

油气田用往复式 天然气压缩机组使用与维护

◎ 李德禄 刘 虎 刘 勇 秦飞虎 编著



石油工业出版社

油气田用往复活塞式 天然气压缩机组使用与维护

李德禄 刘 虎 刘 勇 秦飞虎 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从往复式天然气压缩机组的正确使用入手,阐述了油气田用往复式天然气压缩机及驱动机的运行、维护保养、常见故障及排除方法和使用安全要求,对往复式天然气压缩机及驱动机的工作原理、结构、主要零部件、控制系统及安装基础等作了介绍,具有理论性、实用性和可操作性。

本书可作为从事往复式天然气压缩机组操作维护使用及管理人员的培训教材,也可供相关的工程技术人员和大专院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

油气田用往复式天然气压缩机组使用与维护 / 李德禄等编著.
北京:石油工业出版社,2014.6

ISBN 978-7-5183-0203-1

I . 油…

II . 李…

III . ①往复式压缩机-活塞式压缩机-石油化工用压缩机-使用方法

②往复式压缩机-活塞式压缩机-石油化工用压缩机-维修

IV . ① TE964 ② TH457

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 136582 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010) 64523562 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2014 年 6 月第 1 版 2014 年 6 月第 1 次印刷

710×1000 毫米 开本:1/16 印张:19.25

字数:351 千字

定价:80.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序



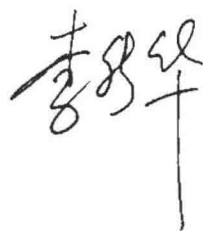
我国是世界上最早发现并利用天然气的国家，2000多年前的西汉时期就在今四川邛崃钻成了世界第一口天然气井，比欧洲最早利用天然气作为能源的英国早了1300余年。但是到1949年前我国天然气年产不足0.1亿立方米；新中国成立后，天然气工业得到了快速发展：1976年产量首次突破100亿立方米，1996年产量200亿立方米，2007年上升为700亿立方米，2011年天然气年产突破1000亿立方米，预计到2020年我国天然气年产量将达到2000亿立方米。

天然气生产中，随着气田压力的降低，产量会大幅度下降。为解决低压天然气开采问题，1961年川渝气田开展了用高压气带低压气的天然气喷射器现场试验，因高压气源和效率低限制了推广应用。20世纪70年代末，我国引进了国外往复式天然气压缩机，于1982年7月在四川兴隆场气田兴3井投入使用，取得了良好的增压开采效果，从此拉开了利用往复式天然气压缩机进行低压气井增压开采的序幕。据不完全统计，目前我国用于增压开采、气举采油、气举排水采气、增压输送、凝析气田循环注气、天然气处理、储气库注气/采气等的往复式天然气压缩机组达2500台以上。仅中国石油西南油气田分公司所在川渝气田，2012年底已建成气田天然气增压站142座、运行机组299台、年处理天然气65.6亿立方米，占当年生产气量的49%，天然气压缩机组已成为天然气生产不可缺少的重要装备。

我国的油气田用往复式天然气压缩机制造工业历经从无到有、从小到大、从低压到高压的发展历程，以中国石油集团济柴动力总厂成都压缩机厂、江汉石油钻头股份有限公司武汉压缩机分公司为代表的油气田往复式天然气压缩机制造企业加工制造水平已跻身世界前列，产品覆盖低速整体式和以电动机、柴油发动机、天然气发动机驱动的中、高速分体式天然气压缩机组等多个系列，最大功率6000kW，最高工作压力50MPa。

为了更好地发挥往复式压缩机对油气开采的装备保障作用，提升使用、维护和管理的水平，由中国石油天然气股份有限公司勘探与生产公司委

托具有 20 多年天然气压缩机设计、制造、维修经验的中国石油济柴动力总厂成都压缩机厂组织编著了这本《油气田用往复式天然气压缩机组使用与维护》。该书从往复式天然气压缩机组的正确使用出发，重点讲述了往复式天然气压缩机及驱动机的运行、维护保养、常见故障及排除方法和使用安全要求，同时对往复式天然气压缩机及驱动机的工作原理、结构、主要零部件、控制系统及安装基础等作了介绍。该书紧密结合现场应用，具有理论性、实用性和可操作性，可作为从事往复式天然气压缩机组操作维护使用及管理人员的培训教材，也可供相关的工程技术人员和大专院校师生参考。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '李华' (Li Hua). The characters are stylized and fluid, with a long vertical stroke extending downwards from the right character.

