

陈德才 崔德容 编著

机械密封 设计制造

与 使用

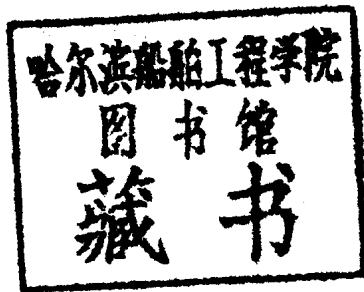
机械工业出版社

7.11.146
C38

366580

机械密封设计制造与使用

陈德才 崔德容 编著



机械工业出版社

07/64
(京)新登字054号

本书是一本实用性强、全面阐述有关机械密封的专业书籍。全书共十章，内容分三大部分：主要阐述机械密封的设计计算、机械密封零部件的选材、密封系统分析及设计、典型工况的结构分析及结构设计；机械密封的制造技术及检测标准和检测方法；机械密封的选型、使用、失效分析及对策。此外，在附录中列入了部分机械密封的国家标准及部颁标准；介绍了与机械密封有关的材料性能和牌号。

本书可供各工程领域中设计、制造、使用机械密封的工程技术人员参考。

机械密封设计制造与使用

陈德本 崔德容 编著

责任编辑：王正琼 版式设计：霍永明

封面设计：姚毅

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码：100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京市顺义县后沙峪印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/8}$ ·印张21 1/8·插页1·字数471千字

1993年4月北京第1版·1993年4月北京第1次印刷

印数 0 001—6 000·定价：17.00元

ISBN 7-111-03599-2/TB·176(x)

序

在现代工业装置系统中，广泛而大量地使用着各种各样的流体机械。随着工业技术的进步，流体机械正向着大型化、高参数、节能方向发展。在这些机械中，转轴的密封是关键技术之一。轴封的泄漏不仅浪费能源和原料，同时也污染环境。因此，密封技术愈来愈受到人们的重视。尤其是机械密封，由于它是节能、治漏、防污染、保安全的先进轴封型式，近年来在结构设计、研究方面取得了大量成果，并在推广应用积累了丰富的经验。

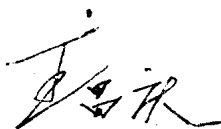
鉴于目前有关机械密封的实用性技术书籍较少，因此如何从科研、生产与应用实践中不断总结出具有共性和规律性的经验并上升为理论，这是从事密封技术的科技人员的一项重要的工作。这也正是作者撰写本书的初衷。本书作者是专门从事密封技术研究的科技人员，在长期工作实践中积累了丰富的经验，书中凝聚了作者多年的心血。

本书在内容安排方面，除用一定篇幅讲述有关机械密封的基础知识、设计方法、材料选用外，大部分篇幅致力于介绍本专题的重要成果。例如，机械密封结构设计及选型；特殊工况用机械密封；各种零件加工、制造与检验；密封失效分析与对策等。其中，还介绍了许多通用型机械密封产品，可供读者参考。这都充分体现了本书的实用性。

本书的出版，不仅作者付出了辛勤的劳动，而且得到了多方面的支持和帮助。但愿本书的出版能使读者有所得益，

并促进我国机械密封技术的科研和生产进一步开展。

中国机械工程学会流体工程分会理事长
教授级高级工程师



1992年10月

前 言

机械密封是重要的基础件，广泛应用于各种旋转设备中。它的质量和性能，直接影响并决定着设备的工作性能。因此，提高其设计、制造与使用水平至关重要。

鉴于我国石化工业的蓬勃发展以及节约能源和环境保护的急需，为此编写了“机械密封设计制造与使用”一书，供广大读者参考。

本书素材主要来源于作者的工作实践与体会，并综合了国内外部分文献的精华，内容十分丰富，实用性较强。

本书第1、2、4章由崔德容执笔，第3、5、6、7、8、9、10章由陈德才执笔。全书由陈德才统稿，天津大学李克永教授主审。

本书在撰写过程中，曾得到江苏沙州工学院密封技术研究所盛永康、昆山市釜用机械密封件厂吴建明、张家港市机械密封件厂朱贵荣、成都流体密封件厂刘世琴、江苏武进机械密封件厂夏小安、浙江鄞县机械密封件厂励康智、上海天依通用机械密封产品经营部徐宝全、浙江乐合密封件厂李一雄、上海化机二厂刘洪德，以及参加本书审稿会同仁的支持，《流体工程》编辑部为支持本书的出版做了大量工作，在此一并致以衷心的感谢。

