



机械设备故障诊断实用技术丛书

往复机械故障诊断 及管道减振实用技术

杨国安 编著

中國石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

机械设备故障诊断实用技术丛书

往复机械故障诊断及 管道减振实用技术

杨国安 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书是《机械设备故障诊断实用技术丛书》之第5分册。本分册共分两部分：第一部分是第一章至第四章，主要说明往复压缩机工作原理、基本结构、常见故障及故障信号表征；第二部分是第五章，重点介绍压缩机组管道振动及减振措施。本书精选了大量典型实例用以说明故障诊断的思路。

本书内容详尽，通俗易懂，以解决实际问题为根本，可供现场从事机械设备管理与维护工作的工程技术人员使用，同时本书也为高等工科院校研究生或本科生在深入理解故障诊断理论体系方面提供了详尽的参考资料。

图书在版编目（CIP）数据

往复机械故障诊断及管道减振实用技术 / 杨国安编著.
—北京：中国石化出版社，2012.1
（机械设备故障诊断实用技术丛书；5）
ISBN 978-7-5114-1334-5

I. ①往… II. ①杨… III. ①往复式压缩机-故障诊断 ②往复式压缩机-减振 IV. ①TH457

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 276701 号

未经本社书面授权，本书任何部分不得被复制、抄袭，或者以任何形式或任何方式传播。版权所有，侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址：北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编：100011 电话：(010)84271850

读者服务部电话：(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 10.5 印张 222 千字

2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

定价：30.00 元

序

现代化工业生产越来越大型化、高速化、自动化，特别是石化、冶金、电力等过程工业，设备投资大，连续生产流程长，机械装备故障停机可以造成重大经济损失，甚至导致机毁人亡的重大事故。现代生产和某些特种装备对人的依赖程度越来越低，对设备的依赖程度越来越高，对故障的预示和诊治越来越重要。设备状态监测和故障诊断作为一门工程技术，是 20 世纪 60 年代以后才发展起来的。

近二三十年来国内设备诊断技术的研究开发异常活跃，发展迅速，在工厂应用经常取得出人意外的实效，设备诊断技术在工厂企业得到了普及和应用。为此，迫切需要提供一批适合不同层次科技人员特别是企业一线技术人员实用的书，同时也需要一些适合本科生和研究生学习用的参考书。杨国安教授编著的《机械设备故障诊断实用技术丛书》就是应这一需求编写的。

对设备的状态监测和故障诊断，实际上从机器诞生之日就已产生。当时人们通过听、摸、看、闻机器的振动、温度、噪声等异常情况，凭借工匠的经验，可以判断机器某些故障并采取对策或者修复。设备状态监测和故障诊断作为一门工程技术正在成为信息、监控、通信、计算机和人工智能等集成技术，并逐步发展成为一个多学科交叉的新学科。我曾在工厂工作 32 年，1979 年开始研究应用设备故障诊断技术。我很赞赏本丛书的出版，因为它既有基础理论知识，又有工程应用技术，对企业工程技术人员是一套难得的实用技术丛书；对缺少工程实践经验的院校研究生也是很好的参考书。

设备状态监测及诊断技术，是将运行中的机器看成“活”的，它时时刻刻在“说话”——发出信息，对其中的故障征兆信息进行采集、处理、分析，对故障进行早期诊断、预测，在机器没损坏之前查明故障原因并适时采取修复、预防和改进对策。故障诊断工作的决定作用在人，好的仪器有了真正掌

握了故障诊断技术的人才能够发挥作用。本丛书较全面地介绍了机械设备故障诊断技术的基础知识，包括设备故障诊断中的机械振动基础及信号处理，将理论与实践紧密结合，由浅入深，是一套很好的基础理论培训教材，也可供自学之用。本丛书还介绍了机电设备故障诊断实用技术、转子动平衡实用技术、轴承和齿轮故障诊断实用技术，并总结汇集了编者的若干科研成果，其内容实践性强，直观，便于掌握，可指导设备诊断工程实践。我对编者近几年不遗余力地编写这部内容丰富的丛书所付出的辛苦和做出的贡献表示钦佩。

