主要危险因素分析	120
第五节 生产控制指标的计算	120
一、一氧化碳变换率	120
二、变换气体积	121

三、变换气成分·····	121
四、煤气中的蒸汽含量·····	121
五、变换气的露点·····	122
六、循环水用量·····	122
复习题·····	123
第四章 脱碳 ·····	124
第一节 物理吸收法·····	124
一、物理吸收剂·····	124
二、吸收的基本原理·····	125
三、脱碳工段工艺流程·····	128
四、吸收与再生系统岗位操作·····	131
五、脱水系统岗位操作·····	137
第二节 化学吸收法·····	137
一、热的钾碱法吸收原理·····	137
二、吸收溶液的再生·····	138
三、操作条件的选择·····	139
四、二段吸收二段再生典型流程·····	140
复习题·····	141
第五章 气体的压缩 ·····	142
第一节 往复式压缩机·····	142
一、工作原理·····	142
二、压缩气体的三种情况·····	143
三、多段压缩·····	144
四、往复式压缩机的构造·····	144
五、影响压缩机参数的因素·····	146
六、压缩岗位的气体流程·····	147
七、往复式压缩机的操作·····	147
第二节 离心式压缩机·····	150
一、工作原理·····	150
二、工艺流程·····	151
三、透平循环压缩机操作要点·····	152
第三节 气体压缩的工艺计算·····	153
一、气体压缩的三个过程·····	153
二、压缩机的生产能力及影响因素·····	155
复习题·····	156
第六章 精炼 ·····	157
第一节 铜氨液吸收法·····	158
一、铜氨液的制取·····	158
二、铜氨液吸收一氧化碳的基本原理·····	159
三、铜洗操作条件·····	160

四、铜液的再生·····	161
五、工艺流程·····	163
第二节 甲醇化和甲烷化精制工艺及操作·····	165
一、任务·····	165
二、生产原理及工艺流程·····	165
三、正常生产操作要点·····	167
第三节 铜洗岗位操作要点·····	170
一、任务·····	170
二、工艺流程·····	170
三、正常生产操作要点·····	172
四、开停车操作要点·····	172
五、铜液制备·····	175
第四节 铜氨液洗涤法工艺计算·····	176
复习题·····	177
第七章 氨的合成·····	178
第一节 氨合成的基本理论·····	178
一、氨合成的反应特点·····	178
二、氨合成反应的化学平衡·····	178
三、氨合成动力学·····	180
四、反应速率·····	180
第二节 氨合成催化剂·····	181
一、催化剂在还原前的化学组成及作用·····	181
二、催化剂的主要性能·····	182
三、催化剂的还原·····	182
四、催化剂的钝化·····	183
五、催化剂的中毒与衰老·····	183
六、合成氨催化剂进展·····	184
第三节 氨合成操作条件的选择·····	185
一、压力·····	185
二、温度·····	186
三、空间速度·····	186
四、合成塔进塔气体组成·····	186
第四节 氨合成的工艺流程·····	187
一、合成氨工艺流程·····	187
二、合成塔·····	189
三、液氨和气氨·····	191
第五节 合成工段操作·····	191
一、任务·····	191
二、生产流程·····	191
三、主要设备性能·····	191

