

专著 出版基金资助项目  
ZIZHU XIANGMU

西北工业大学出版基金资助项目

ZHUANZHU

# 指尖密封的分析与设计

陈国定 苏 华 张延超 著

ZHUANZHU

西北工业大学出版社

西北工业大学出版基金资助项目

# 指尖密封的分析与设计

陈国定 苏 华 张延超 著

西北工业大学出版社

**【内容简介】** 本书在介绍先进密封技术及其在航空发动机及附件系统中应用的基础上,围绕指尖密封这一先进密封结构的分析与设计,就指尖密封的结构和密封原理,指尖密封的静态特性和动态特性,指尖密封优化设计理论和方法,流体动压指尖密封的结构与性能,以及指尖密封相关试验和试验技术进行了较为全面、系统的分析和阐述。全书共8章,是作者近年来从事指尖密封科学研究的成果以及国内、外最新的指尖密封研究进展的汇总。

本书可供从事密封技术和机械设计相关领域的科研人员、工程技术人员使用,也可以作为高等院校机械工程类专业教师和研究生的教学参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

指尖密封的分析与设计/陈国定,苏华,张延超著. —西安:西北工业大学出版社,2012.9  
ISBN 978-7-5612-3477-8

I. ①指… II. ①陈…②苏…③张… III. ①机械密封—应用—航空发动机 IV. ①TH136  
②V23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 223629 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpu.com

印 刷 者:陕西宝石兰印务有限责任公司

开 本:787 mm×960 mm 1/16

印 张:15.375

字 数:332 千字

版 次:2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷

定 价:40.00 元

## 主要符号表

- $R_w, D_w$ : 指尖密封外圆半径, 直径;  
 $R_g, D_g$ : 指尖梁根圆半径, 直径;  
 $R_r, D_r$ : 密封靴内圆半径, 直径; 转子半径, 直径;  
 $R_n, D_n$ : 密封靴外圆半径, 直径;  
 $h_x$ : 密封靴高度;  
 $t$ : 密封片厚度;  
 $m$ : 指尖密封中的密封片数;  
 $\Delta$ : 密封靴宽度角;  
 $\delta$ : 密封靴缝隙宽度角;  
 $n$ : 一个密封片上的指尖梁数; 转子转速;  
 $g_d$ : 后挡板下游保护高度;  
 $\Delta s$ : 迟滞量;  
 $\Delta r$ : 转子径向位移;  
 $\epsilon$ : 迟滞率;  
 $q$ : 泄漏率;  
 $\varphi$ : 泄漏因子;  
 $\psi$ : 线磨损率;  
 $S$ : 过盈量;  
 $\Delta P$ : 流体压力差;  
 $P$ : 密封靴与转子之间的接触压力;  
 $K$ : 指尖梁结构刚度;  
 $K_j$ : 密封靴与转子之间的接触刚度。

# 前言

密封是航空发动机及附件系统中重要的零、部件。一方面因为密封在航空发动机及附件中有着十分广泛的应用,另一方面密封及其技术极大地影响着航空发动机及附件的工作性能、寿命、可靠性和经济性,再加之先进密封技术在改善和提升航空发动机性能上的优异表现,都使得近年来先进密封结构和技术的研究成为航空发动机技术领域十分受关注的分支。先进密封技术对提高航空发动机性能、寿命、可靠性和经济性的作用已经毋庸置疑,并且随着航空发动机性能提高伴随的循环参数增高、转子转速加大、结构刚度降低,包括密封工作条件的苛刻化和功能要求的提高,先进密封技术的应用以及与之相关研究的价值将更加凸现出来。

指尖密封是近年来提出的一种先进密封结构形式,与航空发动机中应用最广泛的篦齿密封和新近得到应用的刷密封相比,因其性价比最好而具有很大的优越性,应用于航空发动机及附件的内流系统密封和轴承腔密封前景十分看好。除此之外,指尖密封在民用蒸汽轮机和重载燃气轮机的应用也有潜在的可能,事实上已经有学者在从事这一方面的研究工作。

正如在其他密封类型,乃至工业系统结构零、部件的技术成熟化和先进化进程中科学研究所担当的开拓和促进作用一样,指尖密封未来能够更好地应用于航空发动机以及其他透平机械,也有赖于科学研究工作的开展,以解决和应对实际应用中出现的的问题和面临的挑战。国内、外的学者和工程技术人员正是因此而开展了近 20 年的指尖密封理论研究和工程尝试方面的工作,将指尖密封的研究和工程应用不断地推向一个个新的、更高的水平,指尖密封及其技术也因此而日渐成熟和先进,工程应用的前景也日渐端倪。有鉴于此,十分有必要针对迄今为止有关指尖密封分析设计研究进行系统和全面的总结和梳理,以便掌控已经具备的学术知识基础,明晰尚未竟的研究工作,确定富有学术意义和工程价值的研究方向;另外,面对指尖密封将应用于工程实际的前景,相关工程技术人员也有系统认识、了解指尖密封分析设计技术的需求。本书正是出于上述考虑和目的而撰写的。

