

流体密封技术

韩建勇 王殿平 林海鹏 编著

哈尔滨地图出版社

流体密封技术

LIUTI MIFENG JISHU

韩建勇 王殿平 林海鹏 编著

哈尔滨地图出版社

· 哈尔滨 ·

图书在版编目(CIP)数据

流体密封技术 / 韩建勇, 王殿平, 林海鹏编著. — 哈尔滨: 哈尔滨地图出版社, 2006. 6

ISBN 7-80717-343-2

I. 流... II. ①韩... ②王... ③林... III. 流体 - 密封 IV. TB42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 056668 号

哈尔滨地图出版社出版发行

(地址: 哈尔滨市南岗区测绘路 2 号 邮政编码: 150086)

哈尔滨太平洋彩印有限公司印刷

开本: 850 mm × 1 168 mm 1/32 印张: 6.187 5 字数: 180 千字

2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1 ~ 1 000 定价: 18.00 元

前 言

流体密封在国民经济的各个领域都有广泛应用,在设备运行中起重要作用。机械设备中密封的功能就是防止泄漏。绝对避免泄漏是不可能实现的,这不仅因为物理问题,而且因为经济性问题,这需要我们进一步的研究。

在某些情况下,当泄漏物只是空气或水蒸气时,甚至较高的泄漏率也可能被视为无害的,并是可忍受的。对于有毒有害的泄漏则不仅仅是会影响整机的性能及正常运转,甚至危及人的健康和安。即使是无害的泄漏也可能造成后处理等措施对付泄漏流体而增加高昂的成本。

密封的种类繁多,可归纳成接触和非接触两类。几乎所有静密封都是接触型密封。接触型动密封分为非弹性体接触和弹性体接触两类。非弹性体接触密封指密封面用金属、石墨等非弹性体材料制成的制品;弹性体接触密封以橡胶密封制品为例,它是弹性体接触密封中应用最广泛的,已成为各种行业中的基础部件和配件。橡胶密封制品一般用于防止流体介质从机械或仪器中泄漏,也可防止外界灰尘以及空气进入密封系统内部,其特点是量大面广。

而近年来发展起来的一项新技术——磁性流体密封,在旋转轴密封中具有其他密封方式不可比拟的优点:无泄漏、无磨损、结构简单、寿命长,受到国内外学者和工程技术人员的重视,在高精领域有重要的应用,在第4章中从发展、原理、结构等方面进行了阐述;在第5章中介绍了其与离心密封组合的应用。

随着各项工业的发展,对密封的要求越来越高。为了满足这些日益提高的密封要求,往往利用几种密封组合在一起,各自发挥其优势并各自负责其任务,来完成共同的密封任务。这是目前密封技术发展中的一个很重要的方向。书中从机械密封与浮环组合密封、螺旋密封与机械密封、机械密封与离心组合密封、磁流体密封与离心组合密封来探

讨组合式密封的形式及应用。

本书可供从事机械设计的技术人员、高校教师和高年级学生参考。

本书由韩建勇、王殿平、林海鹏编著,全书共5章,第1章、第2章、第4章的4.2及第5章由林海鹏撰写,第3章由韩建勇撰写,第4章的4.1,4.3,4.4由王殿平撰写。

由于篇幅有限,不可能全面阐述,亦难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

2006年6月

目 录

| | |
|-------------------|-----|
| 第1章 概述 | 1 |
| 1.1 密封问题 | 1 |
| 1.2 流体的物理性质 | 2 |
| 1.3 流动和泄漏 | 3 |
| 1.4 磨擦、磨损和润滑 | 4 |
| 1.5 密封材料 | 10 |
| 第2章 填料密封 | 16 |
| 2.1 填料种类 | 16 |
| 2.2 填料密封机理 | 30 |
| 2.3 填料密封的摩擦、磨损和润滑 | 35 |
| 2.4 填料箱的设计 | 39 |
| 2.5 填料的装填 | 42 |
| 2.6 胶体填料密封 | 44 |
| 2.7 普通密封改胶体密封 | 45 |
| 第3章 机械密封 | 46 |
| 3.1 机械密封的工作原理 | 46 |
| 3.2 机械密封的基本型式 | 48 |
| 3.3 机械密封的主要参数 | 56 |
| 3.4 机械密封的结构设计 | 78 |
| 3.5 机械密封的常用材料 | 100 |
| 3.6 机械密封端面热变形分析 | 111 |
| 3.7 填料密封的机械密封改造 | 115 |
| 第4章 非接触型轴密封 | 118 |
| 4.1 螺旋密封 | 118 |
| 4.2 离心密封 | 130 |
| 4.3 浮动环密封 | 137 |

