

李化治 编著

制氧技术

(第2版)



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



制氧技术

ZHIYANG JISHU



ISBN 978-7-5024-4963-6



9 787502 449636 >

定价 96.00元

销售分类建议: 动力工程

制 氧 技 术

(第2版)

李化治 编著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2009

内 容 提 要

本书全面阐述了低温法空气分离制氧知识,共分为15章。书中介绍了气体及溶液的热力学基本规律;依照低温法制氧机流程系统的划分,逐章叙述了空气液化原理及设备、空气净化原理及设备、传热原理及设备、精馏原理及设备,以及气体压缩机械、气体膨胀机械、低温液体泵仪表及控制系统。同时也阐述了稀有气体的生产。书中着重介绍了制氧机流程及操作原理,最后列举了制氧机常见故障的分析处理方法。本版以现代低温法制氧机的制氧技术为主,也保留了一些具有代表性的流程和制氧技术。

本书可作为制氧行业技术人员和工人的培训教材,也可供高等院校有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

制氧技术/李化治编著. —2版. —北京:冶金工业出版社,
2009.8

ISBN 978-7-5024-4963-6

I. 制… II. 李… III. ①氧气—制造 ②制氧机
IV. TQ116.14

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第130304号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 王 楠 美术编辑 张媛媛 版式设计 葛新霞

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4963-6

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1997年3月第1版,2009年8月第2版,2009年8月第9次印刷

787mm×1092mm 1/16;32.25印张;2插页;790千字;496页;20501-23500册

96.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

进入 21 世纪以来,随着我国国民经济的高速发展,我国的制氧行业已有长足的进步,与国外的先进制氧技术的差距越来越小,真是可喜可贺!

随着钢铁冶金、化工,尤其是煤化工等行业对氧气、氮气等空分产品需求的增长,制氧机已向大型化、超大型化方向发展,国内超大型制氧机已达到 $90000\text{m}^3/\text{h}$ 等级。制氧的新技术新工艺层出不穷,低温法制氧流程已达到第六代新流程全面普及的程度。

《制氧技术》(第 1 版)一书在问世后的十多年间,受到了业界读者的关注和欢迎,作为编者,我深感欣慰,并由衷地表示感谢!与此同时也感知到第 1 版的《制氧技术》已不能满足制氧技术发展的要求,我在现场授课的过程中深切地体会到制氧行业广大工作人员对新制氧技术的渴求之情,这驱使我提笔再编《制氧技术》(第 2 版),以尽自己微薄之力,为制氧行业的发展再做点贡献!

本书是在《制氧技术》(第 1 版)的基础上,以现代制氧第六代流程为主线,以更新技术内容为宗旨而编写的,但仍保持原书的框架。全书共分 15 章,每章都增加了新技术、新设备等内容。譬如:第 3 章空气的净化以分子筛吸附净化为主;第 6 章空气的分离除筛板塔外,增加了规整填料及规整填料塔等内容;第 11 章制氧流程,删除了切换式换热器流程,全章围绕着现代制氧的外压缩和内压缩流程加以分析和阐述;第 12 章稀有气体的提取全面介绍无氢制氮技术;第 13 章制氧机的过程检测与自动控制,从工艺的角度诠释了制氧机新的集散控制系统(DCS)等。

本书力求保持《制氧技术》(第 1 版)理论联系实际的特点。编写过程中吸收了近十多年来在各厂举办培训班中广大学员丰富的实践经验,力求用理论知识去解决实际问题,这方面尤其体现在第 14 章制氧机操作和第 15 章制氧机故障诊断,以期望提高读者理论联系实际解决问题的能力。

低温法制氧，系统很多，涉及的学科知识面广，加之现代制氧技术需要综合技术，因此本书力求“全面”。书中除对原理、设备、流程、仪表及控制、操作、故障诊断以及稀有气体生产等内容均在相应的章节加以论述外，还增加了气体的主要热物性参数和热力性质图表，以便于在生产实践中进行必要的计算，提高分析问题的层次。“全面”还体现在：以“冶金型”制氧机为主，兼顾“化工型”制氧机；以大型制氧机为主，兼顾中、小型制氧机；以现代制氧机为主，兼顾历史传统型制氧机。