本书是笔者及其学生 10 年来从事指尖密封科学研究和技术工作的总结,研究范围遍及指尖密封工作原理分析、性能分析和动力学分析、优化设计和试验研究,并且旁及相关基础理论和其他指尖密封结构的拓展研究,其中许多内容在国内、外是首次进行的研究工作的成果反映。笔者藉此构建本书的内容主线,并通过参阅国内、外这一领域的文献资料,实现了对指尖密封分析与设计理论与技术的系统阐述。作为第一本阐述指尖密封分析设计理论与方法的专著。本书的特点是具有很好的系统性,从航空发动机及附件的密封装置和技术阐述,到指尖密封的分析与设计,既各成体系亦因此构成了全书的系统;具有较高的学术水平,笔者及其学生多年研究和成果构建的内容主体,客观上保证了本书的学术价值;内容取舍得当,以指尖密封

分析与设计为主题,通过相关主题的内容延拓,很好地体现了全书内容的相关性和继承性,并且没有以冲淡主题为代价。希望笔者的努力能够有助于读者更好地了解、掌握本书的内容,并对读者从事的技术工作有所帮助。

全书分为8章。第1章在一般意义上对密封技术及其应用做了简单阐述;第2章介绍了航空发动机及附件系统中密封的功用和主要类型;第3章探讨了指尖密封的结构和密封原理;第4章和第5章的内容主要是指指尖密封的静态特性和动态特性的分析;第6章是指尖密封优化设计的理论和方法;第7章探讨了流体动压指尖密封的分析与设计;第8章阐述了指尖密封的试验技术和相关试验工作。苏华副教授撰写了第4,6,7章,张延超博士撰写了第5,8章,其余各章由陈国定教授撰写。全书由陈国定教授统稿。

在本书出版之际,笔者十分感谢国家自然科学基金、航空科学基金、高等学校博士学科点专项科研基金、航空支撑科技基金、陕西省自然科学基金、留学人员回国科研启动基金、教育部现代设计及转子轴承系统重点实验室访问学者基金的支持,没有这些科学基金的支持,本书是不可能出版的。

感谢西安交通大学的朱均教授和西北工业大学的严传俊教授,他们在笔者申请西北工业大学专著出版基金的过程中对本书做了热情的推荐。

感谢中国燃气涡轮研究院周连杰高工和中国商用飞机发动机有限责任公司罗健高工,他们在相关试验工作中给予了宝贵的支持和配合。

感谢申晓龙博士、吴银娥硕士、雷艳妮硕士、李二圣硕士、王峰硕士、王栋硕士、江岸英硕士、马晓林硕士、宗兆科硕士、朱三朋硕士、余承涛硕士和王红艳硕士在相关研究工作中的贡献和配合。

感谢孙恒超博士、刘曼丽硕士、何小江硕士和齐放硕士在书稿打印和插图绘制方面所做的工作。

最后,笔者要特别感谢西北工业大学专著出版基金委员会对本书出版的资助,以及西北工业大学出版社编辑李阿盟女士在本书定稿和出版过程中的热情支持和帮助。

著者

2012年7月

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第 1 章 绪言                 | 1  |
| 1.1 密封技术简述               | 1  |
| 1.2 密封的分类和密封方式           | 6  |
| 1.3 工程中密封技术的典型应用         | 10 |
| 参考文献                     | 13 |
| 第 2 章 航空发动机及附件系统的密封      | 14 |
| 2.1 航空发动机及附件系统的密封功能      | 14 |
| 2.2 航空发动机及附件系统的密封类型及密封原理 | 25 |
| 参考文献                     | 38 |
| 第 3 章 指尖密封的结构和密封原理       | 40 |
| 3.1 指尖密封的概念、类型和构成        | 40 |
| 3.2 指尖密封的结构和加工           | 44 |
| 3.3 指尖密封的密封原理和性能         | 48 |
| 3.4 压力平衡型指尖密封简介          | 51 |
| 参考文献                     | 54 |
| 第 4 章 指尖密封的性能            | 56 |
| 4.1 指尖密封的结构特征            | 56 |
| 4.2 指尖密封的性能特征及其描述        | 56 |
| 4.3 指尖密封性能分析的有限元方法       | 63 |
| 4.4 指尖密封性能的热效应           | 67 |
| 4.5 结构和装配参数对指尖密封性能的影响    | 74 |
| 参考文献                     | 84 |
| 第 5 章 指尖密封的动态性能          | 86 |
| 5.1 指尖密封动态性能分析的意义、特点和内容  | 86 |
| 5.2 指尖密封动态性能分析的主要模式      | 88 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 5.3 基于等效动力学模型的指尖密封动态性能分析   | 90  |
| 5.4 指尖密封动态性能的有限元分析         | 104 |
| 参考文献                       | 129 |
| <b>第6章 指尖密封的优化设计</b>       | 131 |
| 6.1 指尖密封优化设计的策略及方法         | 131 |
| 6.2 指尖梁型线的优化设计             | 138 |
| 6.3 指尖密封结构参数的优化设计          | 146 |
| 6.4 指尖密封的博弈优化设计            | 151 |
| 6.5 指尖密封结构参数与性能的关联性        | 163 |
| 参考文献                       | 179 |
| <b>第7章 流体动压指尖密封</b>        | 180 |
| 7.1 流体动压指尖密封的结构和密封原理       | 180 |
| 7.2 流体动压指尖密封的性能            | 183 |
| 7.3 基于等效动力学模型的流体动压指尖密封性能分析 | 193 |
| 参考文献                       | 203 |
| <b>第8章 指尖密封性能试验</b>        | 205 |
| 8.1 指尖密封性能试验的意义和内容         | 205 |
| 8.2 指尖密封性能试验的设备和方法         | 206 |
| 8.3 指尖密封性能试验数据的处理          | 218 |
| 8.4 指尖密封性能试验               | 218 |
| 8.5 指尖密封理论分析与试验研究的印证浅析     | 235 |
| 参考文献                       | 237 |

