

# 静密封设计技术



顾伯勤 李新华 田 争 编著



中国标准出版社



责任编辑：郭丹 封面设计：李冬梅 责任校对：李兵 责任印制：邓成友

ISBN 7-5066-3430-9



9 787506 634304 >

ISBN 7-5066-3430-9/TB · 1123

定价：38.00 元

# 静密封设计技术

顾伯勤 李新华 田 争 编著

中国标准出版社

## 内 容 提 要

本书系统地介绍了流体静密封的基本理论和设计方法以及近年来该领域的最新研究成果和发展,包括流体通过密封间隙的流动、中低压螺栓法兰连接、中低压螺栓法兰连接设计方法、高压容器的密封设计、超高压容器的密封设计、真空和低温密封设计、小型管道连接的密封设计、密封胶和胶粘剂、带压堵漏技术、泄漏检测技术、泄漏的预测与防止。

本书可供从事流体静密封研究、设计、制造和使用的科学工作者和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

静密封设计技术/顾伯勤等编著. —北京:中国标准出版社,2004

ISBN 7-5066-3430-9

I. 静... II. 顾... III. 静密封—设计 IV. TB42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 017112 号

中国标准出版社出版

北京复兴门外三里河北街16号

邮政编码:100045

电话:68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 16 字数 368 千字

2004年6月第一版 2004年6月第一次印刷

\*

印数 1—2 000 定价 38.00 元

网址 [www.bzcbs.com](http://www.bzcbs.com)

版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68533533

# 前 言

流体密封装置广泛应用于工业、农业、国防和人们的日常生活中。现代化工、石油、原子能、航天及深海技术的迅速发展对装备的密封提出了愈来愈高的要求。密封失效轻则造成能源、原材料的大量浪费,重则导致设备报废、停工停产、人员伤亡和严重的环境污染。由于泄漏而引起的灾难性事故屡见不鲜。日本炼油行业近年来发生的燃烧爆炸事故统计结果表明,其灾难性事故将近70%是由于泄漏造成的。美国挑战者号航天飞机的泄漏爆炸事件则已引起世界范围内的巨大震动。

严格定量控制泄漏率是保证现代工业装备安全运行的重要条件。美国压力容器委员会(PVRC)于1977年提出了泄漏率的定量指标,推荐一般工业的泄漏率指标为 $10^{-3}\text{cm}^3/\text{s}$ ,对某些石油、化学和原子能工业,泄漏率则应控制在 $10^{-7}\text{cm}^3/\text{s}$ 以下。这些指标目前已为世界众多国家所认同。

然而,流体的密封是一个复杂而较难解决的问题。密封的可靠性不仅与所采用的密封材料和密封元件有关,而且与连接结构型式、介质特性、工况条件等诸多因素有关。密封系统的设计涉及到流体力学、固体力学、材料科学、现代设计理论及方法等诸多学科领域的专门知识。本书较系统全面地介绍了流体静密封的基

本理论、设计方法和工程应用以及近年来该领域的最新研究成果和发展,旨在为从事流体静密封研究、设计、制造和使用的科学工作者和工程技术人员提供参考。

本书共分十二章,包括绪论、流体通过密封间隙的流动、中低压螺栓法兰连接、中低压螺栓法兰连接设计方法、高压容器的密封设计、超高压容器的密封设计、真空和低温密封设计、小型管道连接的密封设计、密封胶和胶粘剂、带压堵漏技术、泄漏检测技术、泄漏的预测与防止。

本书由南京工业大学顾伯勤教授主编,并编著第一章、第二章、第三章的第一节、第四章、第六章、第十章、第十一章和第十二章;第三章的第二节至第四节、第五章和第七章由机械科学研究院李新华教授级高级工程师编著;第八章和第九章由机械科学研究院田争高级工程师编著。

限于作者水平,书中缺点和错误难免,恳请读者批评指正。

南京工业大学机械与动力工程学院的陈晔、朱柳娟、朱大胜、袁立明、汤东征等以及南京赛博过程工业装备有限责任公司的周芳在文字输入和插图绘制等方面付出了辛勤的劳动,在此表示衷心的感谢。