本书在编写过程中，得到了广大制氧工程技术人员的帮助和支持，尤其是包钢氧气厂史志祥、法液空杭氧李伟、新奥公司蔚龙、泛海能源公司冯香玖和李凤刚、马钢氧气公司朱宏伟、唐钢气体公司董震、俄罗斯深冷驻北京代表处骆娇等，对本书的编写提供了许多有价值的技术资料，并对书稿的内容提出许多宝贵意见，给予编者较大的帮助，在此表示衷心的感谢！

由于编者的水平所限，不当之处恳请广大读者批评指正！



2009年4月18日

目 录

绪论	1
1 气体	5
1.1 气体的基本状态参数	5
1.1.1 温度	5
1.1.2 压力	6
1.1.3 质量体积	8
1.2 气体基本定律	8
1.2.1 理想气体及其状态方程	8
1.2.2 混合气体	10
1.2.3 实际气体及其状态方程	12
1.2.4 蒸气	16
1.3 氧的性质	18
1.3.1 氧的物理性质	18
1.3.2 氧的化学性质	23
1.4 氮的性质	25
1.4.1 氮的物理性质	25
1.4.2 氮的化学性质	31
1.5 空气的性质	32
1.5.1 空气的组成	32
1.5.2 空气的基本性质	32
2 热力学基础	37
2.1 热力学常用的基本术语	37
2.1.1 系统与外界	37
2.1.2 状态与状态参数	37
2.1.3 过程与循环过程	37
2.1.4 可逆过程与不可逆过程	38
2.1.5 平衡	38
2.2 热力学第一定律	38
2.2.1 功、热量、热功当量	38
2.2.2 热力学能、焓	40
2.3 热力学第二定律	40

2.3.1 热力学第二定律的含义	40
2.3.2 熵	41
2.4 气体的热力性质图	42
2.4.1 T - S 图	42
2.4.2 H - T 图	43
2.4.3 H - S 图	44
2.5 溶液热力学基础	44
2.5.1 溶液	44
2.5.2 溶液的基本定律	46
2.5.3 亥姆霍兹自由能、吉布斯自由焓	47
3 空气的液化	49
3.1 获得低温的方法	49
3.1.1 气体的节流	49
3.1.2 压缩气体作外功制冷	52
3.1.3 节流膨胀与等熵膨胀的比较	52
3.2 气体液化循环的性能指标	53
3.2.1 正向循环、热效率	53
3.2.2 逆向循环、制冷系数	53
3.2.3 气体液化的最小功	54
3.2.4 实际液化循环的性能指标	55
3.3 以节流为基础的循环	55
3.4 以等熵膨胀与节流为基础的循环	57
3.5 卡皮查循环	59
3.6 海兰德循环	60
4 空气的净化	62
4.1 固体杂质的净除	63
4.1.1 过滤除尘原理及性能指标	63
4.1.2 空气过滤器	64
4.2 化学法净化空气	68
4.2.1 化学法除水	68
4.2.2 化学法除二氧化碳	69
4.3 自清除	70
4.3.1 饱和与未饱和	70
4.3.2 空气中二氧化碳的饱和	74
4.3.3 不冻结条件	76
4.3.4 保证自清除的最大允许温差	78
4.3.5 保证自清除措施	81

4.3.6 切换式换热器的切换周期	82
4.3.7 自清除理论的评述	83
4.4 吸附法	84
4.4.1 吸附	84
4.4.2 吸附剂	85
4.4.3 吸附机理	87
4.4.4 吸附器	89
4.5 分子筛纯化系统	91
4.5.1 分子筛纯化系统组织	92
4.5.2 分子筛纯化器	92
4.6 分子筛纯化器的使用及节能	96
4.6.1 对吸入空气的要求	96
4.6.2 再生操作条件的确定	98
4.6.3 双层床吸附器	99
4.6.4 加热器及节能	99
5 空分的换热设备	102
5.1 传热基本方式	102
5.1.1 导热传热	102
5.1.2 对流传热	103
5.1.3 辐射传热	104
5.2 间壁式换热器的传热	105
5.2.1 传热基本方程式	105
5.2.2 传热的实际计算	106
5.2.3 强化传热的措施	110
5.2.4 低温换热器的特点	111
5.3 板翅式换热器	112
5.3.1 板翅式换热器的特点	112
5.3.2 板翅式换热器的结构	113
5.3.3 板翅式换热器的组合及制造	115
5.3.4 通过翅片的传热	117
5.3.5 板翅式主热交换器	121
5.4 蓄冷器	124
5.4.1 蓄冷器的结构	124
5.4.2 蓄冷器的温度工况	128
5.5 冷凝蒸发器	132
5.5.1 液氧沸腾传热	132
5.5.2 气氮冷凝	134
5.5.3 主冷的传热温差	135