机械装备故障诊断终极目标是有效防治故障，确保机器健康。其一是除故障：探测原因，有的放矢，消除故障；其二是防发展：早期预警，防微杜渐，预防故障；其三是防发生：查明根源，根治维修，防止故障。机械故障诊断是一门新兴的工程科学技术，它源于工程实践又应用于工程实践。企业技术人员作为机械故障诊断的“临床医生”会发现许多故障的征兆、积累丰富的诊断经验。希望读者对本书提出宝贵意见，使其不断修改完善。本人和作者同在一个科研团队，我们团队愿与读者一道，务实，求真，协力，创新，为提高我国设备诊断理论和技术水平作出应有的贡献。

深信丛书的出版能够在推广和普及机械故障诊断技术，培养更多的从事故障诊断的工程技术人才和后备力量方面发挥重要作用。是为序。

中国工程院院士 高金吉

编者的话

设备诊断技术是在设备管理和维修的基础上发展起来的。设备诊断技术就是掌握设备的现在状态与异常或故障之间的关系，以预测未来的技术。它包含两方面的内容：一是对设备的运行进行监测；二是在发现异常情况后对设备的故障进行分析和诊断。

设备诊断技术首先出现在欧洲，主要是以英国倡导的设备综合诊断学为指导，在上世纪 60~70 年代，英国机械保健和状态监测协会最先开始故障诊断技术，美国的发展则是以后勤学为指导的设备服务维修，美国在 1961 年开始执行阿波罗计划后，出现了一系列因故障造成的事故。1967 年在美国航天局的倡导下，由美国海军研究室主持成立了美国机械故障预防小组，积极从事技术诊断的开发，他们在航空、航天、军事及核能等尖端领域处于领先地位。

日本则吸收了英美两国的优点，提出了全员维修(TPM)的观点。日本的新日铁自 1971 年开始开发诊断技术，1976 年达到实用化。日本的钢铁、化工、电力等行业处于世界领先。

我国自 1979 年才初步接触开发诊断技术，1984 年开始真正在企业推广故障诊断技术，并逐步形成了一支较有实力的故障诊断研究队伍，做出了许多卓有成效的研究成果，特别是自上世纪末，随着计算机技术的发展，彻底改变了故障诊断系统的软、硬件面貌，各种数据采集，分析，诊断功能的仪器被相继开发出来，各种专家系统也不断涌现，给工程技术人员提供了更有效的手段来分析解决问题。但问题也相继出现，现场工程技术人员由于受到专业知识的限制，面对琳琅满目的分析功能、界面、曲线，知其然不知其所以然；专家系统由于受到样本数量的影响，其可靠性、准确性也受到质疑。这使得故障诊断技术浮于研究层面，未有效地深入到基层，深入到生产第一线。应该讲故障诊断技术是一门实践性极强的应用科学，研究内容应本着“从实践中来，到实践中去”的原则，切实解决好生产一线存在的问题。

编者从上世纪 90 年代初开始接触大型装备预知维修技术，先后为几十家国有大型企业开展讲座和项目合作。通过这些项目的开展和与现场工作人员的广泛交流，使编者深深地认识到设备维护工作不仅直接关系到企业的生产效益和安全，而且与节能降耗和低碳环保也密切相关，甚至成为关键制约因素。当前故障诊断工作的推广应用最大的障碍是从事故障诊断技术的现场人员知识结构不合理和缺乏。他们懂得设备的结构、运行机制，却对时频变换不清楚，应该讲，故障诊断技术背后有严谨的数学知识作支撑。众多学科相互渗透构成了故障诊断技术的知识体系。有人说故障诊断就是传感器，有人说

是信号处理,有人说是数据挖掘、专家系统等等。这就充分说明了故障诊断技术知识结构的交叉性和多样性,编者近年来为很多企业培训故障诊断技术人员,和他们的亲密接触丰富了编者,也使编者感到编写一套适合于从事设备管理和维护工作的工程技术人员的实用技术丛书的必要性和迫切性。编者曾在2007年出版了《机械设备故障诊断实用技术》,该书的出版受到了企业设备管理维护人员的广泛欢迎,曾连续多次印刷。近几年通过与企业技术人员交流感到2007年出版的单行本内容上过于简捷,生产一线人员希望在内容体系、原理方法方面更细化些。鉴于此,编者决定出版一套系列丛书,以满足广大生产一线的设备管理和维修人员的需要。近几年,以一己之力编写这套丛书,虽殚精竭虑,仍力所不及,在这套丛书的编写过程中,现场技术人员和我的研究生提供了巨大的帮助。如果这套丛书对您有微薄之用,望不忘感念他们的辛勤付出。