前 言



往复式天然气压缩机由于技术成熟、吸排气压力范围广、对处理天然气（原料气）气质要求低、可使用多种驱动机（天然气发动机、柴油机和电动机）等特点，广泛地应用于常规天然气和非常规天然气（煤层气）的增压开采、排水采气和凝析气田的循环注气提高凝析油采收率、储气库注气/采气以及油田气举采油等气（油）开采生产中。

随着油气田开采对往复式天然气压缩机需求的增加，我国的往复式天然气压缩机的制造也从无到有得到快速发展，现已能生产 170 ~ 630kW 系列低速整体式天然气压缩机组和 100 ~ 6000kW 系列高速分体式天然气压缩机组，并逐步取代进口成为我国气（油）开采的重要装备。

为更好地使用与维护往复式天然气压缩机，我们以目前广泛使用的、具有代表性的国产 ZTY 系列低速整体式和 FY 系列中、高速分体式天然气压缩机为例，在成都压缩机厂使用近 20 年的《压缩机组使用操作培训教材》基础上，编写了这本《油气田用往复式天然气压缩机组使用与维护》。

本书由中国石油集团济柴动力总厂成都压缩机厂组织编著，重点是往复式天然气压缩机组使用与维护，为了本书的完整性和方便读者，对压缩机、驱动机及控制系统也作了简要介绍，并将典型压缩机组平面布置图、常用单位及换算、油气田往复式压缩机常用标准和规范作为附录。

本书的编写工作得到了中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司以及西南油气田分公司、塔里木油田分公司、长庆油田分公司、吐哈油田分公司和青海油田分公司的大力支持和帮助；颜光宗为本书的编写给予了指导，在此谨向对本书编写进行指导、支持和帮助的单位领导和专家致以衷心的感谢。由于编写人员水平有限，不当之处难免，恳请读者提出宝贵意见，以便改进完善。

目 录

第一章 概述	1
第一节 往复式活塞式压缩机的发展历程	1
第二节 压缩机分类	3
第三节 压缩机的相关术语	8
第二章 往复式活塞式压缩机工作原理与结构	11
第一节 往复式活塞式压缩机工作原理	11
第二节 往复式活塞式压缩机结构	35
第三节 油气田常用往复式压缩机	79
第三章 驱动机	95
第一节 电动机	95
第二节 天然气发动机	118
第四章 辅助系统	132
第一节 气路系统	132
第二节 润滑系统	139
第三节 冷却系统	151
第四节 仪表控制系统	157
第五节 整体式天然气压缩机组动力系统	168
第五章 往复式活塞式压缩机组安装调试与试运转	174
第一节 安装基础	174
第二节 往复式活塞式压缩机组安装调试	187
第三节 往复式活塞式压缩机组试运转	209
第六章 往复式活塞式压缩机组运行、维护与状态监测技术	216
第一节 运行与维护安全性要求	216
第二节 往复式活塞式压缩机组的运行	218

第三节	往复活塞式压缩机组的维护·····	231
第四节	状态监测技术·····	240
第七章	往复活塞式压缩机组常见故障判断及处理·····	252
第一节	压缩机常见故障判断及处理·····	252
第二节	电动机常见故障判断及处理·····	270
第三节	燃气发动机常见故障判断及处理·····	278
附录 1	典型压缩机组附图·····	284
附录 2	常用单位及换算表·····	287
附录 3	油气田往复式压缩机常用标准和规范·····	294
参考文献	·····	296