# 第1章 绪 言

## 1.1 密封技术简述

### 1.1.1 密封的定义和作用

#### 1. 密封的概念和定义

密封的简单概念可以用如图 1-1 所示来说明。工程中存在着这样一种情况,设备中两个构件之间因功能或工艺需要存在着间隙,且在间隙两侧存在着不同流体的两个区域。由于存在间隙,所以两个区域中的流体会发生交换,为防止这种交换的发生,需要在间隙区域形成阻碍流体交换的“密封”。两个构件表面可以是静止的,也可以有相对运动。区域中的流体可以有物理相的不同,也可以有压力和温度的差异。密封功能的实现可以通过间隙之间加装“堵塞物”(密封件)实现,也可以通过形成间隙的两个表面结构的变化实现。

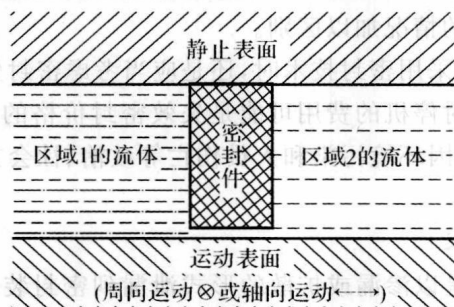


图 1-1 密封的概念图示

密封的概念是非常广泛和多义的,在工程中会因多种需要而出现不同的密封形式。即使在与一般意义上的工程领域相距甚远的生物界,密封也会以各种形式出现,例如动物隔膜、蝶形瓣膜或血的凝固等,这些组织结构或生理反应,从机理上讲都可以归类于“静密封技术”<sup>[1]</sup>。

在一般意义上的密封系统中,起密封作用的零、部件称为密封件,放置密封件的部位称为密封箱或密封室,较复杂的密封,特别是带有辅助系统的,多称为密封装置。

密封的功用是阻止两个表面之间因为存在间隙而形成的泄漏。表面之间的间隙因为零、部件的功能或工艺需要是客观存在的,因此,通过两个表面之间间隙的流体泄漏是不可避免的。密封只是一个程度问题,它无法(至少一段时间之后)绝对禁止流体泄漏的发生。

被密封的流体一般以下面的三种形式通过密封件发生泄漏。

(1)扩散。在浓度差的作用下,被密封流体可以通过最小的工程间隙,甚至密封材料或机器壳体的孔隙泄漏,这种泄漏称为扩散。由于典型气体或蒸气分子的尺寸小于 $1\text{ nm}$ ( $1\text{ nm}=10^{-9}\text{ m}$ ),因此如果要将气体或蒸气的泄漏控制在一个很高的水平,则需要使用非常昂贵的密封系统。以扩散形式为主的泄漏密封成本是很高的。扩散过程受浓度梯度的驱动,随机的分子运动有助于消除浓度差。

(2)对流泄漏。旋转部件引起的流体运动可使流体通过密封间隙向外泄漏,这种泄漏称为对流泄漏,在非接触型密封中较为常见。同样,旋转部件引起的流体运动也可使外界物质通过密封间隙向内移动,从而将灰尘颗粒或液滴从外部环境输送到被密封的空间内。对流泄漏的程度对密封间隙及其周围构件的几何形状很敏感。

(3)压力流泄漏。由压力差引起的流体通过密封间隙的泄漏称为压力流泄漏。当其他条件不变时,因压力流引起的泄漏率随压力梯度增加而增加,而随流体的黏度增加而减小。

泄漏的绝对避免是不可能实现的,这不仅是因为物理因素的制约,而且也是因为经济因素的制约。超乎实际无谓地提高密封功能,不仅在技术上十分难以实现,而且必然以经济性下降作为代价。随着工业技术的发展进步,不断升高的压力、温度和滑动速度需求对密封技术提出了更高的技术要求,这更需要在密封的性能实现和经济性上取得合理的平衡,提出有效的密封解决方案。此外,在某些情况下,例如当泄漏物只是空气或水蒸气时(这样的泄漏可能被视为无害的),或者设备内部的流体内漏密封问题,这时在密封技术采用上应当更为顾及经济性,需要和那些密封有害流体泄漏的情况加以区别。

