

冶金动力职业技能培训系列教材

气体压缩机运行与维护



河北钢铁股份有限公司邯郸分公司动力厂 编
张 卫 主编

QITI YASOOI YUNXING YU WEIHU



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

冶金动力职业技能培训系列教材

气体压缩机运行与维护

河北钢铁股份有限公司邯郸分公司动力厂 编

主编 张 卫

参编 韩利兵 常清峰 怀社坤 蔡联君

李天明 陈金英 李海兴 李树华

张鹏飞 朱海琴

主审 唐景富



机械工业出版社

本书是《冶金动力职业技能培训系列教材》中的一本,主要讲述气体压缩机的运行操作与维护技术,重点介绍空气分离装置用的空气压缩机、氧气压缩机、氮气压缩机以及膨胀机等透平机械。书中涵盖了专业基础知识;工艺流程、设备装置;设备操作与维护;故障分析、判断、调整及处理。基本上满足了制氧岗位操作人员应具备的专业知识和技能要求。

本培训教材的培训对象是从事气体压缩机运行操作与维护的工作人员,适用于岗位技能培训。

图书在版编目(CIP)数据

气体压缩机运行与维护/张卫主编. —北京:机械工业出版社, 2011. 4

冶金动力职业技能培训系列教材

ISBN 978-7-111-33976-2

I. ①气… II. ①张… III. ①气体压缩机—技术培训—教材
IV. ①TH45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 059153 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: 刘怡丹

封面设计: 陈 沛 责任印制: 杨 曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2011 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

140mm×203mm · 8.25 印张 · 219 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-33976-2

定价: 28.00 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)88379772

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>

读者购书热线: (010)88379203 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，动力厂始终把员工职业技能的培训和提高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》、《电气运行维护安全》。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，压缩机在冶金、化工等行业中得到了广泛的使用。近几年压缩机技术不断发展，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、现代化气体压缩设备的能力，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《气体压缩机运行与维护》技能培训教材。

本书是《冶金动力技能培训系列教材》中的一本，主要讲述气体压缩机运行维护的操作技术。其主要作者都是来自河北钢铁集团邯钢公司气动力的工程技术人员，由张卫任主编、唐景富任主审，参加编写的人员有（按章节顺序）：韩利兵、常清峰、怀社坤、蔡联君、李天明、陈金英、李海兴、李树华、张鹏飞、朱海琴，由韩利兵负责统稿。

培训教材针对培训目标——气体压缩机岗位生产操作、设备维护实际工作，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。

本书是许多工程技术人员在统一提纲下分别编写的，由于编写人员实际经验、文字风格不尽相同，在表述上不一定达到完美一致，因此各章之间存在一些内容的重复。由于我们的技术视野和技术积累有限，编写技术教材的经验不足，我们的这些观察和总结可能比较浅近，内容可能有所疏漏，欢迎读者朋友探讨、指正。

编 者

目 录

丛书序

前言

第一章 离心式压缩机的基础知识	1
第一节 概述	1
第二节 工作原理	4
第三节 压缩机的主要性能参数	5
第四节 基本结构及主要零部件	7
第五节 辅机系统	14
第六节 离心式压缩机的常见故障与运行维护	18
第二章 活塞式压缩机的基础知识	26
第一节 基本概念	26
第二节 分类与工作原理	27
第三节 基本结构与主要零部件	37
第四节 技术特性与主要参数	49
第五节 辅助系统	54
第六节 常见的故障及其原因与处理措施	59
第三章 离心式压缩机的运行操作与维护	64
第一节 离心式压缩机的性能与调节方法	64
第二节 空气压缩机的运行操作与维护	78
第三节 氧气压缩机的运行操作与维护	133
第四节 氮气压缩机的运行操作与维护	174
第四章 活塞式压缩机的运行操作与维护	190
第一节 活塞式氧气压缩机的运行操作与维护	190
第二节 煤气压缩机的运行操作与维护	203
第五章 增压透平膨胀机的操作与维护	232

VI 气体压缩机运行与维护

第一节	膨胀机的工作原理	232
第二节	基本结构与主要零部件	235
第三节	膨胀机的技术特性	238
第四节	膨胀机的运行操作	241
第五节	巡检维护与拆装检修	244
第六节	几种典型膨胀机的操作	247

