



黄钟岳 主编

化工透平式 压缩机

上海理工大学出版社

责任编辑：李 鸽

封面设计：葛 明

化 工 透 平 式 压 缩 机

黄 钟 岳 主 编

大 连 理 工 大 学 出 版 社

内 容 简 介

本书撰写了透平式压缩机的气体热力学和气动力学基础,较系统地论述了离心式压缩机和轴流式压缩机的基本结构、工作原理、性能曲线和调节方法、非稳定运行工况和防喘控制原理以及运行和维修有关知识,书中还用专门章节集中介绍了引进大型化肥厂和乙烯装置的典型压缩机结构和特点。

本书可供从事透平式压缩机的设计、操作和维修的工程技术人员阅读,也可作为高等院校有关专业的教材或教学参考书。

化 工 透 平 式 压 缩 机 Huagong Toupingshi Yasuoji

黄 钟 岳 主 编

大连理工大学出版社出版发行 (大连市凌水河)

大连理工大学印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: $19\frac{3}{8}$ 字数: 474 千字

1989年12月第1版 1989年12月第1次印刷

印数: 0001—2000册

责任编辑: 李 鸽

封面设计: 葛 明

责任校对: 唐连政

ISBN 7-5611 0254-2/TK·4

定价: 7.00元

前 言

七十年代以来,我国化肥、化纤及其他化工和石油化工工业得到大力发展,兴建了许多大型化肥厂、大型乙烯厂及其他化工厂,并计划在今后还要建设一批类似的工厂。在这些工厂中透平式压缩机得到了广泛的应用,迫切要求从事这方面工作的工程技术人员能较好地掌握透平式压缩机的设计和运行等知识与技能。为适应上述需要,我校过去在培训工程技术人员的基础上,结合工厂实际,先后编写过离心式压缩机、透平式压缩机的讲义和书。这次在此基础上编写的本书内容更丰富、更系统,兼顾了高等院校相应专业教学的需要。书中除阐述透平式压缩机的基本结构和理论外,还具体介绍了大型化肥厂和乙烯厂的透平式压缩机。编写时力求结合工程实际,将原理与结构,设计原理与运行维护知识结合起来,尽量做到通俗易懂,便于自学。

本书由黄钟岳主编并编写除第六章以外的全部内容,第六章由王晓放编写。

本书的出版得到了石化总公司、化工部及其所属有关公司和工厂特别是辽河化肥厂的大力支持和帮助,辽河化肥厂宋有庆副厂长还亲自组织该厂机动处对本书的内容进行了讨论,提出了宝贵意见,在此深表感谢。

对书中错误和不当之处,望读者给予指正。

编 者

1989年9月

主 要 符 号 说 明

G —气体质量流量;	Q —容积流量; 热量;
N —功率;	ε —压力比;
n —转速;	p —气体压强;
T —气体绝对温度;	ρ —气体密度;
V —体积;	K_v —比容比;
v —气体比容;	R —气体常数; 半径;
i —气体的焓, 叶片进口冲角;	S —气体的焓; 间隙值;
c —气流绝对速度;	w —气流相对速度;
u —叶轮圆周速度;	ω —旋转角速度;
a —音速;	M —马赫数; 力矩;
R_e —雷诺数;	K —绝热指数;
C_p —定压比热;	C_v —定容比热;
m —多变指数; 气体质量;	h —理论能量头; h_s —等熵能量头;
h_p —多变能量头;	h_r —流动损失能量头;
h_{tot} —总能量头;	h_f —轮阻损失能量头;
h_l —漏气损失能量头;	η_p —多变效率;
λ —损失系数;	η_m —机械效率;
η_{ts} —等温效率;	μ —粘性系数; 滑移系数; 分子量;
η_s —绝热效率;	β —气流相对速度方向角;
α —气流绝对速度方向角;	β_A —叶轮叶片几何角;
α_A —扩压器、回流器、叶片几何角;	φ_{2u} —叶轮周向分速系数;
φ_r —流量系数;	Ω —反动度;
$\overline{h}$ —理论能量头系数;	r —半径;
D —直径;	l —叶片高度;
b —叶轮叶片宽度; 叶片弦长;	z —叶片数目; 密封齿数目; 级数;
F —流通面积;	τ —叶片阻塞系数; 剪应力。
透平式压缩机特征截面:	离心式级特征截面:
a — a —压缩机(或级)进口截面;	0—0 叶轮进口截面;
d — d —压缩机(或级)出口截面;	1—1 一叶片进口截面;
轴流式压缩机级特征截面: ;	2—2 一叶轮出口截面;
1—1—动叶进口截面;	3—3 一扩压器进口截面;
2—2—动叶出口即静叶出口截面;	4—4 一扩压器出口截面;
3—3—静叶出口截面。	5—5 一回流器进口截面;
	6—6 一回流器出口截面。