5.5.4 主冷凝蒸发器的结构	135
5.6 氨水预冷器	140
5.7 其他换热器	143
5.7.1 过冷器	143
5.7.2 氨系统中的换热器	143
6 空气的分离	145
6.1 空气分离最小功	145
6.2 气液相平衡	146
6.2.1 气液相平衡机理	146
6.2.2 氧、氮混合物气液相平衡状态及其应用	149
6.3 空气的精馏	155
6.3.1 空气的简单蒸发和简单冷凝过程	156
6.3.2 空气的部分蒸发和部分冷凝	157
6.3.3 空气的精馏过程	159
6.4 单级精馏塔与双级精馏塔	162
6.4.1 单级精馏塔	162
6.4.2 双级精馏塔	164
6.5 双级精馏塔的物质平衡和能量平衡	168
6.5.1 下塔的物质平衡与能量平衡	168
6.5.2 上塔的物质平衡与能量平衡	169
6.5.3 全塔的物质平衡与能量平衡	170
6.6 氧-氮二元系精馏计算	171
6.6.1 精馏塔塔板上的工作过程	171
6.6.2 上塔的操作方程及理论塔板数	174
6.6.3 液空进料口位置的确定	176
6.6.4 全塔效率及板效率	179
6.6.5 逐板计算法	183
6.6.6 回流比对精馏工况的影响	184
6.7 筛板塔	186
6.7.1 筛板塔的典型结构	186
6.7.2 筛板塔的气液流动工况及主要参数选择	187
6.7.3 筛板塔的板间距	191
6.8 填料塔	192
6.8.1 填料	193
6.8.2 填料塔的流动工况	197
6.8.3 填料塔的传质规律	198
6.8.4 填料层高度的确定	200
6.8.5 填料塔塔内件	202

6.8.6 对填料的评价及填料塔与筛板塔对比	204
7 活塞式压缩机	208
7.1 压缩机分类	208
7.2 活塞式压缩机概述	209
7.3 活塞式压缩机工作原理	209
7.3.1 工作过程	209
7.3.2 实际过程及示功图	212
7.4 活塞压缩机的参数计算	213
7.4.1 排气温度	213
7.4.2 排气量	214
7.4.3 实际功及功率	218
7.5 多级压缩	220
7.5.1 多级压缩工作原理	220
7.5.2 多级压缩优点	221
7.6 活塞压缩机的结构	223
7.6.1 工作部件	225
7.6.2 运动部件	231
7.6.3 机身	232
7.6.4 润滑系统	233
7.6.5 冷却系统	233
7.6.6 无油润滑氧压机结构特点	234
7.7 排气量调节	236
7.7.1 转速调节	236
7.7.2 管路调节	237
7.7.3 顶开吸气阀调节	237
7.7.4 辅助容积调节	237
8 离心式压缩机	239
8.1 离心式压缩机概述	239
8.2 基本参数及基本方程式	240
8.2.1 级及段	240
8.2.2 主要元件的作用	240
8.2.3 主要参数的表示法	241
8.2.4 基本方程式	242
8.2.5 音速及马赫数	244
8.3 离心式压缩机的工作原理	244
8.3.1 叶轮的构造与工作原理	244
8.3.2 扩压器的工作原理	248