第一章 概述

第一节 往复活塞式压缩机的发展历程

早在三四千年前，我们的祖先便掌握了利用压气鼓风机从事冶炼的技术，最早是由兽皮做成的皮老虎；公元三十一年，东汉的杜诗创造了用水力鼓风的设备——水排；一直沿用到现在木制的“风箱”，可以说是现代往复式压缩机的雏形。

到 1757 年，英国人威尔肯松（Wilkinson）提出的一个叫“金属风箱”的专利，它有两个气缸，由水轮机驱动。1777 年瓦特（Watt）进一步设计了由蒸气驱动的压缩机。上述的机器都是单级的，主要用作冶炼鼓风。

1829 年和 1830 年在英国和法国相继提出了多级结构的压缩机，但当时的多级压缩机都无级间冷却。多级压缩机采用级间冷却是 1849 年由冯·雷迅（Van Rathen）建议的。

活塞压缩机作为一种工业设备是陆续进入各个领域的。

1834 年，医生潘根（Perking）发明了世界上第一台活塞制冷机，压缩机进入人工制冷领域，当时用的制冷剂是乙醚，而第一台工业用的氨压缩式制冷机，又经过 40 年后才由林德（Linde）创造出来。

1877 年，宋梅娄（Sommeiler）发明了风钻，开始了用压缩空气作为传递力能的介质，为压缩机的应用开辟了广阔的天地。

1877 年，第一次通过压缩、冷却及膨胀实现了氧的液化；1892 年，实现空气的液化，从此为分离空气获得氧、氮及其他稀有气体创造了条件。

1911 年，第一套合成氨装置投入生产，从此压缩机进入化学工业的领域，并且是化工厂中极其重要的设备。

1939 年，第一台超高压压缩机问世，其排气压力为 150MPa，用于高压聚乙烯的生产。

可是在相当长的时期内，往复式压缩机的可靠性是与其重要性不相称的。特别关键的是气阀，因为它的可靠与否对机器有很大影响，为此人们对气阀的制造和研究一直非常重视。早在 1894 年，贺尔碧格（Hoerbiger）制造了著名的贺尔碧格阀——网状阀。1950 年，柯使塔格略兰（Costagliola）建立了气阀运动的微分方程，尽管当时限于条件，实用尚困难，但却为以后定量研究气阀阀片运动的规律打下了良好的基础，现在许多的研究工作都是在此基础上发展起来的。

往复式压缩机中另一个被关注的是滑动密封。滑动密封问题包括两个方面：其一是密封元件的耐久性——寿命；其二是密封元件因需用油润滑而带来的气体被污染问题。对于前者是致力于研究摩擦、磨损和润滑问题，而后者，人们却因此创造了许多新型的、气体不为油污染的压缩机。

1916 年，柯柏林（Corblin）发明了膜式压缩机，并于 1922 年在他自己的工厂制造成功。这种压缩机不仅气体不被油污染，而且能做到完全不漏气，一级压缩达 2.5MPa，但排气量很小，一般不超过 100m³/h。

1934 年，采用有自润滑性能的石墨作密封元件，实现了气缸不用油润滑；但石墨比较脆，石墨磨损后的粉尘也能污染气体。

1935 年，苏尔寿（Sulzer）公司研制成了利用曲折密封原理的迷宫式压缩机，它取消了金属密封元件，也实现了气缸无油润滑，但这种结构制造要求极高，并且严重的泄露使其热效率较一般压缩机低。

1952 年，具有自润滑性能的塑料聚四氟乙烯开始用于压缩机作密封元件。由于聚四氟乙烯经过适当改制后的巨大优越性，因此很快得到了推广，已成为实现气缸无油润滑的主要手段。

在 19 世纪 40 年代末到 20 世纪初的几十年中，随着世界生产的发展，科学技术及工艺的进步，往复压缩机也获得了很大的发展和进步。在技术方面，它所取得的成果有：