| | | |
|------------|--------------------|------------|
| 4.4 | 磁流体密封 | 159 |
| 第5章 | 组合密封 | 183 |
| 5.1 | 机械密封与浮环组合密封 | 183 |
| 5.2 | 螺旋密封与机械密封组合 | 184 |
| 5.3 | 机械密封与离心组合密封 | 185 |
| 5.4 | 磁流体密封与离心组合密封 | 186 |
| | 参考文献 | 190 |

第1章 概 述

1.1 密封问题

机器的运动部件之间密封的一般问题示意于图 1-1,并且可叙述为分享一共同边界的两个区域之间的流体交换的控制。在“动态”密封情形下,边界上有一个明显的相对滑动运动,该运动主要与边界平行。在“静态”密封情形下,基本不存在这种运动。动态密封的例子包括旋转机械密封、橡胶唇形密封、迷宫密封和活塞环。静态密封包括垫片、金属 O 形圈和密封剂。

边界通常为圆柱形,例如,往复式或旋转式机器部件,如轴、活塞或活塞杆的一部分;但它也可以是一个平面环形端面。忽视结构、设计或公差,考虑经常需要在静止和运动表面之间有一相对大的间隙,因而不借助辅助装置就不能执行密封功能。可通过为此引入附加部件,即“密封”使间隙减小到合适的尺寸。通过间隙的流体流动可以由各种物理过程驱动,例如压力梯度、浓度梯度、温度梯度、速度梯度(包括性粘剪切力)、分子相互作用(粘附和凝聚)或诸如重力、惯性力等物体力或电磁力。

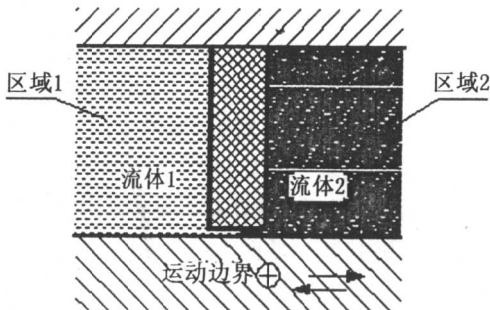


图 1-1 基本密封问题

1.2 流体的物理性质

决定流体平衡和运动规律的内因是流体的物理性质。因此,必须首先对流体的物理性质有所了解。流体的主要物理性质有下述几种。

惯性 惯性是物体维持其原有运动状态的性质。惯性的大小取决于物体的质量,质量愈大,惯性愈大。物体质量的度量都是用密度来表示的。对于流体,单位体积的流体所具有的质量称为流体的密度。

流体受地心引力的作用具有重量。单位体积流体所具有的重量,即作用在单位体积流体上的重力称为流体的重度。

粘性 虽然静止流体不能承受任何切向力,但是,当流体运动时,流体内部各质点间或流体层间会因相对运动而产生内摩擦力(剪切力)以抵抗其相对运动,流体的这种性质称为粘性。此内摩擦力称为粘滞力。因此,粘性是流体阻止发生剪切变形的一种特性。

粘性是流体的固有属性之一,从物理学的角度看,它是由于流体分子不规则运动在流体层间产生动量交换和流体分子间吸引力两方面原因造成的。因而,不论是静止流体还是运动流体都具有粘性。只是当流体处于静止或相对速度等于零的相对平衡时,流体的粘性表现不出来而已,这时的内摩擦力也就等于零。由于流体粘性的存在,为了维持流体的运动就必须消耗能量来克服内摩擦力,这就是流体运动时产生能量损失的根本原因。