8.4 级的实际耗功、损失及效率	250
8.5 级内气体参数	255
8.5.1 温度	255
8.5.2 压力及质量体积	256
8.6 性能曲线及调节	259
8.6.1 性能曲线	259
8.6.2 管网特性曲线	261
8.6.3 压缩机和管网的联合工作	261
8.6.4 常见的几种调节方法	262
8.6.5 离心压缩机的并联	263
8.7 离心压缩机组	263
8.7.1 离心压缩机本体	264
8.7.2 传动	269
8.7.3 润滑	270
8.8 典型离心压缩机举例	271
8.8.1 带中间冷却器的单轴离心压缩机	271
8.8.2 H型离心压缩机(双轴离心压缩机)	271
8.8.3 内置冷却器的单轴离心压缩机	273
8.8.4 筒型离心压缩机	274
8.8.5 轴流加离心压缩机	275
8.8.6 汽轮机简介	277
8.8.7 离心式氧压机和氮压机	279
9 低温液体泵	282
9.1 离心式低温液体泵	282
9.1.1 离心泵的工作原理	282
9.1.2 泵的特性参数	283
9.1.3 离心泵的性能曲线	284
9.1.4 离心泵的汽蚀	285
9.1.5 离心泵的结构	285
9.1.6 离心泵的轴封	286
9.1.7 低温离心泵的维护及故障	288
9.2 往复式低温泵	289
9.2.1 往复式低温泵的工作原理	289
9.2.2 往复泵的性能参数	290
9.2.3 往复式低温泵的结构	292
9.2.4 往复泵的维护及故障	293
9.3 低温泵的选择及对比	294

10 膨胀机	295
10.1 膨胀机的作用及分类	295
10.2 透平膨胀机工作原理	296
10.2.1 气体对外作功的实现	297
10.2.2 能量平衡式	297
10.2.3 速度三角形	298
10.2.4 蜗壳内的气体流动	300
10.2.5 导流器的气体流动	300
10.2.6 工作轮的气体流动	302
10.3 透平膨胀机的损失、产冷量及效率	304
10.3.1 损失	304
10.3.2 等熵效率	306
10.4 透平膨胀机的性能曲线及调节	307
10.4.1 性能曲线	307
10.4.2 制动器形式	308
10.4.3 透平膨胀机的调节方法	308
10.5 透平膨胀机的结构	311
10.5.1 透平膨胀机的本体结构	311
10.5.2 膨胀机的润滑系统	316
10.6 典型透平膨胀机举例	316
10.6.1 低压透平膨胀机	316
10.6.2 中压透平膨胀机	318
10.6.3 气体轴承透平膨胀机	319
10.6.4 液体膨胀机	320
10.7 活塞式膨胀机	322
10.7.1 工作过程	322
10.7.2 配气相图	322
10.7.3 主要参数	323
10.7.4 气体流量、损失及效率	324
10.7.5 冷量调节方法及调节机构	324
10.7.6 典型结构	326
11 制氧流程	329
11.1 概述	329
11.1.1 制氧机分类	329
11.1.2 制氧机的性能指标及评价	329
11.1.3 国产空气分离设备的型号规定	333
11.1.4 制氧机的发展	333

11.2 制氧机典型流程	335
11.2.1 150m ³ /h 制氧机 (中压)	335
11.2.2 3200m ³ /h 制氧机 (蓄冷器自清除)	336
11.2.3 10000m ³ /h 制氧机 (可逆式换热器自清除)	337
11.2.4 30000m ³ /h 制氧机 (外压缩)	338
11.2.5 52000m ³ /h 制氧机 (内压缩)	339
11.2.6 全液体制氧机	340
11.3 外压缩制氧流程分析	341
11.3.1 外压缩制氧流程组织	341
11.3.2 外压缩流程的主要参数	353
11.4 内压缩流程分析	357
11.4.1 内压缩流程组织	357
11.4.2 内压缩流程主要参数	362
11.5 液化装置及全液体空分的流程分析	362
11.5.1 氧、氮液化装置的流程组织	362
11.5.2 全液体空分装置	365
11.6 小型空分装置的流程分析	368
11.6.1 空压机	368
11.6.2 纯化器	368
11.6.3 膨胀机	369
11.6.4 分馏塔	369
11.7 内、外压缩流程对比及流程的选择	369
11.7.1 内、外压缩流程的对比	369
11.7.2 流程的选择	370
11.8 流程设计计算	373
11.8.1 设计计算方法	373
11.8.2 流程计算举例	374
11.9 能耗计算及节能	387
11.9.1 能耗计算	387
11.9.2 空分的节能	389
12 空分的稀有气体提取	392
12.1 稀有气体的性质及用途	392
12.1.1 稀有气体的基本性质	392
12.1.2 稀有气体的主要用途	392
12.2 提取方法简述	396
12.2.1 稀有气体在空分塔的分布	396
12.2.2 基本的提取方法	397
12.2.3 稀有气体的制备概述	398