四、开停车操作·····	192
五、正常生产中的操作要点·····	195
六、不正常现象分析及事故处理·····	195
第六节 氨库岗位·····	200
一、任务·····	200
二、设备性能·····	200
三、正常操作要点·····	200
第七节 氨的合成工艺计算·····	201
一、氨合成催化剂还原时理论出水量的计算·····	201
二、氨合成系统的工艺计算·····	201
复习题·····	208
第八章 合成氨厂水处理 ·····	209
第一节 水的软化及脱盐·····	209
一、水的分布·····	209
二、水中杂质及危害性·····	209
三、水的硬度·····	210
四、水中杂质的清除方法·····	211
五、除氧·····	220
第二节 水处理的操作·····	220
一、反渗透操作要点·····	220
二、脱盐水岗位操作·····	222
复习题·····	224
第九章 合成氨安全及防护 ·····	225
第一节 安全防护知识·····	225
一、化工生产安全规定·····	225
二、有毒有害物质的防护及急救·····	226
三、燃烧、爆炸及消防器材的使用·····	231
四、电器安全知识·····	233
五、机械伤害及预防·····	235
六、压力容器的安全技术·····	235
第二节 氨中毒及预防·····	237
一、氨中毒（灼伤）·····	237
二、现场抢救技术措施·····	240
第三节 合成氨生产岗位的安全操作注意事项·····	241
一、间歇法造气安全操作注意事项·····	241
二、吹风气余热锅炉回收岗位的安全操作注意事项·····	242
三、脱硫净化岗位的安全操作注意事项·····	243
四、净化岗位的安全操作注意事项·····	243
五、半水煤气脱硫岗位的安全操作注意事项·····	244
六、变脱岗位的安全操作注意事项·····	244

七、脱碳岗位的安全操作注意事项·····	245
八、硫黄的制取岗位的安全操作注意事项·····	245
九、压缩岗位的安全操作注意事项·····	246
十、铜洗岗位的安全操作注意事项·····	246
十一、双甲精制岗位的安全操作注意事项·····	247
十二、甲醇精馏岗位的安全生产注意事项·····	248
十三、合成岗位的安全操作注意事项·····	248
复习题·····	249
附表 某些气体的重要物理性质·····	250
参考文献·····	251

绪 论

一、氨和二氧化碳的性质

1. 氨

氨(NH₃)为无色,有刺激性辛辣味的恶臭气体,相对分子质量 17.03,相对密度 0.597,沸点-33.33℃,熔点-77.7℃,爆炸极限为 15.7%~27% (体积分数),氨的主要物理性质见表 0-1。氨在常温下加压易液化,称为液氨。与水形成水合氨(NH₃+H₂O=NH₃·H₂O)简称氨水,呈弱碱性。氨水极不稳定,遇热分解,氨含量为 1%的水溶液 pH 为 11.7。浓氨水氨含量为 28%~29%。氨在常温下呈气体,比空气轻,易溢出,具有强烈的刺激性和腐蚀性,故易造成急性中毒和灼伤。空气中氨含量达 3%时,5min 可引起化学性灼伤和水疱。因此环保要求空气中的氨含量应在 0.5mg/m³ 以下。

表 0-1 氨的主要物理性质

项 目	数 据	项 目	数 据
相对分子质量	17.03	临界密度/(g/cm ³)	0.235
氨含量/%	82.2	临界压缩系数 $pV=ZRT$	0.242
摩尔体积(0℃,0.1MPa)/(L/mol)	22.08	临界热导率/[kJ/(K·h·m)]	0.522
气体密度(0℃,0.1MPa)/(g/L)	0.7714	沸点(0.1MPa)/℃	-33.35
液体密度(-33.4℃,0.1MPa)/(g/cm ³)	0.6818	蒸发热(-33.4℃)/(kJ/kg)	1368.02
临界温度/℃	132.4	冰点/℃	-77.70
临界压力/MPa	11.30	熔化热(-77.7℃)/(kJ/kg)	332.42
临界比体积/(L/kg)	4.257		

20℃下将氨气加压到 0.87MPa 时,液化为无色的液体。

2. 一氧化碳

性状:无色无臭气体,微溶于水,溶于乙醇、苯等多数有机溶剂。危险性类别:第 2.1 类易燃气体。

理化性质:熔点-199.1℃;沸点-191.4℃;相对密度 0.79 (水为 1)、0.97 (空气为 1);临界温度-140.2℃;临界压力 3.50MPa。引燃温度 610℃;爆炸极限 12.5%~74.2%,最大爆炸压力 0.72MPa。