本套丛书的目的是要较全面地对机械设备故障诊断技术的基础知识、机理、方法和应用技术进行较详尽地解释说明。尽量用一目了然的方式明确地说明关于故障诊断技术的一切。本书的宗旨是能用图形说明的尽量不去用文字解释,能用文字解释的不用数学去推演,即使用到的数学也尽量是初等的,从故障诊断基本概念出发,努力用最简单的数学来分析故障机理,而只有在确实需要时才使用复杂的方法。本书的内容参考了大量文献,包括网络上的一些优秀资源,综合汇编而成,这些内容为本书增添了许多新的知识。编者将在书后参考文献中尽量列出,争取不遗漏每一篇参考文献。但由于编者的疏忽可能存在遗漏现象,在此向遗漏参考文献的作者致以歉意,同时对这些优秀资源的作者和编者致以衷心的感谢!

这套丛书共分九分册,分别介绍了设备故障诊断中的机械振动基础、信号处理基础、旋转机械故障诊断实用技术、转子动平衡实用技术、往复机械故障诊断及管道减振实用技术、滚动轴承故障诊断实用技术、滑动轴承故障诊断实用技术、齿轮故障诊断实用技术和电动机故障诊断实用技术。在编写过程中,编者尽量照顾到整套丛书内容的系统性和完备性,尽力做到各分册间内容不重叠,但考虑到读者有选择地使用本套丛书的方便,有些内容各分册间是相通的,于是编者特意安排了适当的重叠,以加强每本分册的相对独立性,使每本分册也形成一个单独的知识体系,如第一分册和第二分册作为故障诊断技术的基础知识,各分册都会用到,但在每分册中也有相关知识的简介。

第一分册机械振动基础重点说明故障诊断中常用到的基本概念及基本原理的讲解和阐述,有针对性地介绍了与故障诊断技术相关的振动诊断标准。有些标准不同国家间可能略有差异,书中尽量同时列出,相同标准可能存在不同版本,考虑到目前现场的使用习惯,只要内容未变,也尽量照顾使用习惯列出,比如ISO2372,目前已有ISO10816,但考虑到使用习惯仍以ISO2372列出。

第二分册信号处理基础是本套丛书中的难点内容,重点说明信号处理的基础知识。本分册对数学基础有一定的要求,特别在傅里叶变换理论的阐述上,重点参考了国外的

经典教材和一些优秀的网络资源，对傅里叶变换的说明有独到之处，读者细读之必有所收获。该分册还较详尽地阐述了常用的故障诊断方法，这些知识对加深理解3~9分册的内容大有裨益。

第三分册旋转机械故障诊断实用技术重点说明旋转机械常见的故障诊断方法，该部分内容较成熟，也是故障诊断技术的重点内容之一。该分册还介绍了常用旋转机械和联轴器的点检方法和点检标准，这部分内容是企业实现预知维修和安全生产的重要保障。

第四分册转子动平衡技术主要说明轴及轴系动平衡原理，重点说明轴系现场动平衡技术，现场动平衡作为一门实用技术，广泛应用于多转子连接的轴系系统，简便易行，行之有效。书中以实例介绍了现场动平衡过程中的一些经验和方法。

第五分册往复机械故障诊断及管道减振技术主要说明往复压缩机的失效形式、故障诊断方法和常用点检方法。重点说明管道减振技术，阐述管道减振必须和往复机械整体考虑，标本兼治，才能做到本质安全，书中还以编者亲历的实例作了简要说明。往复机械故障诊断一直是世界性的难题，因此可参考的资料很少，且不系统。本书部分内容是编者结合自己多年来在往复机械及管道减振方面解决现场实际问题过程中所取得的一手资料和经验整理编辑而成。

第六分册滚动轴承故障诊断实用技术、第七分册滑动轴承故障诊断实用技术和第八分册齿轮故障诊断实用技术三分册均主要说明三种常用零件的失效形式，重点说明常用的故障诊断方法，简要说明各自的点检方法和标准，三分册分别介绍了基于油样分析的故障诊断技术。其中第六分册还介绍了滚动轴承的基础知识，以便读者查阅更方便。第七分册介绍了滑动轴承常用材料和液体润滑的基本原理，以便读者在分析滑动轴承故障时，能够与润滑理论相结合考虑，因为滑动轴承任何形式的故障无不与润滑油膜有关，至于气体润滑轴承只为增广读者知识面而考虑。第八分册介绍了齿廓啮合基本定律，以便读者在分析齿轮故障时，能充分考虑到齿轮齿廓形状，因为齿轮的大多数故障都与齿廓曲线被破坏有关，最常用的渐开线齿廓满足五线合一，不同的故障形式归结起来都是不同程度地破坏了五线合一原则。滚动轴承和滑动轴承作为独立的零件很难制定其零件的点检标准，且这样做也不存在任何意义，因为这两种零件的使用离不开机器本身，因此，所列点检标准为其所安装的相关机械设备的点检标准。

第九分册电动机故障诊断实用技术简要说明常用电动机的基本原理，以便读者分析故障时，能够结合电动机运行机制加以考虑。重点说明电动机振动故障诊断和电气故障诊断方法，简要介绍了电动机温度和噪声故障诊断方法。考虑到电机日常维护，本书还介绍了电动机的点检方法和日常修理和保养方法。

总之，故障诊断技术的终极目标是保证设备长周期、安全稳定运行，投入大量资金购买最现代化的仪器设备是必要的，但首要任务是充实现场工程技术人员的知识储备，包括理论和实际的经验。现在从事故障诊断的人员，通过望、闻、问、切能对设备的运

行状况作出评价的越来越少。当振动异常的时候，对于常见故障，能借助仪器得出诊断结论，能够对问题给出合理解释的人才越来越缺乏，故障诊断工作的决定作用在人，不在仪器。仪器仅仅是人的工具，如果人不行，再好的仪器也无用；好的仪器有了有准备的人才能够发挥作用。真正掌握了故障诊断技术，加上得力的仪器设备，才能使设备维护人员大有用武之地，而成为别人无法替代的人才！

近几年，编者有幸得到国家自然科学基金的支持，对科学基金的研究深化了编者对故障诊断技术的认识，如果说企业合作项目丰富了编者的实践知识，那么，国家自然科学基金项目则提升了编者的基础理论水平，使编者在更高的层面上更加理性地分析、判断每一种故障形式，所以，对近年来国家自然科学基金项目(50875016)的支持表示感谢。

本分册在资料查阅、收集、整理和编排上，我的研究生周昕、张森做了卓有成效的工作，这本书的出版与他们的辛勤付出密不可分。在此对周昕、张森同学表示谢意。

由于本套丛书的编写工作十分浩大，限于编者水平，恳切希望读者对本套丛书中出现的错误和不妥之处提出批评指正，编者将不胜感激。编者网址：[www. ygazd. cn](http://www.ygazd.cn)，E-mail：[yangga@mail. buct. edu. cn](mailto:yangga@mail.buct.edu.cn) 或 [ygapublic@163. com](mailto:ygapublic@163.com)。

