

冶金动力职业技能培训系列教材

气体深冷分离 操作指南



河北钢铁股份有限公司邯郸分公司动力厂 编
李耀 张卫 主编

QITI SHENLENG FENLI CAOZUO ZHINAN



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

冶金动力职业技能培训系列教材

气体深冷分离操作指南

（CIP）目次表查书图

河北钢铁股份有限公司邯郸分公司动力厂 编

主编 李 耀 张 卫

参编 李 军 陈利斌 杨毅坤 帅勇民

王文峰 高国强 李献平 李 宏

李建坡 赵 玲 何安国 葛 兰



机械工业出版社

本书面向低温空气分离装置的操作者和管理者,按照低温空气分离装置的操作过程,介绍了气体深冷分离操作的基础知识、典型流程、设备操作维护内容及注意事项、故障分析及处理方法、典型案例等内容,涉及预处理系统、空气预冷系统、空气净化系统、制冷系统、换热系统、空气分馏系统、稀有气体提取装置、液体储存设备、常规化验及分析仪器。

图书在版编目(CIP)数据

气体深冷分离操作指南/李耀,张卫主编;河北钢铁股份有限公司邯郸分公司动力厂编. —北京:机械工业出版社,2010.12

冶金动力职业技能培训系列教材

ISBN 978-7-111-32583-3

I. ①气… II. ①李…②张…③河… III. ①气体分离—技术培训—教材 IV. ①TQ028.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第232513号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:吕德齐 责任编辑:吕德齐 郑 铨

版式设计:张世琴 责任校对:李秋荣

封面设计:陈 沛 责任印制:乔 宇

北京机工印刷厂印刷

2011年2月第1版第1次印刷

140mm×203mm·10.25印张·1插页·273千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-32583-3

定价:24.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

策划编辑:(010)88379733

社服务中心:(010)88361066 网络服务

销售一部:(010)68326294 门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者服务部:(010)68993821 封面无防伪标均为盗版

丛 书 序

河北钢铁集团邯郸分公司（原邯钢）始建于1958年，邯钢动力厂长期从事氧气、氮气、氩气、氢气和压缩空气的生产输送工作，以及高炉煤气余压发电，220kV、110kV、35kV输变电，继电保护试验，电机、变压器的修理试验等工作。长期的工作实践，使邯钢动力厂积累了雄厚的技术力量和丰富的实践经验。

近年来，伴随着邯钢的产业结构调整、生产规模扩大、装备更新换代，动力厂以实现企业的可持续发展为目标，一手抓装备的更新改造，一手抓员工素质的提高。2002年以来，动力厂始终把提高员工职业技能作为本单位最重要的工作之一，常抓不懈。本套培训教材就是动力厂70多位工程技术人员和老技师自己编写的，并在动力厂作为长期使用的操作岗位员工职业技能培训专用教材。

本套教材以操作岗位员工为对象，以提高员工的操作技能、安全生产能力和应急处理能力为重点。全套丛书共有10册，分别是《气体压缩机运行与维护》、《气体深冷分离操作指南》、《气体吸附制取操作指南》、《制氧站辅助系统运行与维护》、《气体生产系统安全》、《余压发电站运行与维护》、《变电站运行与维护》、《常用电气设备的维修》、《实用电气试验技术》、《电气运行维检安全》。

衷心希望本套培训教材能够给同行们提供一定的帮助和借鉴，共同为冶金动力事业做出贡献。

张卫

前言

随着国民经济的不断发展，低温法空气分离装置在冶金、化工、煤化工、航天等行业中已广泛地使用。近几年空气分离技术不断发展，逐步呈现大型化、现代化，自动化程度越来越高的趋势。为了提升驾驭大型化、现代化气体空分设备的能力，全面提升操作岗位人员的技术能力，更有效地开展职工技术学习和能力训练，我们组织编写了《气体深冷分离操作指南》。

本书是冶金动力职业技能培训系列教材中的一本，主要讲述低温法气体分离装置及其配套设备的操作和维护技术，适用于岗位技能培训。对专业理论知识以必需和够用为原则，重点突出实际操作技能，可操作性强，具有通俗性、针对性、实用性和广泛性的特点。希望本书能对低温空气分离装置的操作者和管理者有所帮助。通过学习操作案例和事故案例，避免生产过程中的操作失误；通过学习空气分离系统的操作和维护，提高岗位系统意识，协调好系统之间的关系，做好设备安装管理工作，做好设备操作及保养，保证正常生产秩序的进行。

本书是许多工程技术人员在统一提纲下分别编写的，主编：李耀、张卫，参编人员有李军、陈利斌、杨毅坤、帅勇民、王文峰、高国强、李献平、李宏、李建坡、赵玲、何安国、葛兰、全献华、李欢乐、王建让、韩文庆、陈和林，全书由李军统稿。

由于我们的技术视野和技术积累有限，编写经验不足，书中难免存在错、漏之处，欢迎读者朋友指正。

编者

目 录

丛书序

前言

第一章 空气分离基础知识 1

第一节 低温技术的基础知识 1

第二节 空气等低温工作介质的性质 10

第三节 获得低温的方法 14

第四节 空气分离的方法 20

第五节 空气分离的精馏原理及设备 23

第二章 预处理系统设备的操作与维护 40

第一节 概述 40

第二节 湿式过滤器的操作与维护 41

第三节 袋式空气过滤器的操作与维护 43

第四节 自洁式空气过滤器的操作与维护 45

第三章 空气预冷系统的操作与维护 49

第一节 空气预冷系统的工艺流程及基本原理 49

第二节 空气预冷系统设备的结构特点及功能 50

第三节 空气预冷系统的安装、使用和维护 56

第四节 冷水机的操作与维护 59

第五节 空气预冷系统在运行过程中出现的问题及解决方法 62

第四章 空气净化系统的操作与维护 64

第一节 概述 64

第二节 自清除原理 65

第三节 自清除系统的操作与维护 68

第四节 分子筛吸附系统的吸附机理和附属设备 71

第五节	分子筛系统的操作与维护	89
第六节	分子筛吸附系统操作中应注意的几个问题	95
第五章	制冷系统的操作与维护	99
第一节	风机制动膨胀机的操作与维护	101
第二节	发电机制动膨胀机的操作与维护	107
第三节	增压透平膨胀机的操作与维护	114
第四节	中压透平膨胀机的操作与维护	123
第六章	换热系统的操作与维护	128
第一节	空气分离用换热器分类	128
第二节	板式换热器的操作与维护	131
第七章	空气分馏系统的操作与维护	134
第一节	小型空气分馏装置的操作原理	134
第二节	中小型空气分馏装置的正常调节	141
第三节	空气分馏装置的加温、吹除和清洗	146
第四节	小型空气分馏设备典型操作	148
第五节	切换式全低压型空气分馏装置的操作原理	155
第六节	大型空气分馏装置操作	173
第七节	分馏塔的故障及处理	187
第八章	稀有气体提取装置的操作与维护	198
第一节	稀有气体的应用	198
第二节	空气精馏制氮的影响因素	200
第三节	氩制取的流程	204
第四节	工艺氩的制取	206
第五节	精氩的制取	208
第六节	氮、氦的提取	209
第七节	氦、氙的提取	211
第九章	液体储存设备操作与维护	215
第一节	全低压粉末平底液体储存设备的操作与维护	215
第二节	真空粉末液体储存的操作与维护	217
第三节	真空管道的操作与维护	223

第四节	汽化器的操作与维护	225
第五节	液化装置的操作与维护	228
第十章	常规化验及分析仪器的操作与维护	233
第一节	气体分析基础知识	233
第二节	制氧工艺中的化学检验	235
第三节	工业氧的纯度分析	237
第四节	工业氮的纯度分析	240
第五节	目视比色分析法测量气体中的微量氧	243
第六节	便携式微量氧分析仪的操作与维护	246
第七节	便携式露点仪的操作与维护	251
第八节	色谱分析方法原理	254
第九节	色谱分析方法在制氧工艺中的操作与维护	256
第十节	在线分析仪的基本原理	264
第十一章	空气分离装置的事故案例	271
第一节	典型事故案例	271
第二节	国内同类型设备的重大安全事故	278
附录	复习题及参考答案	283
附录 A	初级工复习题	283
附录 B	中级工复习题	290
附录 C	高级工复习题	293
附录 D	参考答案	296
参考文献		320

(一) 空气分离 (二)

空气分离基础知识

第一章 空气分离基础知识

空气分离基础知识

第一节 低温技术的基础知识

低温技术不仅与人们当代高质量生活息息相关,同时与世界上许多尖端科学研究(诸如超导电技术、航天与航空技术、高能物理、受控热核聚变、远红外探测、精密电磁计量、生物学和生命科学等)密不可分。在低温状态,空气、氧气等多种气体出现液化和固化及升华现象。在超低温条件下,物质的特性会出现奇妙的变化:空气变成了液体或固体,生物细胞或组织可以长期储存而不死亡;导体的电阻消失了——超导电现象;磁力线不能穿过超导体——完全抗磁现象;液体氮的黏滞性几乎为零——超流现象,而导热性能比高纯铜还好。下面就低温空气分离及其基础知识做一简单介绍。

一、温度

一般来讲,温度就是表示物质的冷热程度;用分子运动论表述,温度是物质分子热运动平均动能的度量,温度越高,分子热运动的平均动能就越大。

测量某物质的温度,常以温标做为衡量物质温度的标尺。“温标”规定了温度的起始点(即零点)和测量温度的基本单位。常用的温标有以下几种。

(一) 摄氏温标(单位:℃)

摄氏温标的物理基础是汞的体积随温度升高发生线性膨胀,分度的方法是规定在标准大气压下纯水的冰点是零摄氏度(0℃),沸点为 100 摄氏度(100℃),而把汞在这两点的液柱长度分为 100 等分,每一等分代表 1 摄氏度,用符号℃标记。

(五)

(二) 华氏温标 (单位: $^{\circ}\text{F}$)

华氏温标的物理基础与摄氏温标的相同。华氏温标规定在标准大气压下纯水的冰点为 32 华氏度, 沸点为 212 华氏度, 把这两点的汞柱长度划分为 180 等分, 每一等分代表华氏 1 度, 用符号 $^{\circ}\text{F}$ 标记。由于摄氏温标和华氏温标都是建立在汞的体积随温度发生线性变化的基础上, 而且分度是等分的, 但实际上任何物质的物理性质都不能完全与温度呈线性关系, 因此测量中会出现或大或小的误差。

(三) 热力学温标 (单位: K)

热力学温标又称绝对温标或开尔文温标。它依据热力学基础而建立, 在热力学中, 卡氏定理指出: 对于一个理想的卡诺机, 假如它工作在温度为 T_2 的热源和温度为 T_1 的冷源之间, 它从热源中吸收热量 Q_2 , 在冷源放出热量 Q_1 , 则温度之比等于热量之比。可见温度只与热量有关, 而与工质无关, 所以热力学温标克服了摄氏温标和华氏温标与工质有关的缺点, 是一种理想的温标, 已被规定为国际上使用的基本温标。热力学温标规定水在标准大气压下的三相点为 273.16 度, 沸点与三相点间分为 100 格, 每格为 1 度, 记作符号 K , 把 -273.16°C 定为零度。但是实际上热力学零度只能接近而无法达到。从热力学零度起算, 热力学温标的刻度与摄氏温标的刻度相同。

(四) 国际实用温标

国际实用温标是由国际度量衡大会通过并与热力学温标相吻合的温标, 其单位分别用 K 和 $^{\circ}\text{C}$ 表示。

国际实用温标还规定了标准温度计: $13.8 \sim 630.755^{\circ}\text{C}$ 用基准铂电阻温度计; $630.755 \sim 1064.43^{\circ}\text{C}$ 用基准铂铑-铂热电偶温度计; 1064.43°C 以上用基准光学高温计。定量测量温度的仪器有水银温度计、电阻温度计、热电偶温度计等。仪表所指示的温度通常为摄氏温标, 而工程计算中必须采用热力学温标。

(五) 各温标间的换算关系为:

$$t (^{\circ}\text{C}) = T - 273.16$$

$$t (^{\circ}\text{C}) = \frac{5}{9} (F - 32)$$

$$T (\text{K}) = t + 273.16$$

$$F (^{\circ}\text{F}) = \frac{5}{9} t + 32$$

二、压力

压力就是容器单位面积上的作用力（即压强）。用分子运动论表述，压力是气体分子撞击容器内壁的宏观表现。压力的方向总是垂直于容器壁。由于压力是单位面积上的作用力，因此它的单位由力和面积单位导出。常用的单位有以下几种：

（一）物理大气压（atm）

物理大气压是温度为 0°C 时，纬度 45° 海平面上大气的平均压力。物理大气压也可称为标准大气压。

（二）工程大气压

工程大气压是工程技术上常用的压力单位。工程大气压是指平方厘米面积上作用公斤力而产生的压力，单位可用 $\text{kg} \cdot \text{f}/\text{cm}^2$ 表示。

（三）水柱和汞柱

在压力测量中，往往直接读出水柱或汞柱高度，常用 mm 水柱（ mmH_2O ）或 mm 汞柱（ mmHg ）来表示压力的大小。

（四）磅力每平方英寸（ lbf/in^2 ）

lbf/in^2 是英、美等国家使用的单位，在每平方英寸（ in^2 ）的面积上作用的力（用英磅计）而产生的压力，记作 lbf/in^2 （外文书中常写作 lb/in^2 ）。

（五）我国法定计量单位

我国法定压强（压力）的单位是每平方米面积上作用的力（用牛顿计）而产生的压力，即 N/m^2 ，记作 Pa（帕斯卡）。在真空领域，巴（bar）可以与国际单位 Pa 并用， $10^5 \text{Pa} = 1 \text{bar}$ （巴）。单位的换算关系如表 1-1 所示：

表 1-1 常用压力单位换算表

单 位	帕斯卡 (牛顿/米 ²) (Pa) (N/m ²)	公斤力/米 ² (kgf/m ²)	公斤力/厘米 ² (kgf/cm ²)	巴 (bar)	标准大气压 (atm)	毫米水柱 (4℃) (mmH ₂ O)	毫米汞柱 (0℃) (mmHg)	磅力/英寸 ² (lbf/in ² , psi)
帕斯卡 (牛顿/米 ²) (Pa) (N/m ²)	1	0.101972	10.1972 × 10 ⁻⁶	1 × 10 ⁻⁵	0.986923 × 10 ⁻⁵	0.101972	7.50062 × 10 ⁻³	145.038 × 10 ⁻⁶
公斤力/米 ² (kgf/m ²)	9.80665	1	1 × 10 ⁻⁴	9.80665 × 10 ⁻⁵	9.67841 × 10 ⁻⁵	1 × 10 ⁻⁸	0.0735559	0.00142233
公斤力/厘米 ² (kgf/cm ²)	98.0665 × 10 ³	1 × 10 ⁴	1	0.980665	0.967841	10 × 10 ³	735.559	14.2233
巴 (bar)	1 × 10 ⁵	10197.2	1.01972	1	0.986923	10.1972 × 10 ³	750.061	14.5038
标准大气压 (atm)	1.01325 × 10 ⁵	10332.3	1.03323	1.01325	1	10.3323 × 10 ³	760	14.6959
毫米水柱 (4℃) (mmH ₂ O)	0.101972	1 × 10 ⁻⁸	1 × 10 ⁻⁴	9.80665 × 10 ⁻⁵	9.67841 × 10 ⁻⁵	1	73.5559 × 10 ⁻³	1.42233 × 10 ⁻³
毫米汞柱 (0℃) (mmHg)	133.322	13.5951	0.00135951	0.00133322	0.00131579	13.5951	1	0.0193368
磅力/英寸 ² (lbf/in ² , psi)	6.89476 × 10 ³	703.072	0.0703072	0.0689476	0.0680462	703.072	51.7151	1

测量压力的仪表所指示的值往往是被测压力的绝对值与大气压力之差。容器内气体对容器壁的实际压力称绝对压力。容器内气体的实际压力高于当时大气压力的值称为表压力。容器内气体的实际压力比大气压力低时，其差值称为真空度。绝对压力 $p_{\text{绝}}$ 、表压力 $p_{\text{表}}$ 、真空度 $p_{\text{真空度}}$ 、大气压力 $p_{\text{大气}}$ 之间的关系（见图 1-1），可以用以下公式来表述。

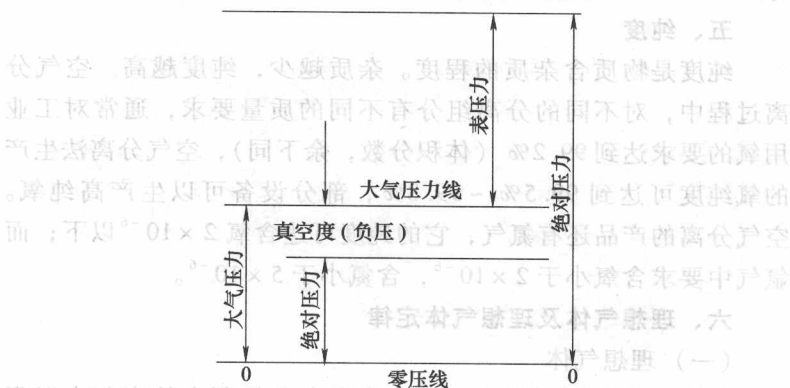


图 1-1 绝对压力、表压力、真空度、大气压力之间的关系

$$p_{\text{绝}} = p_{\text{表}} + p_{\text{大气}}$$

$$p_{\text{绝}} = p_{\text{大气}} - p_{\text{真空度}}$$

由于用压力表测出的只能是表压力和真空度，而实际计算时都用绝对压力，因为只有绝对压力才说明气体的真实状态。

三、质量体积、密度

单位质量气体所具有的容积称为质量体积，用符号 v 表示，单位为 m^3/kg 。如 $G\text{kg}$ 气体占 $V\text{m}^3$ 的容积，则该气体的质量体积 $v = V/G$ (m^3/kg)，反之，单位容积的气体质量，称之为气体的密度，以 ρ 表示，则 $\rho = G/V$ (kg/m^3)。可见质量体积和密度互为倒数，即 $v = 1/\rho$ 或 $\rho = 1/v$ 。

四、流量

流量是单位时间内通过的流体体积，用以测量管路中流体通过的速率，其测量仪表有转子流量计、节流式流量计、细缝

流量计、容积流量计、电磁流量计、超声波流量计和堰等。

现在常见的有：容积式流量计、差压式流量计（威力巴流量计等）、浮子流量计、涡轮流量计、电磁流量计（多用于水流量测量）、流体振荡流量计中的涡街流量计（空气分离使用，测量低温液体流量）、质量流量计和插入式流量计、探针式流量计等。

五、纯度

纯度是物质含杂质的程度。杂质越少，纯度越高。空气分离过程中，对不同的分离组分有不同的质量要求，通常对工业用氧的要求达到 99.2%（体积分数，余下同），空气分离法生产的氧纯度可达到 99.5% ~ 99.8%，部分设备可以生产高纯氧。空气分离的产品还有氮气，它的纯度可达含氧 2×10^{-6} 以下；而氩气中要求含氧小于 2×10^{-6} ，含氮小于 5×10^{-6} 。

六、理想气体及理想气体定律

（一）理想气体

气体的分子间距较大，气体分子在它们所占的容积内以很快的速度运动着，并且在每次碰撞之间都做直线运动。在压力不高与温度不太低的情况下，气体分子本身所占的体积与相互作用可以忽略不计，这种状态的气体称为理想气体。

对于理想气体，常常用几个气体定律来描述其性质，这几个气体定律统称为理想气体定律。

1) 在一定温度下，气体在各状态下的压力 p 与质量体积 v 成反比，即 $pv = \text{常数}$ 。

2) 在压力不变的条件下，气体在各状态下的质量体积与热力学温度成正比，即 $v/T = \text{常数}$ 。

3) 在体积恒定的条件下，气体温度越高，其压力也越大，也就是气体在各状态下的热力学温度与压力成正比，即： $p/T = \text{常数}$ 。

实验表明，不同气体遵守上述三个公式的范围是不同的。可以假设一种在任何情况下完全符合上述三个公式的气体存在，

这种气体称为理想气体。

根据分子运动论分析,所谓理想气体,就是指这样一种假想的气体,其分子不具有体积,可以完全看做是弹性质点,分子间无作用力。

实际上,自然界不存在理想气体,但是当气体的压力不太高(与大气压相比),温度不太低(与该气体的液化温度比)时,某些气体可近似看做是理想气体,为此氧气、氮气、空气等在压力不太高,温度不太低时可作为理想气体看待。

根据上述三个关系式,可得到理想气体在状态变化时压力、温度、质量体积之间的关系,即理想气体状态方程。

设图 1-2 中某种气体由状态 1 (p_1 、 v_1 、 T_1) 变化到状态 2 (p_2 、 v_2 、 T_2) 求二状态下各参数间的关系。

设先由状态 1 等压变化到状态 1' (p_1 、 v_1' 、 T_2), 则有:

$$v_1/T_1 = v_1'/T_2 \quad (1-1)$$

然后由 1' 状态等温变化到状态 2 (p_2 、 v_2 、 T_2), 则有

$$p_1 v_1' = p_2 v_2 \quad (1-2)$$

式 (1-1) 和式 (1-2) 的等号两边相乘, 消去 v_1' 得: $p_1 v_1/T_1 = p_2 v_2/T_2$ 或 $pv/T = \text{常数}$ 。

如用 R 表示这个常数, 则理想气体状态方程为

$$pv = RT$$

式中 p ——气体的绝对压力 (Pa);

v ——气体的质量体积 (m^3/kg);

T ——气体的热力学温度 (K);