本书部分章节得到了江苏省自然科学基金项目“流体密封原理及其连接系统设计方法研究”的资助,在此一并表示感谢。

作 者

2003年10月 于南京

# 目 录

第一章 绪论 .....	1
第一节 泄漏与密封 .....	1
第二节 密封的基本方法 .....	2
第三节 静密封的分类和特征 .....	3
参考文献 .....	5
第二章 流体通过密封间隙的流动 .....	6
第一节 流体流动的基本理论 .....	6
第二节 密封模型及其泄漏率计算 .....	16
参考文献 .....	22
第三章 中低压螺栓法兰连接 .....	23
第一节 垫片密封连接的泄漏现象 .....	23
第二节 垫 片 .....	27
第三节 法 兰 .....	45
第四节 螺栓法兰连接的安装 .....	50
参考文献 .....	54
第四章 中低压螺栓法兰连接设计方法 .....	55
第一节 ASME 规范设计方法 .....	55
第二节 DIN 2505 规范设计方法 .....	56
第三节 ASME 规范设计新方法 .....	59
第四节 螺栓法兰连接的紧密性设计方法 .....	63
第五节 螺栓法兰连接的可靠性分析方法 .....	74
参考文献 .....	84

<b>第五章 高压容器的密封设计</b> .....	86
第一节 概述 .....	86
第二节 金属平垫密封 .....	87
第三节 双锥环密封 .....	89
第四节 “C”型环密封 .....	91
第五节 金属“O”形环密封 .....	93
第六节 三角垫密封 .....	95
第七节 卡扎里密封 .....	97
第八节 伍德密封 .....	103
第九节 透镜垫密封 .....	107
参考文献 .....	112
<b>第六章 超高压容器的密封设计</b> .....	113
第一节 “B”形环密封 .....	113
第二节 Bridgman 密封 .....	116
第三节 楔形垫密封 .....	118
第四节 组合式密封 .....	123
参考文献 .....	126
<b>第七章 真空和低温密封设计</b> .....	127
第一节 真空密封 .....	127
第二节 低温密封 .....	156
参考文献 .....	158
<b>第八章 小型管道连接的密封设计</b> .....	159
第一节 小型高压管接头 .....	159
第二节 弹性体密封管接头 .....	176
第三节 真空小型管接头 .....	182
第四节 焊接承插接头及焊接承插管 .....	183
参考文献 .....	184



---

第九章 密封胶和胶粘剂 .....	185
第一节 密封胶 .....	185
第二节 胶粘剂 .....	192
参考文献 .....	198
第十章 带压堵漏技术 .....	199
第一节 带压堵漏的基本原理与方法 .....	200
第二节 卡具设计 .....	204
第三节 密封剂 .....	206
第四节 带压堵漏的安全施工 .....	211
参考文献 .....	213
第十一章 泄漏检测技术 .....	214
第一节 检漏方法的特点和分类 .....	214
第二节 压力检漏法 .....	217
第三节 真空检漏法 .....	230
第四节 其他检漏方法 .....	235
第五节 检漏实践 .....	237
参考文献 .....	238
第十二章 泄漏的预测与防止 .....	240
第一节 项目准备阶段 .....	240
第二节 设计阶段 .....	242
第三节 加工制造阶段 .....	243
第四节 安装调试阶段 .....	244
第五节 运行维修阶段 .....	245
参考文献 .....	246

## 第一节 泄漏与密封

泄漏是自然界常见的现象。日常生活中如自来水、煤气的泄漏常常给人们带来不便甚至危害；工业中如压力容器、管道、反应器、阀门、液压设备、运输工具一旦发生泄漏，轻则造成能源和原材料的大量浪费、设备不能正常工作，重则导致设备报废、整个工厂或系统陷于瘫痪、人员伤亡和严重的环境污染。因此，人们在生产实践中千方百计地设法防止和消除泄漏。