危险特性:是一种易燃易爆气体;与空气混合能形成爆炸性混合物;遇明火、高热能引起燃烧爆炸。

健康危害:一氧化碳在血中与血红蛋白结合而造成组织缺氧。

根据《职业性接触毒物危害程度分级》(GB 5044-85)和《工作场所有害因素职业接触限值》(GBZ 2-2002),一氧化碳危害级别属Ⅱ级(高度危害);工作场所空气中一氧化碳容许浓度 PC-TWA:20mg/m³;PC-STEL:30mg/m³ (平原地区)。

3. 二氧化碳

相对分子质量 44.009,熔点在 0.52MPa 下为-78.5℃,临界温度 31.0℃,临界压力 7.29MPa,密度在标准状况下 1.9768g/L,对空气的密度 1.5290g/L,CO₂ 气体在 18℃时溶于水中的溶解热 $\Delta H=-19.895\text{kJ/mol}$ 。吸入人体后在低浓度时对呼吸中枢呈兴奋;高浓度

时则还会引起麻醉作用。吸入含量为 8%~10% 的二氧化碳除头晕、头痛、眼花和耳鸣外，还有气急、脉搏加快、无力、肌肉痉挛、昏迷、大小便失禁等。严重者出现呼吸停止及休克。

4. 空气

空气无色无味无嗅，气态。在 0℃ 及 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ (1atm) 下空气密度为 1.293g/L。把气体在 0℃、 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 下的状态称为标准状态，空气在标准状态下可视为理想气体，其摩尔体积为 22.4L/mol。

空气的比热容与温度有关，温度为 250K 时，空气的定压比热容 $C_p = 1.003 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，300K 时，空气的定压比热容 $C_p = 1.005 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

空气的相对分子质量是 29。常温下的空气是无色无味的气体，大气层中因有臭氧 (O_3) 存在，而呈现天蓝色。在 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，空气的液化温度为 -191.35°C (81.8K)，气化温度为 -194.35°C (78.8K)。在 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 下，将空气冷却到 -213°C (60.15K) 时，则变成固体。液态空气则是一种易流动的浅蓝色液体。

1atm 时氧的沸点 90.17K (-182.98°C)，氮的沸点 77.35K (-195.80°C)，两者的沸点相差的 13°C 。氩的沸点为 87.291K (-185.86°C)，它介于氧和氮沸点中间。低温液化精馏法就是利用氧、氮沸点不同把空气分离为氧气和氮气。显然氩气在精馏中，将会影响氧和氮的纯度。一般当空气被液化时二氧化碳已经清除掉，因而液态空气的组成是 20.95% 氧、78.12% 氮和 0.93% 氩，其他组分含量甚微，可以略而不计。

空气作为混合气体，在定压下冷凝时温度连续降低，如在标准大气压 (101.3kPa) 下，空气于 81.7K (露点) 开始冷凝，温度降低到 78.9K (泡点) 时全部转变为饱和液体。这是由于高沸点组分 (氧、氩) 开始冷凝较多，而低沸点组分 (氮) 到过程终了才较多地冷凝。地球的正常空气成分 (体积分数计算) 是：氮占 78.08%，氧占 20.95%，氩占 0.93%，二氧化碳占 0.03%，还有微量的稀有气体，如氦、氖、氫、氙、臭氧、氧化氮、二氧化氮。

5. 甲醇

外观与性状：无色澄清液体，有刺激性气味。溶解性：溶于水，可混溶于醇、醚等多数有机溶剂。危险性类别：第 3.2 类中闪点易燃液体。

化学式 CH_3OH ；相对分子质量 32.04；熔点 -97.8°C ；沸点 64.8°C ；相对密度 0.79 (水为 1)；闪点 11°C ；引燃温度 385°C ；爆炸极限 5.5%~44.0%；火灾危险类别甲。

危险特性：易燃，其蒸气与空气可形成爆炸性混合物。遇明火、高热能引起燃烧爆炸，与氧化剂接触发生化学反应或引起燃烧。

健康危害：对中枢神经系统有麻醉作用；对视神经和视网膜有特殊选择作用，引起病变；可致代谢性酸中毒。长期接触可引起神经衰弱综合征，植物神经功能失调，黏膜刺激、视力减退等。