第一章 离心式压缩机的基础知识

第一节 概 述

一、离心式压缩机的发展概况

离心式压缩机是透平式压缩机的一种，具有气量大、体积小、结构简单、运转平稳、维修方便以及气体介质不容易受污染等特点。随着气体动力学研究的发展，离心式压缩机的效率不断提高。随着压缩机制造技术的不断提高，以及高压密封、小流量窄叶轮的加工、多油楔轴承等关键技术的突破，离心式压缩机已向高压力、宽流量范围发展。这使得离心式压缩机的应用范围大为扩展，在许多场合逐步取代往复式压缩机。

我国在 20 世纪 50 年代已能制造离心式压缩机，从 20 世纪 70 年代初开始，又以石油化工厂、大型化肥厂为主，引进了一系列高性能的、中高压力的离心式压缩机，取得了丰富的使用经验，并在对引进技术消化、吸收的基础上大大增强了自己的研究、设计、制造能力。

二、分类

在国民经济许多部门中，特别是在采矿、石油、冶金、化工等行业中，气体压缩机使用广泛。它主要用来输送气体介质。压缩机种类繁多，结构形式和工作原理都可能有很大的不同。气体的压力取决于单位时间内气体分子撞击单位面积的次数和强烈程度。提高气体压力的主要方法就是增加单位容积内气体分子数目，这也是容积式压缩机（活塞式、罗茨式、螺杆式等）的基本

2 气体压缩机运行与维护

原理：利用惯性的方法，通过气流的不断加速、减速，以惯性挤压气体，缩短分子之间的距离，来提高气体的压力透平式压缩机的工作原理就属于这一类。

各种形式的压缩机按其工作原理划分为两大类，即容积式压缩机和速度式压缩机。

两类压缩机在原理上的主要区别在于：容积式压缩机是利用封闭空间的器壁移动，使气体所占空间容积减少，单位体积的气体分子数增多，分子间距离接近，分子运动碰撞的次数增多、强度增大，来达到气体压力提高的目的；而速度式压缩机是连续送入的气体在工作轮作用下，利用气流惯性力，在随后的减速运动中使气体分子间距更加接近，以达到提高气体压力的目的。容积式的特点是气体不移动，不产生惯性力，机械能直接转化为压力能，其过程又称为静力法；速度式的特点是气体连续运动并产生惯性力，机械能通过动能转化为压力能，其过程又称为动力法。容积式压缩机适用于小流量、中高压力的工况；而速度式压缩机更适用于大流量、中低压力的工况。

大、中型制氧机所配套的空气压缩机全部为离心式压缩机。氧、氮气压缩机有的也采用离心式压缩机。

离心式压缩机按结构大致可分为：水平剖分式、垂直剖分式（筒形）、等温式。水平剖分离心式压缩机的机壳剖分成上、下两部分，制氧装置所配套的空气压缩机多数采用此种类型；垂直剖分离心式压缩机抗内压能力强，对温度和压力所引起的变形也比较均匀，用在压力较高的化工循环机上；近年来制氧行业均采用等温式空气压缩机，这种压缩机的冷却效果较好，因此等温效率较高，而且叶轮双轴对称布置，也有利于提高效率，也就是可以在较小的动力消耗情况下进行高效压缩。

与活塞式压缩机相比，离心式压缩机有下列优点：

1) 结构紧凑，尺寸小，排气量大，机组质量轻，原材料消耗少。

2) 没有气阀、填料、活塞环等易损件，连续运转周期长。

3) 在转子与定子之间,除轴承和轴端密封之外,没有接触性摩擦的部分,气缸内不需要油润滑,所以加工空气中不带油。

4) 供气连续、稳定,无循环脉动。

主要缺点为:

1) 稳定工作范围较窄,一旦偏离设计工况,效率降低,甚至发生故障,也就是可调性相对较差。

2) 在高速、高温下旋转的叶轮和轴,要求用高级合金钢制造,而且制造工艺要求高。

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,提高气体的压力和动能,并利用流道使气体速度减少,将动能转变为压力能。

一般透平式压缩机分类如下:

按照气体流动方向分为:离心式,气体在压缩机腔内主要沿径向流动;轴流式,气体在压缩机内主要沿轴向运动;轴流离心组合式,在轴流的高压段配上离心式段,形成轴流、离心组合式。

按照排气压力划分为:通风机,压力小于 0.0142MPa (表压);鼓风机,压力在 0.0142MPa 与 0.245MPa (表压) 之间;压缩机,压力大于 0.245MPa (表压)。

