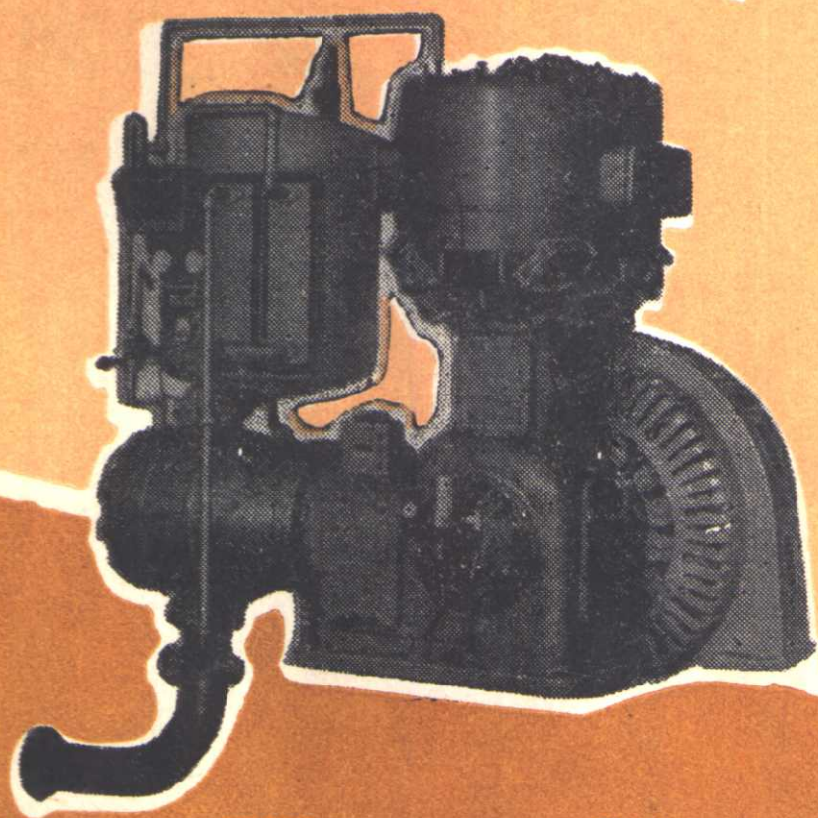


矿山压气 设备

胡亚非 陈更林 编著



Kuangshan Yaqi Shebei

中国矿业大学出版社

TD443
H-917

矿山压气设备

胡亚非 陈更林 编著

中国矿业大学出版社

798605

(苏)新登字第 010 号

内容提要

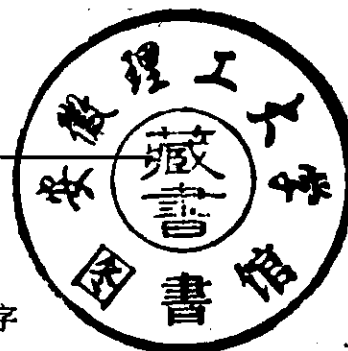
本书是为矿业机械和矿山机电专业编写的《矿山压气设备》课程的教材,全书共分六章,包括热力学基础、活塞式空压机的工作理论、活塞式空压机的主要系统与构造、空压机的运转、维护和检修、空压机运转的监测调控与性能测试、压缩空气站选型及管网计算。内容丰富、适合教学和有关技术工作者参考。

本书可作为高等院校矿业机械、矿山机电、设备管理工程专业本科与专科《矿山压气设备》的教材,也可作为业大、函校、同类专业教学使用。

责任编辑 孙树朴
技术设计 关湘雯

矿山压气设备
胡亚非 陈更林 编著

中国矿业大学出版社出版
新华书店经销 中国矿业大学印刷厂印刷
开本 787×1092 毫米 1/16 印张 10 字数 250 千字
1994 年 7 月第一版 1994 年 7 月第一次印刷
印数 1—3000 册



ISBN 7-81040-246-3

TD·10

定价:8.80 元

前 言

压缩空气一直是金属矿和煤矿所采用的动力,矿山压气设备是矿山四大固定设备之一,在矿山开采和生产过程中占有重要的地位。随着科学技术的发展,矿山压气设备日趋完善,监控管理的自动化程度日益提高,迫切需要能够详细介绍矿山压气设备和相应新技术的著作。本书编写参考了矿山机电专业《矿山压气设备教学大纲》,并考虑到从事矿山固定设备管理维护的工程技术人员需要。

本书共分六章,主要阐述矿用活塞式空压机的工作理论、构造、经济运行、故障分析、维护检修、电气控制与保护、性能测试及微机自动化管理,空压机站及管网设计。前三章是本书的基础内容,要求读者对空压机的理论和结构有一个比较系统的了解和一定程度的掌握。后三章从技术和管理角度着重介绍了空压机的经济运行、故障分析和维护检修的知识,介绍了空压机运转的监测调控与性能测试的新成果、新技术,以适应空压机的微机自动化管理的更高要求。

本书在编写过程中力求深入浅出,由点及面,循序渐进,努力反映当前矿山压气设备的最新技术水平。本书既可作为矿山机电专业,设备管理工程专业本科、专科(含电大、夜大、函大)的教材,也可供空压机设备管理维修人员日常工作和在岗培训参考。

本书在编写过程中得到王家澍同志的大力支持与协助,在此表示衷心感谢。

由于编者学识水平浅薄,实践经历不足,教学经验有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

1994年1月

ABF.29/04

目 录

绪论	(1)
第一章 热力学基础	(5)
第一节 气体的热力性质	(5)
第二节 热力学第一定律	(8)
第三节 热力学第二定律	(9)
第四节 理想气体的主要热力过程	(11)
思考题与习题	(18)
第二章 活塞式空压机的工作理论	(19)
第一节 活塞式空压机的分类	(19)
第二节 活塞式空压机的工作原理	(20)
第三节 活塞式空压机的理论工作循环	(21)
第四节 活塞式空压机的实际工作循环	(28)
第五节 活塞式空压机的吸气量及影响因素	(29)
第六节 活塞式空压机的性能参数	(32)
第七节 两级压缩	(35)
思考题与习题	(39)
第三章 活塞式空压机的主要系统与构造	(41)
第一节 传动系统及主要组成部件	(43)
第二节 压气系统及主要组成部件	(48)
第三节 润滑系统及主要组成部件	(55)
第四节 冷却系统和冷却器	(60)
第五节 调节系统和调节方法	(68)
思考题与习题	(76)
第四章 空压机的运转、维护和检修	(78)
第一节 空压机的经济运行	(78)
第二节 空压机运转中常见故障及其原因和解决方法	(81)
第三节 空压机重大运行事故的分析	(86)
第四节 空压机的维护和修理	(92)
第五章 空压机运转的监测调控与性能测试	(95)
第一节 空压机运转的监测	(95)
第二节 空压机设备的技术测定	(113)

第六章 压缩空气站选型及管网计算.....	(124)
第一节 压缩空气站.....	(124)
第二节 压气管网.....	(128)
第三节 压缩空气设备的选型计算.....	(134)
思考题与习题.....	(142)
附录图表.....	(143)
参考文献.....	(151)

绪 论

矿山压气设备(空压机)将原动机的机械能转换成空气的压力能,获得压缩气体;压缩气体是矿山工业中常用的动力之一。

一、压缩气体在矿山工业中的应用

压缩空气作为动力,特别适合矿山井下作业的特殊环境。即使是电气化程度很高的矿井,也都配有压气设备,为井下气动机具提供动力。近年来,煤矿推广锚喷工艺,进一步增加了对压缩空气的需求。

压缩空气在矿山工业中主要用于:

1. 采掘机械:风镐、风钻(凿岩机)、气动截煤机等;
2. 运输、装载、充填机械:抓岩机,装岩机,气力运输机,气力绞车、压气机车,气力充填机等;
3. 气动机械:往复式气动机,回转式气动机,齿轮气动机等;
4. 通用机械:压气潜水泵,气动局扇,喷射通风机,汽泡泵等;
5. 选矿厂用:鼓风机,气动闸门,气力喷嘴等;
6. 修配厂用:锻钎机等。

与电力相比,压缩空气具有如下优点:

1. 安全性好,减少了因电火花引起瓦斯爆炸事故的隐患,特别适用于高瓦斯或深部开采的矿井;
2. 缓冲性能好,减少钻凿坚硬岩石和煤层时的冲击振动;
3. 气动工具构造简单、易操作、重量轻、耐潮湿,适于井下作业;
4. 废气可降温和改善井下通风。

压缩空气作动力的主要缺点是系统效率低,通常为12~20%左右。输气管路系统容易漏气,大约有20~50%的压缩空气中途漏掉。因此,必须十分重视空压机站和管路系统的合理设计,合理运行并有严格的维护、检修等管理制度。

二、空压机的分类

压缩空气的机械,因用途不同,对气体的压缩程度也不同。按压缩气体的压力分为:

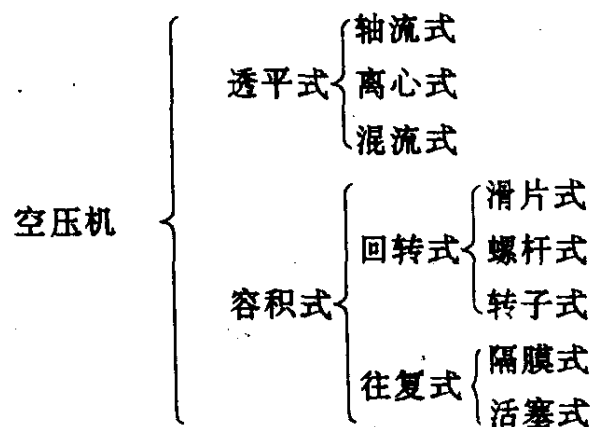
通风机—— $p < 15\text{kPa}$;

鼓风机—— $p = 15 \sim 300\text{kPa}$;

空压机—— $p > 0.3\text{MPa}$;

矿用空压机的工作压力一般在0.3~0.8MPa,本书主要内容是矿用空压机。

按工作原理空压机可分为容积式和透平式两类:



1. 容积式空压机

通过工作空间的变化对气体直接进行压缩,使其压力增高。这类空压机由盛装气体的气缸和压缩气体的活塞构成空压机的工作空间。按照运动方式,容积式空压机又可分为往复式和回转式两种结构型式。

(1) 往复式(活塞式)空压机 图 0-1 为其结构示意图,利用曲柄连杆机构将原动机的旋转运动转化为活塞在气缸中的往复运动,使气缸容积周期性改变,压缩缸内气体,并通过缸体上的进、排气阀吸气、排气。这种空压机在矿山工业中应用最广,将在后面章节中重点讲述。

(2) 回转式空压机 根据转子的结构和工作空间的变化特点,可分为转子式,滑片式和螺杆式等多种形式。

转子式空压机结构如图 0-2 所示,气缸为圆筒形,转子与气缸偏心安装,气缸上设有一可滑动的密封片。转子绕偏心轴旋转时,气缸、转子和密封片三者所形成的容积周期性地改变,实现对气体的压缩,