根据《职业性接触毒物危害程度分级》(GB 5044—85) 和《工作场所有害因素职业接触限值》(GBZ 2—2002)，甲醇危害级别属Ⅲ级 (中度危害)，工作场所空气中甲醇 (皮) 容许浓度 (GBZ 2—2002)：PC-TWA (8h 时间加权平均容许浓度)：25mg/m³；PC-STEL [在符合 8h 时间加权平均容许浓度的情况下，任何一次短时间 (15min) 接触的浓度均不应超过的 PC-TWA 的倍数]：50mg/m³。

6. 硫黄

硫黄别名硫、胶体硫、硫黄块。外观为淡黄色脆性结晶或粉末，有特殊臭味。相对分子质量 32.06，蒸气压 0.13kPa，闪点 207°C ，熔点 119°C ，沸点 444.6°C ，相对密度 2.0 (水

为 1)。硫黄不溶于水，微溶于乙醇、醚，易溶于二硫化碳。作为易燃固体，硫黄主要用于制造染料、农药、火柴、火药、橡胶、人造丝等。

硫黄为黄色晶体。有多种同素异形体，斜方硫又叫菱形硫或 α -硫，在 95.5°C 以下最稳定，密度 $2.1\text{g}/\text{cm}^3$ ，熔点 112.8°C ，沸点 445°C ，质脆，不易传热导电，难溶于水，微溶于乙醇，易溶于二硫化碳；单斜硫又称 β 硫，在 95.5°C 以上时稳定，密度 $1.96\text{g}/\text{cm}^3$ ；弹性硫又称 γ -硫是无定形的，不稳定，易转变为 α -硫。斜方硫和单斜硫都是由 S_8 环状分子组成，液态时为链状分子组成，蒸气中有 S_8 、 S_4 、 S_2 等分子， 1000°C 以上时蒸气由 S_2 组成。化学性质比较活泼，能与氧、氢、卤素（除碘外）、金属等大多数元素化合，生成离子型化合物或共价型化合物。硫单质既有氧化性又有还原性。如硫与铁共热生成硫化亚铁，与碳在高温下生成二硫化碳，常温下与氟化合生成六氟化硫，加热时与氯化合生成 S_2Cl_2 。

硫黄属低毒危化品，但其蒸气及硫黄燃烧后产生的二氧化硫对人体有剧毒。它与卤素、金属粉末等接触后会发生剧烈反应。硫黄为不良导体，在储运过程中易产生静电荷，可导致硫尘起火。粉尘或蒸气与空气或氧化剂混合后就会形成爆炸性混合物。硫黄发生事故后，一般会出现吸入、食入、经皮肤吸收等情况。因其能在肠内部分转化为硫化氢而被吸收，故大量口服可导致硫化氢中毒。急性硫化氢中毒的全身毒作用表现为中枢神经系统症状，有头痛、头晕、乏力、呕吐、昏迷等。硫黄还可引起眼结膜炎、皮肤湿疹。对皮肤有弱刺激性。在发生硫黄泄漏事故时，应隔离泄漏污染区，限制出入，同时切断火源。

二、合成氨的历史

1. 合成氨的历史背景——氮气的发现

1727 年英国的牧师、化学家 S. 哈尔斯 (HaLes, 1677~1761)，用氯化铵与石灰的混合物在以水封闭的曲颈瓶中加热，只见水被吸入瓶中而不见气体放出。1774 年化学家普里斯德里重做此实验，采用汞代替水来密闭曲颈瓶，制得了碱空气（氨）。他还研究了氨的性质，发现氨易溶于水、可以燃烧，还发现在该气体中通以电火花时，其容积增加很多，而且分解为两种气体：一种是可燃的氢气；另一种是不能助燃的氮气。从而证实了氨是氮和氢的化合物。其后 H. 戴维 (Davy, 1778~1829) 等化学家继续研究，进一步证实了 2 体积的氨通过火花放电之后，分解为 1 体积的氮气和 3 体积的氢气。

2. 合成氨的发现

19 世纪以前，农业生产所需氮肥的来源，主要是有机物的副产物和动植物的废物，如粪便、种子饼、腐鱼、屠宰废料、腐烂动植物等。随着农业的发展和军工生产的需要，迫切要求建立规模巨大的探索性的研究。他们设想，能不能把空气中大量的氮气固定下来，而开始设计以氮和氢为原料的合成氨流程。

1900 年法国化学家勒夏特利 (Henri Le Chatelier, 1850~1936) 是最先研究氢气和氮气在高压下直接合成氨的反应。很可惜，由于他所用的氢气和氮气的混合物中混进了空气，在实验过程中发生了爆炸。在没有查明发生事故的原因的情况下，就放弃了这项实验。德国化学家 W. 能斯特 (Nernst, 1864~1941)，对于研究具有重大工艺价值的气体反应有兴趣，研究了氮、氢、氨的气体反应体系，但是由于他在计算时，用了一个错误的热力学数据，以致得出不正确的理论，因而认为研究这一反应没有前途，停止了研究工作。

虽然在合成氨的研究中化学家遇到的困难不少，但是，德国的物理学家、化工专家 F. 哈伯 (Haber, 1868~1934) 和他的学生仍然坚持系统的研究。起初他们想在常温下使氮和氢反应，但没有氨气产生。又在氮、氢混合气中通以电火花，只生成了极少量的氨气，

而且耗电量很大。后来才把注意力集中在高压这个问题上，他们认为高压是最有可能实现合成反应的。根据理论计算，表明让氢气和氮气在 600℃ 和 20MPa 下进行反应，大约可能生成 6% 的氨气。如果在高压下将反应进行循环加工，同时还要不断地分离出生成的氨气，势必需要很有效的催化剂。为了探索有效的催化剂，他们进行了大量的实验，发现钨和铀具有良好的催化性能。如果在 17.5~20MPa 和 500~600℃ 的条件下使用催化剂，氮、氢反应能产生高于 6% 的氨。

哈伯把他们取得的成果介绍给他的同行和巴登苯胺纯碱公司，并在他的实验室做了示范表演。尽管事先对反应设备做了细致的准备工作，可是实验开始不久，有一个密封处就经受不住内部的压力，于是混合气体立即冲了出来，发出惊人的呼啸声。他们立即把损坏的地方修好，又进行了几小时的反应后，公司的经理和化工专家们亲眼看见清澈透明的液氨从分离器的旋塞里一滴滴地流出来。但是，实验开始时发生的现象确实是一个严重的警告，说明在设计这套装置时，必须采取各种措施，以避免不幸事故发生。哈伯的那套装置，在示范表演后的第二天发生了爆炸。随后，刚刚安装好的盛有催化剂钨的圆柱装置也爆炸了。这时金属钨粉遇到空气又燃烧起来，结果，把积存备用的价值极贵的金属钨几乎全部变成了没有大用处的氧化钨。

尽管连续出现了一些爆炸事故，但巴登公司的经理布隆克和专家们还是一致认为这种合成氨方法具有很高的经济价值。于是该公司不惜耗费巨资，还投入强大的技术力量、并委任德国化学工程专家 C. 波施 (Bosch, 1874~1940) 将哈伯研究的成果设计付诸生产。波施整整花了 5 年的时间主要做了三项工作：第一，从大量的金属和它们的化合物中筛选出合成氨反应的最适合的催化剂，在这项研究中波施和他的同事做了两万多次实验，才肯定由铁和碱金属的化合物组成的体系是合成氨生产最有效、最实用的催化剂，用以代替哈伯所用的钨和铀；第二，建造了能够进行高温和高压的合成氨装置，最初，他采用外部加热的合成塔，但是反应连续几小时后，钢中的碳与氢发生反应而变脆，合成塔很快地报废了，后来，将合成塔衬以低碳钢，使合成塔能够耐氢气的腐蚀；第三，解决了原料气氮和氢的提纯以及从未转化完全的气体中分离出氨等技术问题。经波施等化工专家的努力，终于设计成功能长期使用和操作的合成氨装置。

1910 年巴登苯胺纯碱公司建立了世界上第一座合成氨试验工厂，1913 年建立了大型工业规模的合成氨工厂。这个工厂在第一次世界大战期间开始为德国提供当时极其缺少的氮化合物，以生产炸药和肥料。以后在全世界范围内合成氨的工厂像雨后春笋般地建立起来。

三、世界合成氨生产及市场分析

合成氨是生产尿素、磷酸铵、硝酸铵等化学肥料的主要原料，以天然气或煤炭为原料，通过水蒸气重整工艺制得氢气，然后与氮气进行高压合成制得合成氨。

按终端用途来分，约 85%~90% 的合成氨用作化肥：液态氨、尿素、硝酸铵或其他衍生物；仅 13% 用于其他商品市场。

目前世界上合成氨主要专利供应商有丹麦哈德尔-托普索公司、美国凯洛格布朗路特公司和德国伍德公司。

1. 世界合成氨产能和需求分析

据统计，2009 年世界合成氨产能已超过 1.92 亿吨/年，主要分布情况：美国 1000 万吨/年、加拿大 520 万吨/年、墨西哥 298 万吨/年、南美地区 920 万吨/年、西欧 1218 万吨/年、东欧 3334 万吨/年。表 0-2 列出 2009 年世界主要合成氨产能。

表 0-2 2009 年世界主要合成氨产能

地区、国家	产能/(万吨/年)	地区、国家	产能/(万吨/年)
北美		德国	336.8
美国	1000	希腊	16.5
加拿大	520	意大利	61.5
墨西哥	291	荷兰	254.1
南美		挪威	29.6
阿根廷	88.4	西班牙	60
巴西	153.5	瑞士	7
哥伦比亚	21.5	英国	131.1
特立尼达	453	东欧	3334
委内瑞拉	204	中东/非洲	1610
西欧		亚太地区	
奥地利	59.5	澳大利亚	160
比利时	91.7	亚洲	8960
法国	170.3	总计	17498.7

表 0-3 中列出了 2005~2009 年世界部分地区合成氨产量统计，近年来世界合成氨供需基本趋于平衡，合成氨生产逐渐转向低价天然气生产区。

表 0-3 2005~2009 年世界部分地区合成氨、尿素产量统计 /万吨

项 目	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年
美国					
合成氨	1014.1	1035.9	1042.5	1036.4	1041
尿素	308.6	228.4	234	231	231.1
加拿大					
合成氨	460.4	462.3	463.8	462.4	462.3
欧洲					
尿素	282.2	255	263	254.5	254
日本					
合成氨	131.8	132.8	133.2	131	131

据国际肥料工业协会（IFA）对全球合成氨产量的调查显示，2008 年全球合成氨产量接近 1.528 亿吨，比 2007 年减少了 1%。其中中国、澳大利亚、欧洲、俄罗斯、特立尼达和多巴哥、印度、沙特阿拉伯等国由于市场需求疲软而减少，伊朗、加拿大、印度尼西亚、墨西哥、委内瑞拉等需求继续增加。2008 年全球合成氨产能达到 1.809 亿吨，比 2007 年增加 500 万吨，增加的产能主要来自中国、非洲、西亚等地区。

2009 年美国合成氨总需求量约为 1400 万吨，其用途为：尿素占 22.5%、直接用作化肥占 20.4%、磷酸铵占 17.5%、硝酸占 10.9%、硝酸铵占 7.3%、化学用途占 5.1%、硫酸铵占 3.6%、其他用途占 12.7%。

挪威 Yara 国际公司是全球领先的化肥生产商，该公司于 2010 年，以 41 亿美元收购美国 Terra 工业公司。新的 Yara 国际公司拥有合成氨总能力近 1200 万吨/年和尿素、硝酸铵能力 500 万吨/年。其全球业务包括欧洲、美国、中东（通过卡塔尔的 Qafco）、巴西、俄罗斯、澳大利亚和其他亚洲国家，以及特立尼达和多巴哥。在特立尼达和多巴哥，Yara 国际