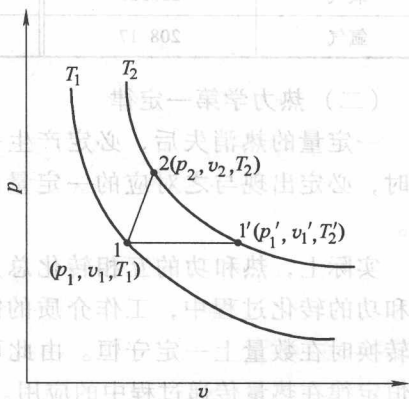


图 1-2 状态变化示意图

R ——气体常数 $[J/(kg \cdot ^\circ C)]$ 。

因为 $v = V/G$ ，则 $pV = GRT$ ，式中 G 为气体的质量， V 为体积。

对于一种气体，不论在何种状态下 R 值是不变的，但不同的气体，具有不同的 R 值。在国际单位制中， R 的单位为 $J/(kg \cdot K)$ 。制氧常用的几种气体常数 R 见表 1-2。

表 1-2 常用的几种气体常数

气体名称	$R/[J/(kg \cdot K)]$	气体名称	$R/[J/(kg \cdot K)]$
空气	287.16	氮气	412.11
氮气	296.86	氦气	2077.45
氧气	259.89	氖气	99.24
氩气	208.17	氙气	68.34

(二) 热力学第一定律

一定量的热消失后，必定产生一定量的功，消耗一定量的功时，必定出现与之对应的一定量的热，这就是热力学第一定律。

实际上，热和功的互相转化总是要通过某种工作介质。即热和功的转化过程中，工作介质的能量也是改变的，只是热和功转换时在数量上一定守恒。由此可见热力学第一定律是能量守恒定律在热量传递过程中的应用。

功是能量变化的一种度量，其数字表达式为：功 = 力 $\times$ 距离。压缩气体推动活塞做功 W ，等于气体对活塞的作用力 F 与活塞移动距离 Δr 的乘积。若作用在活塞上的压力为 p ，活塞的截面积为 S ，那么功可以表示为 $W = pS\Delta r = p\Delta V$ ，其中 ΔV 为气体膨胀的体积变化值。

热量是物体内部分子所具有的能量的一种度量，用字母 Q 或 q 表示。如果分子运动的动能增加，反映出温度升高，这一过程中分子吸收了热量。1kg 物质升高 1K 所需要的热量叫做该物质的质量热容。气体的质量热容并非常数，而与温度、压力有关。质量和质量热容的乘积称为热容。

(三) 热力学第二定律

热力学第一定律说明了能量传递及转化时的数量关系。当两个温度不同的物体接触，其间有热量传递时，第一定律说明了某一物体所失去的热量必定等于另一物体所得到的热量。

第二定律表述为：热不可能自发地、不付代价地从一个低温物体传给另一个高温物体。阐述了热量传递的方向，条件及深度。

(1) 焓 焓 H 是工作介质在某一状态下所具有的总能量，它是内能 U 和压力势能（流动能） pV 之和，是一个复合状态参数，其定义式为 $H = U + pV$ 。焓 H 的单位为 J 或 kJ。单位质量工作介质的焓称为比焓，用符号 h 表示，单位为 J/kg 或 kJ/kg，则比焓 $h = U + pV$ 。因为焓是由状态参数 U 、 p 、 V 组成的综合量，对工作介质的某一确定状态， U 、 p 、 V 均有确定的数值，因而 $U + pV$ 的数值也就完全确定。所以，焓是一个取决于工作介质状态的状态参数，它具有状态参数的一切特征。

(2) 熵 熵是物理学中的一个重要概念，由英文 entropy 翻译而得。熵是人们为解决自然过程的方向和限度问题，从研究热机效率开始提出的。它和内能一样是系统状态的单值函数，其改变量仅由系统的始态和终态决定。熵用“ S ”表示，熵变 $\Delta S = S_{\text{终}} - S_{\text{始}}$ 。熵是能量分散度的度量。从分子运动的角度看，分子是能量的载体，能量越分散，分子运动越混乱。因此熵是系统内部分子热运动混乱程度的度量，这就是熵的物理意义。空气分离系统用到近似绝热状态的等熵膨胀做分析的例子。

(3) 相变 相变是物质从一种相转变为另一种相的过程。物质系统中物理、化学性质完全相同，与其他部分具有明显分界面的均匀部分称为相。

相变是物质系统不同相之间的相互转变。固、液、气三相之间转变时，常伴有吸热或放热以及体积突变。单位质量物质在等温、等压条件下，从一相转变为另一相时，吸收或放出的