目 录

绪论.....	(1)
§ 0-1 透平式压缩机的分类	(1)
§ 0-2 透平式压缩机的结构组成与工作原理.....	(2)
§ 0-3 透平式压缩机的发展概况	(6)
第一章 气体热力学和气动力学基础.....	(8)
§ 1-1 气体状态方程式	(8)
§ 1-2 热力学第一定律和第二定律	(11)
§ 1-3 混合气体, 含湿量对流量的影响	(16)
§ 1-4 一元定常流动的基本方程	(22)
§ 1-5 气体的压缩过程	(30)
§ 1-6 气体流动中的一些基本概念	(45)
第二章 离心式压缩机基本理论	(52)
§ 2-1 进气室	(52)
§ 2-2 叶轮	(54)
§ 2-3 扩压器	(73)
§ 2-4 弯道、回流器和排气室	(78)
§ 2-5 压缩机的效率与功率	(84)
§ 2-6 压缩机的中间冷却和分段	(87)
§ 2-7 离心式压缩机的热力计算	(91)
第三章 离心式压缩机基本结构.....	(106)
§ 3-1 气缸和隔板	(106)
§ 3-2 离心式压缩机转子	(109)
§ 3-3 离心式压缩机叶轮	(113)
§ 3-4 离心式压缩转子气体轴向推力及其平衡方法	(120)
§ 3-5 压缩机密封.....	(126)
§ 3-6 轴承	(137)
§ 3-7 转子动力学问题	(147)
第四章 轴流式压缩机基本理论.....	(156)
§ 4-1 轴流式压缩机基元级的反动度	(156)
§ 4-2 轴流式压缩机平面叶栅的升力和阻力, 升力系数和阻力系数	(159)
§ 4-3 叶栅效率、基元级效率和叶栅效率的关系	(161)
§ 4-4 平面叶栅试验数据	(164)
§ 4-5 轴流式压缩机叶片的扭曲方法	(172)

§ 4-6	轴流式压缩机级的损失和效率	(181)
§ 4-7	多级轴流式压缩机	(186)
§ 4-8	轴流式压缩机基本结构	(195)
第五章	透平式压缩机变动工况	(201)
§ 5-1	透平式压缩机流量特性	(201)
§ 5-2	透平式压缩机的相似条件	(210)
§ 5-3	透平式压缩机性能换算	(219)
§ 5-4	透平式压缩机的模化设计	(221)
§ 5-5	透平式压缩机调节方法	(221)
§ 5-6	透平式压缩机的非稳定工况	(226)
§ 5-7	防喘自动控制基本原理	(235)
第六章	化工透平式压缩机	(241)
§ 6-1	大型化肥厂的透平式压缩机	(241)
§ 6-2	乙烯装置压缩机	(270)
第七章	压缩机的安装、运行与维护	(281)
§ 7-1	压缩机的安装	(281)
§ 7-2	油路清洗	(289)
§ 7-3	压缩机运行要点	(291)
§ 7-4	压缩机的维护	(295)
附表	美荷型装置的离心式压缩机性能表	(298)
附录	国际单位和常用工程单位的换算	(302)
参考文献		(304)

绪 论

§ 0 — 1 透平式压缩机的分类

在国民经济许多部门中，特别是在采矿、石油、化工、动力和冶金等部门中广泛地使用压缩机来输送气体和提高气体的压强。压缩机种类繁多，尽管用途可能一样，但其结构型式和工作原理却可能有很大的不同。我们知道，气体的压强取决于单位时间内气体分子撞击单位面积的次数与强烈程度，如果增加容积内气体的温度，使气体分子运动的速度增加，可以使气体压强提高，但当温度降下来，气体压强又随之降低，而一般要求被压缩的气体应具有不高的温度，故此法不可取。因此，提高气体压强的主要方法就是增加单位容积内气体分子数目，也就是缩短分子间距离。减少气体所占据的封闭空间的容积，提高气体的压强，这就是容积式压缩机（活塞式、滑片式、罗茨式、螺杆式等等）的基本工作原理；利用惯性的方法，通过气流的不断加速、减速，因惯性而彼此被挤压，缩短分子间的距离，来提高气体的压强，透平式压缩机的工作原理属于这一类。

（透平式压缩机是一种叶片式旋转机械，它利用叶片和气体的相互作用，提高气体的压强和动能，并利用相继的通流元件使气流减速，将动能转变为压强的提高）。一般透平式压缩机可以进行如下分类：

1. 按气体运动方向分为：

- 1) 离心式。气体在压缩机内大致径向流动；
- 2) 轴流式。气体在压缩机内大致沿平行于轴线方向流动；
- 3) 轴流离心组合式。有时在轴流式的高压段配以离心式段，形成轴流、离心组合式压缩机。

2. 按排气压强 p_d 分为：

- 1) 通风机。 $p_d = 1.42 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ (表压)；
- 2) 鼓风机。 $p_d = 1.42 \times 10^4 \text{ N/m}^2 \sim 2.45 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ (表压)；
- 3) 压缩机。 $p_d > 2.45 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ (表压)。