泄漏是指介质，如气体、液体、固体或它们的混合物，从一个空间进入另一个空间的人们不希望发生的现象。单位时间内泄漏的介质质量称为泄漏率。

由于机械加工的结果，机械产品的表面必然存在各种缺陷以及形状和尺寸偏差。因此在机械零件的接触处不可避免地会产生微小的间隙，当存在压力差或浓度差时，工作介质就会通过间隙而泄漏。密封是指机器、设备的连接处没有泄漏的现象。能起密封作用的零部件称密封件。较复杂的密封连接称为密封系统或密封装置。

在工程实践中，常用密封性或紧密性这个概念来评价密封连接的有效性。系统和设备的紧密性可以通过泄漏率的大小来评定。从物理意义上讲，并不存在绝对的紧密性。所谓紧密性应该像其他物理量一样，可以定量地加以衡量。文献[1]将连接的紧密性定义为：“在一定的操作条件下，连接的泄漏率低于某一规定的指标泄漏率；或在规定的泄漏率指标下，连接能够承受特定的操作条件。满足上述条件的连接是紧密的，反之则认为是不紧密的”。实际上连接的泄漏率大小是与检漏条件、检漏方法、检漏人员等密切相关的。不同的测试人员或采用不同的检漏方法、不同的检漏设备所得到的测试结果往往不一致。因而，文献[2]对系统和设备的紧密性作了较为严格的定义：“在某一特定的操作条件下，采用指定的、具有相应测试分辨率的检漏方法测得的泄漏率低于某一规定的指标泄漏率。满足上述条件的系统和设备是紧密的，反之是不紧密的”。

不同的工业部门对系统和设备的紧密性有不同的要求。例如，我国国家标准 GB/T 4622.3—1993《缠绕式垫片技术条件》<sup>[3]</sup>中所规定的四级泄漏率指标 ( $1.2 \times 10^{-5}$ ,  $1.0 \times 10^{-4}$ ,  $1.0 \times 10^{-3}$ ,  $1.0 \times 10^{-2}$   $\text{cm}^3/\text{s}$ ) 可基本满足一般工业和某些石油化工企业装置的紧密性要求。对核能和某些重要的化工设备，其泄漏率则应控制在  $10^{-7}$   $\text{cm}^3/\text{s}$  以下<sup>[4]</sup>。而心脏起搏器所用同位素电池的泄漏率数量级约为  $10^{-12}$   $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ <sup>[5]</sup>。

泄漏率通常用体积流率、质量流率以及 PV 流率来表示，其常用的单位为  $\text{cm}^3/\text{s}$ 、 $\text{g}/\text{s}$ 、 $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  等。表 1-1 给出了常用泄漏率单位之间的换算关系，其中  $P_n$  为标准大气压力 ( $1.01325 \times 10^5$  Pa)， $T_n$  为标准状态下大气的绝对温度 (273.16 K)。

表 1-1 常用泄漏率单位的换算关系

单位	1 mbar · L/s ( $T_n$ )	1 Torr · L/s ( $T_n$ )	1 Pa · m <sup>3</sup> /s ( $T_n$ )	1 cm <sup>3</sup> /s ( $T_n, P_n$ )	1 kg/h 20°C 空气	1 g/s 20°C 空气	1 g/a 氟里昂 12
1 mbar · L/s( $T_n$ )	1	0.75	0.1	0.99	$4.3 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-3}$	$1.55 \times 10^5$
1 Torr · L/s( $T_n$ )	1.33	1	0.13	1.32	$5.7 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-3}$	$2.1 \times 10^5$
1 Pa · m <sup>3</sup> /s( $T_n$ )	10	7.5	1	9.9	$4.3 \times 10^{-2}$	$1.2 \times 10^{-2}$	$1.55 \times 10^6$
1 cm <sup>3</sup> /s( $T_n, P_n$ )	1.01	0.76	0.101	1	$4.3 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-3}$	$1.55 \times 10^5$
1 kg/h(20°C 空气)	230	175	23	230	1	0.28	—
1 g/s(20°C 空气)	828	630	82.8	828	3.6	1	—
1 g/a 氟里昂 12	$6.4 \times 10^{-6}$	$4.9 \times 10^{-6}$	$6.4 \times 10^{-7}$	$6.4 \times 10^{-6}$	—	—	1