即使如此,当选择密封或采用密封技术时,还是应当考虑密封失效后造成的后续成本。密封装置的修理费用和设备临时停机的费用可能是失效密封价格的几百甚至几千倍,有些非常重要的密封场合,还需要考虑因环境污染和人员伤亡等政治、社会方面的影响。这些都是密封设计中需要注意的。

### 2. 密封的实质和基本要求

被密封的流体介质往往是以渗漏或扩散的形式泄漏到密封装置的彼侧,其原因在于密封处存在间隙(包括宏观间隙或微观间隙),被密封流体在压力差或运动驱使等的作用下通过间隙而泄漏。因此,密封的实质一般来讲就是减小或消除泄漏间隙。不过随着动态控制密封间隙和形成反向泵吸作用的技术应用,可以在较大密封间隙条件下实现流体的密封功能,这是对传统的密封实质解释的一种扩展。

对密封的基本要求是保证结合部分的密闭性、工作可靠、使用寿命要长;并且力求密封装置的结构紧凑、系统简单、制造维修方便、成本低廉;由于大多数密封件为易损件,还应保证它有互换性,以便实现通用化、标准化、系列化。

#### 1.1.2 密封及密封技术的重要性

密封技术在现代工业生产和科学技术发展中具有十分重要的作用。无论是提高科学技术

发展和工业生产技术水平,还是在技术改造和设备改造与更新方面,密封技术都占据着重要的地位和承担着重要角色。密封技术对提高机器设备效率(例如减少容积损失可提高机器的容积效率,减少摩擦损失可提高机器的机械效率等),节省能耗,节约原材料,提高机器设备工作的可靠性,对安全和环境保护、开发新能源和发展新技术都有着重要的作用,其意义绝非仅仅限于阻止流体的跑、冒、滴、漏等方面。

在很多情况下,相对于整台机器设备而言,从体积上或者从成本上来看,密封元件和装置是很不起眼的,密封技术也不属于尖端技术的范畴。但在相当多的实际工程中,密封技术却起着相当关键的作用,甚至于一个价格低廉的密封元件的失效,可能会造成价值数百万元甚至数亿元的经济损失,有时还可能会造成不可挽回的环境污染和人员伤害等灾难。正是如此,这时的密封设计构成了整个工程系统设计的重要甚至关键环节,并因此而可能掣肘着工程设计的品质和可靠性。

诠释密封及其技术重要性的一个经典事例就是 1986 年美国“挑战者”号航天飞机点火升空 73 s 后爆炸,7 名宇航员全部遇难的灾难事件。这次事故造成的直接经济损失达到 12 亿美元,而事故原因仅仅是因为一个价值几美元的 O 形密封圈的可靠性出了问题。由于固体燃料火箭助推器段的柄脚和叉形接头处的 O 形圈装置设计缺陷,在火箭点火后造成柄脚和叉形接头接触部位的突然膨胀,处于低温条件下的密封圈材料因弹性变差而使得其弹性变形无法跟随上泄漏间隙的扩张,导致温度高达  $3\,000^{\circ}\text{C}$  的燃气从产生的界面缝隙中喷出,酿成了大爆炸。如图 1-2 所示为“挑战者”号航天飞机火箭助推器的 O 形圈密封系统的原始缺陷和其后的结构改进。