压缩性和膨胀性 当作用在流体上的压力增加时,流体的体积减小,密度增加,这种性质称为流体的压缩性,这种流体称为可压缩流体。否则称为不可压缩流体。当温度变化时,流体的体积也随之变化,温度升高,体积增大,这种性质称为流体的膨胀性。

表面张力和毛细管现象 液体虽然不能承受张力,但因其表层分子受指向液体内部的分子力作用,具有尽量缩小表面的趋势,使液体的自由表面上能够承受极其微小的张力,这种张力称表面张力。表面张力不仅在液体与气体接触的周界面上发生,而且还会在液体与固体,或一种液体与另一种液体相接触的周界面上发生,如液体中的气泡,气体

中的液滴,液体的自由射流,液体表面和固体壁面相接触处等。表面张力的作用,使液体表面好像一张均匀受力的弹性薄膜,并在曲面处产生附加张力,以维持其平衡。

1.3 流动和泄漏

任何间隙,无论多小,都允许流体分子在两个方向上有通道。因此,密封只是一个程度问题,它永远不是绝对的。泄漏通常被认为是流体向外流过密封到被密封的机器的周围区域。但是,在某些情况下,泄漏可能是环境流体向内通过密封与机器内的流体混合并通过运动部件向内泵送。根据应用场合,由这种内漏引起的污染可能是可接受的,也可能是不可接受的。以下是几种泄漏模式:

扩散 扩散过程受浓度梯度驱动,因为随机的分子运动倾向于消除浓度差。典型的气体或蒸气分子的尺寸小于 1 nm (10^{-9} m),它可通过最小的工程间隙甚至机器壳体或密封部件上的孔隙扩散。甚至一个放置在大气中的真空玻璃球也会被穿透玻璃球壁的氦气充满。因此,当危险气体或蒸气的泄漏量要控制到一个很高的水平时,需要使用非常昂贵的密封系统。但是,当被密封的流体不产生环境有害物如压缩空气或蒸气时,相对大的泄漏率是没什么可说的,并且可以使用低成本的密封系统。大多数工业应用界于这些极端情况之间。

对流 密封的旋转部件引起的空气流动可使小的液滴通过密封间隙向外移动,特别是在非接触型密封中。同样,旋转部件可引起内部空气流动也可使小的液滴通过密封间隙向内移动,从而将灰尘颗粒或液滴从环境输送到被密封的空间。对流泄漏量对密封间隙内和其周围的具体几何形状很敏感。

渗漏 压差引起的液相泄漏频繁地以滴出或流出的液体出现。这是实际中最受关注的泄漏模式。对于无害的流体,当不存在流体泄漏时,密封系统在技术上定义为是不漏的。该定义中,密封的大气侧的一个薄的弯液面通常不被认为是泄漏,尽管存在向大气的汽化。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

的粘度增加而减小。

带压的气体或蒸气的泄漏也与压差有关。当挥发液体通过密封间隙而改变相态时,也产生气体或蒸气相泄漏。相变可能由于压力降低或摩擦加热或两者兼之造成。相变时体积的增大具有有用的节流作用,因而减小了质量流率。

在毒性或污染控制受到关注的低泄漏率下,气体或蒸气泄漏可能不被注意到,除非使用敏感仪器,如采用对百万分之几浓度敏感的烃探测仪来探测。目前,这类探测仪使用火焰电离传感器或导热传感器。

1.4 摩擦、磨损和润滑

摩擦和磨损是接触型动密封中必然存在的问题。接触型动密封的密封件与被密封件相接触,由于有相对运动而产生摩擦,导致发热和零件表面的磨损,这是引起泄漏及密封件损坏的主要原因。表1-1为常用摩擦副材料的摩擦因数。