密封技术所要解决的问题就是防止或减少泄漏。

## 第二节 密封的基本方法

密封的本质在于阻止被密封的空间与周围介质之间的质量交换。密封的方法主要有下述几种：

### 1. 尽量减少密封部位

在进行容器和设备设计时,应尽可能少设置密封部位。特别是对于那些处理易燃、易爆、有毒、强腐蚀性介质的容器和设备,更应少采用密封连接。

### 2. 堵塞或隔离泄漏通道

在密封部位设置垫片,采用密封胶,可大大提高连接的密封性能。由于垫片或密封胶均具有良好的变形特性,容易与被连接元件表面贴合,填满表面的微间隙,堵塞或减小被密封流体的泄漏通道,实现密封。

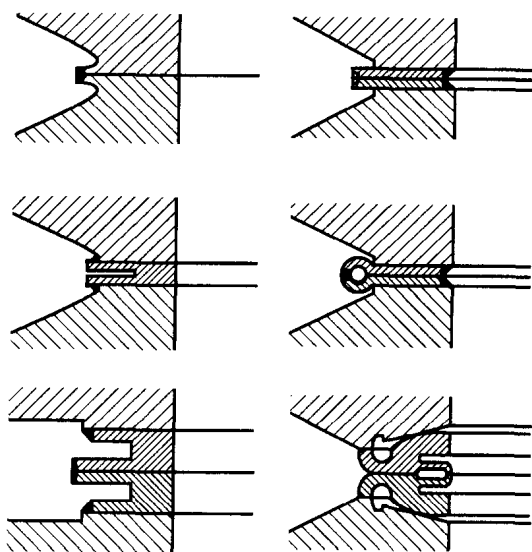
### 3. 增加泄漏通道中的流动阻力

介质通过泄漏通道泄漏时会遇到阻力。流动阻力与泄漏通道的长度成正比,与泄漏通道的当量半径的 4 次方(对于层流状态)或 3 次方(对于分子流状态)成反比。对于

垫片密封来说,适当增加垫片宽度,即增加泄漏通道长度,提高垫片的密封比压,即减小泄漏通道的当量半径可增加泄漏阻力,改善连接的密封。

### 4. 采用永久性或半永久性连接

采用焊接、钎焊或利用胶粘剂可形成永久性或半永久性连接。如图 1-1 所示的焊接垫片密封就是一种半可拆的连接形式。

图 1-1 焊接垫片<sup>[6]</sup>

### 第三节 静密封的分类和特征

密封的分类方法很多。按所密封的介质可分为气体密封、液体密封等；按设备种类可分为容器密封、管道密封、压缩机密封、釜用密封等；按密封装置的工作压力可分为高压密封、中低压密封、真空密封等；按密封面间的相对运动状态又可分为动密封和静密封两大类。

表 1-2 为按工作压力对密封装置的分类。

表 1-2 按工作压力对密封装置的分类

压力范围/Pa	密封类型	应 用	备 注
$10^{10}$ 以上	超高压密封	特殊材料制造,如人造金刚石、爆炸成型加工等	带压气体、液体等的密封
$10^{10} \sim 10^8$	高压密封	天然气开采、化学和石化工业,如高压聚合过程	
$10^8 \sim 10^6$	中压密封	过程机械制造业、液压传动、气动、化工、石化、电力等行业	
$10^6 \sim 10^5$	低压密封	普通机械制造、液压和气动元件、民用设施	
$10^5 \sim 10^2$	低真空密封	化工、石油化工、制药、食品、选矿等行业	真空密封
$10^2 \sim 10^{-1}$	中等真空密封	化工、轻工、机械制造、电子等行业,如真空焊接、真空喷涂等	
$10^{-1} \sim 10^{-5}$	高真空密封	电子、航空、核能、冶金等工业部门,如稀有金属和纯金属的冶炼	
$10^{-5}$ 以下	超高真空密封	电子工业,宇航、核科学技术	