限于作者水平，书中难免有不妥之处，请读者批评指正。

编 者

1992年5月于合肥

目 录

序

前言

第1章 概述	(1)
第1节 基本概念	(1)
第2节 分类	(8)
第3节 密封参数	(24)
第4节 现状与发展	(44)
第2章 机械密封的设计	(48)
第1节 补偿环设计	(51)
第2节 非补偿环设计	(64)
第3节 其它部件设计	(72)
第4节 总成设计	(96)
第5节 设计计算	(112)
第3章 机械密封材料	(118)
第1节 摩擦副组对材料	(118)
第2节 辅助密封圈材料	(148)
第3节 弹性元件材料	(156)
第4节 其它结构件材料	(158)
第4章 机械密封系统	(164)
第1节 密封系统的器件	(166)
第2节 密封系统的基本流程	(177)
第3节 密封系统的设计	(188)
第5章 特殊工况用机械密封	(197)
第1节 耐腐蚀机械密封	(197)

第2节	含杂质介质用机械密封	(221)
第3节	特殊介质用机械密封	(260)
第4节	真空器件用机械密封	(287)
第5节	反应釜用机械密封	(293)
第6节	船用机械密封	(325)
第7节	高负荷机械密封	(340)
第6章	加工与制造	(382)
第1节	金属零件	(382)
第2节	堆焊、喷涂及RC合金环	(406)
第3节	石墨浸渍处理	(413)
第4节	圆弧面密封环的车削加工	(422)
第5节	硬质合金环磨削加工	(426)
第6节	聚四氟乙烯零件	(434)
第7节	波形弹簧与焊接波纹管	(445)
第8节	研磨与抛光	(456)
第7章	密封的检测与试验	(481)
第1节	密封件的检测	(481)
第2节	机械密封的试验技术	(501)
第8章	通用型机械密封产品介绍	(518)
第1节	泵用机械密封	(518)
第2节	釜用机械密封	(529)
第9章	机械密封的选用	(543)
第1节	选型方法	(543)
第2节	订货注意事项	(544)
第3节	验收与检测	(546)
第4节	机械密封对机器精度的要求	(548)
第5节	机械密封的保管与使用	(553)
第6节	填料密封改装机械密封	(556)
第10章	密封失效分析与对策	(561)

第1节	泄漏失效分析	(561)
第2节	从摩擦副用材料分析故障原因	(566)
第3节	从失效形式分析故障原因	(569)
第4节	密封失效典型实例分析	(583)
第5节	选型与使用	(592)
附录A	有关机械密封的主要技术标准	(601)
一、	机械密封的型式、主要尺寸、材料和识别标志 (GB6556—86)	(601)
二、	机械密封技术条件 (JB4127—85)	(611)
三、	机械密封用O形橡胶圈 (ZBJ22002—88)	(615)
四、	机械密封试验规范 (JB4236—86)	(630)
五、	机械密封产品验收技术条件 (ZBJ22006—88) ...	(636)
六、	有关釜用机械密封标准名录	(639)
附录B	机械密封材料及性能	(641)
附表B-1	各国不锈钢牌号对照及其合金成份	(641)
附表B-2	常用不锈钢耐酸钢在各种腐蚀介质 中的耐蚀性	(645)
附表B-3	耐磨硬质合金国内外牌号对照	(653)
附表B-4	国际标准组织 (ISO) 硬质合金分类、代号、成份及性能	(656)
附表B-5	国外氧化铝陶瓷主要牌号及性能	(657)
附表B-3	国外生产的耐磨石墨密封材料的 物理力学性能	(657)
附表B-7	丁腈橡胶分类及各国相应牌号	(658)
附表B-8	乙丙橡胶的分类及国外牌号对照	(661)
附表B-9	硅橡胶主要品种特性及国外商品牌号	(663)
附表B-10	国内外23型氟橡胶的主要品种和性能	(664)
附表B-11	国内外26型氟橡胶主要品种及特性	(664)
参考文献		(667)

第1章 概 述

第1节 基 本 概 念

机械密封是一种用来解决旋转轴与机体之间密封的装置。它是由至少一对垂直于旋转轴线的端面在流体压力和补偿机构弹力（或磁力）的作用及辅助密封的配合下保持贴合并相对滑动而构成防止流体泄漏的装置，常用于泵、压缩机、反应搅拌釜等旋转式流体机械，也用于齿轮箱、阀门、旋转接头、船舶尾轴等密封。因此，机械密封是一种通用的轴封装置。