表1-1 常用摩擦副材料的摩擦因数

| 摩擦副材料 | 摩擦因数 | |
|-----------|------------------------|-----------------------|
| | 无润滑剂 | 有润滑剂 |
| 钢-钢 | 0.15 ^① | 0.1~0.12 ^① |
| | 0.1 | 0.05~0.2 |
| 钢-软钢 | 0.2 | 0.1~0.2 |
| 钢-不淬火的T8钢 | 0.15 | 0.03 |
| 钢-铸铁 | 0.2~0.3 ^① | 0.05~0.15 |
| | 0.16~0.18 | |
| 钢-黄铜 | 0.19 | 0.03 |
| 钢-青铜 | 0.15~0.18 | 0.1~0.15 ^① |
| | | 0.07 |
| 钢-铝 | 0.17 | 0.02 |
| 钢-轴承合金 | 0.20 | 0.04 |
| 钢-粉末冶金材料 | 0.35~0.55 ^① | 0.1 |
| 钢-夹布胶木 | 0.22 | |

续表

| 摩擦副材料 | 摩擦因数 | |
|--------------|--------------------------|--------------------------|
| | 无润滑剂 | 有润滑剂 |
| 钢 - 冰 | 0.027 ^① | |
| | 0.014 | |
| 石棉基材料 - 铸铁或钢 | 0.25 ~ 0.40 | 0.08 ~ 0.12 |
| 皮革 - 铸铁或钢 | 0.30 ~ 0.50 | 0.12 ~ 0.15 |
| 硬木 - 铸铁或钢 | 0.20 ~ 0.35 | 0.12 ~ 0.16 |
| 软木 - 铸铁或钢 | 0.30 ~ 0.50 | 0.15 ~ 0.25 |
| 毛毡 - 铸铁或钢 | 0.22 | 0.18 |
| 软钢 - 铸铁 | 0.2 ^① , 0.18 | 0.05 ~ 0.15 |
| 软钢 - 青铜 | 0.2 ^① , 0.18 | 0.07 ~ 0.15 |
| 铸铁 - 皮革 | 0.55 ^① , 0.28 | 0.15 ^① , 0.12 |
| 铸铁 - 铸铁 | 0.15 | 0.15 ~ 0.16 ^① |
| | | 0.07 ~ 0.12 |
| 铸铁 - 橡胶 | 0.8 | 0.5 |
| 铸铁 - 青铜 | 0.28 | 0.16 ^① |
| | 0.15 ~ 0.21 | 0.07 ~ 0.15 |
| 皮革 - 木材 | 0.4 ~ 0.5 ^① | |
| | 0.03 ~ 0.05 | |
| 铜 - 铜 | 0.20 | |
| 黄铜 - 黄铜 | 0.17 | 0.02 |
| 黄铜 - 硬橡胶 | 0.25 | |
| 黄铜 - 钢 | 0.30 | 0.02 |
| 青铜 - 黄铜 | 0.16 | |
| 青铜 - 青铜 | 0.15 ~ 0.20 | 0.04 ~ 0.10 |
| 青铜 - 钢 | 0.16 | |
| 青铜 - 夹布胶木 | 0.23 | |
| 青铜 - 树脂 | 0.21 | |
| 青铜 - 硬橡胶 | 0.36 | |
| 青铜 - 石板 | 0.33 | |
| 铝 - 黄铜 | 0.27 | 0.02 |
| 铝 - 青铜 | 0.22 | |
| 铝 - 钢 | 0.30 | 0.02 |

续表

| 摩擦副材料 | 摩擦因数 | |
|--|----------------------|-----------|
| | 无润滑剂 | 有润滑剂 |
| 铝-夹布胶木 | 0.26 | |
| 硅铝合金-夹布胶木 | 0.34 | |
| 硅铝合金-树脂 | 0.28 | |
| 硅铝合金-硬橡胶 | 0.25 | |
| 硅铝合金-石板 | 0.26 | |
| 木材-木材 | 0.4~0.6 ^① | 0.1 |
| | 0.2~0.5 | 0.07~0.10 |
| 麻绳-木材 | 0.5~0.8 ^① | |
| | 0.5 | |
| 45 钢淬火-聚甲醛 | 0.46 | 0.016 |
| 45 钢淬火-尼龙 9(加 3% MoS ₂ 填充料) | 0.57 | 0.02 |
| 45 钢淬火-尼龙 9(加 30% 玻璃纤维填充料) | 0.48 | 0.023 |
| 45 钢淬火-尼龙 1010(加 30% 玻璃纤维填充料) | 0.089 | |
| 45 钢淬火-尼龙 1010(加 40% 玻璃纤维填充料) | 0.07 | |
| 45 钢淬火-氯化聚酯 | 0.35 | 0.034 |
| 45 钢淬火-苯乙烯-丁二烯-丙烯腈共聚体 (ABS) | 0.35~0.46 | 0.018 |