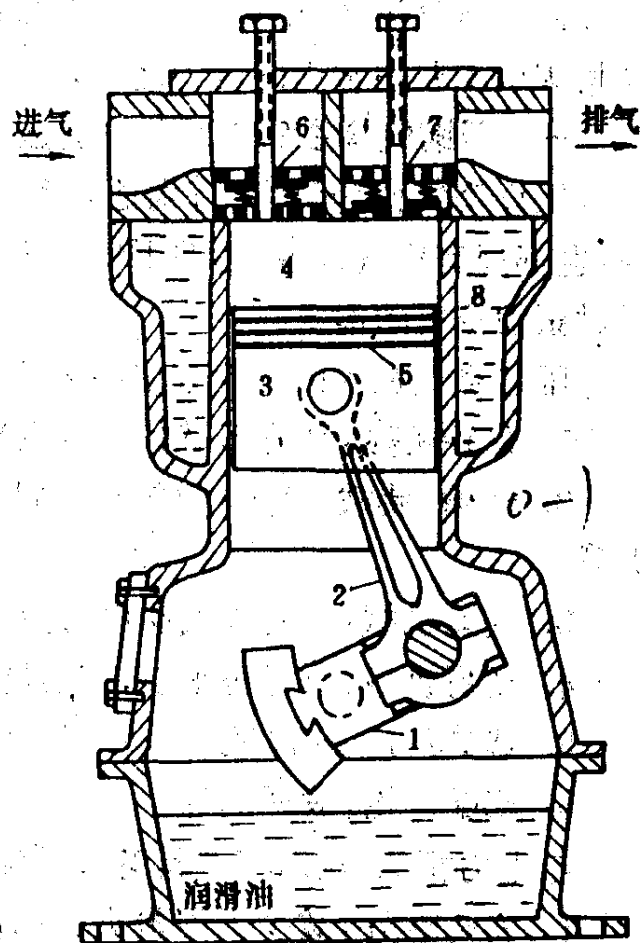


图 0-1 往复式空压机

1—曲轴, 2—连杆, 3—活塞, 4—气缸, 5—活塞环, 6—吸气阀, 7—排气阀

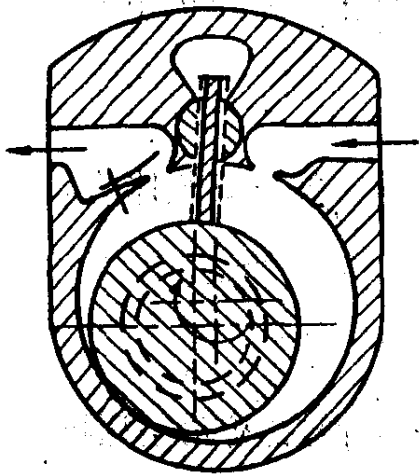


图 0-2 转子式空压机

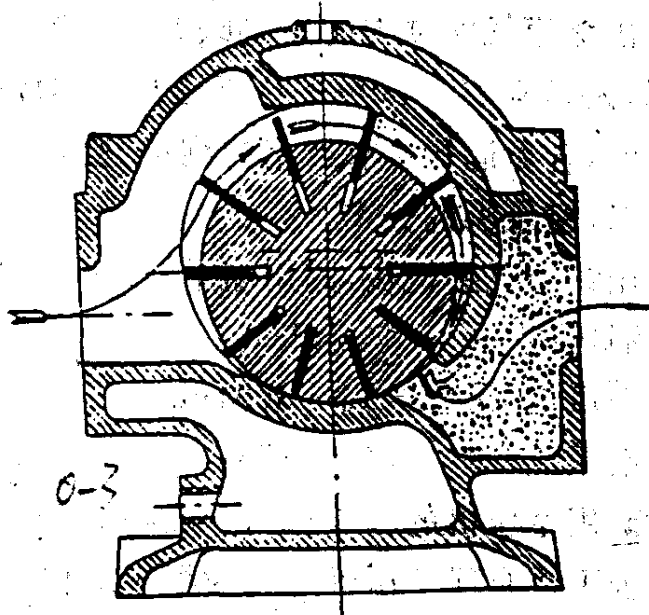


图 0-3 滑片式空压机

并通过气缸上的配气孔吸、排气体，转子旋转一周空压机经历一次吸气、压缩和排气过程。

滑片式空压机结构如图 0-3 所示，气缸仍为圆筒形，但偏心安装的圆柱形转子上装有若干径向滑片。转子转动时，滑片端部因受离心力作用紧贴气缸内壁，将气缸和转子间的月牙形空间分割成许多小室。转子每旋转一周，每个小室都经历一次由小到大，由大到小的变化，完成一次对气体的吸气、压缩和排气过程。与转子式空压机相比，滑片式空压机容积利用率较高。

螺杆式空压机结构如图 0-4 与图 0-5 所示，气缸截面为“8”字型，缸内平行地装有两个螺杆形转子，其一有 4 个凸齿，称为阳螺杆，另一个有 6 个凹齿，称为阴螺杆。其工作过程如图 0-6 所示，工作时两转子通过一对同步齿轮传动反向旋转，由于两转子的转动和啮合，凹凸齿面和气缸内壁所构成的封闭容积连续移动，空气不断从吸气侧推挤至排气侧，被压缩后由另一端排出。

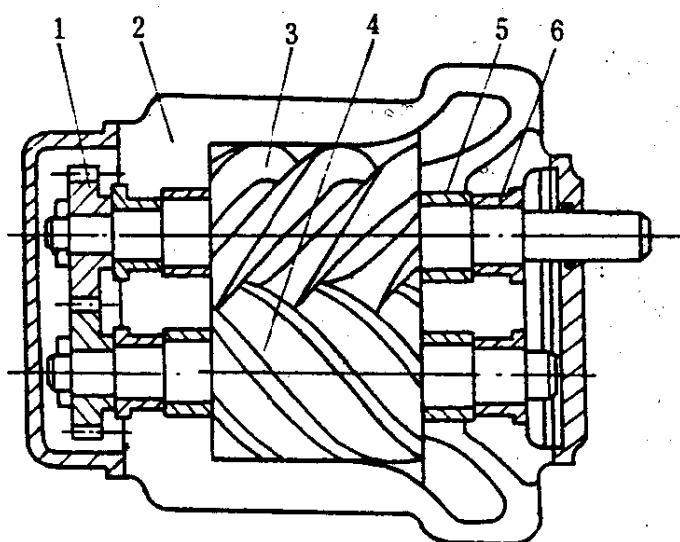


图 0-4 螺杆式空压机结构示意图

1—同步齿轮；2—气缸(外壳)；
3—阳转子；4—阴转子；5—轴密封；6—轴承

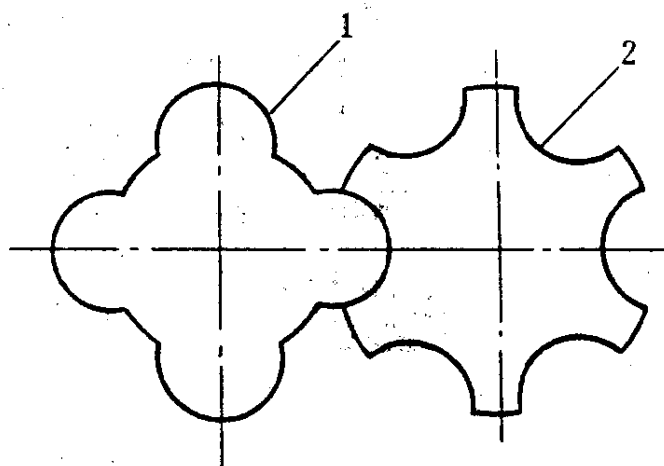


图 0-5 转子端面型线

1—阳转子；2—阴转子

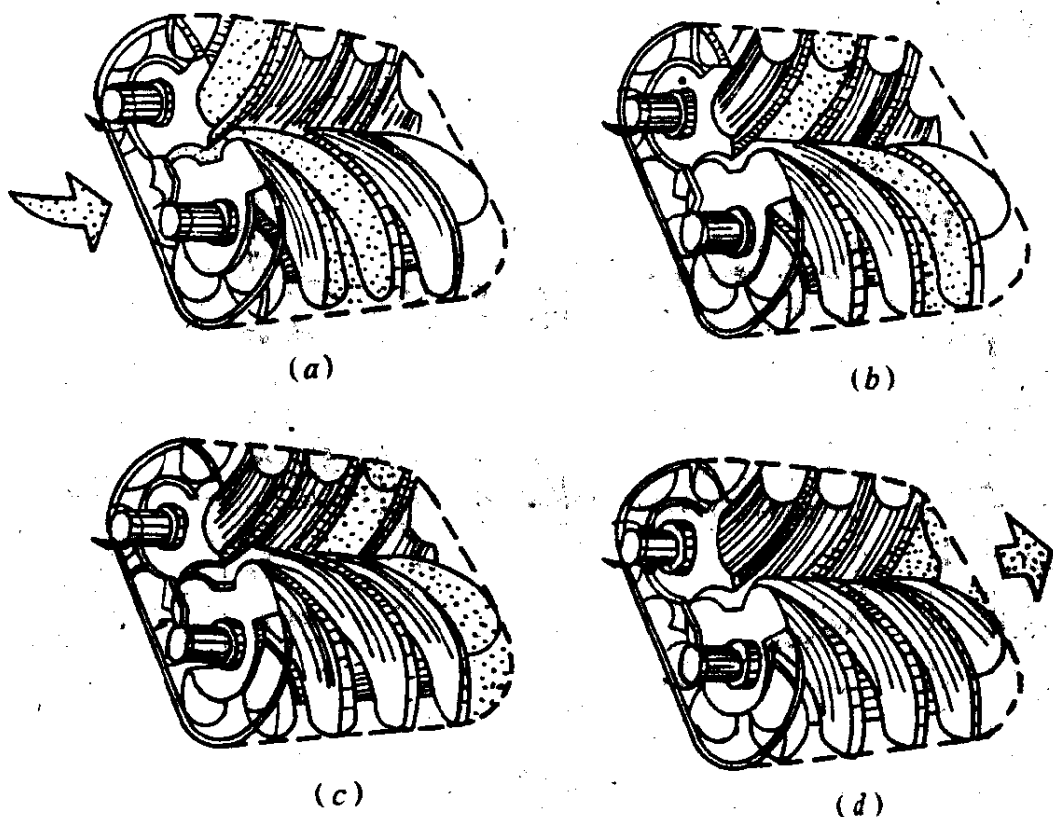


图 0-6 螺杆式空压机的工作过程

a—吸气終了；b—压缩开始；c—压缩終了；d—排气

2. 透平式空压机

由高速旋转的叶轮和外壳构成,首先使空气获得很高的速度,然后在扩压流道中将气体的动能转化为压力能。根据作用原理和气流流动方向,分为离心式和轴流式两种。

1) 离心式空压机 其工作原理与离心水泵相同,结构如图 0-7 所示。气体轴向进入叶轮,在高速旋转的叶片流道中加速,并受离心力作用高速飞出叶轮,然后在螺旋形蜗壳中转化为压力。

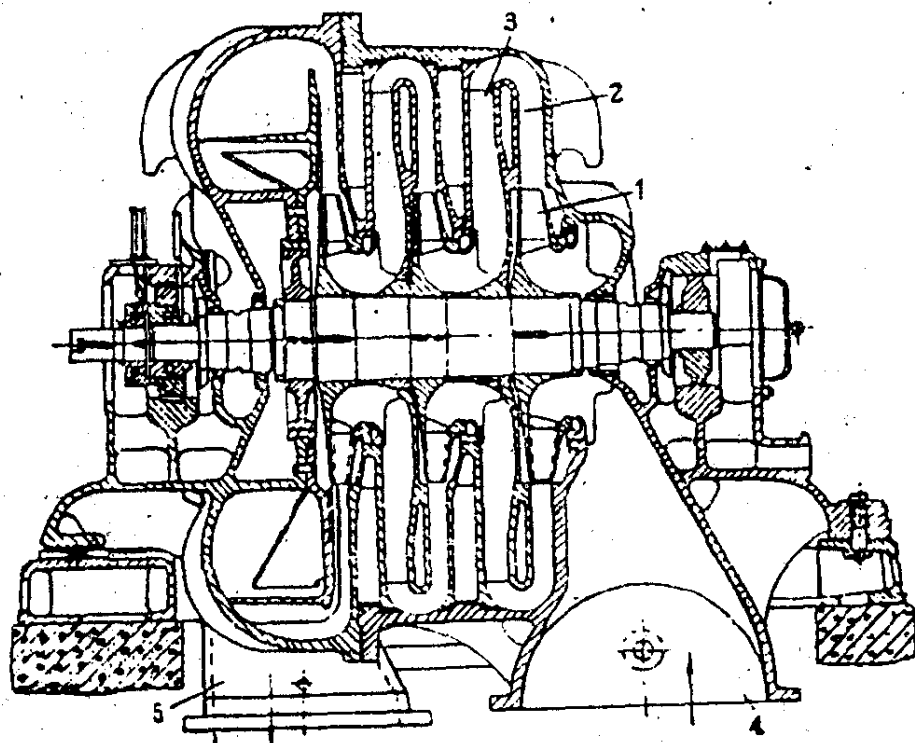


图 0-7 离心式空压机

1—叶轮;2—蜗壳;3—通道;4—进气口;5—排气口

2) 轴流式空压机 工作原理与轴流式通风机相同,其结构如图 0-8 所示。但其工作压力远远大于通风机,所以级数较多。气体轴向进入高速旋转的叶轮,然后被叶片挤到导叶中扩压或进入下一级继续压缩。

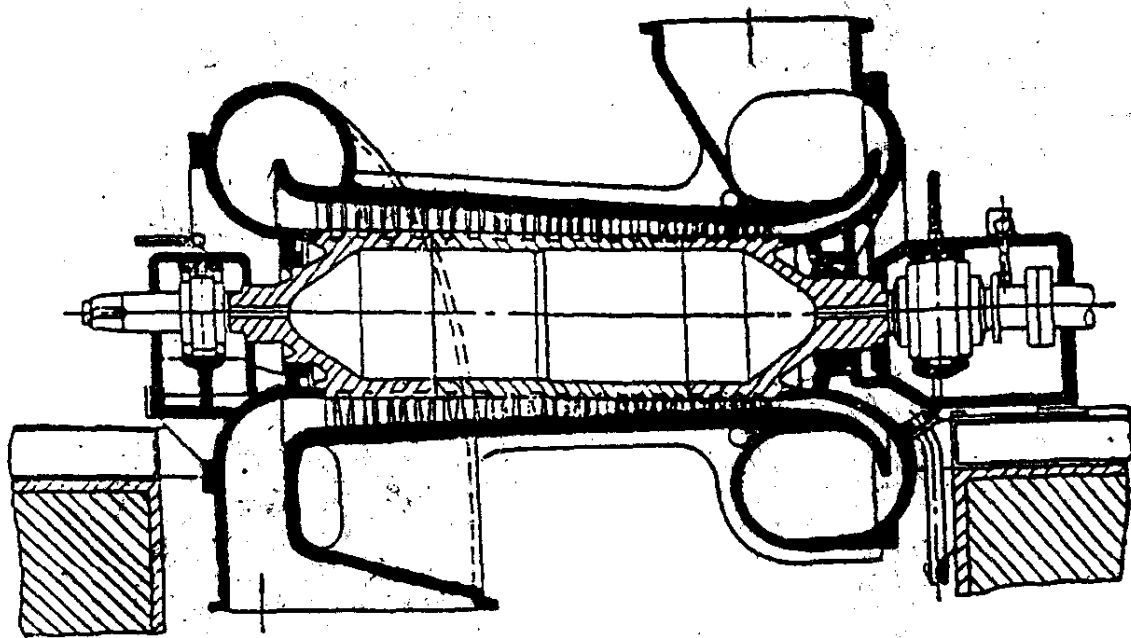


图 0-8 轴流式空压机

透平式空压机产生的压力较低,通常适用于流量大,压力低的场合。

第一章 热力学基础

空压机实质上是消耗机械功以产生压缩空气的设备。空气在空压机中被压缩不仅仅是压力升高,成为具有作功能力的动力气体,还伴随有气体内部温度的升高。要确定空压机工作过程的功能转换关系,必须对热力学基本理论有一个基本的了解。

第一节 气体的热力性质

一、状态参数

空压机转换能量,空气是传递能量的载能物质,热力学中称其为工质。空压机的压缩过程导致了工质宏观状态的连续变化,每个状态气体的物理性质都可以通过气体状态参数来描述。工程热力学中常用的状态参数有压力、温度、比容、内能、焓、熵等。其中前三个参数可直接测量,称为基本状态参数。其它状态参数可根据基本状态参数间接地计算得出。下面先介绍三个基本状态参数。

1. 压力 p

气体的压力是气体分子在单位面积容器壁上的垂直作用力。气体的压力是内部大量分子在紊乱的热运动中对容器壁频繁碰撞的总结果,是微观运动的宏观效应。当容器内气体没有宏观运动,即系统处于力学平衡时,忽略气体本身的重量,容器内任何位置的任何方向上气体压力都相同。因此,可以用测压装置测定气体的压力。我国法定的压力计量单位是帕[帕斯卡],符号为 Pa, $1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$ 。

2. 比容 v

比容是单位质量的物质所占有的容积

$$v = \frac{V}{m} \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (1-1)$$

式中 V ——容积, m^3 ;

m ——质量, kg ;

比容的倒数就是密度,可表示为 $\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \quad [\text{kg}/\text{m}^3]$

3. 温度 T

温度是表示物体冷热程度的物理量。

按分子运动学说,气体的温度乃是气体分子平均动能的量度。温度高时气体分子平均动能大,温度低时分子平均动能小。

从热力学的角度,温度的含义应包含两方面的内容:一是两个热平衡系统温度应相同;一是两系统温度若不同,则必以热的方式将能量从高温系统传递给低温系统。

温度的数值表示方法称为温标。常用的有热力学温标 $T[\text{k}]$ 和摄氏温标 $t[^\circ\text{C}]$ 。前者用于热力学计算,后者用于温度测量。其换算关系为

$$T[\text{k}] = t[^\circ\text{C}] + 273 \quad (1-2)$$

热力学温度与摄氏温度,每一度间隔相等,即温差相等,仅所取的零度基点不同。

二、状态方程

处于平衡状态的气体,其状态参数 p, v, T 有确定的值,而且,在整个系统中处处相同。因此,只要知道其中两个,系统的状态就被完全确定,另一个基本状态参数可以依据状态参数之间存在的关系求得。确定状态参数间相依关系的代数式称为气体的状态方程。

根据理想气体定律或气体分子运动论,其状态方程具有极简单的形式。质量为 1kg 的理想气体的状态方程为:

$$pv = RT \quad (1-3)$$

质量为 $m\text{kg}$ 的理想气体的状态方程为:

$$pV = mRT \quad (1-4)$$

式中 R ——气体常数。

对于同一种气体,气体常数 R 是一个不变的常数。因此,当理想气体从一个状态变化到另一状态时,每一状态的压力与比容的乘积与绝对温度之比值应相同,即

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2} = \dots = \frac{pv}{T} = R \quad (1-5)$$

在分析空压机压缩过程时,常用上式计算各状态点的参数。

理想气体是一种假想气体,即组成该气体的分子不占体积,分子间无作用力,分子为完全弹性。虽然理想气体实际并不存在,但在许多工程应用问题中,把实际气体当作理想气体来处理,既简化了计算,又具有足够的精度。

例 1-1 当空压机停止运转时,风包内压气的绝对压力 $p_1 = 0.7\text{MPa}$, 温度 $t_1 = 80^\circ\text{C}$, 到夜晚温度降为 $t_2 = 15^\circ\text{C}$, 绝对压力变为 $p_2 = 0.52\text{MPa}$, 风包容积为 3m^3 , 求由于风包和阀门漏气而损失的空气量?

[解]

由式 1-4 知,漏气前风包内空气质量

$$m_1 = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{0.7 \times 10^6 \times 3}{287 \times (273 + 80)} = 20.73 \text{ kg}$$

漏气后风包内空气质量

$$m_2 = \frac{p_2 V_2}{RT_2} = \frac{0.52 \times 10^6 \times 3}{287 \times (273 + 15)} = 18.87 \text{ kg}$$

漏失的空气质量

$$\Delta m = m_1 - m_2 = 20.73 - 18.87 = 1.86 \text{ kg}$$

三、膨胀功和压缩功

对于气体组成的简单可压缩系统而言,可以通过自身容积的变化以功的形式传递能量。当其反抗外力或在外力作用下进行膨胀或压缩时,与外界交换的功相应地称为膨胀功或压缩功,统称为容积功。

在图 1-1 中,假定气缸内有 $m\text{kg}$ 气体,其压力为 p , 则作用在活塞面积 A 上的总压力为

pA 。当作用在活塞右面的力 F 小于 pA 时, 气体开始膨胀对活塞作膨胀功。反之, 当 F 大于 pA 时, 气体被压缩, 活塞对气体作压缩功。当工质作微小膨胀功时, 活塞移动距离为 ds , 则功量 dI 可依下式计算

$$dI = pA \cdot ds = p dV$$

当气体从初态 1 膨胀到终态 2 时, 整个过程的膨胀功为

$$I = \int_1^2 p dV \quad [J] \quad (1-6)$$

欲求全过程的膨胀功, 需要知道该过程的曲线方程式, 即 $p=f(v)$ 。曲线 1-2 下的面积就是该过程的膨胀功。从图上还可以看出, 功的大小不仅与过程的始末状态有关, 而且还取决于过程的路线。例如图 1-1 中的两个过程 1-A-2 与 1-B-2, 虽然都是从相同的初态 1 膨胀到相同的终态 2, 但由于中间的过程路线不同, $I_{1-A-2} < I_{1-B-2}$ 。因此, 功量不是系统的状态函数, 而是一个与过程特性有关的过程量。对于 1kg 气体, 其功量为

$$I = \int_1^2 p dv \quad [J/kg]$$

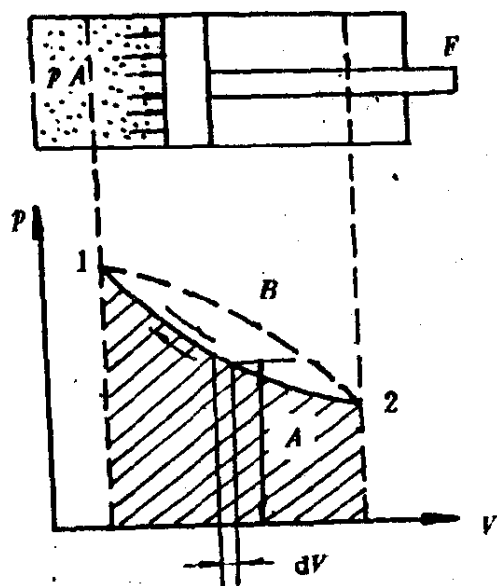


图 1-1 工质的膨胀功和压缩功

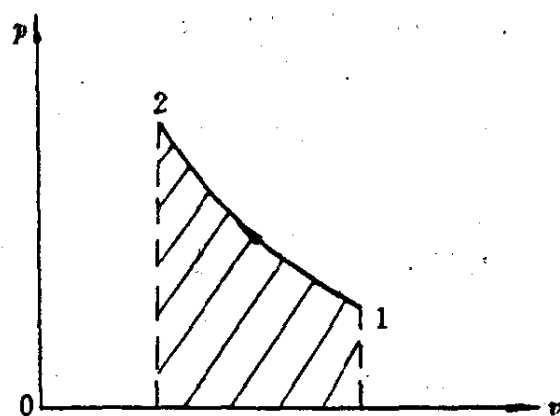


图 1-2 压缩过程与压缩功

例 1-2 初态为 $p_1=2 \times 10^5 \text{ Pa}$, $V_1=0.005 \text{ m}^3$ 的空气被压缩到 $V_2=0.002 \text{ m}^3$, 忽略损失, 过程中参数变化规律为 $pV^{1.2}=\text{常数}$ 。试计算并图示过程中的压缩功。

[解]

由 $pV^{1.2}=p_1V_1^{1.2}=\text{常数}$, 得

$$p = \frac{p_1 V_1^{1.2}}{V^{1.2}}$$

代入式(1-6)得:

$$\begin{aligned} I &= \int_1^2 \frac{p_1 V_1^{1.2}}{V^{1.2}} dV \\ &= p_1 V_1^{1.2} \int_1^2 \frac{dV}{V^{1.2}} = -\frac{p_1 V_1^{1.2}}{0.2} \left(\frac{1}{V_2^{0.2}} - \frac{1}{V_1^{0.2}} \right) \\ &= -\frac{3 \times 10^5 \times (0.005)^{1.2}}{0.2} \left(\frac{1}{0.002^{0.2}} - \frac{1}{0.005^{0.2}} \right) \\ &= -1508.4 \quad J \end{aligned}$$

功量值为负, 说明气体从外界获得能量, 活塞对气体作压缩功。图 1-2 中给出了过程线 1-2

及过程中的压缩功。

根据空压机的工作特点,通常定义压缩功为正,相应地气体对外界放出热量为正。这一点恰好与热力学中功量和热量的正负规定相反。

第二节 热力学第一定律

热力学第一定律是热力学的基本定律。在建立和发展热力学理论中它具有极为重要的意义。热力学第一定律阐明了热功转换中能量守恒的规律,故实质上就是能量守恒和转换定律应用于热现象的一个具体规律。

一、热力学第一定律

能量守恒及转换定律是自然界中最重要的普遍规律之一。它说明:自然界中物质所具有的能量既不能创造,也不能消灭,只能从一种能量形态转变为另一种能量形态。当转换发生时,两种能量变化的数量相等,总能量保持不变。

热力学第一定律就是能量守恒和转换定律在热力学中的一种表述。热和功作为能量的两种形式,彼此可以互相转换。为了要获得一定量的功,必须消耗一定量的热;反之,消耗一定量的功,必会产生一定量的热。这种转换可用数学形式表达为

$$Q = l \quad [\text{J}] \quad (1-7)$$

式中 Q ——热量, J;

l ——功, J。

二、内能与能量方程式

1. 内能

气体的内能就是气体内部大量分子运动的动能和分子间的相互作用力所形成的位能的总和。

根据能量按自由度均分原理和量子理论可知,系统内部分子运动动能(包括分子直线运动动能,回转运动能和原子振动能)只是温度的函数;分子间的相互作用力所形成的位能与分子间的距离有关,也即与气体的比容有关,是比容的函数。所以,内能是温度和比容的函数。温度和比容是状态参数,内能也是状态参数。单位质量物质所具有的内能叫比内能,用 u 表示,单位为焦耳/千克 $[\text{J}/\text{kg}]$ 。 m 千克物质所具有的总内能用 U 表示,单位为焦耳 $[\text{J}]$ 。有时也将比内能称为内能,仅从单位上加以区别。因此

$$u = \frac{U}{m}$$

$$U = u \cdot m \quad (1-8)$$

2. 能量方程式

为了应用热力学第一定律研究热能与机械能之间的相互转换规律,对图 1-3 所示闭口体系加热时气体能量的变化予以讨论。

图 1-3 所示,在一个具有可移动活塞的缸内有 $m\text{kg}$ 气体;如果把 $Q[\text{J}]$ 的热量加热到缸内气体中去,气体将从状态 1(p_1, V_1, T_1)变化到状态 2(p_2, V_2, T_2),从而对外做功 l 。因为内能从



图 1-3 闭口体系内能变化

U_1 增加到 U_2 , 所以在过程中内能的变化为 $\Delta U = U_2 - U_1$ 。输入系统的热量一部分使内能增加 ΔU , 另一部分 $(Q - \Delta U)$ 则全部变为功 l 。因此

$$Q - \Delta U = l \quad \text{或} \quad Q = \Delta U + l$$

对于 1kg 气体则有

$$q = \Delta u + l' \quad (1-9)$$

第三节 热力学第二定律

热力学第一定律揭示了热力系统在状态变化过程中能量传递与转换守恒原理, 但并没有指明过程进行的方向、条件等。如: 有两个物体 1、2, 温度分别为 T_1 和 T_2 , 且 $T_1 > T_2$, 当两物体接触时将有热传递。根据第一定律, 物体 1 失去的热量 Q_1 等于物体 2 得到的热量 Q_2 , 即

$$Q_2 = Q_1$$

若设想有另一过程, 使物体 2 失去热量 Q_2 , 物体 1 得到热量 Q_1 , 则由热力学第一定律可写出

$$Q_2 = Q_1$$

上述两式完全相同, 都不违反第一定律。根据常识, 后一过程使热自发地从低温物体传向高温物体, 是不可能的。但第一定律却不能说明这一问题。对于热能与机械能的转换, 第一定律表明数量相等, 但热能是否自发地转变为机械能, 以及能否全部转变为机械能, 第一定律也难以解答。

热过程的上述特性必须有一新的定律来说明, 这就是热力学第二定律。

一、热力学第二定律

热力学第二定律是根据无数经验总结出来的有关热现象的经验定律。实践表明: 一切实际的宏观热现象都具有方向性, 是不可逆的, 这就是热过程的基本特征, 也是热力学第二定律的表现。由于自然界中热现象种类繁多, 因而形成了关于热力学第二定律的多种说法, 但本质是一致的。

克劳修斯说法(1850 年): 不可能把热从低温物体传至高温物体而不起其它变化。

开尔文说法(1851 年): 不可能从单一热源取热使之完全变为有用功而不产生其它影响。

二、熵

一切实际的宏观的热力过程都具有不可逆的特征, 因此可以寻求一个统一的热力学参量来描述不可逆这一共同特性。该参量用作为在一定条件下一切不可逆过程进行方向的判据, 并且它只与系统的状态有关而与过程进行的方式无关。1865 年这一统一的热力学参量首先由克劳修斯确定, 并定义为熵。熵是气体的状态函数, 数学表达式为:

$$ds = \frac{dq}{T} \quad [\text{J/kg} \cdot \text{K}] \quad (1-10)$$

式中 ds ——热力过程中熵的变化量, $\text{J/kg} \cdot \text{K}$;

dq ——气体在可逆过程中的热量变化, J/kg ;

T ——热源温度, K ;

可逆过程中熵的计算

熵是一个状态参数,在任意可逆过程中,从状态 1 到状态 2 熵的变化为

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dq}{T}$$

对于理想气体的可逆过程,将热力学第一定律 $dq = C_v dT + p dv$ 代入熵的定义式得

$$\begin{aligned} \Delta s &= \int_1^2 C_v \frac{dT}{T} + R \int_1^2 \frac{dv}{v} \\ \Delta s &= C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \end{aligned} \quad (1-11)$$

代入理想气体的状态方程 $\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2}$, 上式可写为

$$\Delta s = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (1-12)$$

$$\Delta s = C_v \ln \frac{p_2}{p_1} + C_p \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (1-13)$$

以上是以气体状态参数 $T, v; T, p; p, v$ 分别表示的理想气体熵的计算式。在一般的热工计算中用到的只是气体熵的变化 Δs , 通常以标准状态的熵值为零, 即作为起算点。

2. 温熵图

根据熵的定义, 可逆过程热量的计算可采用状态函数熵, 表示为:

$$dq = T ds \quad \text{或} \quad q_{1-2} = \int_1^2 dq = \int_1^2 T ds \quad (1-14)$$

因此, 热力过程中系统与外界热交换的方向可以利用熵的增减来判断。

对于简单的可压缩热力系统, 在纵坐标为绝对温度 T , 横坐标为熵 s 的直角坐标系中, 以 T, s 为参数的过程曲线如图 1-4 所示, 系统与外界交换的热量为过程曲线下方的面积。当系统的状态沿熵增的方向 $1 \rightarrow 2$ 进行时, q 为正, 系统吸热; 当系统的状态沿熵减的方向 $1 \rightarrow 2'$ 进行时, q 为负, 系统放热。

利用温熵图可以方便地分析系统的状态变化过程及其与外界的热交换。因此温熵图又称为示热图。

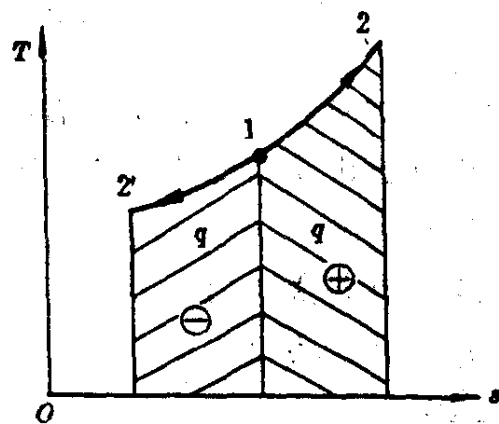


图 1-4 温熵图

3. 不可逆过程中熵的计算

研究表明, 在孤立系统中, 一切实际过程(不可逆过程)都是朝着使系统熵增加的方向进行。任何使系统熵减少的过程都不可能自发进行。图 1-4 中过程 $1 \rightarrow 2$ 是熵增过程, 可以自发进行不需要补充条件。反之, 过程 $2 \rightarrow 1$ (或 $1 \rightarrow 2'$) 是熵减过程, 不可能自发进行, 必须以某种使熵增加的补偿过程相伴为条件进行。例如, 在热功转换循环中向冷源的排热过程, 在制冷循环中消耗外功而将功转化为热的过程, 都是熵减过程的熵增补偿过程。

在工程实际中常常需要分析某些不可逆过程, 并计算过程中熵的变化量。而熵的定义 $ds = \frac{dq}{T}$ 中 dq 限定为可逆过程中热量的变化。因此, 不可逆过程中熵的变化量不可能利用原

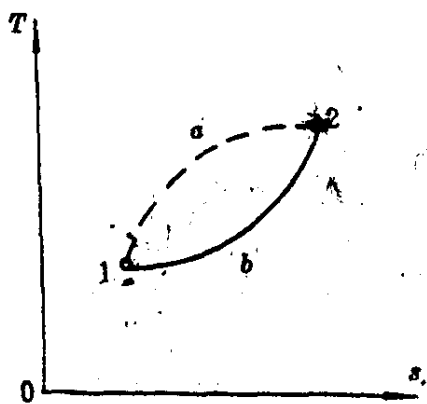


图 1-5 熵的计算与过程选择

过程求积分 $\int \frac{dq}{T}$ 得到。但是,熵是一个状态量,在任意过程中熵的变化量只与初、终状态有关,而与过程如何进行无关。例如,在图 1-5 中,如果从平衡态 1 过渡到平衡态 2,则不论以可逆过程 1b2 或不可逆过程 1a2 的方式进行,其熵变化量都是相等的,即

$$\int_{1a2} ds = \int_{1b2} ds = s_2 - s_1$$

可逆过程的熵变化量可以由熵的定义积分求得

$$\int_{1a2} ds = \int_{1b2} ds = \int_{1b2} \frac{dq}{T}$$

值得注意的是 $\int_{1a2} ds \neq \int_{1a2} \frac{dq}{T}$ 。

因此,要计算从某一初平衡态达到某一终平衡态的任意不可逆过程熵的变化,只需在初态与终态间选择任意的可逆过程,并利用可逆过程的 $\int \frac{dq}{T}$ 积分来计算。

第四节 理想气体的主要热力过程

热力工程中实施热力过程(热力系统状态连续变化的过程)的目的不外乎两方面,一是实现预期的能量转换;一是达到预期的状态变化。对热力过程的计算、分析常包括两个方面内容,即确定过程中气体状态变化的规律及过程中能量转换的情况。根据热工设备实际过程进行的情况,常可简化为某些带有简单特征的典型热力过程,如定压、定容、定温、绝热四个基本热力过程及多变过程。本节主要讨论理想气体主要热力过程(均视为可逆过程)的特性。

一、定容过程

定容过程是气体容积保持不变的状态变化过程。例如,汽油机循环中的点燃阶段近似于定容过程。因为气缸内的汽油和空气的混合物被点燃后,迅速燃烧,燃气压力很快上升,活塞来不及移动,缸内容积变化甚微可以忽略。过程方程式为

$$v = \text{const}$$

1. 状态参数

由过程方程可得 $v_1 = v_2$, 代入状态方程 $\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2}$, 可得

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad \text{或} \quad \frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (1-15)$$

这说明定容过程中气体的压力和热力学温度成正比。气体被加热时,如图 1-6 中过程 1→2, 温度升高, 压力增大; 气体被冷却时, 如图 1-6 中过程 1→2', 温度降低, 压力也降低。

2. 功量

因为在定容过程中 $v = \text{const}$, $dv = 0$, 可得

$$l' = \int_1^2 p dv = 0$$

可见定容过程气体对外不作功, 外界也不对气体做功。

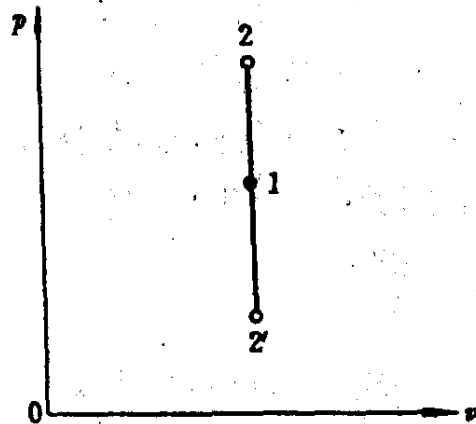


图 1-6 定容过程的压容图