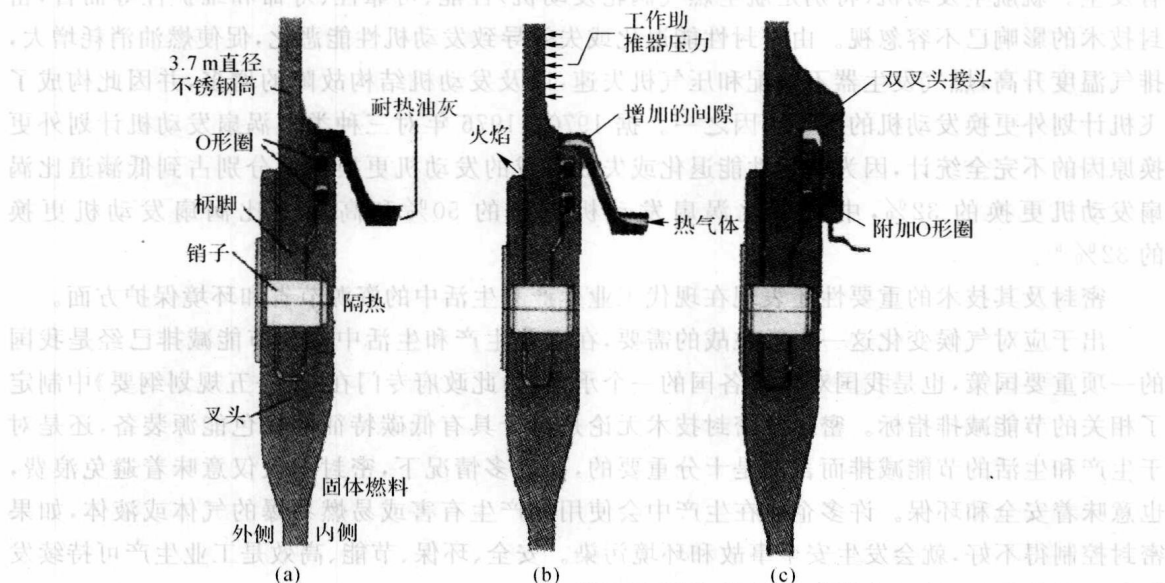


图 1-2 火箭助推器 O 形圈密封系统的原始缺陷和结构改进<sup>[1]</sup>

(a)(b)有密封缺陷的设计; (c)重新设计的密封系统

因密封件失效而造成的航天事故远非仅此一例。苏联联盟 11 号飞船 3 名宇航员死于密封舱中的原因也是归于航天器中密封元件的失效;我国的火箭也有过因密封泄漏事故造成卫星不能准确入轨的故障<sup>[2]</sup>。在美国关于液体火箭发动机 SSME 涡轮泵的故障统计中,密封装置的故障占到了涡轮泵故障总数的 12.5%<sup>[3]</sup>。

对于某些设备装置,密封及其技术甚至构成了设备功能实现的极为重要的环节。例如美国大力神 II 洲际导弹在 900 多处使用了 340 组橡胶密封件,这些密封多数处于关键部位,以至于密封件的失效寿命构成了导弹储存寿命的主体<sup>[4]</sup>。

密封及其技术在航空发动机中的重要作用也是十分明显的。这一方面表现在提升航空发动机性能水平,先进密封技术已经与气动、性能和传热学等领域技术同样成为航空工程界努力的方向,而且近年来的研究表明,改进和发展密封技术是提高发动机性能的一个新的有着巨大潜力的领域,具有投资少、收益大的特点;另一方面则表现为先进密封技术在提高发动机性能和寿命的同时,能够有效地减少和降低发动机的燃油消耗率和飞行成本。一个典型的事例是,在发动机高压压气机出口卸荷腔处采用刷密封代替常规篦齿密封后,发动机推力可以增大 2% 左右,相应的耗油率降低了 2%。类似这样的事例有信服力地表明,在部件设计中做很大努力才可使发动机性能有 0.1% 的改进,但若通过使用先进密封技术,有可能较容易地使发动机性能获得 1%~2% 的提高<sup>[5]</sup>。

随着航空燃气涡轮发动机性能的提高,循环参数(压力、温度)增高,转子转速加大,结构刚度降低,这使得密封的工作条件更日趋恶劣,由于密封问题而导致发动机故障和事故的情况时有发生。就航空发动机(特别是航空燃气涡轮发动机)性能、可靠性、寿命和维护性等而言,密封技术的影响已不容忽视。由密封性能退化或失效导致发动机性能恶化,促使燃油消耗增大,排气温度升高,燃气发生器不匹配和压气机失速,以及发动机结构故障的增多,并因此构成了飞机计划外更换发动机的主要原因之一。据 1970—1976 年对三种类型涡扇发动机计划外更换原因的不完全统计,因为密封性能退化或失效造成的发动机更换比例分别占到低涵道比涡扇发动机更换的 32%,中涵道比涡扇发动机更换的 50% 和高涵道比涡扇发动机更换的 32%<sup>[6]</sup>。

密封及其技术的重要性还表现在现代工业生产和生活中的资源节省和环境保护方面。

出于应对气候变化这一人类挑战的需要,在工业生产和生活中实现节能减排已经是我国的一项重要国策,也是我国对世界各国的一个承诺,为此政府专门在《十一五规划纲要》中制定了相关的节能减排指标。密封及密封技术无论是对于具有低碳特征的绿色能源装备,还是对于生产和生活的节能减排而言都是十分重要的,在许多情况下,密封不仅仅意味着避免浪费,也意味着安全和环保。许多企业在生产中会使用或产生有害或易燃易爆的气体或液体,如果密封控制得不好,就会发生安全事故和环境污染。安全、环保、节能、高效是工业生产可持续发展所追求的方向,而这些都与密封技术紧密相关。

可以列举一些事例说明密封应用的重要性和广泛性。汽车发动机中采用高密封活塞环消除端口窜气以提高缸压,使燃烧更充分,减少了废气排放,也大大提升了发动机的节油率。轴

承油封、回转轴封和凸轮轴油封等密封装置在发动机和变速器中的应用非常普遍,其目的都是为了提高发动机的性能和效率。化肥生产中使用的工艺介质多为易燃易爆、具有污染性的危险性流体,生产设备的密封装置十分重要,比如氨压缩机的轴封,既承担着防止工艺气体被油污染,也承担着避免气体泄漏造成过度污染的任务。油轮和集装箱船等类型船舶中的艉轴管密封将海水与艉轴管内的润滑油分开,防止润滑油向船外泄漏污染海水,以及防止海水侵入艉轴管内,密封装置的性能直接影响到船舶的航行安全和海洋环保。目前最主要的抽油井举升方式中使用的整筒式有杆柱塞泵,柱塞与泵筒之间的弹性密封装置降低了流体泄漏量,保证了泵的效率。

航空业的能源消耗,特别是发达国家航空业的能源消耗在整个工业和运输界能源消耗中所占份额越来越大。以美国为例,1970年,美国航空业的燃油消耗占到整个美国石油总需求的10%,到了1985年,这一数字达到了15%。随着高涵道比发动机的出现,这个数字还将进一步上升。考虑到迄今以及可以预见到2020年,全世界航空运输业将以每年5%的比例、某些地域比如亚洲太平洋地区甚至可能将以每年14%的比例增长<sup>[7]</sup>,航空运输业的节能减排任重道远。

尽管可以采用新的能源形式,比如氢能源、天然气或煤的液化燃料,以及生物燃料以替代石油产品作为航空运输燃料,但氢能源就现在看作为航空燃料还比较遥远;液化燃料和生物燃料还只是一种中间过渡性的解决方案,例如目前全世界生物燃料年产量大约为227.2亿升,而仅仅是美国2004年一年所需要的航空燃料就达到618.3亿升,加之生物燃料存在着与民争食的弊端,因此液化燃料和生物燃料目前尚无法成为工业燃料(包括航空燃料)的主角。因此在相当长的一段时间里,航空界还是得以石油产品作为运输燃料。

在航空运输成本中,根据近年来的趋势分析,燃料成本将从2004年的占整个飞行成本的1/4上升到2020年占整个飞行成本的1/2。当油价达到每升11美分时,燃油费用占到飞行直接运营成本(DOC)的53.3%。这些事实使得影响DOC的若干参数中,单位耗油量(SFC)以超越发动机质量而占据了第一位<sup>[7]</sup>。这也使得在新的发动机研制中提出了燃油效率的指标。为此在航空发动机中采用先进的密封技术以提高发动机的性能和降低油耗是十分有意义的,例如对高压比发动机而言,控制密封间隙的开度以防止因腐蚀磨损造成密封失效导致发动机性能的下降。

### 1.1.3 密封技术的发展趋势

密封技术涉及多个领域的科学知识,包括固体力学和流体力学、传热学、摩擦学、材料物理及化学等领域。密封问题是由与这些学科相互有关的作用叠加起来的,因此研究密封技术必然要涉及多个学科领域的知识。例如,机械密封或浮环密封中的静环与动环(定子与转子元件),由于受力和受热作用发生变形,产生磨损和振动,将影响流体膜的动力特性。这就要求从弹性理论、传热学、摩擦学和振动理论等方面,以及从自动控制理论、可靠性理论、技术诊断学等方面进行分析研究;反过来,流体膜特性又会影响密封中的静环与动环,这又要从流体动力

学、气体动力学和润滑理论等方面开展分析研究工作。

密封技术在其设计、制造和运行原理上与诸如流体力学、摩擦学、物理和化学、材料学以及机械设计等学科密切相关。密封界面上的物理过程受以下因素支配:分子相互作用、密封端面的几何形状、合适的受力平衡,导热、传热和相变,以及材料性质。这些因素的相互作用有时很复杂而难以通过单一知识的分析来可靠地预测密封的运行特性,对工程师而言又要求能够提供一可靠的密封解决方案,或论证不能满足现有技术水平所规定要求的原因。尽管可以寻求密封公司专家的帮助,但因为各种因素的制约,包括某一密封领域的专家经常缺乏其他领域知识的原因,仍然需要从事密封技术的人员具有更宽广的知识面,特别是应掌握现代密封技术精髓的知识。

密封研究设计人员应当有这样一个概念:绝对避免密封泄漏是很难实现的,并且必然以高成本作为代价。在某些情况下当泄漏物是无害的廉价流体时,即使有较高的泄漏率也可能被接受,经济性的因素可能更多地被加以考虑。但当泄漏物对环境有很大污染,或者泄漏极大地影响到机械装备的性能和效率时,则首先要考虑密封的可靠性和严密性,例如处理有毒或放射性流体的流程泵和压缩机的轴密封。此外,在密封设计过程中还应当注意到这样一种情况:当密封失效时,后续成本可能很高,修理费用和停机损失可能是失效密封价格的几百甚至几千倍,此时在选择密封并设计安装细节时,一定要关注这一点。

密封技术的发展是与工业领域技术装备的发展分不开的。随着现代工业技术装备的发展,其工作性能越来越高,面对的工况条件越来越多样和苛刻,现代技术装备具有的高速、高压、高温以及工作介质多样性的特点,使得对装备中的密封要求也不断提高。一方面密封装置本身面对的压力、速度和温度决定了它的重要性,另一方面随着参数和条件的要求提高,机械设备对密封的工作性能和可靠性的要求也更加严格。正是在现代工业技术装备发展需求的牵引下,以及在材料科学和机械制造水平提高的支持下,不断地促使密封技术向着更高的性能要求、可靠性和适应性方向发展。

## 1.2 密封的分类和密封方式

### 1.2.1 密封的一般性分类和选用原则

密封是机械工程中应用非常广泛的零件,其分类按照不同的依据有不同的方法。根据密封表面间是否有相对运动,密封分为静密封和动密封;动密封按运动形式分为旋转密封和往复移动密封;按接触形式分为接触密封和非接触密封;按密封介质的不同分为油封和气动;按密封位置的不同分为径向密封和端面密封。此外,还有利用弹性薄膜作为密封件的薄膜密封以及利用磁学原理的磁密封等。若干类型的密封结构还可以通过组合形成结构多样的组合密封。下面对一般性的密封分类和典型形式作简单介绍。

### 1. 静密封与动密封

密封根据其部位接合面是静止的还是具有相对运动的,分为静密封和动密封。静密封大多应用于设备中的箱体接合面和管道连接法兰中,而动密封应用要广泛得多。

典型的静密封有 O 形密封圈(O 形密封圈也可以作为动密封使用),它作为管接头密封和液动及气动设备中的辅助密封广泛应用。法兰接合面使用的垫片密封也是静密封,其垫片的结构和材料十分多样。玻璃镶嵌条、汽车窗口密封以及盛装易腐食品和饮料的容器的密封盖都属于静密封的分类范畴。

作为动密封的密封种类十分繁多,例如航空发动机中典型的篦齿密封(迷宫密封)、石墨密封和浮环密封等。有些作为静密封使用的密封形式,如 O 形密封圈和阶梯形密封,也常用于动密封的场合,例如液压缸的活塞杆密封。

### 2. 旋转密封与往复密封

如果密封部位接合面的相对运动是圆周方向上的运动,这种密封称为旋转密封;如果密封部位接合面的相对运动是往复轴向运动,这种密封称为往复密封。

旋转密封在旋转机械中应用十分普遍。例如弹性体骨架唇形密封,它作为内燃机和齿轮箱中的轴封得以应用。往复密封的典型应用集中在液压传动的动力元件和执行元件中,例如,液压缸(马达)的活塞密封和活塞杆密封。

### 3. 接触密封与非接触密封

密封部位的接合面如果是相互接触的(或者通过其他元件相互接触),这种密封称之为接触密封,反之为非接触密封。

接触密封可以消除间隙,故而达到很高的封严性,但是,需要花费额外的功耗来克服摩擦,密封面会发热和磨损。O 形密封圈、唇形密封和填料密封等都是典型的接触密封。

非接触密封的密封件不直接接触,因此无摩擦和磨损,密封件工作寿命长,但通过缝隙流体泄漏量较大,泄漏流体通过缝隙消耗的功率和密封件在流体中搅拌消耗的功率也会影响机器和设备的能耗与物料消耗。非接触密封又可分为流体动压密封和流体静压密封,流体静压密封通过减小间隙,产生流动阻力来达到有限的密封,故又称之为流阻型密封;流体动压密封通过密封件产生反压,将泄漏流体挤回密封室来达到密封,故又称之为反压型密封。迷宫密封和气膜密封都是典型的非接触密封。

值得注意的是,目前有接触密封和非接触密封的相互转化而形成半接触(半非接触)形式密封的趋势。例如通过调节密封载荷系数使接触式机械密封转化为半接触式密封,以适应条件变化下的工作;而非接触密封逐步趋于接触密封,则出现了各种承磨密封<sup>[6]</sup>。

### 4. 径向密封与端面密封

径向密封是两圆柱面或环形面之间径向间隙的密封,阻止流体沿着与运动件轴线平行方向的泄漏。唇形密封是经常作为径向密封使用的。端面密封是平面、锥面或球面间端面间隙(轴向间隙)的密封,阻止流体朝着径向方向泄漏,机械密封是典型的端面密封类型。用于径向密封的非接触密封其径向间隙大多固定(固定间隙密封),而用于端面密封的非接触密封其端

面间隙是可以调整 and 控制的(可控间隙密封)。

目前工程中还存在着径向密封与端面密封组合的混合型密封形式,浮环密封和分瓣密封大致可以归为这类形式的密封。

### 5. 多级密封与组合密封

随着机器设备的工作条件和参数的提高,单靠一级密封或一种形式的密封已经不能满足要求,工程中出现了多级密封或组合密封的结构。

由于一个端面密封不能满足机泵轴密封工作条件和参数的要求,所以轻烃泵、浆液泵和核电站泵的轴封采用了串联式的多级机械密封,并且出现了接触式密封和非接触式密封组合的情况。

几种形式密封组合到一起形成组合密封是机器设备中常采用的密封形式,例如接触式机械密封上开出螺旋槽(非接触式密封)组成机械密封-螺旋密封组合密封,以及轴承密封中常用的甩油盘密封、毡圈密封与迷宫密封组成的组合密封。

### 6. 密封类型选择的主要原则

密封类型和密封方式较多,应用的场合和环境亦各异,因此,密封类型和方式的选择需要结合工程实际合理确定。一般来讲,密封类型和方式的选择可以考虑下述主要原则,即从工作条件和密封特点的匹配性,密封任务的重要性,以及经济性等方面加以考虑。

当选用不同的密封类型和方式时,要注意密封使用条件及其特点的匹配。例如,篦齿密封由于篦齿尖端与密封配合面存在间隙,因而工作中不受转速和温度的限制,但其封严效果不如接触式密封装置,轴向尺寸也较大;涨圈密封受到工作温度和线速度的限制,对于高速、高温工作环境不太适用;浮环密封可以在工作温度和线速度较高的条件下使用,但封严效果要差一些;石墨密封可在高温、高压差、高转速下工作,密封效果好,但结构复杂,另外若温度过高,装置中的压缩弹簧失效也影响到石墨密封的功能。

密封类型和方式的选择还应考虑到密封任务的重要程度。重要的密封应尽可能采用性能好、可靠性高的密封装置,例如应用于航空航天工程中的密封,以及应用于化工和核电站设备中的密封等,都应该首先从密封性能和可靠性角度来选择密封类型和方式。一般性的密封应用,如果允许可以采用结构简单、成本低的密封装置,以在实现密封需求的基础上降低制造、安装、维护费用。

经济性是密封类型和方式选择中必须考虑的原则。这里所涉及的经济性,不仅是密封装置本身制造、安装和维护的经济性,而且也包括因为密封失效造成的对设备、企业生产乃至人类社会影响的社会成本和经济成本。虽然复杂昂贵的密封系统能够最大限度地实现有效密封,但绝对避免泄漏的密封是难以实现的,除非不考虑密封装置的工作寿命。因此一般在选择密封类型和方式时允许有可以承受的流体泄漏,这样可以降低密封应用的成本,特别是当泄漏物对设备人员和环境没有危害时。但是,当面对密封失效造成继生危害很大和后续补救成本很高的应用情况时,例如航空航天飞行器中的密封装置,以及化工厂和核电站设备中的密封装置,一旦失效将造成生命财产的严重损失,此时密封装置本身的经济成本不应再作为设计中的主要考虑因素。

### 1.2.2 密封的方式

工程中较为常见的密封方式大致可以归纳为以下几种<sup>[8]</sup>。

#### 1. 全封闭或部分封闭的密封方式

全封闭或部分封闭是将机器设备采用机壳或机罩全部密闭或部分密闭进行密封的密封方式。密闭式泵、密闭式压缩机、磁力耦合器驱动的泵和搅拌机等都采用了全封闭的密封方式。部分封闭的密封方式如减少密封箱(或密封室)数目,立式筒袋泵和砍头泵就采用这种密封方式。

#### 2. 填塞或阻塞的密封方式

利用密封件填塞泄漏处(例如静密封的密封垫和动密封的填料密封等)或利用流体阻塞被密封流体(例如气封和水封等)属于填塞或阻塞的密封方式。航空发动机的某些轴间密封部位,通过设置油槽将篦齿密封的篦齿浸没在润滑油中,形成阻塞密封,此时由于篦齿浸没在润滑油中,篦齿不易磨损,又允许有较大的密封间隙防止碰撞。将柔性填料压缩填充于密封空间的填塞密封方式在早先的旋转轴密封和往复式活塞杆密封中很常见,随着新的压缩填料的采用,填塞密封在工程中仍有广泛应用,比如离心泵旋转轴和供水系统阀门中的填料密封等。

#### 3. 分隔的密封方式

分隔是利用密封件将泄漏处和外界分隔开(例如隔膜密封、机械密封等)或利用气体或液体作为中间密封流体(例如气垫密封,中间有封液的双端面机械密封等)进行分隔的密封方式,这种密封方式可以做到“零泄漏”。采用弹性隔膜进行密封是典型的分隔密封方式,例如波纹管密封。弹性隔膜材料可以采用金属材料,也可以采用非金属材料如聚四氟乙烯(PTFE),由于弹性隔膜的柔性使得这种密封可以作为动密封使用。磁流体密封则是典型的液体隔膜密封,流体由悬浮于专门选择的液体的细磁性颗粒组成,通过永磁体产生的强大磁场使其保持在间隙中的适当位置,磁流体在两个表面之间形成隔离层,由此形成密封。磁流体密封作为真空密封很有价值,此外在计算机磁盘驱动器中作为隔离油脂和尘埃的密封也有使用。

#### 4. 引回的密封方式

引回是将泄漏流体再次送回被密封空间的密封方式。螺旋密封是利用了螺旋结构回流作用将泄漏流体引回被密封空间的引回密封方式代表,当螺旋密封设计成泄漏与回流平衡时,可以形成非接触型的无泄漏密封。在高速旋转轴封中采用的抛油环结构也体现了这种密封方式,利用结构变化迟滞泄漏流体流动和离心作用将泄漏流体甩进集液腔,泄漏流体收集后通过排出通道返回被密封空间。

#### 5. 流阻或反压的密封方式

此种密封方式的原理是,利用密封件的狭窄间隙或曲折途径造成密封所需要的流动阻力(例如迷宫密封等)或利用密封件对泄漏流体造成反压,使之部分平衡或完全平衡,达到密封作用。航空发动机中常用的篦齿密封就是很典型的利用迷宫间隙流阻原理的密封方式。唇形旋转密封在密封流体一侧的接触角大于另一侧的接触角的结构布置,即是利用了密封件对流体反压作用,以使密封流体与外界处于平衡状态而得以被密封;离心密封则是利用密封流体旋