注:表中未注明者为滑动摩擦因数。①为静摩擦因数。

根据轴承润滑理论研究机械密封,由实验得出密封准数 G 与摩擦因数 f 有下面关系:

$$f = \psi G^m = \psi \left(\frac{\eta v b}{W} \right)^m \quad (1-1)$$

式中密封准数 G 为:

$$G = \eta v b / W \quad (1-2)$$

式中: η ^① ——密封流体粘度;

v ——密封端面平均线速度;

b ——密封圈端面宽度, $b = (d_2 - d_1)/2$;

d_1, d_2 ——端面内、外直径;

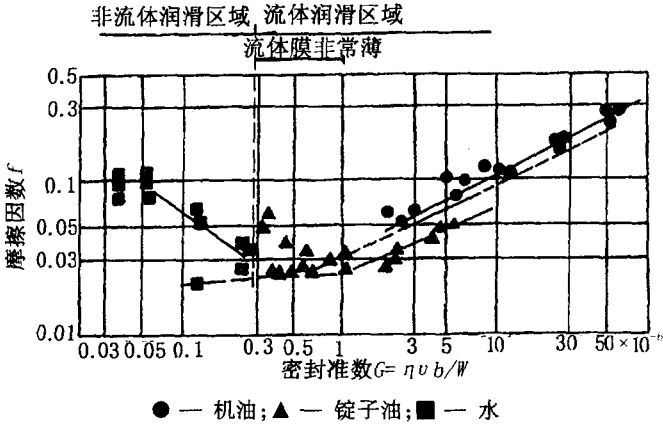
W ——端面承受的总载荷;

ψ ——密封特性数,由密封形式而定;

m ——动密封指数,见表 1-2

G 值越大,表示越容易形成液膜,相应的液膜厚度也越大。

图 1-2 为机械密封的 $f-G$ 实验曲线。由图可见,当 $G \geq 1 \times 10^{-6}$ 时,密封面间有较厚的液膜。



● — 机油; ▲ — 锭子油; ■ — 水

图 1-2 机械密封的 $f-G$ 实验曲线

图 1-3 中的虚线为液膜最小厚度 h_0 等值线,当 $G \geq 1 \times 10^{-6}$ 时,

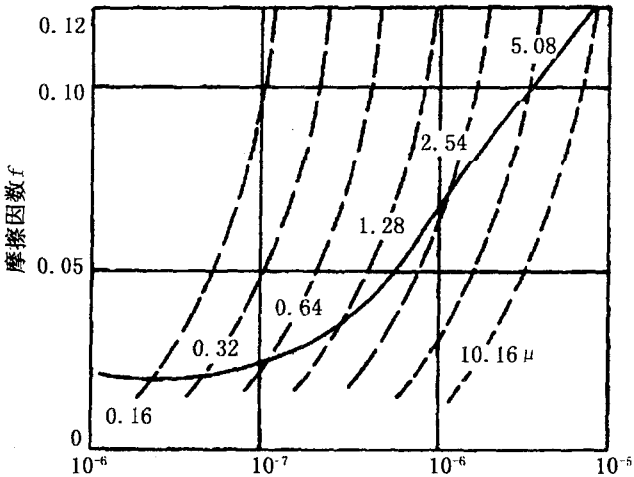


图 1-3 h_0 等值线及 $f-G$ 曲线实验值

两个密封面被液膜完全隔开,处于流体润滑状态。

在 $G = (0.1 \sim 1) \times 10^{-6}$ 范围内, $\psi \neq$ 常数,此时密封面处于边界润滑状态或半流体润滑状态,两表面被一层具有分层结构和润滑性能的边界膜分开。