（1）现代压缩机的可靠性和耐久性已大大提高，可以连续运行 8000h 而中间无需修理，每年的开工率达 95% 以上。

（2）由于采取了低的阀隙流速和大的缓冲容积，使压缩机的功率消耗进一步降低。

（3）在中、大型范围内，由于采用了对动式等动力平衡性能好的结构形式，使压缩机转速成倍提高，从而使压缩机的尺寸和质量相对大大减小。

（4）在一定的压力范围内，气缸能比较容易地实现无油润滑，使被压缩的气体不再为油所污染。

近年来,在中、小型范围内,压缩机普遍实现机组化,采用弹性支撑来代替基础,使机器的安装和基建费用都显著降低。

随着人们对环境噪声污染的严格控制,努力使压缩机噪声限制在 85dB (A) 以下,在这方面也取得了很大的成果。

最近,优化设计理论取得了很大进展,并且已开始进入压缩机的设计领域,它必将推动压缩机向更新的水平前进。

在我国,目前压缩机制造业已经发展成为机械制造业的一个重要组成部分。全国已有几十个专业生产工厂,制造着各种类型的压缩机,已能基本满足国民经济各部门的需要。可以预期,随着我国现代化逐步实现,在全国现有和未来的压缩机工作者的努力下,国产压缩机也将进入世界先进的行列。

第二节 压缩机分类

一、按工作原理分类

依据压缩机的工作原理,分为动力式压缩机和容积式压缩机两大类。

动力式压缩机又称为速度式压缩机,它首先使气体流动速度提高,增加气体动能;然后使气流速度有序降低,使动能转化为压力能。其结构特点是压缩机具有驱使气体获得流动速度的叶轮。

动力式压缩机涵盖引射器在内,但以透平压缩机为主流。

透平压缩机亦称涡轮压缩机,分为轴流压缩机、径流(离心)压缩机和其他类型(如轴流/径流组合)压缩机。

容积式压缩机,是直接对一可变容积中的气体进行压缩,使该部分气体容积缩小、压力提高。其结构特点是压缩机具有容积可周期变化的工作腔。

按主要零件的运行状态,容积式压缩机又可分为往复压缩机和回转压缩机。

以轴驱动的往复压缩机,主要分成(往复)活塞压缩机和隔膜压缩机。

自由活塞压缩机隶属于往复压缩机。

回转压缩机中有单轴回转压缩机、双轴或多轴回转压缩机。

单轴回转压缩机主要有:液环压缩机、滑片压缩机、回转(滚动)活塞

或摇摆活塞压缩机、单（轴）螺杆压缩机。

双轴或多轴回转压缩机主要有：（双轴）螺杆压缩机、双转子（罗茨）压缩机、齿式压缩机。

以上的压缩机分类方法和国际标准化组织（ISO）对压缩机和分类完全一致。参看图 1-1 至图 1-3。各种压缩机热力性能与结构特点比较参看表 1-1。

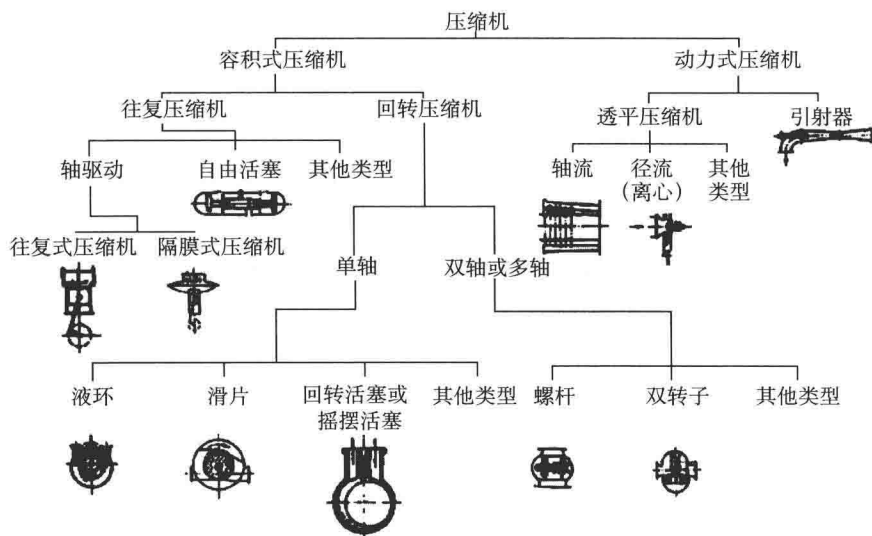


图 1-1 国际标准化组织对压缩机的分类

表 1-1 各种压缩机热力性能与结构特点比较

名 称	往复式压缩机	回转式压缩机	离心式压缩机	轴流式压缩机
排气压力（MPa）	一般 0.2 ~ 32， 最高 700	一般 0.2 ~ 1， 最高 4.5	一般 0.2 ~ 15， 最高 70	一般 0.2 ~ 0.8
容积流量（m ³ /min）	0.1 ~ 400， 最小 0.01	0.1 ~ 500	10 ~ 3000	200 ~ 10000
调节性能	排气压力稳定	排气压力稳定	排气压力随量变化	排气压力随量变化
绝热效率	较高	一般	一般	较高
结构、零部件	复杂	较简单	简单	简单
可靠性	一般	高	高	高
寿命	一般	较长	长	长

续表

名 称	往复式压缩机	回转式压缩机	离心式压缩机	轴流式压缩机
制造要求	一般	高	高	高
安装维修	较复杂	较简单	较简单	较简单
工作腔润滑	有、无	有、无	无	无
气体带液工作适应性	差	强	不可	不可

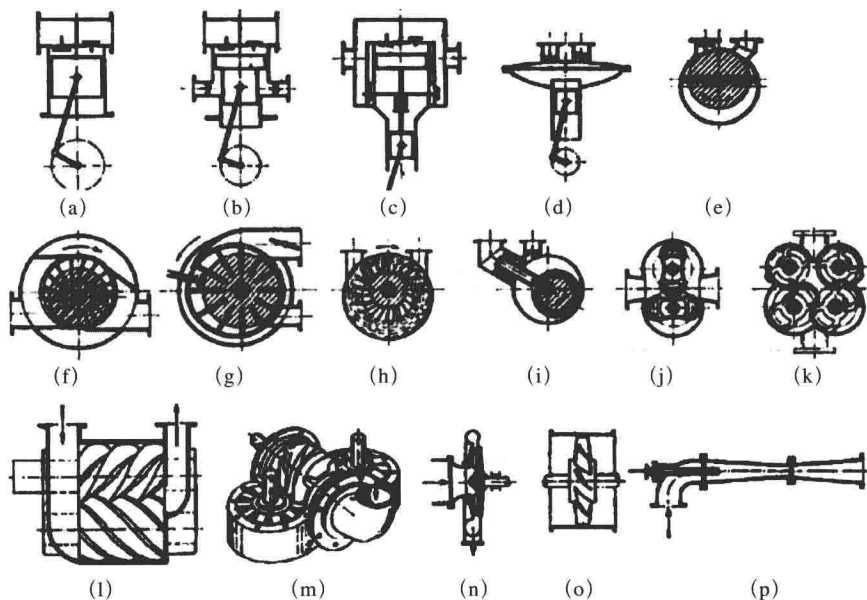


图 1-2 压缩机的基本形式

(a) ~ (m) 为容积式压缩机; (h) ~ (p) 为动力式压缩机

(a) 单作用往复式活塞式压缩机; (b) 级差式、双作用往复式活塞式压缩机; (d) 机械—液力驱动的隔膜式压缩机; (e) 滑片式真空泵 (用于真空获得的仅具有两片滑片的多室压缩机); (f) 滑片式压缩机 (具有薄的钢滑片的多室压缩机); (g) 滑片式压缩机 (具有干转子或喷冷却液的多室压缩机); (h) 液环式压缩机 (叶轮形转子和液环组成工作室的多室压缩机); (i) 旋转活塞式压缩机; (j) 罗茨压缩机 (定容式鼓风机, 最高排气压力 0.5bar); (k) 罗茨压缩机 (定容式鼓风机最高排气压力 1.8bar); (l) 双轴螺杆式压缩机; (m) 单轴螺杆式压缩机; (n) 离心式压缩机; (o) 轴流式压缩机; (p) 喷射式压缩机 (主要用于真空获得)

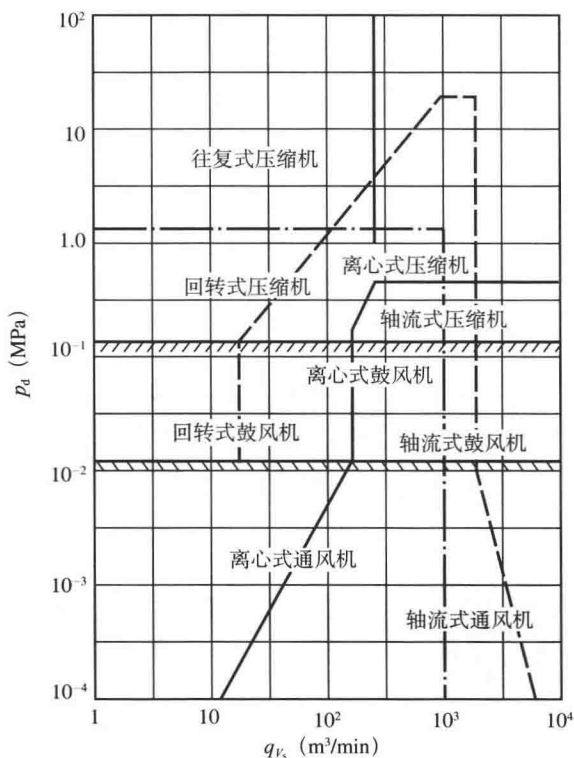


图 1-3 动力与化工用压缩机各种形式的应用范围

二、按压缩介质分类

按压缩介质的不同，对压缩机进行分类，是压缩机的又一种重要分类方法。

不同气体的属性特点、物理化学性质的区别明显，知晓压缩机所压缩的介质是何种气体，对于确保工业气体在制造或使用过程中的安全性，有最直接的作用。

我国的机械行业标准明确规定了压缩机的铭牌上应标明其压缩介质为何种气体。

常见压缩介质及压缩机主要用途详见表 1-2。

表 1-2 压缩机主要压缩介质及用途

用 途			气体	工作压力 (MPaG)	用途	气体	工作压力 (MPaG)	
化 学 工 业	合气氨	氮、氢混合气		15, 20, 32, 60	石 油 炼 制	催化裂化	裂解气、 空气	0.95, 0.25 ~ 0.4
		循环气		升压 3 ~ 4		重整	烃	2.75
		空气		3.5, 7.0		脱硫	氢	7, 11, 16
		氮气		2.5 ~ 3.5, 7.0 ~ 8.0		加氢精制	氢	2.6 ~ 3.6, 7 ~ 9
		氨气		1.5, 3.5				15, 32
	合成尿素	二氧化碳		15, 20	采 油	钻井	空气、氮气	8, 15, 25, 35
	合成甲醇	氮、氢、氧、 二氧化碳		5, 32		油田注气	二氧化碳、空气	5 ~ 13
					天然气		15 ~ 50	
	制取乙烯、 丙烯	裂解气		3.7	气 体 输 送	气态管道 输送	甲烷	7 ~ 9
		乙烯气		1.9			多种成分烃	1.6, 2.5, 4
		丙烯气		1.8			城市煤气	0.3, 0.5
	高压聚乙烯	乙烯	一次	15 ~ 25		气态装瓶	甲烷、稀有气体	22, 24
			二次	150, 320			氧、氮	15
	氯乙烯	乙烯、氧					1.0	二氧化碳
			合成气	0.5			乙炔	2.1
		丙烯腈	丙烯气	2.0			丙烷	1.6
			空气	0.2			氨	1.5
	合成橡胶	丙烯气	2.0	制 冷	气体分离	空气	0.5 ~ 0.8, 2.5, 22	
		生成气	1.6				焦炉气氢分	焦炉气
	合成纤维	乙炔	1.2	空 气 动 力	水压机	空气	15, 35	
		空气	0.35 ~ 1.2		风力器械	空气	0.7 ~ 1.2	
								二氧化碳
	正丁醛	合成气	3.0		仪表控制	空气	0.4 ~ 0.6	
		空气 (脱钴)	3.0		车辆制动	空气	0.4 ~ 0.6	
	醋酸乙烯 (乙烯气相法)	乙烯、氧	0.6 ~ 0.8		喷涂、喷雾	空气	0.1 ~ 0.3	
					内燃机启动	空气	3.0 ~ 3.5	
					武器系统	空气	150 ~ 300	



