

制氧机的原理与操作

ZHIYANGJI DE YUANLI YU CAOZUO

冶金工业出版社

1

制氧机的原理与操作

《制氧机的原理与操作》编写组

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书比较全面系统地介绍了大型制氧机的工作原理、制氧工艺流程、机器设备和操作。

全书共分四篇十八章。

第一篇制氧原理；第二篇制氧设备。介绍空气净化设备、换热设备、精馏设备及其阀门等其他设备；第三篇制氧机器。介绍活塞式压缩机、离心式压缩机、透平膨胀机和离心式液氧泵的工作原理、结构和调节；第四篇制氧操作。介绍离心式压缩机、氧气压缩机、透平膨胀机、液氧泵的操作，大型空分装置的启动、正常操作、调整、停车及临时停车后的启动，空分装置的加温和试车等。

本书可供冶金、化工部门的制氧车间操作工人和工程技术人员使用，亦可供高等院校有关专业师生参考。

制 氧 机 的 原 理 与 操 作

《制氧机的原理与操作》编写组

冶金工业出版社出版

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 26 1/8 插页 6 字数 621 千字

1977年8月第一版 1977年8月第一次印刷

印数00,001~13,400册

统一书号：15062·3245 定价（科三）2.20元

毛主席语录

路线是个纲，纲举目张。

独立自主，自力更生，艰苦奋斗，勤俭建国。

备战、备荒、为人民。

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

抓革命，促生产，促工作，促战备。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

前 言

钢铁工业和整个冶金工业的发展对氧气的需要量越来越大。高炉富氧鼓风炼铁，平炉、电炉吹氧炼钢都需要大量氧气。特别是氧气顶吹转炉炼钢，已为世界各国广泛采用，成为钢铁工业高速发展的一条重要途径，用氧气顶吹转炉炼1吨钢，就需要 $50\sim 60\text{米}^3$ 氧气。这些都充分说明了氧气在钢铁工业生产中的重要作用。此外，氮气是制造合成氨的重要原料，有了合成氨，就可以生产各种化肥，增产粮食。氮、氧和各种稀有气体又是金属切割与焊接，有色金属与高级合金钢的冶炼，以及电子工业、原子能工业、火箭导弹等部门所大量需要的。因此，必须多快好省地发展制氧工业，以适应社会主义建设的需要。

生产氧气是采用深度冷冻的方法把空气液化，然后再利用元素沸点的不同而分离成氧、氮和其他稀有气体。自1902年世界上制成第一台单级精馏的制氧机以来，已有近70年的历史了。在此期间，制氧机由小到大，不断发展。目前，世界各国的制氧机都在向大型化、全低压、全板式的方向发展。

我国制氧机的制造是一个年轻的工业。解放前是一个空白点。解放后，在毛主席、党中央的英明领导下，我国工人阶级、革命干部和革命技术人员，在毛主席革命路线指引下，坚持“独立自主、自力更生”、“鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义”的方针和路线，制氧机的制造得到迅速发展。无产阶级文化大革命是使我国社会生产力发展的强大动力。经过无产阶级文化大革命，先后制造成了容量不同的全低压大型制氧机。此外，全国各地不少工厂还自己制造中小型制氧机。制氧工业的发展对冶金、化工等部门发展起到一定的促进作用，并为工业支援农业作出了一定的贡献。

随着制氧机的增加，如何使用、维护，不断地提高设备生产能力，就成为当前一个重要问题。为了培养一批懂得制氧原理和设备构造，并能掌握制氧机的使用、维护的技术骨干，一机部、冶金部共同商定，先后在北京钢铁学院举办了几期制氧机训练班，编写了教材。本书是在制氧机训练班所用教材的基础上改编而成的。

本书是由杭州制氧机厂、杭州制氧机研究所、开封空分设备厂、鞍山钢铁公司、首都钢铁公司、酒泉钢铁公司、西安交通大学、华中工学院、北京钢铁学院等单位参加编写的。由于我们水平有限，实践经验不足，书中难免出现缺点和错误，请读者批评指正。

编 者

1975年11月

目 录

第一篇 制 氧 原 理

第一章 基础知识..... 1	一、KFD-41000 型空分装置 35
第一节 基本概念..... 1	二、KFS-21000型空分装置 41
一、温度..... 1	三、FL-3350-Ⅲ型空分装置..... 44
二、压力..... 2	第三章 空气精馏原理..... 47
三、流量..... 3	第一节 气-液相平衡时浓度间的关系 49
四、功与功率..... 4	一、气-液相平衡 49
五、热量与冷量..... 5	二、氧、氮混合物的气-液相平衡图 51
六、内能与焓..... 6	第二节 空气的精馏..... 54
七、熵..... 7	一、液态空气的蒸发过程..... 54
第二节 空气的性质..... 8	二、空气的冷凝过程..... 57
一、气体的性质..... 8	三、空气的精馏..... 57
二、混合气体的性质..... 11	第三节 精馏塔..... 59
三、蒸气的性质..... 12	一、单级精馏塔..... 59
第二章 制氧装置原理流程..... 16	二、双级精馏塔..... 60
第一节 空分装置中的能量转换规律..... 16	三、全低压空分装置中的双级精馏塔..... 64
一、压缩机中的能量转换过程..... 16	第四节 从空分装置中提取稀有气体..... 71
二、热交换器中的换热过程..... 17	第五节 空分装置的物料衡算..... 74
三、节流过程..... 19	第六节 塔板数的计算..... 79
四、膨胀机的膨胀过程..... 22	一、在精馏塔塔板上的流动过程..... 79
第二节 深度冷冻循环..... 25	二、用逐板计算法计算理论塔板数..... 80
一、节流膨胀循环..... 25	三、用 $y-x$ 图的图解法确定理论塔板数..... 81
二、作外功的绝热膨胀循环..... 30	四、回流比与塔板数..... 85
第三节 空分装置工艺流程..... 34	五、实际塔板数的确定..... 86