谨以此书献给辛勤工作在生产第一线的机械设备管理维护人员和有志于故障诊断技术研究的科学技术人员！

编 者

2011 年 10 月于北京化工大学

目 录

第一章 往复式压缩机基础知识	(1)
第一节 往复式压缩机的工作循环	(1)
一、往复式压缩机的理论压缩循环	(1)
二、往复式压缩机的实际压缩循环过程	(3)
第二节 多级压缩机的原理及优点	(6)
一、多级压缩机的原理	(6)
二、多级压缩机的优点	(6)
第三节 往复式压缩机的主要参数及其性能指标	(7)
一、转数 n	(7)
二、活塞行程 s	(7)
三、活塞平均速度 C_m	(7)
四、级数	(8)
五、列数	(8)
六、压力比 ε	(8)
七、容积效率	(8)
八、排气量 V	(9)
九、排气系数	(10)
十、排气温度 T_d	(10)
十一、功率与效率	(11)
十二、活塞力	(12)
十三、惯性力及其平衡措施	(13)
第四节 往复式压缩机的分类、结构型式与型号表示法	(14)
一、往复压缩机的内部结构	(14)
二、往复式压缩机的分类	(21)
三、往复式压缩机型号的表示方法	(22)
第二章 往复式压缩机的故障类型及故障原因	(24)
第一节 压缩机热力参数异常及故障原因	(24)
一、排气量降低	(24)
二、吸、排气压力异常	(25)
三、温度异常	(26)
四、工况改变对压缩机主要参数的影响	(27)

五、油路故障	(29)
第二节 压缩机主要零部件的机械故障	(31)
一、气阀故障	(31)
二、活塞环常见故障及分析	(41)
三、活塞杆断裂	(43)
四、连杆螺栓断裂	(47)
五、曲轴断裂	(50)
六、活塞卡住、咬住或撞裂	(52)
第三节 压缩机故障振动	(55)
一、曲柄连杆机构的运动惯性力	(55)
二、压缩机故障振动和不正常声音	(56)
第四节 故障振动诊断实例	(58)
第三章 往复式压缩机点检及在线实时监测	(70)
第一节 点检基础知识	(70)
一、点检的含义	(70)
二、点检的目的	(70)
三、点检的分类	(70)
四、点检的主要环节	(71)
五、点检员所需的技能	(72)
第二节 往复压缩机点检	(72)
一、往复压缩机视觉点检	(73)
二、往复压缩机听觉点检	(74)
三、往复压缩机嗅觉点检	(75)
四、往复压缩机触觉点检	(75)
五、往复压缩机的测量点检	(75)
第三节 推广点检工作应注意的问题	(75)
第四节 压缩机在线实时监测	(76)
第四章 往复式压缩机的调试与维护	(80)
第一节 压缩机试车	(80)
一、压缩机循环油润滑系统的试车	(80)
二、气缸与填料函注油系统的试车	(81)
三、压缩机冷却水系统通水试验	(82)
四、压缩机的驱动系统单独试车	(83)
五、压缩机的无负荷试车	(84)
六、管线吹除	(86)
七、压缩机的负荷试车	(87)

第二节 压缩机正常操作及维护检修	(90)
一、气体置换	(90)
二、正常操作启动	(90)
三、日常维护	(91)
四、停车	(92)
五、压缩机的检修管理	(93)
六、清洗	(95)
第三节 润滑油和冷却水	(98)
一、压缩机的润滑和对润滑油的要求	(98)
二、压缩机油的品种和选用	(100)
三、润滑油消耗量及更换	(105)
四、冷却水质技术要求	(107)
第五章 压缩机管道振动与气流脉动	(110)
第一节 管道振动的危害及现状	(110)
第二节 压缩机机组管道共振	(110)
一、管路的振动系统	(111)
二、管道共振	(112)
第三节 气流脉动分析	(113)
一、气流脉动与压力脉动	(113)
二、气流脉动引发管道振动机理	(116)
三、气流脉动对压缩机经济性 & 可靠性的影响	(117)
四、压力脉动的控制标准	(118)
第四节 脉动压力的相关理论及计算	(118)
一、在直管单元中的声学传递矩阵(TA)	(119)
二、节流单元的声学传递矩阵(TP)	(125)
三、容器单元的声学传递矩阵	(128)
第五节 API 618 涉及脉动及振动的规定	(129)
一、控制脉动和振动设计工作流程	(130)
二、管道内脉动压力控制标准	(130)
三、管道设计的振动标准	(131)
四、对于固有频率(MNF)的限定	(133)
五、最大许用激振力	(134)
第六节 管道振动减振措施	(134)
一、消除频率共振	(134)
二、消减气流脉动	(135)
三、转移、耗减振动能量	(138)
第七节 管道振动故障的诊断实例	(139)

附录 A 往复压缩机振动标准	(149)
附录 B 管道振动标准	(151)
参考文献	(153)