三、按压缩级数分类

按压缩级数可分为单级压缩机、两级压缩机和多级压缩机三类。

(1) 单级压缩机。气体仅通过一次工作腔或叶轮压缩。

(2) 两级压缩机。气体顺次通过两次工作腔或叶轮压缩。

(3) 多级压缩机。气体顺次通过多次工作腔或叶轮压缩，相应通过几次便是几级压缩机。

在容积式压缩机中，每经过一次工作腔压缩后，气体便进入冷却器中进行一次冷却；而在动力式压缩机中，往往要经过两次或两次以上叶轮压缩后，方才进入冷却器进行冷却，并把每进行一次冷却的数个压缩级合称之为一个“段”。

压缩级数、压缩段数的多少，反映了压缩机结构的复杂程度、压力的高低、外形尺寸的大小以及价值的高低。

四、按容积流量分类

按容积流量的大小可分为微型压缩机、小型压缩机、中型压缩机和大型压缩机四类（表 1-3）。

表 1-3 压缩机按流量分类

名称	容积流量 (m ³ /min)	名称	容积流量 (m ³ /min)
微型压缩机	< 1	中型压缩机	10 ~ 100
小型压缩机	1 ~ 10	大型压缩机	≥ 100

第三节 压缩机的相关术语

(1) 容积流量。

容积流量在我国曾被称为排气量和输气量。压缩机的容积流量，是指在额定排气压力下压缩机在单位时间内排出的气体容积值；该值在排气端测得

并折算到压缩机进口状态，即压缩机第1级进气处的压力与温度时的容积值。此值尚应计入级间分离掉的水分折算成蒸汽的容积，还应计入气体压缩性的影响。当压缩级间有中间洗涤等而出现中间抽气或者中间补气时，还应加入或减去该部分气体折算到进口状态的容积。

容积流量用 q_v 表示，单位为 m^3/s ， m^3/min ， m^3/h 及 L/h 。

(2) 标准容积流量。

压缩机标准容积流量也称供气量，是指压缩机在单位时间内排出的气体容积值折算到标准状态之值，并不计入级间分离掉的水分及抽气量。供气量的标准状态是：绝对压力 0.1013MPa 、温度 0°C 、干燥气体。

(3) 进气 / 排气压力。

压缩机的进气压力也称吸气压力，是最初进入压缩机的气体压力。它应在压缩机的第1级工作腔进气法兰接管处测得。

压缩机的排气压力，是指最终排出压缩机的气体压力。它应在压缩机的末级工作腔排气法兰接管处测得。当未特别指明时，压缩机的进气压力、排气压力皆系表压力值。

多级压缩机中，每一级工作腔排出气体的压力称为该级的排气压力或级间压力。

(4) 压力比。

压缩机的压力比也称总压力比，是指压缩机末级排气接管处的绝对压力与第1级进气接管处的绝对压力之比。简言之，压缩机的压力比是压缩机排气绝对压力与压缩机进气绝对压力之比。

压缩机各级排气绝对压力与该级进气绝对压力之比，称为该级压力比。

除了气体固有的特定物性，压力比对于气体压缩后的温升起决定性的作用。

(5) 进气 / 排气温度。

压缩机的各级进气温度、排气温度之间的关系式是：

$$T_d = T_s \varepsilon^{\frac{n-1}{n}} \quad (1-1)$$

式中 T_d ——级的排气温度，K；

T_s ——级的进气温度，K；

ε ——级的压力比；

n ——级的压缩过程指数。