第二篇 制 氧 设 备

第四章 空气净化设备 88	五、切换周期的计算 105
第一节 空气中固体杂质的清除..... 88	第三节 吸附法清除水分、二氧化碳及乙
一、湿式过滤器..... 88	炔 107
二、干式过滤器..... 89	一、吸附的基本概念 107
第二节 空气中水分和二氧化碳的自清除..... 90	二、干燥器 111
一、基本概念..... 90	三、二氧化碳吸附器 114
二、空气中水分和二氧化碳析出规律..... 92	四、乙炔吸附器 117
三、切换式换热器中水分和二氧化碳自清	第五章 换热设备..... 126
除原理..... 96	第一节 传热基本原理 127
四、蓄冷器（或可逆式换热器）	一、传热过程基本规律 127
的切换原理 103	二、传热的实际计算 128

三、影响传热的因素.....	130	第一节 塔板结构	172
四、换热器的温度工况.....	136	第二节 塔板上的流动工况	177
第二节 切换式换热器.....	137	第三节 塔的整体结构	183
一、板翅式可逆式换热器.....	138	一、下分馏塔	183
二、石头蓄冷器	146	二、上分馏塔	187
三、铝带蓄冷器	153	三、纯氮塔	189
第三节 冷凝蒸发器	155	第七章 其他设备	190
一、板式冷凝蒸发器	157	第一节 自动阀箱	190
二、管式冷凝蒸发器	158	第二节 消声器	192
三、辅助冷凝器	160	第三节 加热器	195
第四节 过冷器	161	第四节 阀门	196
一、板式过冷器	162	一、切换阀(强制阀)	197
二、管式过冷器	163	二、节流阀(调节用)	201
第五节 液化器	166	三、蝶阀	211
一、板式液化器	166	四、闸阀	215
二、管式液化器	167	五、截止阀	221
第六节 氮水预冷器	168	六、止回阀	225
一、空气冷却塔	169	七、安全阀	226
二、水冷却塔	169	八、仪表阀	229
第六章 精馏设备	172		

第三篇 制 氧 机 器

第八章 压缩机的作用原理及分类.....	235	六、气缸	262
第九章 活塞式压缩机	240	七、机身	264
第一节 活塞式压缩机的基本工作原理及循环	240	八、曲轴、连杆、十字头	264
一、基本工作原理	240	九、润滑系统	266
二、气体的状态方程和过程方程	240	十、冷却器	268
三、活塞式压缩机的理论循环	241	第十章 离心压缩机	269
四、压缩机级的实际工作过程	244	第一节 工作原理	269
五、排气量	245	一、基本工作原理	269
六、排气温度	248	二、实际工作轮叶片对气体的作功	271
七、功率	250	三、实际耗功和功率	275
八、多级压缩机	251	四、压缩机的效率	276
第二节 氟塑料密封无润滑氧压机结构介绍	253	第二节 工作轮与转子	277
一、氟塑料密封无润滑氧压机的特点	253	一、工作轮的结构	277
二、氟塑料密封无润滑氧压机的结构形式	255	二、轴向力及其平衡	280
三、活塞及活塞环	255	三、转子结构	281
四、填料函及刮油器	259	第三节 固定元件	282
五、气阀	261	一、扩压器	282
		二、弯道与回流器	284
		三、蜗壳	285
		四、密封	286

五、机壳	288	三、反动式透平膨胀机	308
第四节 压缩机组	288	四、透平膨胀机的基本损失及其等熵效率 η_s	309
一、传动	288	第三节 透平膨胀机的结构	311
二、气体冷却器	292	一、透平膨胀机的结构特点	311
三、油路系统	295	二、透平膨胀机机组	312
四、轴向位移安全器	297	三、透平膨胀机的典型结构	312
第五节 特性曲线及调节方法	299	第四节 透平膨胀机的调节	319
一、压缩机的特性曲线	299	一、冷量调节概述	319
二、管网特性曲线	300	二、透平膨胀机制冷量调节方法	320
三、压缩机和管网的联合工作	300	第十二章 离心式液氧泵	324
四、常见的几种调节方法	301	第一节 概述	324
五、自动调节装置简介	302	第二节 离心式液氧泵的工作原理	325
第十一章 透平膨胀机	305	一、离心式液氧泵的基本原理	325
第一节 概述	305	二、泵的特性参数	325
一、透平膨胀机在制氧机中的应用及其特点	305	三、泵的汽蚀	326
二、透平级的概念	306	第三节 离心式液氧泵的结构	327
第二节 透平膨胀机的工作原理	306	一、离心式液氧泵的基本结构	327
一、透平膨胀机制冷的基本原理	306	二、液氧泵的密封	328
二、速度三角形, 无冲击进气	307	三、离心式液氧泵的整体结构	329