第一章 往复式压缩机基础知识

第一节 往复式压缩机的工作循环

一、往复式压缩机的理论压缩循环

往复式压缩机的主要工作机构包括：气缸、活塞、进气阀与排气阀(均为自动开启和关闭的单向阀)。

往复式压缩机的工作循环是指：活塞在气缸内往复运动一次，气体经过一系列状态变化后，又回到初始吸气状态的全部工作过程。往复式压缩机的工作原理可以通过工作循环加以说明。

理论压缩循环对压缩机的工作情况作了以下的简化和假设：

- (1) 循环过程中气体无泄漏；
- (2) 气体在流动过程中没有阻力损失；
- (3) 排气过程终了时，气缸内的气体被全部排尽；
- (4) 吸、排气过程中气体的温度保持不变；
- (5) 气体压缩过程按不变的热力指数进行，即过程指数是一个常数；

往复式压缩机的理论循环如图 1-1 所示。

其中，图(a)示意：缸内没有气体，容积为零，活塞从左止点开始右行时，吸气过程开始，并假定吸气过程压力不变。

图(b)示意：活塞运行到右止点，4-1 水平线表示吸气过程。

图(c)示意：活塞开始左行，缸内气体容积逐渐缩小，气体压力不断升高。1-2 线表示压缩过程。

图(d)示意：当压力升高到一定值时，顶开排气阀，开始排气。2-3 水平线表示排气过程。3-4 线表示排气终了至吸气的瞬间变化过程。

在这样一个理论循环全过程中，吸气、排气过程只有气缸内气量的变化，而认为气体的状态没有发生变化，只是气体的流动过程，所以不属于热力过程。只有在压缩过程中气体状态才发生变化，属于热力过程。

图 1-1 为往复式压缩机的理论循环压容图，又称为理论示功图。示功图上 4-1-2-3-4 所包围的面积称为理论指示功，它是在这一理论循环过程中活塞对气体所作的功。其值为吸入、压缩和排出过程功的总和。其中规定：活塞对气体做功为正，气体对活塞做功为负，则理论循环总功为

$$W = W_{\text{吸}} + W_{\text{压}} + W_{\text{排}}$$

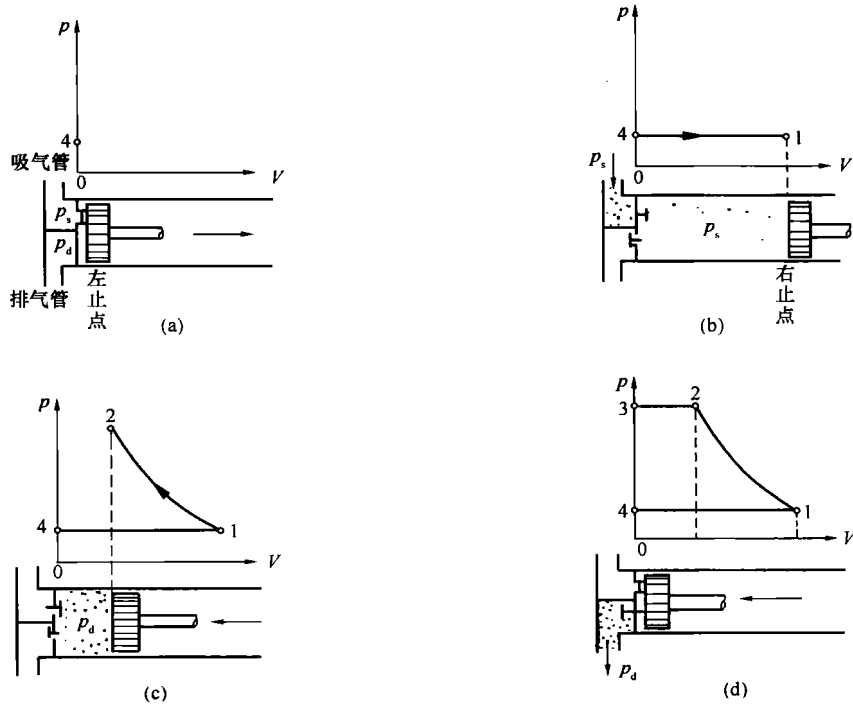


图 1-1 往复式压缩机理论循环压容图

其中

$$W_{\text{吸}} = -p_1 V_1$$

$$W_{\text{压}} = \int_2^1 p dV = - \int_1^2 p dV$$

$$W_{\text{排}} = p_2 V_2$$

$$W = -p_1 V_1 - \int_1^2 p dV + p_2 V_2 = \int_1^2 V dp$$

而 $\int_1^2 V dp$ 的积分，正好就是图 1-1 中 $p-V$ 图上 1-2-3-4-1 所围成的面积；

不同的压缩过程所构成的循环，其理论循环功也不同。常见的压缩过程有等温压缩（图 1-2 中的 1-2）、绝热压缩（图 1-2 中的 1-2''）和多变压缩过程（图 1-2 中的 1-2'）。

（1）等温理论循环功 W_{is}

理想气体
$$W_{\text{is}} = p_1 V_1 \ln(p_2/p_1) \tag{1-1}$$

实际气体
$$L_{\text{is}} = p_1 V_1 \ln(p_2/p_1) (Z_1/Z_2)/2Z \tag{1-2}$$

式中 W_{is} ——每一循环等温理论循环功（指示功），J；

V_1 ——每一循环理论吸气量， m^3 ；

p_1 、 p_2 ——吸、排气压力（绝），Pa；

Z_1 、 Z_2 ——对应吸、排气状态的压缩性系数。

（2）绝热理论循环功 W_{ad}

理想气体

$$W_{ad} = L_{ad} = p_1 V_1 k / (k - 1) [(p_2/p_1)^{(k-1)/k} - 1] \quad (1-3)$$

实际气体

$$W_{ad} = L_{ad} = p_1 V_1 k / (k - 1) [(p_2/p_1)^{(k-1)/k} - 1] (Z_1 + Z_2) / 2Z \quad (1-4)$$

式中 k ——绝热指数

(3) 多变理论循环功 W_{pol}

理想气体

$$W_{pol} = p_1 V_1 m' / (m' - 1) [(p_2/p_1)^{(m'-1)/m'} - 1] \quad (1-5)$$

实际气体

$$W_{pol} = p_1 V_1 m' / (m' - 1) [(p_2/p_1)^{(m'-1)/m'} - 1] (Z_1 + Z_2) / 2Z \quad (1-6)$$

式中 m' ——多变指数, 对于石油化工大、中型压缩机, 可选取 $m' = k$ 。

三种不同压缩过程的理论循环在 $p-V$ 图上的比较, 见图 1-2, 当 $1 < m' < k$ 时, $W_{is} < W_{pol} < W_{ad}$ 。

图 1-2 表明, 在压缩过程初始、终了的压力均为 p_1 、 p_2 的条件下, 等温理论循环 ($m' = 1$) 耗功最小, 绝热理论循环 ($m' = k$) 耗功最大, 介于两者之间的多变理论循环耗功居中。可见, 创造较好的冷却条件, 使压缩过程接近于等温过程, 从理论上讲, 可以减少功耗。

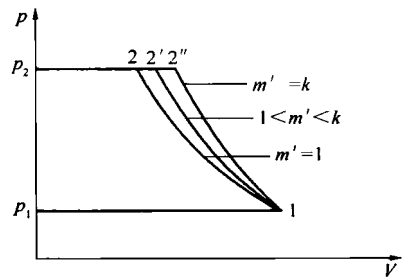


图 1-2 不同压缩过程理论循环功的比较

在实际生产过程中, 压缩过程大多介乎于绝热过程和等温过程之间, 虽然气体有热量向外界传出, 但并未达到等温过程, 即 $1 < m' < k$, 将这样的过程称为多变过程。

二、往复式压缩机的实际压缩循环过程

1. 实际示功图的分析

分析理论压缩循环时曾对压缩机的工作情况作出了一系列的简化和假设, 而往复式压缩机的实际循环却是一个复杂的循环过程。一般采用示功仪测量气缸内气体体积和压力的变化曲线——示功图来加以分析。往复压缩机实际示功图, 如图 1-3 所示。