12.3 氩的制取	399
12.3.1 氩在主塔的富集	399
12.3.2 配粗氩塔时主塔的技术改造	401
12.3.3 传统的制氩流程	403
12.3.4 全精馏制氩	412
12.3.5 氩提取率	413
12.3.6 两种制氩方法的对比	414
12.4 氮、氦的提取	415
12.4.1 概述	415
12.4.2 粗氮、氦气的制备	415
12.4.3 纯氮氦混合气的制备	416
12.4.4 纯氮氦混合气分离制纯氮和纯氦	417
12.5 氮、氙的提取	418
12.5.1 氮、氙提取的特点	418
12.5.2 基本流程	419
12.5.3 新型氮、氙提取装置	422
13 制氧机的过程检测与自动控制	426
13.1 概述	426
13.2 过程参数检测仪表	427
13.2.1 检测仪表的基本性能指标	427
13.2.2 制氧机检测仪表	428
13.3 自动调节系统简介	440
13.3.1 自动调节系统的组成	440
13.3.2 几种自动调节作用	441
13.3.3 控制阀	445
13.4 集散控制系统	446
13.4.1 概述	446
13.4.2 DCS 的基本结构	447
13.4.3 集散控制系统性能指标及评估	448
13.4.4 空分集散控制系统举例	450
13.4.5 空分组态软件的组态原则及控制分析	451
13.4.6 ESD 系统	452
13.5 自动变负荷	453
13.5.1 概述	453
13.5.2 液氧与液氮周期倒灌的自动变负荷 (VAROX)	453
13.5.3 自动变负荷 (ALC)	454
13.6 现场总线控制系统	461

14 制氧机操作	463
14.1 制氧机的调试	463
14.1.1 气密性检查	463
14.1.2 裸体冷冻	464
14.2 启动操作	465
14.2.1 启动操作的特点	465
14.2.2 设备冷却阶段	465
14.2.3 积累液体阶段	467
14.2.4 精馏工况的调整阶段	468
14.2.5 充液启动方法	469
14.3 正常操作	469
14.3.1 分子筛纯化器的操作	470
14.3.2 液面调节	470
14.3.3 精馏工况调节	472
14.3.4 氩系统精馏工况调节	473
14.4 手动变负荷操作	475
14.4.1 增加液氧产量的变工况操作	475
14.4.2 变化空气量的手动变负荷	476
14.4.3 对手动变负荷操作的分析	476
14.5 加温解冻和吹除操作	477
14.5.1 冷状态的加温操作	477
14.5.2 热状态的加温操作	477
14.6 内压缩流程的操作特点	478
14.6.1 一拖二机组的操作	478
14.6.2 精馏工况的调节	478
14.6.3 主换热器	479
14.6.4 启动操作	479
14.7 全液体空分操作特点	480
14.7.1 一体机的操作	480
14.7.2 启动操作	480
15 制氧机的安全及故障诊断	481
15.1 制氧机的安全问题	481
15.1.1 危险源识别	481
15.1.2 人身安全保护	483
15.2 制氧机故障诊断	483
15.2.1 常见故障举例	483
15.2.2 实时故障诊断专家系统	488

附 录	492
附表 1 低温工质的基本物理-化学性质	492
附表 2 单位换算	493
附图 1 空气 T - S 图	插页
附图 2 氧的 T - S 图	插页
附图 3 氮的 T - S 图	插页
附图 4 氮-氧混合物 T - p - h - x - y 图	插页
参考文献	495