第四篇 制 氧 操 作

第十三章 机器的操作	332	六、液氧泵的加温	346
第一节 离心压缩机的操作	332	第十四章 大型空分装置的启动	347
一、启动前的准备	332	第一节 空分装置的启动	347
二、离心压缩机的开车	335	一、集中冷却法	348
三、停车	335	二、分段冷却法	349
四、正常操作	336	第二节 启动过程的调整	350
五、故障及故障处理	337	一、可逆式换热器生产工况的调整	350
第二节 氧气压缩机的操作	338	二、启动阶段中膨胀机的运转	357
一、主要技术参数	338	三、启动阶段中液体的产生和积累	361
二、操作	339	第三节 KFD-41000 型空分装置的启动操作	363
第三节 透平膨胀机的操作	341	一、启动前的准备	364
一、主要技术参数	341	二、冷却设备的第一阶段	367
二、风机制动的膨胀机的操作	341	三、冷却设备的第二阶段	368
三、电机制动的透平膨胀机简介	344	四、冷却设备的第三阶段	372
第四节 液氧泵的操作	345	五、冷却设备的第四阶段	372
一、主要技术参数	345	六、调整纯度至正常工作状态	374
二、操作	345	第十五章 空分装置的正常操作	377
三、注意事项	346	第一节 可逆式换热器(或蓄冷器)生产工况的调整	377
四、保护装置	346		
五、故障及处理	346		

一、控制可逆式换热器（或蓄冷器）各部 温度工况的意义	377	二、解冻空气干燥器本身的加温再生 流路	397
二、可逆式换热器（或蓄冷器）温度工 况的调整	378	三、解冻空气干燥器再生后的冷却流路	397
第二节 精馏工况的调整	383	四、仪表空气压缩机的空气气源流路	397
一、下塔精馏工况的调整	383	第三节 全面加温	398
二、上塔精馏工况的调整	384	一、全面加温的工艺要求	398
第三节 膨胀机的调整	387	二、可逆式换热器的解冻	399
一、制冷量的调整	387	三、保温箱内其它容器和管道的解冻	399
二、调整时应注意的几个问题	388	第四节 单体加温	400
第四节 其他维护事项	388	一、液氧吸附器的加温	400
一、切换机构的维护	388	二、液空吸附器的切换和加温	401
二、液悬的处理	389	三、膨胀机、液氧泵等单体的加温	401
三、乙炔含量的控制	390	第十八章 空分装置的试车	402
四、其它事项的处理	391	第一节 概述	402
第十六章 空分装置的停车及临时 停车后的启动	392	第二节 KFD-41000 型空分装置的 试车	402
第一节 空分装置的停车	392	一、空分装置的气密性检查	402
一、全系统停车	392	二、低压系统的检漏和试压	403
二、短期停车	392	三、自动切换系统及安全阀的调整	404
三、紧急停车	393	四、KFD-41000 型空分装置的 裸体冷冻	404
第二节 临时停车后的再启动	393	五、冷冻后的解冻、试压、检漏和必要的 检修	405
第十七章 空分装置的加温	395	六、保温材料的填充	405
第一节 概述	395	七、投产试车	405
第二节 加温系统	395	第三节 空分装置的单体试压和检漏	406
一、加热气体的流路	396		

第一篇 制氧原理

第一章 基础知识

第一节 基本概念

工业上大规模制取氧气的主要原料是空气，因为空气中大约包含有五分之一氧气。

“制氧”就是要设法将空气中的氧气分离出来，因此制氧机也叫“空气分离设备”。空气中的其余部分主要是氮气，它与氧气均匀地搀混在一起，在常温下要使它们分离是很困难的。人们在长期实践中发现，任何物质都可能以气体状态、液体状态或固体状态存在，并在一定条件下可以互相转化。当温度降低到一定程度时，氧气或氮气均可能变成液氧或液氮，但转化的条件（即液化温度）是不同的。这样，就有可能在专门的设备（精馏塔）里将液态空气分离成氧和氮。因此，要使空气中氧、氮分离的首要条件是要将空气液化。

空气一般均以气体状态存在，要使空气液化必须将空气冷到零下140度以下才有可能。日常经验告诉我们，一个物体要自发地冷到比周围更低的温度是不可能的，除非用人工的方法，化费一定的代价（消耗功）才能实现。这种人工获得低温的方法叫“冷冻”，冷至零下100度以下叫“深度冷冻”。因此，目前在工业上广泛采用的制氧方法也叫“深度冷冻方法分离空气”。

要掌握制氧原理，首先要熟悉与此有关的一些基本概念。

一、温度

温度是监视空分装置运转情况的重要参数之一。由它可以知道空气在空分装置各部位被冷却的状态。

温度的刻度一般以1标准大气压下冰的融化点作为0度，水的沸点为100度，在0度与100度之间给予一百等分，每一等分称为1度。这种刻度方法叫“摄氏温标”，用 $t^{\circ}\text{C}$ 表示。低于冰点的温度用负值表示，例如，空气出可逆式换热器的温度为零下172度，用 -172°C 表示。