按照用途和压缩的介质可以分为高炉鼓风机、空气压缩机、氧气压缩机、天然气压缩机、二氧化碳压缩机等。

气体在压缩机内受离心力的作用,沿着垂直压缩机轴的径向方向流动,称为离心式压缩机。离心式压缩机一般有水平剖分式、筒式和多轴式三大类。

水平剖分式压缩机有一个水平中分面将压缩机气缸分为上下两部分,在中分面处用螺栓连接。此种结构拆装方便,适用于中、低压力的场合。

筒式的离心压缩机有内、外两层气缸。外气缸是一个筒,两端有端盖;内气缸垂直剖分,其组装后再推入外气缸中。此种结构缸体强度高、密封性好、刚性好,但是安装困难,检修起来不

是很方便，一般适用于高压力或者密封性好的场合。

多轴式的离心压缩机是在一个大的齿轮箱内有一个大齿轮和若干个小齿轮轴，每个轴的一端或者两端各有一个叶轮，叶轮轴向进气、径向排气，通过级间管道将各级连接起来。这类设备结构简单、体积小，压缩机效率有一定的提高，适用于中、低压力介质的压缩。

第二节 工 作 原 理

一般说，提高气体压力的主要目标就是增加单位容积内气体分子的数量，也就是缩短气体分子与分子之间的距离。为了达到这个目的，按照动力学的方法，利用机器的做功部件（高速旋转的叶轮）对气体做功，使气体在离心力场中压力得到提高，同时动能也大为增加，随后在扩压流道内流动中部分动能又转变为静压能，从而使气体压力进一步提高，这就是离心式压缩机的工作原理。

在压缩机中，通常将一套转子、一个气缸及相应的隔板等部件组装在一起，称为压缩机的一个缸。缸是气体压缩的场所。根据流量压力的不同，一台压缩机一般由1~3个缸组成。

在离心式压缩机中，一般将进入缸体的气体经一级或者几级压缩后引出进行冷却，再进入缸体进行压缩，称之为离心式压缩机的段。离心式压缩机之所以设置段，是由于在压缩过程中气体的温度会升高，而气体在高温下压缩，消耗功将增大，并且对压缩机的运行有很大的危害，于是增加了中间冷却，以减少压缩机耗功。

离心式压缩机的级就是由一个叶轮和与之相配合的固定零部件构成的基本单元。在压缩机中的级，是由叶轮、扩压器、弯道和回流器等零部件组成；在压缩机每段进口处的第一级，除了叶轮、扩压器、弯道和回流器等零部件外，还包括进气室；在压缩机每段的最后一级没有弯道和回流器，但是有排气室。

第三节 压缩机的主要性能参数

一、流量

流量是指单位时间内流经压缩机流道到任一截面的气体量，通常以体积流量和质量流量两种方法来表示。

体积流量是指单位时间内流经压缩机流道任一截面的气体体积，其单位为 m^3/s 。因气体的体积随温度和压力的变化而变化，当流量以体积流量表示时，须注明温度和压力。

质量流量是指单位时间内流经压缩机流道内任一截面的气体质量，其单位为 kg/s 。

二、压缩比

压缩比是指压缩机排气压力和吸入压力之比，也称为压缩比。计算压缩比时排气压力和进气压力都要用绝对压力。

三、轴功率和有效功率

1) 轴功率：离心式压缩机的转子为气体升压提供有用功率，在气体升压过程中提供流体流动损失功率、轮阻损失功率和漏气损失功率；此外其本身也产生功率损失，就是轴承的摩擦损失。这部分功率消耗约占总功率的 $2\% \sim 3\%$ 。如果有齿轮传动，则传动功率消耗一样存在，约占总功率的 $2\% \sim 3\%$ 。以上六个方面的功率消耗，都是在转子对气体做功的过程中产生的，它们的总和就是压缩机的轴功率。轴功率的大小是选择电动机（汽轮机）功率的依据。

2) 有效功率：在气体压缩的过程中，叶轮对气体所做的功绝大多数转变为气体的能量，也有一部分能量的损失，损失主要包括流动损失、轮阻损失和漏气损失三部分。被压缩气体的能量与叶轮对气体所做功的比值称为有效功率。