3. 按用途和被处理的介质命名，如制冷压缩机、高炉鼓风机、空气压缩机、天然气压压缩机、合成气压缩机等等。

离心式和轴流式压缩机相比各有优缺点。轴流式压缩机效率高，设计工况下绝热效率可比离心式高出 5% ~ 10%，流量大等优点，但排气压强不高，稳定工作范围窄，对工质中的杂质敏感，叶片易受磨损；离心式压缩机可达到很高的排气压强，允许较小的流量。

§ 0 - 2 透平式压缩机结构组成与工作原理

一、离心式压缩机

从外观上看一台压缩机，首先看到的是机壳，它又称气缸（图 0—1 中的件 2），通常是用铸铁或铸钢浇铸而成。一台高压离心式压缩机通常有两个或两个以上气缸，按其气体压强高低分别称为低压缸、中压缸和高压缸。

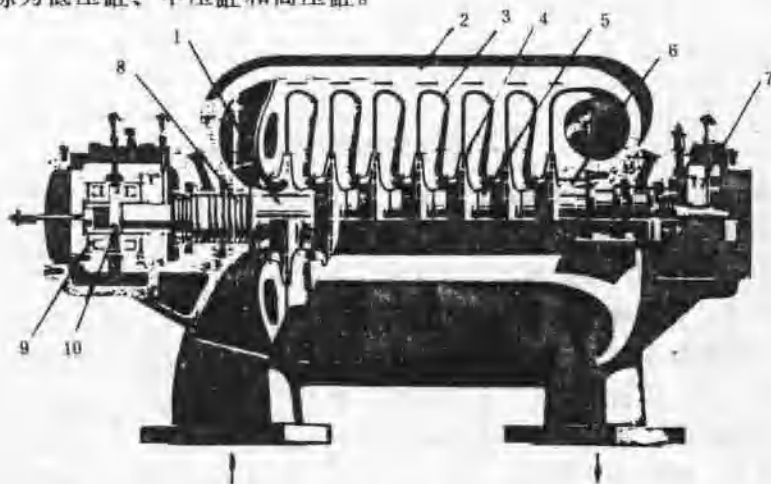


图 0 - 1 离心式压缩机

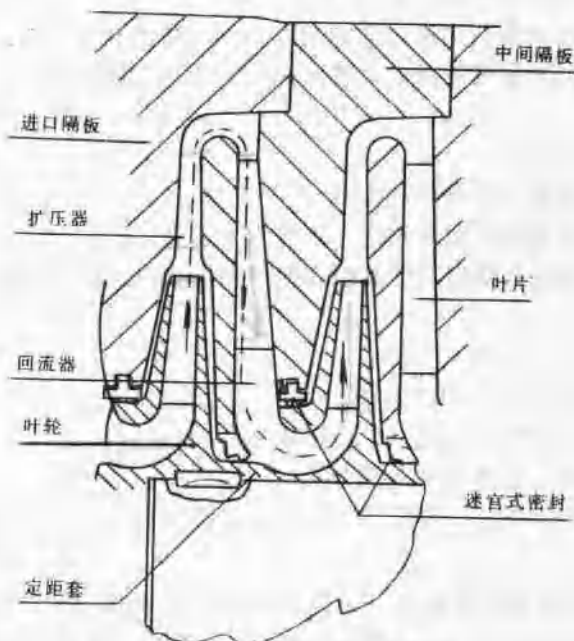


图 0 - 2 压缩机的中间级

压缩机本体结构可以分为两大部分：转动部分，它由主轴1、叶轮4（本压缩机共有7个叶轮）、平衡盘6、推力盘10以及联轴用的半联轴节等零部件组成，称为转子；固定部分，它由气缸2、隔板3（每个叶轮前后都配有隔板）、叶轮间的定距套5、支撑轴承7、推力轴承9、轴端密封8等零部件组成，常称为定子。图0—1所示压缩机只有一个进气口和排气口，称为一段压缩，有的压缩机，气体从气缸中间排出，到缸外进行冷却后，再回到气缸内继续进行压缩，有一次这样中间排出又返回的称为二段压缩，有的压缩机一个气缸可以有几个这样的段。

在压缩机理论中常常顺着气体流动路线，将压缩机分成若干个级。所谓级就是由一个叶轮和与之相配合的固定元件构成的基本单元。图0—2所示是压缩机中间的级，它包括叶轮、扩压器、弯道和回流器几个元件；压缩机每段进口处的级称为首级，除了上述元件外它还应包括进气室（图0—3），而在压缩机每段的排气口的级称为末级，它就没有弯道和回流器，而代之以排气室（图0—1），有的压缩机甚至连扩压器元件也没有，气体从叶轮出来直接进入排气室。可见，每级都必须有叶轮，由于级在段中所处的位置不同而有不同的固定元件相配合。一个压缩段可以有一个级也可以有许多级。为了对压缩机级的通流元件作用有个了解，分别叙述如下：

吸气室 在每段第一级入口都设有吸气室，将气体从进气管均匀地引入叶轮进行压缩。

叶轮 叶轮又称工作轮，是压缩机中最重要的部件。它随轴高速旋转，气体在旋转离心力和在叶轮中的扩压流动的作用下，由叶轮出来后，压强和速度都得到提高。从能量转换观点来看，在压缩机中叶轮是将机械能传给气体，以提高气体能量的唯一元件。

扩压器 气体从叶轮流出来时，具有很高的流动速度，为了将这部分动能充分地转变为势能，以提高气体的压强，紧接叶轮设置了扩压器，它是由前后隔板组成的通道，随着直径的增大，通流面积也随之增加，使气流速度逐渐减慢，压强得到提高。

弯道与回流器 为了把从扩压器出来的气体引导到下一级去继续压缩，设有使气流拐弯的弯道和把气流均匀地引入下一级叶轮入口的回流器。弯道是由隔板和气缸组成的通道，回流器则由两块隔板和装在隔板之间的叶片组成。

蜗壳 蜗壳的主要作用是将从扩压器或从叶轮（在没有扩压器时）出来的气体汇集起来，并引出机外。在大多数情况下，由于蜗壳外径逐渐增大，通流面积也增大，因此还可以起到一定的扩压作用。

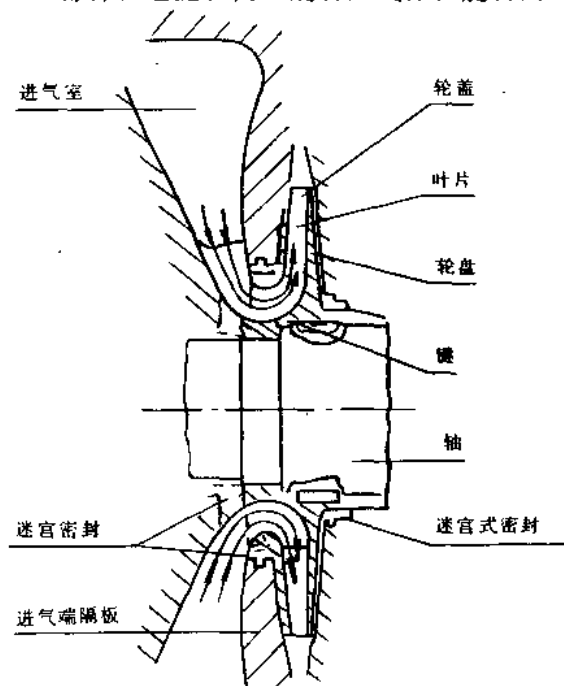


图0—3 压缩机首级叶轮和进气室

离心式压缩机本体除了上述级元件外，还有许多元件，例如减少气体从叶轮出口倒流到叶轮入口的轮盖密封；减少级间漏气的定距套密封；减少气体向机外泄漏的轴端密封；减少轴向推力的平衡盘；承受转子的剩余轴向推力的止推轴承以及支撑转子的支持轴承等等。

为了使压缩机持续安全、高效率地运转，还必须有一些辅助设备和系统。如：油路系统、自动控制及保安系统等等。具有中间冷却的压缩机还带有中间冷却器、冷却系统。有的压缩机还带有增速器。

二、轴流式压缩机

和离心式压缩机一样，轴流式压缩机的结构也分为转子和定子两部分。现以我国自行设计生产的 Z 3250—46 轴流式压缩机（图 0—4）为例，对其通流部分的主要元件的功用叙述如下：

进气室（11）：进气室的作用是使大气或从进气管来的气体较均匀地进入环形收敛器；

收敛器（13）：使进气室中的气流适当加速，以保证进气导流器前的气流具有均匀的速度场和压强场；

进气导流器（12）：由装在气缸上的均布叶片组成。使气流以一定速度和方向进入第一级动叶；

动叶（5）：由装在转鼓 3（由轮盘焊接而成）上的叶片组成，它是轴流式压缩机对气体作功的唯一元件。每一列动叶与其后面的静叶（导流器）组合在一起，称为轴流

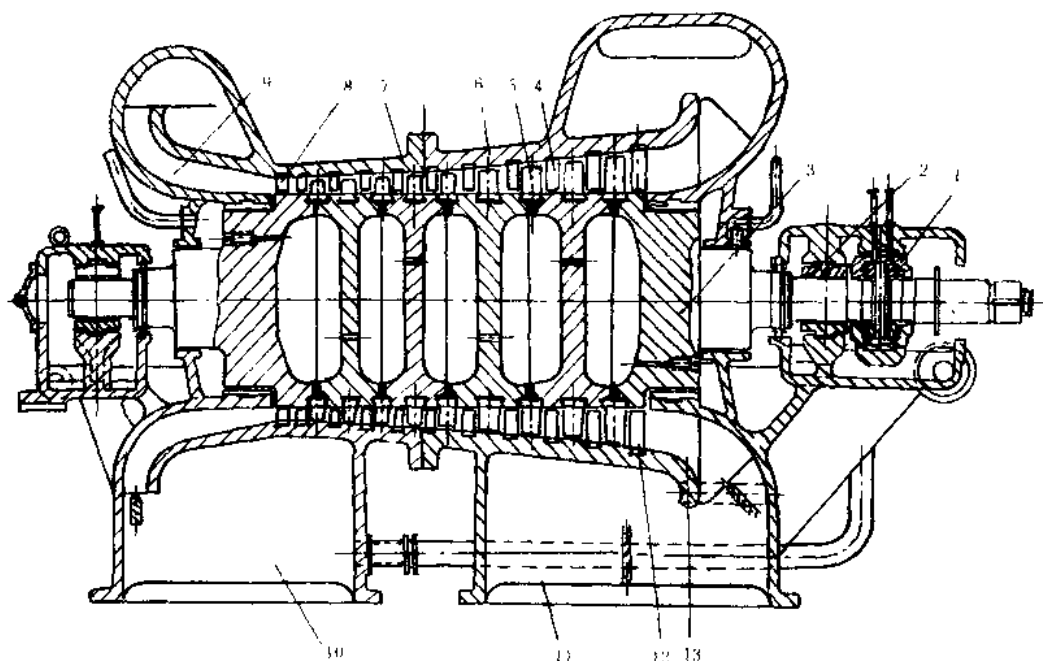


图 0—4 Z 3250—46 轴流式压缩机

- 1—止推轴承 2—径向轴承 3—转子 4—静叶 5—动叶 6—前气缸
7—后气缸 8—出口导流器 9—扩压器 10—排气室 11—进气室 12—收敛器

式压缩机的级（图 0—5），该压缩机共有九级。转鼓和装在上面的动叶就构成转子。转子高

速旋转, 叶片对气体做功, 使气体在流出动叶时, 速度和压强都得到提高。

静叶 (导流器)(4): 由均匀装在气缸上的叶片组成。其作用有二, 一是将从动叶出来的气体动能尽量转换成压强的提高, 二是按要求使气流按照一定的方向和速度进入下一级继续进行压缩。

出口导流器 (8): 其功用是使末级导流器出来的气流沿叶高均变为轴向流动, 以避免气流在扩压器中由于旋绕运动而增加损失, 提高效率。

扩压器 (9): 使从出口导流器出来的气流均匀地减速, 进一步提高气体的压强。

排气室 (10): 将气流沿径向收集起来, 经排气管排出。

除了上述通流部分元件外, 和离心式压缩机一样, 轴流式压缩机还有密封、支持轴承、止推轴承等部件以及其他有关辅助设备和系统。

如前所述级由动叶和静叶组成 (图 0—5), 通常用 1—1、2—2、3—3 特征截面分别表示动叶进口 (即级进口)、动叶出口 (亦即静叶进口) 和静叶出口 (即级出口)。对于首级来说如果设有进口导流器还应包括有进口导流器在内, 对末级还应包括整流器在内。为了研究这样的级常用相距 dr 的两个相邻圆柱面去截取一个微元环形段进行研究。这样截取的动叶栅和静叶栅分别称为基元动叶栅和基元静叶栅, 由它们组成基元级。图 0—5 下图为基元级在平面的展开图, 它是一种平面叶栅, 叶型前缘与后缘间距离 b 和相邻两叶型间距离 t 分别称为弦长和栅距。对基元级来说可以忽略气流参数沿叶高 dr 的变化, 实践证明, 可以用研究平面叶栅的方法来研究轴流式压缩机基元级。

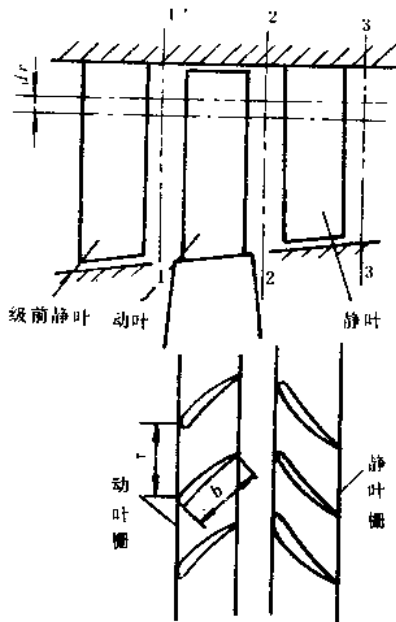


图 0—5 轴流式压缩机的级和基元级

三、透平式压缩机的主要性能参数

表征透平式压缩机性能的有如下主要参数:

1. 流量

流量可以用容积流量也可以用质量流量。运输式 (指用于航空、交通运输等部门) 压缩机多用质量流量, 单位常用 kg/s , 固定式 (指运输部门以外的工业用) 压缩机多用容积流量, 并且习惯上用进气容积流量来表示压缩机的流通能力。单位常用 m^3/min , 在空气分离、石油、化工等部门用的压缩机中常用标准状态下的容积流量, 称为标准容积流量, 单位是 Nm^3/h 。所谓标准状态, 一般规定压强和温度分别为 $1.01325 \times 10^5 \text{N/m}^2$ 和 273K 的气体状态。

2. 排气压强和压强比

化工透平式压缩机铭牌习惯标明排气压强, 对一些运输式压缩机习惯标明压强比 (简称压比)。压比为:

$$\varepsilon_c = \frac{\text{排气绝压 } p_d}{\text{进气绝压 } p_a}$$

3. 转 速

指压缩机转子旋转速度, 单位是 r/min 。

4. 功 率

指驱动压缩机所需的轴功率和驱动机的功率等, 单位常用 kW 。

5. 效率 (后面有专门章节讨论)

除效率外, 上述参数都应在压缩机铭牌上标出, 并同时注明其进气条件 (压强、温度、相对湿度) 和气体介质。

§ 0 - 3 透平式压缩机发展概况

实用透平式压缩机在工业上出现之前, 活塞式压缩机早已获得了普遍应用, 在19世纪活塞式压缩机几乎成了实际上应用的唯一型式。活塞式压缩机由于存在单机容量小、机器笨重、易损件多和滑油消耗量大等许多缺点, 很难满足生产发展的需要。随着科学技术的发展, 在实际上解决了热力学、气体动力学、材料及机械制造等一系列重大问题之后, 透平式压缩机才迅速发展起来。1900年法国拉托厂首先制造了第一台高炉鼓风机用离心式压缩机, 六年后, 瑞士的布朗包威尔开始生产拉托型压缩机, 从此在欧洲和美国便出现了离心式压缩机的生产热潮。实用轴流式压缩机的出现较离心式压缩机要晚些, 虽然在上世纪末就有人提出过多级轴流式压缩机的概念, 不少人作过很大努力, 但都因效率低而未能获得推广, 真正的发展是在本世纪30年代以后的事。还在上世纪末, 美国的C. A. 帕尔森根据透平的经验将多级反动式透平反转, 得到第一台实验用轴流式压缩机, 显然这种忽视压缩机和透平的重要区别的做法, 必定导致压缩机效率低。后来他又利用透平叶型试制了一些轴流式压缩机, 都因为效率低 (小于50%) 而没有被推广使用。从本世纪30年代开始, 由于航空事业的发展需要, 对航空燃气轮机进行了大量的理论和试验研究, 使轴流式压缩机不断完善, 提高了效率。1934年瑞士的BBC首次为超音速风洞制造了第一台多级轴流式压缩机, 效率达到84%。从四十年代开始, 轴流式压缩机已广泛应用于航空燃气轮机中, 迄今仍占有很重要的地位。现代轴流式压缩机效率可高达86—90%, 除航空发动机外, 还广泛用于发电燃气透平、舰用燃气透平和机车燃气透平装置中。随着钢铁、石油、化工等企业不断大型化, 轴流式压缩机在这些领域也获得了发展, 特别是用于高炉鼓风机以来, 一直被各国所重视和发展。为改善低负荷性能, 1960年瑞士BBC制造了第一台静叶可调轴流式高炉鼓风机, 随后世界许多厂家在这方面都做了许多工作, 使得静叶可调式轴流式压缩机已成为高炉鼓风机的主要机型。目前轴流式压缩机在流量为 $300-25000\text{Nm}^3/\text{min}$, 排气压强为 $(3 \sim 40) \times 10^5\text{pa}$ 的范围内得到广泛应用。

离心式压缩机在航空发动机上的应用经历了一些曲折。应该说第一台航空喷气式发动机采用的是离心式压缩机, 但随着航空事业的飞速发展, 对发动机的功率需要猛烈增殖, 利用轴流式压缩机更为合适, 因而在本世纪50年代中期和以后, 航空用离心式压缩机的发展几乎停滞不前。一直到了60年代中期先进的军用直升飞机需要装备小的燃气透平装置, 才又刺激离心式压缩机的进一步发展。此时, 还由于离心式压缩机制造工艺的新进展和气动力研究的成就, 大大扩大了离心式压缩机的应用范围。离心式压缩机已成功地应用到汽车、直升飞机用透平装置、柴油机的增压器、空调、化工、石油等部门, 并在许多部门中和容积式压缩机

展开了竞争,取得了很好的成绩。透平式压缩机的主要优点是单机容量大、重量轻、体积小、结构简单、滑油消耗少,为生产大型化提供了条件。开始离心式压缩机只是在低中压压缩机方面在大型企业中取代活塞式压缩机,发展到今天,在高压领域内在大型企业中逐渐代替活塞式压缩机。1956年美国的克拉克公司为日产1000 t合成氨厂制造了合成气低压段离心式压缩机,排气压强只有 $25.5 \times 10^5 \text{ pa}$,到了1963年为德克萨斯的日产600 t合成氨厂制造了世界第一台合成氨用高压离心式压缩机,排气压强达到 $155 \times 10^5 \text{ pa}$,耗功率为8800 kW,从此离心式压缩机跨进了高压领域。随着高压离心式压缩机的有关技术关键如高压密封、小流量叶轮的制作和防喘措施等方面的进展,世界许多厂家已能生产出排气压强达 $(280 \sim 340) \times 10^5 \text{ pa}$ 或更高的高压离心式压缩机,1972年依了得厂为压缩多种工艺气体制造的压缩机其排气压强高达 $687 \times 10^5 \text{ pa}$ 。从进气流量范围看,离心式压缩在 $80 \sim 6000 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 范围内得到广泛应用。

我国是世界历史悠久的国家,勤劳勇敢的中国人民很早就懂得透平机械原理,并制造了结构轻巧、使用方便的风车。但是在解放前的旧中国,透平式压缩机制造业基本上属于空白,只有少数厂能生产少量低压的通风机和鼓风机。新中国成立以来,随着社会主义经济建设的发展,透平式压缩机制造业也从无到有得到迅速发展,除了各大汽轮机厂外,还有许多鼓风机专业生产厂,如沈阳鼓风机厂、陕西鼓风机厂、上海鼓风机厂、武汉鼓风机厂等可以生产各种规格的工业透平式压缩机。透平式压缩机的理论研究、设计工作都取得了很大进展,除了自行设计外,还从国外引进技术,推动我国透平式压缩机事业的发展。沈阳鼓风机厂继从意大利新比隆引进了MCI(水平剖分型)、BCI(筒型)和PCI(输气管线用)三种系列压缩机技术之后又从日本引进了DH系列压缩机,陕西鼓风机厂从瑞士苏尔寿公司引进轴流式压缩机技术,生产A系列(静叶不可调)和AV系列(静压可调)多种规格轴流式压缩机。目前我国从通风机、鼓风机到高压离心式压缩机、各种规格的轴流式压缩机都能生产,并为进一步发展打下坚实基础。

透平式压缩机用途很广,特别是在石油精炼(重整、催化裂化、润滑剂生产等)、化工(合成氨、尿素、甲烷、乙烯、复合肥料等)、天然气(输气工程、天然气液化等)以及空气分离、氧气站、冶炼等部门中的应用越来越广泛,已成为这些企业的关键设备。现结合透平式压缩机在合成氨、尿素厂中的应用情况作简要说明。七十年代以来,为迅速改变我国化肥落后的面貌,先后从国外引进技术,建成了十多套以天然气为原料或以石脑油或以煤为原料的不同类型化肥厂,目前还在兴建并在以后还要兴建类似的化肥厂。在这些厂中的压缩机都采用透平式压缩机,主要是离心式压缩机。以天然气为原料的合成氨厂有压缩机4台,它们是原料气、空气、氨和合成气(氮、氢气)压缩机,连同尿素厂一台 CO_2 压缩机都用蒸汽轮机驱动,利用工艺生产中的余热产生的蒸汽,节省大量电力,合理使用能源。这些压缩机无论是动力消耗还是投资都占有很大比例,如合成氨厂压缩机所耗动力约占该厂动力的87%,投资约占总投资的21%,尿素厂压缩机的动力占该厂动力的85%,投资约占18%。鉴于蒸汽轮机驱动的离心式压缩机组在化肥生产中所起的作用,常被人们称为化肥厂的心脏设备,因此,确保这些机组的正常运行对这个工厂的安全、稳定生产关系极大。国外许多大型化肥厂运行经验表明:因汽轮机压缩机故障而使整个工厂停工的约占25%,其中因设计不合理造成的事故占10~15%,因操作不当而造成的事故占13~15%。为了提高机组的运转率必须做到精心操作,周密维护,认真检修。

第一章 气体热力学和气动力学基础

本章将简要介绍透平式压缩机理论中常用的一些热力学和气动力学的基本知识, 其中包括: 气体热力性质、第一定律、压缩过程分析、一元定常流的基本方程等。对于学过工程热力学和气动力学的人来说是个复习。所有这些基本知识, 都将为以后诸问题的讨论奠定必要的基础。

§ 1-1 气体状态方程式

化工用压缩机所处理的气体种类繁多, 气体所处的状态千差万别。从气体的基本性质来看, 根据其所处的状态不同可以分为两类。一类是气体所处的状态离液态较远, 例如空气、氢、氧、氮等, 其特点是密度小, 分子与分子间的距离大, 彼此间的引力很弱, 一般在压强增加温度降低时仍能离液态很远。对这类气体可以忽略分子本身所占体积和分子间引力的影响, 抽象为理想气体, 认为气体分子是一些弹性的, 不占据体积的质点, 相互间没有作用力, 而使问题简化, 这样的假设分析得出的许多规律对许多气体来说和实验总结出来的规律相符。另一类气体则不同, 它所处的状态离液态很近, 例如水蒸汽和氨气等。这类气体和前类气体相反, 一般密度大, 分子之间距离小, 彼此间的引力大, 不能忽略分子本身所占的体积和分子之间引力的影响。这一类气体是真实气体。当然, 严格说来, 气体都是真实气计, 只不过一些气体服从于或接近于理想气体的规律, 而另一些则与理想气体规律差别较大。本书不在加说明, 气体都视作理想气体, 对真实气体, 结合其特点, 也作一定说明。

一、理想气体状态方程式

前面提到热力状态, 而气体的状态特性是通过压强、温度、比容、内能、焓、熵等参量来表明的, 这些表明气体热力状态的量, 称为状态参数。在这些状态参数中先来讨论前三个, 因为压强 p 、温度 T 和比容 v (或者用密度 ρ , $\rho = \frac{1}{v}$) 是三个可以测量的量, 成为描写气体状态最常用的基本状态参数。对理想气体来说, 不管是什么气体, 或者处在何种状态, 都有一种共性, 那就是

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

或
$$p/\rho = RT \quad (1-2)$$

式中 p 为绝对压强 (N/m^2); T 为绝对温度 (K); v 为比容 (m^3/kg); ρ 为密度 (kg/m^3); R 称为气体常数 ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)。式 (1-1) 或 (1-2) 称为理想气体状态方程, 它表示出三个基本状态参数间的关系。上式是对 1 kg 质量气体写的, 如果对于 $m\text{ kg}$ 质量气体而言, 则式 (1-1) 可写成:

$$pV = mRT \quad (1-3)$$

式中 V 为气体的总容积 (m^3)。

为了确定气体常数 R ，运用阿佛伽德罗定律：“当气体在 $1.0133 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 压强和 273 K 温度的标准状态下时， 1 mol 或 $\mu \text{ kg}$ 任意气体（ μ 为气体分子量）都占有 22.4 Nm^3 的容积”。这种性质与气体种类无关。于是由式（1-3）得：

$$p\mu v = \mu RT$$

$$\mu R = \frac{p\mu v}{T} = \frac{1.0133 \times 10^5 \times 22.4}{273} = 8314.3$$

$$R = \frac{8314.3}{\mu} \quad \text{J/(kg, K)} \quad (1-4)$$

式（1-4）说明气体常数与分子量成反比。数 8314.3 称为通用气体常数，对不同种类气体都适应。

例：空气压缩机进口气体温度为 38°C ，进口气体压强为 $0.910 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ，质量流量为 50868 kg/h ，试求其进口容积流量是多少？换算到标准状态的容积流量又是多少？空气的气体常数 $R = 287.4 \text{ J/(kg, K)}$ 。

解：由式（1-3）得：

$$Q_a = \frac{G}{\rho_a} = \frac{GRT_a}{p_a} \quad \mu v = mRT$$

式中 Q_a 为进口容积流量，脚标 a 为压缩机进口， G 为质量流量。

$$Q_a = 50868 \times 287.4 \times (273 + 38) \frac{1}{0.910 \times 10^5} = 49963 \text{ m}^3/\text{h}$$

用脚标 ‘ N ’ 表示标准状态，由两个状态下质量流量相同得

$$\frac{p_a Q_a}{T_a} = \frac{p_N Q_N}{T_N}$$

$$\begin{aligned} \text{由此 } Q_N &= Q_a \frac{p_a}{p_N} \cdot \frac{T_N}{T_a} = 49963 \times \frac{0.910}{1.0133} \times \frac{273}{311} \\ &= 39387 \text{ Nm}^3/\text{h} \end{aligned}$$

二、真实气体状态方程式

许多气体所处的许多状态，三个基本状态参数之间的关系和理想气体规律差别很小，而另有许多气体和理想气体差别很大。工程上将不符合理想气体规律的气体称为真实气体。对真实气体，三个基本状态参数间的关系比较复杂，要通过大量实验和计算来确定，为便于工程计算，通常制定出气体的热力性质图表。在缺乏这些资料时，也可以简化处理，对理想气体状态方程式进行修正得：

$$pv = ZRT \quad (1-5)$$

式中 Z 称为压缩系数或可压因子。它表示在相同压强和温度下，真实气体的比容值 v 和把真实气体按理想气体计算得到的气体比容值 $v_{i,0}$ 之比

$$Z = \frac{v}{v_{i,0}}$$

$Z > 1$ ，表示按理想气体规律计算得的比容值小于实际值； $Z = 1$ ，真实气体符合理想气体