实践与理论均证明，零下 273°C （精确地说是 -273.16°C ）是实际能够接近而不可能达到的最低温度。因此，如果以 -273°C 作为温度的起算点，就不会出现负温度。这种温标叫“绝对温标”， -273°C 叫绝对零度，用绝对温标表示的温度叫绝对温度，用 $T\text{K}$ 表示。

摄氏温标与绝对温标的关系如图1-1所示，它们二者的每一度的刻度完全一样，只是起算点不同。因此，二者之间的换算关系为

$$T = 273 + t \quad \text{K} \quad (1-1)$$

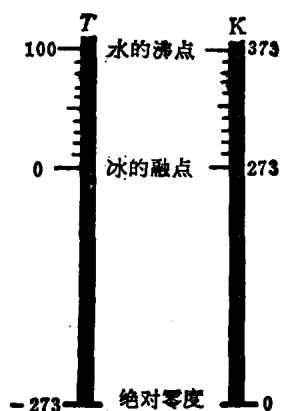


图 1-1 摄氏温标与绝对温标的关系

$$t = T - 273 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1-1')$$

〔例〕可逆式换热器出口空气的摄氏温度为 $t = -172^\circ\text{C}$ ，问绝对温度是多少？

〔解〕由式 (1-1)

$$T = 273 + (-172) = 101\text{K}$$

实际测量一般用摄氏温度，而理论计算中经常采用绝对温度。

二、压力

压力是表示空分装置运转状态的另一个重要参数。

通常说空分塔下塔压力为“几公斤”，上塔压力为“几公斤”，实际上压力与力是两种不同的东西。压力是指在单位面积上作用力的大小。力的单位通常用“公斤”，单位面积可用每平方厘米或每平方米为单位，因此压力的单位为“公斤/厘米²”或“公斤/米²”。同样1公斤力，如果作用在1厘米²面积上，则它的压力为1公斤/厘米²；如果作用在1米²面积上，它的压力为1公斤/米²，则每平方厘米面积上所分担的压力只有万分之一。所以这两个压力单位之间的换算关系为

$$1 \text{ 公斤/米}^2 = 0.0001 \text{ 公斤/厘米}^2$$

压力的另一种单位叫“大气压”，1公斤/厘米²的压力就叫“一个大气压”。即

$$1 \text{ 大气压} = 1 \text{ 公斤/厘米}^2 = 10000 \text{ 公斤/米}^2$$

通常，对周围空气（大气）的压力及一些较低的压力采用“毫米水银柱”，“毫米水柱”等液柱高度为单位。它的原理是被测量的压力等于液柱在底面上由于本身重量所产生的压力。若玻璃管内液柱的高度为 h ，截面积为 A ，液体单位体积的重量（叫“重度”）为 $\gamma_{\text{液}}$ ，则液柱本身重量对底面产生的作用力为 $\gamma_{\text{液}}hA$ ，压力为

$$P = \gamma_{\text{液}}hA / A = \gamma_{\text{液}}h \quad (1-2)$$

我们知道，水的重度为 $\gamma_{\text{水}} = 1000 \text{ 公斤/米}^3$ ，1毫米水柱的压力相当于多少公斤/米呢？由式 (1-2) 可得：

$$P = \gamma_{\text{水}}h = 1000 \times 0.001 = 1 \text{ 公斤/米}^2$$

水银的重度为 $\gamma_{\text{水银}} = 13600 \text{ 公斤/米}^3$ ，则1毫米水银柱应等于

$$P = 13600 \times 0.001 = 13.6 \text{ 公斤/米}^2 = 13.6 \text{ 毫米水柱}$$

大气产生的压力一般在700多毫米水银柱，它随海拔高度和气候条件而变化。通常规定760毫米水银柱为1标准大气压。所以

$$\begin{aligned} 1 \text{ 标准大气压} &= 760 \text{ 毫米水银柱} \\ &= 760 \times 13.6 = 10332 \text{ 公斤/米}^2 \\ &= 1.0332 \text{ 公斤/厘米}^2 \\ &= 1.0332 \text{ 大气压} \end{aligned}$$

常用的压力单位之间的换算关系如表1-1所示。

〔例〕在空分仪表中常用四溴乙烷作为液面压差计中的液体，其重度为 $\gamma = 2960 \text{ 公斤/米}^3$ 。今测得压差为180毫米四溴乙烷柱，若改灌水作为压差指示液，则对同样压差所指示的水柱高为多少。

〔解〕由式 (1-2) 可知，对同样的压力，如果液体的重度越大，则液柱高度越小。四溴乙烷柱高与水柱高的关系为

$$\gamma h = \gamma_{\text{水}} h_{\text{水}}$$

压力单位换算表

表 1-1

公斤/厘米 ² (大气压)	标准大气压	公斤/米 ²	毫米水柱	毫米水银柱
1	0.9878	1000	1000	735.6
1.0332	1	10332	10332	760
0.0001	0.0000968	1	1	0.0735
0.00136	0.00132	13.6	13.6	1