一、基本结构与作用

机械密封的结构多种多样，最常用的结构如图1-1所示：机械密封安装在旋转轴上，筒状密封腔内有补偿环1、补偿环辅助密封圈2、弹簧3、弹簧座4、紧定螺钉5，它们都随轴一起旋转，称为补偿环组件。机械密封的其它零件，非补偿环6、非补偿环辅助密封圈7和防转销8，安装在与机体用双头螺栓联接的端盖内，旋转轴贯穿其中，相互不接触，且相对静止，称为非补偿环组件。

弹簧座用紧定螺钉固定在轴上，并圈弹簧装在弹簧座和补偿环的台阶上，靠过盈配合带动补偿环旋转。弹簧加载使补偿环与非补偿环相互贴合，构成密封端面。补偿环不与轴接触，而是通过其辅助密封圈支承于轴上。非补偿环不与端盖接触，而是通过其辅助密封圈支承在端盖内。非补偿环端

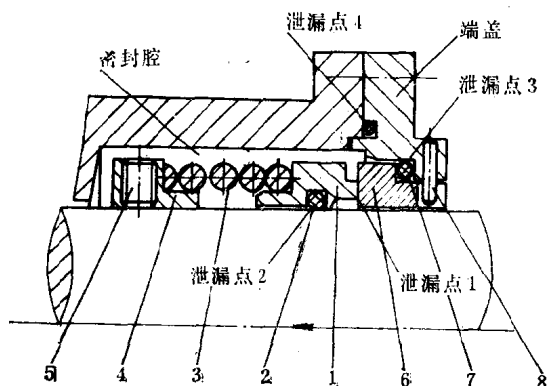


图1-1 机械密封基本结构（旋转式）

- 1—补偿环 2—补偿环辅助密封圈 3—弹簧 4—弹簧座
5—紧固螺钉 6—非补偿环 7—非补偿环辅助密封圈
8—防转销

面向着主机工作腔，补偿环端面背着主机工作腔。防转销固定在端盖上，插入非补偿环的槽内，以防转动。

当密封腔内充满了压力流体时，由图1-1可见，压力流体有4个泄漏点。泄漏点1是在补偿环与非补偿环接触的端面间，这个部位称为主密封。泄漏点2、泄漏点3分别处于补偿环与旋转轴之间、非补偿环与端盖之间，这个部位称为辅助密封。工作时，辅助密封圈无明显相对运动，基本上属于静密封，并且泄漏点4不属于机械密封，它处于端盖与机体的联接处，常用O形圈或垫片来密封。

机械密封安装后，依靠弹簧的弹力，以克服补偿环辅助密封圈与轴之间的摩擦阻力，使补偿环端面紧紧地贴住非补偿环的端面。此时，有初始闭合力存在。当主机开始工作时，密封腔充满了压力流体，而产生更强有力的轴向推力，使密封端面贴合更紧密。由于端面的平面度高和粗糙度小，

在压力流体的作用下，相对滑动的端面间便出现了边界摩擦或半液体摩擦状态，足以防止压力流体的明显泄漏，实现了主密封。

图1-1所示机械密封的补偿环组件处于旋转状态，这是机械密封的常用型式，称为旋转式机械密封。但是，在高速情况下，圆柱螺旋弹簧会因离心力而失效。此时，应采用图1-2所示的静止式机械密封。

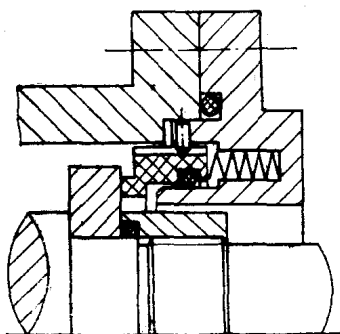


图1-2 机械密封的基本结构
(静止式)

静止式机械密封的结构和布置与旋转式机械密封相反，它的补偿环组件安装在与机体联接的带有假轴套的弹簧座上，而非补偿组件则安装在与轴联接的轴套上，其作用完全与旋转式机械密封相同。

图1-1、图1-2所示的机械密封分别采用了单根弹簧和多根弹簧，前者称为单弹

簧式，后者称为多弹簧式机械密封。

二、主要零件及其功用

机械密封由5个部分组成：①由补偿环和非补偿环构成的密封端面，亦称摩擦副；②由弹性元件为主构成的加载、补偿和缓冲机构；③辅助密封；④与旋转轴联接，并同轴一起旋转的传动机构；⑤防转机构。由于机械密封的结构不同，其零件也不尽相同，但这5个要素基本上都应具备。

1. 补偿环与非补偿环 补偿环是具有轴向补偿能力的密封环，它可以是旋转环（亦称动环），也可以是非旋转环。

非补偿环是不具有轴向补偿能力的密封环，同样可以是旋转环，也可以是非旋转环（亦称静环）。两者的端面贴合在一起构成密封端面。它是机械密封的主要构件，起主密封作用。近来在不少情况下，补偿环用软质材料制造，端面较窄；非补偿环用硬质材料制造，端面较宽。

2. 弹性元件与弹簧座 由它们构成了加载、补偿和缓冲机构，以保证机械密封在安装后端面贴合；在磨损时及时补偿；在受振动、窜动时起缓冲作用。

（1）弹性元件 指弹簧或波纹管之类具有弹性的元件。由弹性元件产生的弹力的大小必须足以克服补偿环辅助密封圈在轴（轴套）上滑动时的摩擦阻力；在图1-1所示的机械密封结构中，还要能足以防止密封腔处于真空状态时，补偿环和非补偿环被吸入密封腔。过大的弹性力会加剧密封端面的磨损，影响使用性能。弹簧可以是单个圆柱螺旋弹簧、圆锥螺旋弹簧，亦可以是多个周向布置的圆柱螺旋弹簧，或成对的片状波形弹簧、碟形弹簧等。

（2）弹簧座 用于弹簧轴向和径向定位的零件，通常还兼备传递转矩或克服转矩的功能。

3. 辅助密封圈 起辅助密封作用，分补偿环辅助密封圈和非补偿环辅助密封圈。

（1）补偿环辅助密封圈 按其截面形状分为O形圈、V形圈、楔形环等，用来密封补偿环与轴（轴套）之间的泄漏。

（2）非补偿环辅助密封圈 在旋转式机械密封中用以密封非补偿环与端盖之间的泄漏；在静止式机械密封中用以密封非补偿环与轴（轴套）之间的泄漏。它的截面形状有O形、V形、矩形，也有垫片形式。

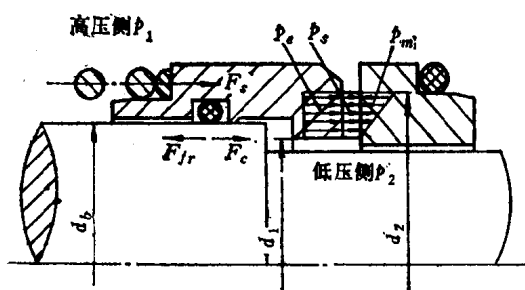
4. 传动机构 起传递转矩的作用。在旋转式机械密封

中，多弹簧结构常用凸圆凹坑、柱销、拨叉等方式传动，传动机构多布置在弹簧座和补偿环上；单弹簧结构常以弹簧自身的并圈或带钩结构兼起传动作用。在静止式机械密封中，旋转环常以键、柱销来传动。

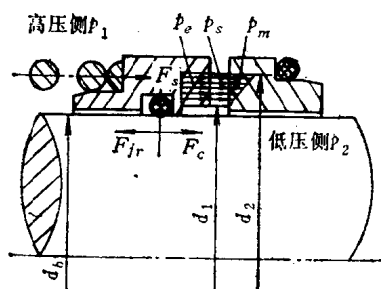
5. 防转机构 起克服转矩作用，其结构型式与传动结构相反。

三、基本力学分析

机械密封的使用性能主要取决于主密封。起主密封作用的



a)



b)

图1-3 机械密封端面基本力学分析

a) 平衡型机械密封 b) 非平衡型机械密封

的密封端面是由一层极薄的（一般厚度为 $0.0006 \sim 0.006 \mu\text{m}$ ）流体膜来润滑，以保证其正常工作，而这又取决于这对摩擦端面的摩擦状态。因此，对密封端面的力学分析极其重要。

图1-3 是机械密封端面基本力学分析的示意图。

1. 密封环带面积 A 指较窄的密封端面外径 d_2 与内径 d_1 之间的环形

区域的面积，即与另一个密封端面的有效接触面积。

$$A = \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2) \quad (1-1)$$

式中 d_1 ——密封环带的内径 (mm)；

d_2 ——密封环带的外径 (mm)。

2. 弹簧比压 p_s 。指弹簧处于工作高度时，自身产生的弹性力 F_s 所施加到密封环带单位面积上的力。

$$p_s = \frac{F_s}{A} = \frac{F_s}{\frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2)} \quad (1-2)$$

式中 F_s ——弹簧处于工作高度时的弹性力 (N)。

3. 密封流体压力有效作用面积 A_e 。指密封流体压力作用在补偿环上，使之对非补偿环趋于闭合的有效作用面积。

$$A_e = \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_b^2) \quad (1-3)$$

式中 d_b ——滑移直径，指密封流体压力在补偿环辅助密封圈处的轴 (或轴套) 直径 (mm)。

4. 密封流体压力作用比压 p_e 。指密封流体压力施加到密封环带单位面积上的力。

$$\begin{aligned} p_e &= \frac{p A_e}{A} \\ &= \frac{p \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_b^2)}{\frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2)} \\ &= p \frac{d_2^2 - d_b^2}{d_2^2 - d_1^2} \quad (1-4) \end{aligned}$$

式中 p ——密封流体压力，指机械密封内外侧流体的压力

差 (MPa)。

$$p = p_1 - p_2 \quad (1-5)$$

式中 p_1 ——机械密封高压侧的流体压力 (MPa);

p_2 ——机械密封低压侧的流体压力 (MPa)。

当密封流体压力 p 较大时, 密封流体压力作用比压 p_e 随之增大, 以致破坏密封端面间的流体膜, 使机械密封不能正常工作。因此, 常将密封流体压力较高的 (一般 $p > 1\text{MPa}$) 机械密封设计成图 1-3a 的型式, 即平衡型机械密封。此时, 滑移直径 d_e 便处于密封环带之间。这样, 密封流体压力有效作用面积 A_e 相应减小, 密封流体压力作用比压 p_e 也减小, 从而保证了机械密封的正常工作。

5. 载荷系数 K 指密封流体压力作用在补偿环上, 使之对于非补偿环趋于闭合的有效作用面积 A_e 与密封环带面积 A 之比。

$$K = \frac{A_e}{A} = \frac{d_2^2 - d_e^2}{d_2^2 - d_1^2} \quad (1-6)$$

因此, 式 (1-4) 可写为:

$$p_e = Kp \quad (1-7)$$

当 $K \geq 1$ 时, 即 $A_e \geq A$, 密封流体压力作用面积大于或等于密封环带面积 (承载面积), 称为非平衡型机械密封。

当 $K < 1$ 时, 即 $A_e < A$, 密封流体压力作用面积小于密封环带面积 (承载面积), 称为平衡型机械密封。

6. 平均流体膜压力 p_m 指密封端面间流体膜的平均压力。

$$p_m = \frac{\int_A p_r dA}{A} \quad (1-8)$$

式中 p_r ——在半径为 r 处密封端面上的流体膜压力(MPa)。

7. 反压系数 λ 指密封端面间流体膜平均压力 p_m 与密封流体压力 p 之比。

$$\lambda = \frac{p_m}{p} \quad (1-9)$$

对于水, 流体膜压力 p_r 的分布如图1-3所示, 即:

$$p_m = 0.5p, \lambda = 0.5$$

8. 闭合力 F_c 。指由密封流体压力 p 和弹簧弹力 F_s 等引起的作用于补偿环上使之对于非补偿环趋于闭合的力。

$$F_c = p_e A + p_s A \pm (F_{fr} + F_i)$$

式中 F_{fr} ——摩擦力(N);

F_i ——惯性力(N)。

在稳定工作条件下, 不考虑摩擦力和惯性力的影响, 因此

$$\begin{aligned} F_c &= p_e A + p_s A \\ &= (K p_e + p_s) A \end{aligned} \quad (1-10)$$

9. 开启力 F_o 。指作用于补偿环上使之对于非补偿环趋于开启的力。

$$F_o = \lambda p A \quad (1-11)$$

10. 端面比压 p_o 。指作用在密封环带上单位面积上净闭合力。

$$\begin{aligned} p_o &= \frac{F_c - F_o}{A} \\ &= p_s + p(K - \lambda) \end{aligned} \quad (1-12)$$

第2节 分 类

机械密封的分类方法较多, 可以按结构布置、端面比压