图 1-2 给出了静密封的分类,图 1-3 为典型的静密封结构<sup>[6]</sup>。

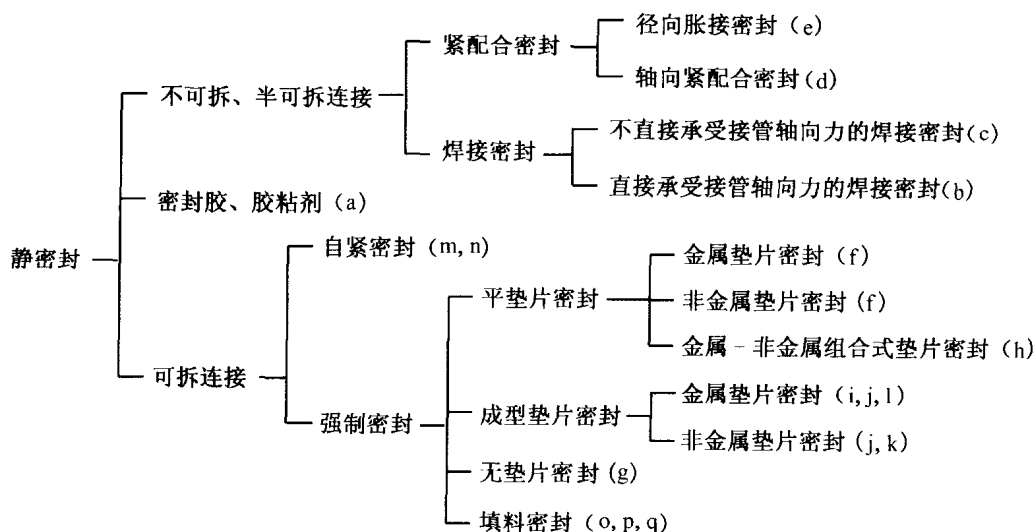


图 1-2 静密封分类

静密封连接可分为可拆和不可拆(半可拆)两大类。焊接密封连接(图 1-3c)属于不可拆或半可拆连接。密封胶和胶粘剂连接可归入半可拆一类。直接承受接管轴向力的焊接结构(图 1-3b)通常不作为密封连接看待;不直接承受接管轴向力的焊接结构(图 1-3c)常常列入焊接密封一类,它属于半可拆连接。胀接连接(图 1-3e)靠管子的大塑性变形,从而在两元件间产生很高的表面比压实现密封。无垫片密封(图 1-3g)要求两个密封表面具有很高的加工精度,一般需要研磨。

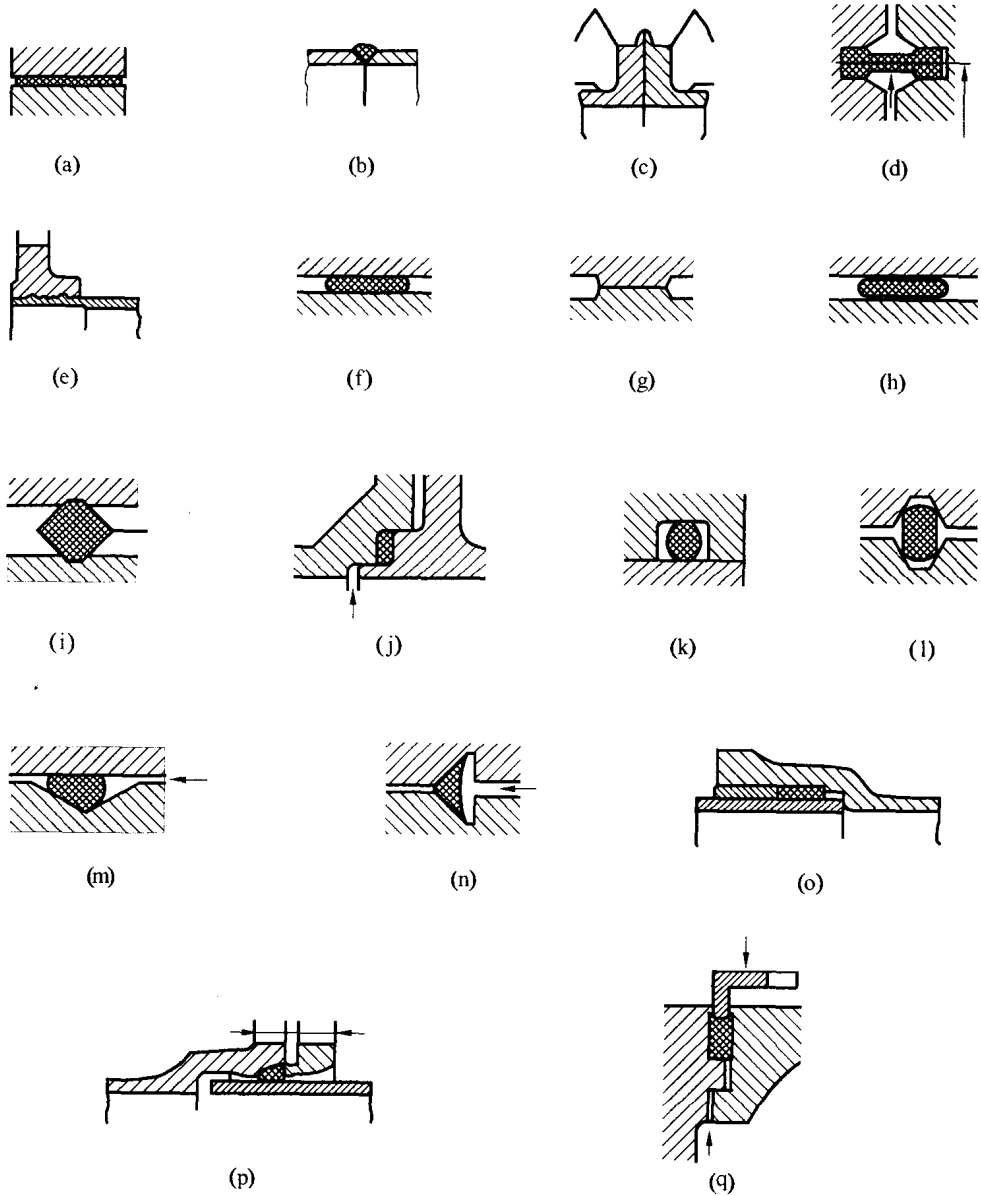


图 1-3 典型的静密封结构

## 参 考 文 献

- 1 顾伯勤,朱洪生. 螺栓法兰连接的紧密性分析. 石油化工设备,1988, 17(1): 16~20.
- 2 Gu Boqin. Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit von Lässigkeitsmeßverfahren. Leoben; Montanuniversität Leoben, 1996.
- 3 GB/T 4622.3—1993 缠绕式垫片技术条件. 北京:中国标准出版社,1993.
- 4 Raut H D, Leon G F. Report of Gasket Factor Tests. WRC Bulletin 233, 1977, (12): 1~35.
- 5 Burger H-D. Lecksuche an Chemieranlagen mit Helium—Massenspektrometer-Lecksuchern. DECHEMA. Lecksuche an Chemieranlagen. 1980: 73~93.
- 6 Trutnovsky K. Berührungsdichtungen. Berlin: Springer—Verlag, 1975.

## 第二章

# 流体通过密封间隙的流动

## 第一节 流体流动的基本理论

### 一、流动状态

流体流过微小间隙的流动主要表现为分子流和黏性流,对气体介质来说,其流动特征可以用克努森数  $Kn$  来描述,克努森数为气体分子的平均自由程  $\lambda$  与泄漏通道的特征尺寸  $r$  之比

$$Kn = \frac{\lambda}{r} \quad (2-1)$$

当  $Kn < 0.01$  时,气体分子的平均自由程远小于泄漏通道的特征尺寸,气体分子间的相互碰撞远远多于气体分子与流道壁面之间的碰撞,因而气体分子间的相互碰撞决定了流动的性质。此时,在平均自由程范围内,气体的温度、密度、流速等性质并不会发生明显改变,因而可以把气体看成是连续介质,即黏性流体,而相应的流动称之为黏性流动,它可以用流体动力学的基本理论加于描述和分析。

当  $Kn > 1$  时,气体分子的平均自由程大于泄漏通道的特征尺寸,流动阻力主要来自气体分子与流道壁面之间的相互碰撞。此时的流动分析主要是确定流道壁面对分子自由运动的限制效应这样一个几何问题。由于分子间的碰撞很少,各分子的运动可以认为是相互独立的。这种克努森数较大时的流动称为自由分子流或简言之分子流。

当  $0.01 < Kn < 1$  时,气体分子的平均自由程与泄漏通道的特征尺寸具有相同的数量级,其流动特性与气体分子间的相互碰撞以及气体分子与流道壁面之间的碰撞均有关,气体传递处于过渡流区域,此时的流动分析为半经验的<sup>[1~3]</sup>。

黏性流动又可区分为不可压缩流体的黏性流动和可压缩流体的黏性流动两类。通常气体的可压缩性要大于液体,但在流动分析中要判别流体是否可压缩,不能仅仅看流体是气体或是液体,而必须根据流体流动过程中密度变化的大小来决定。通常当流体密度的相对变化(相对于初始密度)的绝对值小于 5% 时,无论该流体是气体或是液体,都可把它作为不可压缩流体来处理。所以,当气体的流速不超过其声速的 0.3 倍时,可以把它看成是不可压缩流体。密封间隙中的流动主要表现为分子流和黏性流,对于密封间隙中不可压缩流体的黏性流动可以用纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程加于描述。

### 二、分子流

#### 1. 长泄漏通道中的分子流

克努森提出了解决分子流流动问题的基本理论并作了实验验证。对于长度为  $l$ 、横截面面积为  $A$ 、横截面周界为  $H$  的任意横截面形状的泄漏通道,当其长度与横截面当量半径

之比  $\frac{l}{r} > 100$  时, 流过该流道的  $\rho V$  流率  $L_{\rho V}^M$  为<sup>[1]</sup>

$$L_{\rho V}^M = \frac{4}{3} \int_0^l \frac{v_a}{A^2} H dl (p_1 - p_2) \quad (2-2)$$

式中:  $p_1$ 、 $p_2$ ——流道入口和出口处的压力;

$v_a$  为气体分子的平均速度, 可由下式计算:

$$v_a = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (2-3)$$

式中:  $R$ ——通用气体常数;

$T$ ——气体温度;

$M$ ——气体分子质量。

将式(2-3)代入式(2-2)得到

$$L_{\rho V}^M = \frac{4}{3} \int_0^l \frac{H}{A^2} dl \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} (p_1 - p_2) \quad (2-4)$$

对于一个半径为  $r$  的均匀横截面长管

$$\int_0^l \frac{H}{A^2} dl = \int_0^l \frac{2\pi r}{(\pi r^2)^2} dl = \frac{2l}{\pi r^3} \quad (2-5)$$

将式(2-5)代入式(2-4)则可得到气体流过均匀圆形横截面长管的分子流流率为

$$L_{\rho V}^M = \frac{4}{3} \frac{r^3}{l} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} (p_1 - p_2) \quad (2-6)$$

对于一个边长分别为  $a$  和  $b$  的均匀矩形横截面的长管

$$\int_0^l \frac{H}{A^2} dl = \int_0^l \frac{2(a+b)}{a^2 b^2} dl = \frac{2(a+b)l}{a^2 b^2} \quad (2-7)$$

将式(2-7)代入式(2-4)则可得到气体流过均匀矩形横截面长管的分子流流率为

$$L_{\rho V}^M = \frac{4}{3} \frac{a^2 b^2}{(a+b)l} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} (p_1 - p_2) \quad (2-8)$$

对于一个长、短半轴分别为  $a$  和  $b$  的均匀椭圆形横截面的长管

$$\int_0^l \frac{H}{A^2} dl = \int_0^l \frac{2\pi \sqrt{\frac{a^2+b^2}{2}}}{(\pi ab)^2} dl = \frac{2 \sqrt{\frac{a^2+b^2}{2}}}{\pi a^2 b^2} l \quad (2-9)$$



将式(2-9)代入式(2-4)则可得到气体流过均匀椭圆形横截面长管的分子流率为

$$L_{pV}^M = \frac{8}{3} \frac{a^2 b^2}{\sqrt{a^2 + b^2} l} \sqrt{\frac{\pi RT}{M}} (p_1 - p_2) \quad (2-10)$$

例如, 20°C 的氮气流过一根长为 2 m、半径为 0.01 mm 的毛细管, 管子一端的压力为 20 Pa, 管子另一端与一高真空容器相连, 计算流过该毛细管的流率。

由于管子一端与真空容器相连接, 故可认为  $p_1 \approx 0$ 。对于 20°C 的氮气, 其平均自由程可按下式估算:

$$\begin{aligned} \lambda p_2 &= 5.9 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{Pa} \\ \lambda &= \frac{5.9 \times 10^{-3}}{20} \approx 2.95 \times 10^{-4} \text{ m} \end{aligned}$$

由式(2-1)

$$Kn = \frac{\lambda}{r} = \frac{2.95 \times 10^{-4}}{1 \times 10^{-4}} = 2.95 > 1$$

故该流动属于分子流, 其流率可按公式(2-6)计算:

$$\begin{aligned} L_{pV}^M &= \frac{4}{3} \frac{r^3}{l} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} (p_1 - p_2) \\ &= \frac{4}{3} \times \frac{(1 \times 10^{-4})^3}{2} \times \sqrt{\frac{2\pi \times 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times 293.15 \text{ K}}{28}} \times 20 \\ &= 9.86 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

## 2. 小孔和短泄漏通道中的分子流

考虑一个等温容器, 其中有压力为  $p_1$  的低压气体, 容器器壁上有一穿透小孔, 容器中的气体通过该小孔流入压力为  $p_2$  ( $p_2 < p_1$ ) 的一相邻容器中。由于分子流状态下的气体压力通常较低, 故可作为理想气体看待, 因而其流率可以用下式计算<sup>[2]</sup>

$$L_{pV}^M = \frac{1}{4} A v_a (p_1 - p_2) = \frac{1}{2} A \sqrt{\frac{2RT}{\pi M}} (p_1 - p_2) \quad (2-11)$$

对于半径为  $r$  的圆孔, 流道截面积  $A = \pi r^2$ , 则式(2-11)成为

$$L_{pV}^M = \frac{1}{2} r^2 \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} (p_1 - p_2) \quad (2-12)$$

比较式(2-6)和式(2-12)可以发现, 流过圆孔和长圆管的流率之比为

$$\frac{\left[ \frac{1}{2} r^2 \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} (p_1 - p_2) \right]}{\left[ \frac{4r^3}{3l} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} (p_1 - p_2) \right]} = \frac{3l}{8r} \quad (2-13)$$

当  $l/r = 100$  时, 流过圆孔的流率是流过圆管流率的 37.5 倍。由此可以得出这样的结论: 对于短圆管, 即  $l/r < 100$ , 由长圆管流率计算公式(2-6)得到的流率偏小, 而由圆孔的流率计算公式(2-12)得到的流率偏大, 也就是说公式(2-6)和(2-12)是不适用于短圆管的流