四、转速

转速是指压缩机旋转的速度，单位是 r/min 。

五、临界转速

当压缩机转子的转动频率与它本身的固有频率相等时，振动最为强烈，振幅最大，称为共振现象。发生共振现象时的转速称为该压缩机的临界转速。

六、能量头

能量头是指叶轮对单位质量的气体所做的功，单位是 J/kg 。

七、效率

离心式压缩机的效率是用来说明压缩机传递给气体的机械能的有效利用程度。离心式压缩机的效率主要有内效率、机械效率和传动效率之分。一般来说内效率也叫多变效率。在工程上为了比较压缩机性能的优劣，人为地定义了压缩机的绝热效率和等温效率。

离心式压缩机的多变效率是多变压缩功和叶轮总耗功之比。压缩机的多变效率除了通过测试得到以外，也可以按照类似压缩机的已知多变效率选取。一般级的多变效率在 $0.70 \sim 0.84$ 之间。

绝热效率就是假定气体压缩升压的过程是完全绝热的过程，其绝热压缩功和叶轮总耗功之比。

等温效率就是假定气体的压缩过程是完全等温的，其等温过程中等温压缩功和叶轮实际消耗功率之比。等温效率除常被用来表示等温型离心压缩机（有级内冷却的压缩机）的效率以外，通常也用来衡量有中间冷却器的多段压缩机的工作质量。

八、离心式压缩机性能参数间的关系

反映离心式压缩机性能的主要参数有：容积进气量 Q 、压缩比 ϵ 、功率 P 以及效率 η 等。离心式压缩机的性能曲线反映的是

整台压缩机各参数之间的关系。它包括气体流量与压缩比的关系、气体流量与功率的关系、气体流量与效率的关系。

1) 在一定的转速下, 压缩机的压缩比同流量成反比。随着流量的减少, 压缩机能够提供的压缩比将增大。在最小流量时, 压缩比达到最大。反过来说, 如果压缩机的背压有所降低的话, 其流量也将增大。

2) 在一定的转速下, 当流量为某一定值时, 压缩机的效率达到最高值; 当流量大于或小于此值时, 效率都将下降, 一般常以此流量的工况点为设计工况点。

3) 离心式压缩机有最大流量和最小流量两个极限流量, 当然排出压力也有最大值和最小值。当压缩机的流量小于最小流量时, 压缩机将会发生喘振现象; 大于最大流量时, 压缩机气路将会发生堵塞。两者都是压缩机运行时应该避开的危险工况区。在喘振流量和堵塞流量之间是压缩机的稳定工作区。该区域的大小, 是衡量压缩机性能的一个重要指标。

第四节 基本结构及主要零部件

从外观上看一台压缩机, 首先看到的是机壳。它又称为气缸, 通常采用铸铁、铸钢材料或者焊接材料制成。一台高压离心式压缩机通常由两个或者两个以上的气缸组成, 按照气体压力的高低分别称为低压缸、中压缸、高压缸。

压缩机的结构, 以常见的水平剖分式压缩机为例, 可以分为两大部分: 首先是转动部分, 一般由主轴、叶轮、平衡盘、推力盘以及半联轴器组成, 总称为转子; 其次是固定部分, 一般由气缸、隔板、径向轴承、推力轴承、轴端密封等零部件组成, 称为定子。

一、气缸与隔板

(一) 气缸

气缸是压缩机的壳体，又称机壳。一般由壳体和进、排气室组成，内部装有隔板、密封体、轴承等零部件。对气缸一般有下列要求。

- 1) 有足够的强度以承受气体的压力，以免变形或破裂。
- 2) 法兰密封面应该严密，防止介质的泄漏。

离心式压缩机气缸可以分为水平剖分式和垂直剖分式，常见的都是水平剖分式的，用于气体压力低的场合。水平剖分式的气缸有一个中分面，将气缸分为上下两半，分别称为上气缸和下气缸，在中分面处用螺栓连接在一起。法兰结合面严密，避免介质的泄漏。一般进、排气接管都装在下气缸，便于上气缸的拆装。一般设备需要进行检修，拆下上气缸，压缩机内部的转子、隔板、密封等零部件将一目了然。水平剖分的压缩机优点就是拆装方便。

（二）隔板

隔板的作用是形成压缩气体的通道，一般根据隔板在压缩机内所处的位置，有四种类型：进气隔板、中间隔板、段间隔板和排气隔板。隔板上装有轮盖密封、轮盘密封以及级间密封。一般所有的密封都做成上下两半，主要是便于拆装。隔板也是做成上下两半，便于拆装，并有沉头螺栓将隔板固定在气缸上。