由于压缩机在压缩过程终了时, 不允许活塞与气缸盖发生撞击, 实际上活塞与气缸盖间保留着一个安装间隙。当排气过程结束以后, 活塞开始返回行程, 气缸容积逐渐扩大, 残留在缸内的高压气体开始膨胀, 当缸内气体压力降至低于进气压力时, 进气阀打开, 开始了下一个循环的进气过程。活塞每往复运动一次, 都重复着气体膨胀—进气—压缩—排气四个过程。图 1-3 中 1-2 曲线表示实际压缩过程、2-3 曲线表示实际排气过程、3-4 曲线表示实际膨胀过程、4-1 曲线为实际吸入过程。1-2-3-4-1 表示压缩机的一次实际循环。整个循环过程中, 1-2 和 3-4 可以视为热力学过程, 其他过程可以当作为气体流动过程。如果将实际压缩循环和理论压缩循环(图 1-3 中虚线所示)相对比, 两者间存在以下的差别。

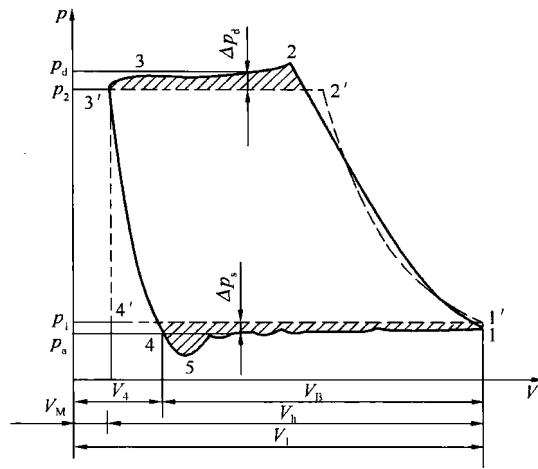


图 1-3 实际示功图

(1) 余隙与膨胀

往复式压缩机的余隙容积包括：活塞在左、右止点处(对于立式压缩机是指活塞在上、下止点处)活塞端面与气缸盖之间的间隙，以及气缸内壁与活塞端面至第一道活塞环间的环形间隙、气缸容积至气阀阀片间的整个通道容积等。这些间隙的存在使得缸内气体无法排净。吸气之前，余隙容积内的高压气体先要进行膨胀，实际上等于减少了吸气量，降低了气缸利用率。因此，要求余隙容积尽量小一些，但又不能太小，否则由于热膨胀和受力拉伸作用，活塞和活塞杆将发生撞缸事故。

(2) 气阀阻力损失

由于气流通道和气阀存在一定阻力，所以气流通过时，必然产生阻力损失。因此气缸内的压力比入口管道内气体压力(又称名义吸入压力)要低，吸入阀从开始开启到全开还要克服较大的局部阻力，图中点 4 为吸入阀开始开启，点 5 对应吸入阀全开。同理，气缸内实际排气压力应高于排出管道气体压力(又称名义排出压力)，排出阀在点 2 处增加了局部阻力。示功图上吸入线和排出线呈波浪状，是由于气流速度随活塞速度以及阀片的惯性振动而变化，导致阻力损失不稳定而产生的。

(3) 热交换的影响

实际循环过程中热量交换对气体的影响是相当复杂的，压缩机工作一段时间以后，气缸各部位的温度逐渐趋于稳定，它高于气体的吸入温度，低于排气温度。气体在每一个循环过程中热量交换的情况也是不断变化的。压缩开始时气体的温度低于气缸的温度，于是气体吸收了一部分热量，此时的压缩过程为 $m' > k$ 的多变压缩过程。随着压缩过程的进行，气体温度不断提高，气体与气缸的温差逐渐缩小，到某一瞬间，温差等于零时，压缩过程也演变成绝热过程， $m' = k$ 。继续压缩，当气温高于气缸壁温时，气体通过气缸壁向外界散热，气体进行 $m' < k$ 的多变压缩。膨胀过程，开始时气温比壁温高，一边对外放热，一边膨胀降温， $m' > k$ 。中间某瞬时， $m' = k$ 。随后 $m' < k$ 。