对于一定的结构、尺寸和材料组对的密封, ψ 存在着一个临界值 ψ_c , $\psi > \psi_c$ 为密封区, $\psi < \psi_c$ 为泄漏区。

ψ_c 与密封面的直径 D 和宽度 b 之比 D/b 以及摩擦副材料有关。 D/b 值越小,即直径一定时,密封面越宽, ψ_c 值越小,表示越容易密封。而摩擦副材料组对不同, ψ_c 值也有差异。例如,当不锈钢分别与纯石墨和浸渍酚醛树脂的石墨组对时,后者的 ψ_c 更小,说明这种组对具有更好的密封性能。

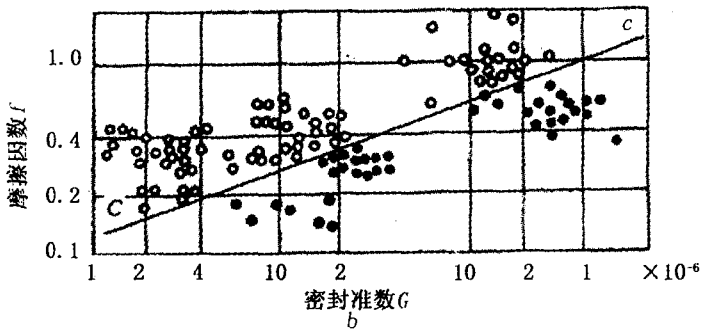
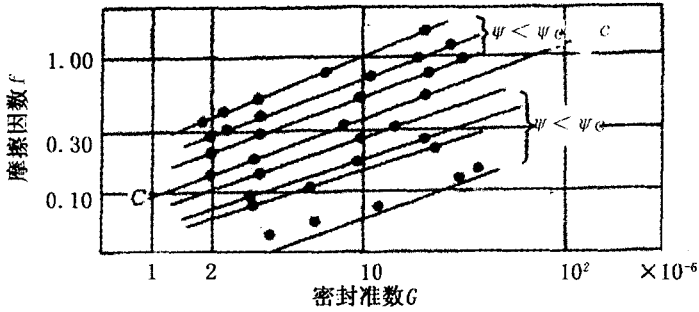
图 1-4 为典型的摩擦特性。图 1-4 a 为机械端面密封的 $f-G$ 特性,而图 1-4 b 为唇形密封的 $f-G$ 特性。图中空心点为密封点,而黑点为泄漏点。 $\psi = \psi_c$ 为密封与泄漏分界线(临界值);当 $\psi < \psi_c$ 时密封泄漏;当 $\psi > \psi_c$ 时密封不漏。表 1-2 列出各种动密封的指数 m 及密封特性数临界值 ψ_c 。

表 1-2 各种动密封的指数 m 及特性数 ψ 值

| 类别 | 型式 | m | 摩擦特性 | ψ_c | G |
|-----------|---------|---------------|----------------------------|-------------------------|---------------------|
| 往复 动密封 | 油封 | | | $\psi_c = 16$ | |
| | 阀杆密封 | $\frac{1}{2}$ | $f = \psi G^{\frac{1}{2}}$ | $\psi_c = 18$ | $\frac{\mu u D}{P}$ |
| | O形圈密封 | | | $\psi_c = 7$ | |
| 旋转 动密封 | 油封 | 1/3 | $f = \psi G^{\frac{1}{2}}$ | $\psi_c = 34$ | $\frac{\mu u D}{P}$ |
| | 机械端面密封 | 1/3 | | $\psi_c = 100 \sim 250$ | |
| | Y形密封件密封 | 1/2 | $f = \psi G^{\frac{1}{2}}$ | $\psi_c = h^{-3.2}$ | $\frac{\mu u D}{W}$ |
| | O形圈密封 | 4/5 | $f = \psi G^{\frac{1}{2}}$ | 23.1 ~ 64.6 | |