因此

$$h_{\text{水}} = \frac{\gamma}{\gamma_{\text{水}}} h = \frac{2960}{1000} \times 180 = 533 \text{ 毫米水柱}$$

测量压力的仪表叫压力表或压力计。它们指示的读数往往是被测量的绝对压力与大气压力的差值，不是真正的压力。例如，压力表指示下塔压力为 5.1 公斤/厘米²，下塔内实际压力还应加上大气的压力（接近 1 公斤/厘米²），为 6.1 公斤/厘米²。因此，绝对压力与表压力的关系为

$$P_{\text{绝对}} = P_{\text{大气}} + P_{\text{表}} \quad (1-3)$$

在透平空压机入口的压力要比大气压力低，压力计指示的读数表示低于大气压力的数值，叫“真空度”，用 $P_{\text{真空}}$ 表示，则空气的绝对压力为

$$P_{\text{绝对}} = P_{\text{大气}} - P_{\text{真空}} \quad (1-4)$$

〔例〕空压机在运转时测得其进口真空度为 $P_{\text{真空}} = 200$ 毫米水柱，当时的大气压力为 $P_{\text{大气}} = 735$ 毫米水银柱，问进口空气的绝对压力为多少？

〔解〕由式 (1-4)

$$\begin{aligned} P_{\text{绝对}} &= P_{\text{大气}} - P_{\text{真空}} = 735 - 200/13.6 \\ &= 735 - 15 = 720 \text{ 毫米水银柱} \end{aligned}$$

在计算时，通常需根据气体真正的压力来进行。因此均需将表压力换算成绝对压力。

三、流量

空分装置的产氧量、加工空气量等均以单位时间（每小时）流过的气体数量来表示，也叫流量，可用孔板流量计测定。

表示气体数量多少的单位分重量单位和体积单位两类，下面分别对实际采用的与空分计算中常用的一些单位作一说明。

1. 重量

最常用的重量单位是“克”和“公斤”，1 公斤 = 1000 克。此外，在空分计算中还常用“克分子”和“公斤分子”（也称“莫尔”）作为表示气体数量的量。

我们知道，任何物质都是由分子所组成，分子都具有一定的重量。不同的分子它们的重量也不同。通常用分子量来表示不同分子的相对重量。例如，氧的分子量为 32，氮的分子量为 28，氢的分子量为 2。而所谓“克分子”及“莫尔”是分别以克及公斤作为单位，在数值上与该物质的分子量相同。即一克分子氧是 32 克，一克分子氮是 28 克，一克分子氢是 2 克，等等。莫尔则为克分子的一千倍。

为什么要用克分子为单位呢？因为一克分子的不同物质，虽然它们的重量不等，但是它们的分子数目均相等，因此反映了物质的一种共性。实验表明，一克分子的任何气体，在相同的温度和压力下，它们所占的体积均相等。在 0℃ 和 1 标准大气压下，一莫尔的任

何气体所占的体积均等于 22.4米^3 。因此，如果用莫尔作为气体重量的单位，要换算成体积（标准米³），则只要乘以22.4即可，非常方便。

2. 体积

常用的体积单位是米³。对液体常用升， $1\text{米}^3=1000\text{升}$ 。对气体而言，同样数量的气体可以占有不同的体积；同样一个容器可以包含不同数量的气体。即气体所占的体积是随压力和温度变化的。因此，在给出气体的体积时，必须指明是在什么温度和压力下。通常规定 0°C 和760毫米水银柱作为标准状态，在这样的状态下所占的体积叫“标准米³”。空分装置给出的气量都是指标准米³。

3. 重度和比容

重量和体积只能说明某种物质总的数量，而不能表示某种物质的性质。例如，一公斤铁与一公斤木头是一样重的，而通常的概念是铁比木头重。这实际上是指对同样的体积来说，铁比木头重。因此，单位体积的重量表示了物质的性质，称它为重度，用 γ 表示。即

$$\gamma = \frac{\text{重量}}{\text{体积}} = \frac{G}{V} \quad (1-5)$$

它的单位为公斤/米³。

反之，单位重量气体所占的体积叫比容，用 v 表示。则

$$v = \frac{V}{G} = \frac{1}{\gamma} \text{米}^3/\text{公斤} \quad (1-6)$$

由此可见，重度与比容互为倒数关系，即成反比。重度越大，比容越小。

四、功与功率

在空分装置中，空气压缩机和氧气压缩机需由马达带动才能工作，即利用电能对气体做功来增加气体的压力。马达的大小用瓩数表示。生产每一立方米氧气的成本主要取决于压缩机消耗的电能。对大型制氧机，单位功耗一般为 $0.5\sim 0.6$ 瓩小时/米³氧气。

“瓩”与“瓩小时”表示什么意思呢？前者是功率的单位，后者是功的单位。我们知道，当我们用手提一物体时，要化力气，如果将它举起来，就要做功。物体越重，举得越高，作的功越多。因此，通常用力与作用力方向移动距离的乘积来表示功的大小。如果力用“公斤”为单位，距离用“米”为单位，则功的单位为“公斤·米”。功率是指单位时间内所作的功，如果在每秒钟内作的功越多，表示机器的做功本领越大。它的单位为公斤·米/秒。在工程上规定：每秒钟能作102公斤·米的功叫1瓩。即

$$1 \text{ 瓩} = 102 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{秒}$$

1瓩小时（即通常说的1度电）是指1瓩的功率工作1小时所作的功。因1小时=3600秒，所以

$$\begin{aligned} 1 \text{ 瓩小时} &= 102 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{秒} \times 3600 \text{ 秒} \\ &= 367,200 \text{ 公斤} \cdot \text{米} \end{aligned}$$

当气体在气缸内由于马达带动曲轴、连杆，推动活塞压缩气体对气体做功时，或气体膨胀推动活塞对外做功时（图1-2），气体作用在活塞上的压力为 P ，若活塞面积为 A ，则作用在活塞上的力为 $F=P \cdot A$ 公斤。当

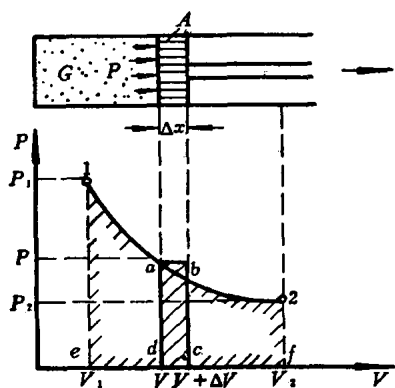


图 1-2 气体的膨胀功

活塞移动了距离 Δx 时, 气体推动活塞所作的膨胀功为

$$\Delta L = F \cdot \Delta x = P \cdot A \cdot \Delta x = P \cdot \Delta V \text{ 公斤} \cdot \text{米} \quad (1-7)$$

式中, $A\Delta x$ 等于气体膨胀增加的体积 ΔV 。

若气缸内气体为 G 公斤, 则每公斤气体所作的功为

$$\Delta l = \Delta L / G = P \cdot \Delta V / G = P \cdot \Delta v \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{公斤} \quad (1-8)$$

即气体作的膨胀功可按压力与比容变化的乘积来计算。

当气体压缩时, 所消耗的压缩功可用同样方法计算, 只是这时体积缩小, 比容减小。

实际上, 当气体在气缸内膨胀或压缩时, 气体的压力随体积的变化而在变化。如果以压力为纵坐标, 体积为横坐标, 压力随体积的变化可用图 (1-2) 中的曲线 1-2 表示。由图可见, $P\Delta V$ 为长方形面积 $a-b-c-d$ 。对整个膨胀过程所作的功, 应是许多个微小长方形面积之和, 即为曲线 1-2 下的那块面积 1-2-f-e-1 表示总的膨胀功, 它可用数学的积分方法来求得。在计算压缩机理论上所需消耗的功时, 需用到这方面的知识。

五、热量与冷量

要使空气液化, 首先要将空气从室温冷至 -172°C , 即空气要放出热量才能使温度降低。这是靠出精馏塔的低温产品氧、氮气体来冷却空气, 而氧、氮气体则吸收了空气放出的热量 (或回收了冷量) 而被复热到接近大气的温度。由此可见, 热量是物质之间进行能量传递的表现, 它与功具有同样的性质。

工程上用“大卡” (也叫千卡) 作为度量热量的单位。1 大卡的热量是指使 1 公斤水温度升高 (或降低) 1°C 所吸收 (或所放出) 的热量。1 克水温度升高 1°C 所需的热量叫卡。

对 1 公斤其它物质, 温度升高 1°C 所需的热量与水不相等, 例如, 1 公斤铁升高 1°C 需要的热量是 0.11 大卡; 而 1 公斤空气在一定压力下温度升高 1°C 约需要 0.24 大卡的热量。因此, 习惯上采用“比热”来说明物质的这一特性。

1 公斤物质温度升高 1°C 所需的热量叫该物质的重量比热, 用小写字母 c 表示, 它的单位为大卡/公斤·度。表 1-2 给出了一些物质的比热值。

重 量 比 热 表

表 1-2

物 质 名 称	C, 大卡/公斤·度	物 质 名 称	C, 大卡/公斤·度
铜	0.09	油	0.40
铁	0.11	水	1.0
铝	0.21	液 氧	0.4
玻 璃	0.15	空 气 (定压下)	0.24
混 凝 土	0.27	氧 气 (定压下)	0.218
冰	0.50	氮 气 (定压下)	0.25
矿 渣 棉	0.45	碳 酸 镁	0.24

根据温度变化和比热值, 可以计算某一过程所吸收或放出的热量。例如, 对 G 公斤物质, 比热为 c , 当温度由 t_1 升高到 t_2 时, 它所吸收的热量为

$$Q = G \cdot c (t_2 - t_1) \text{ 大卡} \quad (1-9)$$

应该指出, 气体的比热并非常数, 而与温度、压力及加热过程有关。例如, 空气在可逆式换热器中从 30°C 降到 -172°C , 由于温度变化很大, 比热已不能取 0.24 大卡/公斤·度。

度。后面将会讲到，可用查图的方法来计算热量。

通常把重量与比热的乘积 $G \cdot c$ 叫做“热容量”。由式 (1-9) 可见，如果热容量越大，温度改变 1 度所吸收或放出的热量越多。在选择蓄冷器的填料时，要求它的热容量尽可能大，以使缩小装置尺寸。

如上所述，热量与功具有同样的性质，加热能使物体温度升高，作功（例如摩擦）同样能使物体温度升高，它们只是度量的单位不同。因此，两个不同的单位之间应具有一定的换算关系。大量实验表明，1 大卡的热量与 427 公斤·米的功效果相当，即 1 公斤·米的功相当于 $1/427$ 大卡的热。如果要将功换算成热量的单位，只要乘以 $1/427$ 即可，这个单位换算关系叫“功的热当量”，用符号 A 表示，即

$$A = \frac{1}{427} \text{ 大卡/公斤} \cdot \text{米}$$

如果功用 瓩·小时 为单位，则每瓩小时相当的大卡数为

$$A = \frac{1}{427} \times 367200 = 860 \text{ 大卡/瓩小时}$$

在制氧中，经常还用到“冷量”这一概念，它与热量的概念有所区别。当冷热不同的两个物体接触时，热物体温度降低，冷物体温度升高，即热量从高温物体传给了低温物体。通常将低于周围空气温度的低温物体具有的吸收热量的能力叫冷量。空分装置内部处于很低的温度下工作，而周围的空气温度高，这就必然会有热量传入。如果不采取措施，将这部分热量带走，内部温度就会越来越高，无法维持装置的正常工作。这一措施主要是靠压缩空气在膨胀机中绝热膨胀对外作功（带动制动风机或发电机），从而消耗气体内部的能量，造成温度降低。因此，气体内部能量减少的数值就叫“制冷量”。气体的能量减少在数值上应等于气体通过膨胀机时对外所作的功。如果每公斤气体通过膨胀机对外作的功为 l_0 公斤·米/公斤，则

$$\text{制冷量} = A l_0 \text{ 大卡/公斤} \quad (1-10)$$

热量传递会自发地发生，而冷量的产生则要化一定的代价，预先要将空气压缩。这是二者之间的主要区别，因此在空分操作中，要尽量注意冷量的节约，尽可能减少一切冷损失。

六、内能与焓

能量是指作功的能力或本领，它有许多种形式，如动能、位能等。而物质内部具有的能量叫内能。当对气体加热或作功时，它会转变成气体的能量而储存于内部，反映出温度、压力等的变化。

实际上，任何物质都由大量的分子所组成，每个分子不停地在作不规则运动。它有一定的运动速度，即具有一定的动能。温度的高低就是反映了分子运动的动能 u_k 的大小。此外，分子之间相互有作用力，正如地球与其它物体之间具有引力一样。当增加分子之间的距离（例如体积膨胀）时，需要克服分子间的引力作功，这部分功转化成位能的形式储存于分子内部。分子相互作用的位能 u_w 与分子间的距离有关。因此，内能 u 是指分子运动的动能 u_k 与分子相互作用的位能 u_w 之和，即

$$u = u_k + u_w \quad (1-11)$$

它的单位也用大卡/公斤。

内能与温度、压力及比容之间具有一定的关系，分子运动动能只与温度有关，而位能

取决于分子间的距离，则与压力、比容有关。

当流体在流动时，后部流体不断推动前面的流体向前移动，即后面的流体对前面的流体作了推进功。这个功也要转换成流体所携带的一部分能量，叫“流动能”。因此，当流体在流动时，流体所携带的能量包括内能与流动能两部分之和。通常将二者之和称为焓，用符号 i （或 I ）表示。即

$$\text{焓} = \text{内能} + \text{流动能}$$

实际问题多数均为流动问题，空气在空分装置中的变化过程也如此，因此，在对空分装置作流程分析时，经常要用到焓的概念。

流动能在数值上应等于后面流体推动前面流体前进所作的推进功。如图1—3所示，在1—1断面处，压力为 P_1 ，断面积为 A_1 ，如果在压力 P_1 的作用下，将重量为 ΔG 公斤流体推进断面1—1，移动的距离为 Δx ，则后面流体所作的推动功为 $P_1 \cdot A_1 \cdot \Delta x$ 公斤·米。而 $A_1 \cdot \Delta x$ 为 ΔG 公斤流体所占的体积 ΔV ，它等于重量与比容的乘积 $\Delta G v_1$ 。所以，对 ΔG 公斤流体所作的推进功为

$$P_1 A_1 \Delta x = \Delta G P_1 v_1 \quad \text{公斤} \cdot \text{米}$$

对每公斤流体所作的推进功则为 $P_1 v_1$ 公斤米/公斤。由此可见，流动能在数值上等于压力与比容的乘积。则焓为

$$i = u + APv = u_{\text{静}} + u_{\text{动}} + APv \quad (1-12)$$

七、熵

在对空分装置工作过程进行理论分析时，特别是对膨胀机的工作过程进行分析时，经常要用到“熵”这个概念。熵是个什么东西？实际上，熵与温度、压力、比容、内能、焓等一样，是一个说明物质状态的量。只是不能像温度、压力那样可以直接用仪表测量，因此比较抽象。但是，引进熵这个量会对工程计算带来很大方便，因此有存在的实际意义。

我们知道，膨胀机是处在很低的温度下工作，为了防止从外部传入热量，将它放在保冷箱内。在理想情况下，外部一点不传进热量，即处于绝热的状态。空气经过膨胀机后温度降低了。如果根据式（1—9），气体温度降低应放出热量，这就与实际产生了矛盾。由此可见，仅仅根据温度的变化来判断是否吸热或放热不是很科学的标准。那末，应该根据什么能作出科学的判断呢？

如前所述，热量与功的性质相同，只是表现形式不同。由式（1—8）可以看到，膨胀功可用压力 P 和比容的变化 Δv 的乘积来表示。压力是推动做功的动力，比容 v 是否发生变化是判断是否做功的依据。对热量来说，温度 T 是推动传递热量的动力，而判断是否传热的依据还应当有一个与比容相当的量，将这个量称之为“熵”，用 S 表示。如果对每公斤物质传递的热量为 Δq 大卡/公斤，则与式（1—8）相似，可表示为

$$\Delta q = T \Delta S \quad \text{大卡/公斤} \quad (1-13)$$

或改写成下列形式

$$\Delta S = \frac{\Delta q}{T} \quad \text{大卡/公斤} \cdot \text{度} \quad (1-14)$$

即熵的变化等于在一定温度下传递的热量与该绝对温度之比。它的单位与比热相同。

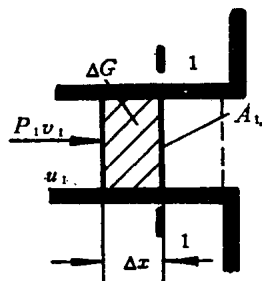


图 1—3 流动能分析

引进熵的概念后，对膨胀机的工作过程就容易解释。因为在绝热膨胀过程中熵没有变化，虽然温度降低，但 $T \angle S = 0$ ，所以与外界没有热量交换。与表示膨胀功的 $P-v$ 图相对应，取温度 T 为纵坐标，熵 S 为横坐标，画出温—熵（ $T-S$ ）图（图1—4）。膨胀机的

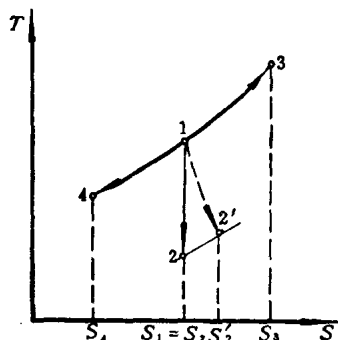


图 1—4 $T-S$ 图

理想绝热膨胀过程为一垂直线1—2，膨胀过程中温度降低，熵没有变化。对实际的膨胀过程，由于有摩擦等存在，气体吸收这部分摩擦热。因此，实际膨胀后的状态为2'，它的温度比2点要高些，而熵 $S_{2'}$ 也比 S_2 有所增加。

一般的加热过程，吸热后温度升高，在 $T-S$ 图中如曲线1—3所示，熵由 S_1 增加至 S_3 ；对一般的放热过程，放热后温度降低，如曲线1—4所示。熵由 S_1 减小至 S_4 。因此，根据熵是否变化，可以判断理想过程是吸热、放热还是绝热。而用 $T-S$ 图来表示绝热过程就非常方便，为一垂直线。

第二节 空气的性质

空气主要是由氧和氮组成，在气体状态，它们是均匀地混合在一起。空气中还含有氩、氖、氦、氪、氙等气体。这些气体化学性质稳定，在空气中含量甚少，在自然界中不易得到，所以称为稀有气体或惰性气体。这些气体分别有它的化学特性，但又均具有气体的共性，如能充满整个空间，可以被压缩等。对气体的这些性质及其规律应有所了解。

此外，空气中还含有少量的水份、二氧化碳、乙炔等气体。虽然数量不多，但危害不小。因为水分和二氧化碳在空气被液化前最先被冻结成固体微粒，它在制氧机内会堵塞阀门，管道和塔板的筛孔，磨损机器，影响传热，使制氧机无法长期正常运转。乙炔则是引起制氧机爆炸事故的主要因素之一。因此，在一定条件下，这些杂质成为主要矛盾，所以还必须了解它们的性质。

当空气温度降到液化温度，逐渐液化时，它的性质已由量变发展到质变，与在气体状态时有很大差别，在空分装置中要遇到这种质变，因此对此也必须有所了解。

一、气体的性质

在生产中经常可以看到这样一些现象：制氧机在夏天气温较高时，或在高原地区气压较低时，空压机的气量会减少，造成制氧机的出力降低；当往一定容积的贮氧罐内充氧时，罐内压力会升高；在试压时，虽然没有漏气，由于温度变化，也会引起压力的改变。这些现象说明，气体的压力 P 、温度 T 、体积 V 和重量 G 之间存在着一定的关系。通过大量实验，找到了这些量之间相互关系的规律，并且发现，对所有气体都遵守同样的关系。通常将这一关系称为“气体基本定律”。它的规律为：当气体数量及温度一定时，压力越高则体积越小，即压力与体积成反比；当体积及温度一定时，气体的数量越多则压力越高，即压力与重量成正比；当压力及气体数量一定时，温度越高则体积越大，即温度与体积成正比；当气体数量及所占体积一定时，温度越高则压力也越高，即温度与压力成正比。

如果将上述规律用公式表示，则称为“气体状态方程式”。即