由于隔板的形状要符合气体流动的需要，因此隔板的形状比较复杂。隔板一般采用铸造结构，材料选用铸铁、球墨铸铁、铸钢。近几年大型的压缩机隔板也采用焊接结构。

二、离心式压缩机转子

转子是压缩机的关键部件。它高速旋转，是对气体介质做功的主要部件。转子由许多零部件组成。转子各零部件的装配有许多的技术要求，主要有以下几个方面：

- 1) 转子在装配前，所有的叶轮都要做超速试验，主要检查叶轮的变形和表面质量情况。
- 2) 叶轮和转子上其他所有的零部件都必须牢固地装在轴上，

保持叶轮和主轴的过盈量，高速运行过程中不能有松动。

3) 转子装配时必须做动平衡。

4) 转子各零部件装配后，对径向和轴向的跳动值要进行详细的检查，要求小于相应的允许值。

三、离心式压缩机叶轮

叶轮又称工作轮，是离心式压缩机中唯一对气体做功的元件，而且是高速旋转元件，所以对叶轮的设计、材料和制造工艺都有很高的要求。对叶轮的要求主要有：①提供尽可能大的能量头；②叶轮以及与之相配套的级的效率要高；③所设计的叶轮形式能使级及整机的性能稳定；④强度和质量符合要求。下面首先介绍叶轮的类型。

1) 按照叶片的弯曲形式分，主要有后弯式、径向式及前弯式三种形式。它们的性能比较如表 1-1 所示。

表 1-1 三种叶片的弯曲形式比较

性 能 \ 叶 轮	前弯式	径向式	后弯式
能 量 头	高	中	低
反作用度	小	中	大
稳定工况区	窄	中	宽
流动效率	低	中	高

前弯式由于效率低，在压缩机中不采用，压缩机目前普遍采用后弯式。由于三元流理论的不断发展和加工技术的进步，近几十年来扭曲叶片在叶轮中的应用越来越广泛，因为扭曲叶片叶轮内气体流动比较均匀，速度和压力分布比较合理，流动损失小，压缩级的效率明显提高。

2) 按照叶轮的结构形式可以分为开式、半开式和闭式三种。开式叶轮结构最简单，但是气体流动损失最大，故叶轮的效率最低，在压缩机中很少使用。目前闭式和半开式叶轮在压缩机中的

应用越来越广泛。

半开式叶轮和开式叶轮不同，改善了气体流动，减少了流动的损失，提高了效率，但是唯一的缺点是侧面间隙很大，内泄漏损失大。由于半开式叶轮可以整体铣削，叶轮的强度大，叶轮的圆周速度可以很大，有利于级压缩比的提高。

闭式叶轮由轮盘、叶片和轮盖组成。这种叶轮对气体流动有利，效率也比前两种高，在离心式压缩机中广泛应用。

3) 按照加工工艺可以分为铆接式、焊接式、整体式。一般铆接叶轮的叶片常用钢板压制而成，分别与轮盘、轮盖铆在一起，缺点是强度较低。

整体铣削叶轮减少了气体的流动阻力损失，可以提高叶轮的效率。精密铸造工艺省时、省料，但是由于形状复杂，加工工艺要求比较高。

焊接叶轮目前应用最广泛，它适用于叶道较宽的叶轮，在出口宽度较大时，叶片单独压制，然后与轮盘和轮盖焊接。

四、轴向力及其平衡装置

(一) 转子的轴向力

离心式压缩机转子在机体内的气体中旋转，叶轮的两侧都受到气体压力的作用，所受气体力的方向相反，可以互相平衡掉一部分，所有叶轮轴向力之和就是整个转子的轴向推力。轴向力的作用方向一般是从高压端向低压端。转子的轴向推力经过平衡后，剩下的轴向推力由推力轴承来平衡。如果推力过大，会影响轴承的寿命，严重的会使轴承损坏，引起转子窜动，使转子上的零部件和固定元件发生碰撞，以至机器破坏，因此，在运行中必须注意轴向力的变化，确保压缩机的安全稳定运行。

(二) 轴向推力的平衡方法

1. 叶轮对称排列

使叶轮背靠背排列，可以大大减少剩余轴向力，故通常总是在气体中间冷却后，变更叶轮进口的朝向。这种平衡轴向力的缺