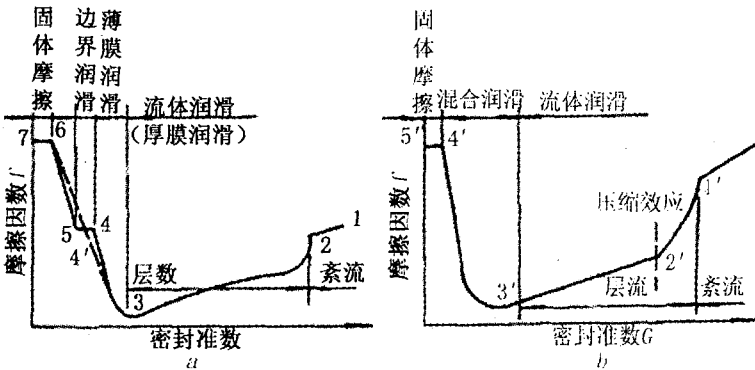
注: u —周向线速度; P , W —径向载荷。

此外,摩擦特性还可以用来区别密封的摩擦状态。图 1-5 所示为判别摩擦状态用摩擦特性,即摩擦学中的斯屈列贝克曲线(Stribeck curve)。如图 1-5 a 所示:1~2 为紊流区,2~3 为层流区,1~3 为液体润滑(厚膜润滑)区,该区的液体膜厚度与表面粗糙度之比(膜厚比) $\lambda = h/\sigma$ 较大为 $\lambda = 3 \sim 5$ 。3~4 为流体润滑与边界润滑的混合润滑



a—机械端面密封的 $f-G$ 特性；b—唇形密封的 $f-G$ 特性

图 1-4 旋转轴密封的摩擦因数 f 与密封准数 G 关系的摩擦特性



a—液体密封；b—气体密封

图 1-5 判别摩擦状态用的曲线

区(虚线),该区 $\lambda \leq 3$,第一凸峰可能接触。3 ~ 4 为弹性流体润滑或部分弹性流体润滑(薄膜润滑)区, $\lambda \leq 1$ 会造成固体接触。4 ~ 6 为边界润滑与固体摩擦的混合润滑区(虚线),该区 $\lambda \geq 0.4$ 。6 ~ 7 为固体摩擦区, $\lambda < 0.4$,完全失去液膜的承载能力。

膜厚比为计算最小液膜厚度 h 与表面粗糙度 σ 之比,即

$$\lambda = \frac{h}{\sigma} = \frac{h}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}} \quad (1-3)$$

式中: R_{a1}, R_{a2} ——均方根误差。

通常用 λ 来衡量润滑状态过渡的过程转化参数。

表 1-3 列出各种摩擦状态及其典型特征。

表 1-3 列出各种摩擦状态及其典型特征

| 摩擦工况 | 干摩擦 | 边界摩擦 | 混合摩擦 | 液体摩擦 |
|----------|-------------|-----------------|--|--------------|
| 润滑状态 | 无润滑 | 仅在配合面上有吸附的气膜或液膜 | 部分润滑 | 完全润滑 |
| 粘度影响 | 无影响 | | 部分影响 | 决定性影响 |
| 过程特征 | 配合表面在表面峰处焊合 | 在少数分子层有分子的机械作用 | 部分的分子机械作用和部分的流体动压和流体静压作用(包括微观流体动压与静压的作用) | 流体动压或流体静压作用 |
| 摩擦因数(约值) | 0.1 ~ 0.60 | 0.05 ~ 0.15 | 0.005 ~ 0.10 | 0.001 ~ 0.05 |
| 膜厚比 | <0.4 | ≤ 1 | ≤ 2 | 3 ~ 5 |

1.5 密封材料

1.5.1 密封材料的种类及用途

密封材料应满足功能的要求。由于被密封的介质不同,以及设备的工件条件不同,要求密封材料具有不同的适用性。对密封材料的要求一般是: