

机械密封技术问答

沈锡华 编



机械工业出版社

本书以技术问答的形式阐述了机械密封的基本原理、分类、结构设计、材料选用和制造与检验。同时,根据实际应用过程中常出现的问题,也通过问答形式介绍了机械密封的标准、安装要领及故障处理。

本书可供从事机械密封设计、制造和使用的工程技术人员参考,也可作为大专院校的教学参考书。

机械密封技术问答

沈锡华 编

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外大街25号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $8 \frac{3}{8}$ · 字数 179 千字

1986 年 12 月北京第一版 · 1986 年 12 月北京第一次印刷

印数 0,001—8,500 · 定价 2.25 元

*

统一书号: 15033 · 6466

前 言

近十几年来，随着社会的发展，人类面临着能源短缺、环境污染和人口膨胀三大危机的挑战已越来越严峻。能源问题已成为社会需要的基础，而环境的严重污染又直接影响着人类的生存。在这种情况下，各国近年来都十分重视节约能源和环境保护方面的工作。并相应的制定了适合本国国情的环境保护法和能源政策，以迎接这一严峻的挑战。可是，目前机器设备普遍存在着跑、冒、滴、漏现象，这些漏泄出来的介质不仅加重了环境污染，而且也造成了严重的能源损失。尤其是对于象我国目前能源利用率还很低的情况下更应注意因跑、冒、滴、漏而造成的能源浪费。即使是工业发达的国家（能源利用率为50%左右），目前也在极力采取措施防止机器设备因跑、冒、滴、漏而造成的能源浪费。这就是目前各国都对既能节约能源又能减少环境污染的密封技术十分重视的原因。当然，开发密封技术的意义还不仅仅只在于此，因为先进的密封技术也是自动化连续生产、文明生产所必不可少的。

密封技术的开发从根本意义上来讲就是为了制造出先进的密封件；即机器设备阻止介质漏泄的部件。根据密封的结合面是否产生相对运动，人们又常把密封分成动密封和静密封两大类。相对静止的结合面间的密封称为静密封，相对运动的结合面间的密封称为动密封。

密封技术一经得到人们的重视，发展就十分迅速，随着

近代工程发展的需要，流体机械的使用范围也在不断扩大，高温密封、低温密封、超低温密封、高压密封、高真空密封、高速密封以及易燃、易爆、强腐蚀性介质的密封也都应运而生，而机械密封则是目前所出现的各种先进密封结构中较为成熟的一种接触型动密封。

由于动密封的种类繁多，人们通常又把动密封分为接触型动密封和非接触型动密封两大类。在接触型动密封中除了机械密封以外，还包括软填料密封、硬填料密封、成型填料密封、油封、胀圈密封等等。它是借助密封力的作用，使密封面靠紧接触，以消除或减少间隙的一种密封。对于非接触型动密封，则包括迷宫密封、浮环密封、间隙密封、离心密封、螺旋密封以及磁流体密封等等。它是在密封面上预留一定的装配间隙的密封。但是，无论那种密封，对密封件都有一个共同的要求，即：

1. 严密、漏泄量少；
2. 可靠、使用寿命长；
3. 结构简单、紧凑；
4. 维修方便；
5. 成本低廉、价格便宜；
6. 互换性好。

机械密封对于解决这些问题确实有它本身的独到之处。正因为如此，机械密封近年来已得到了较为广泛的应用。不过，由于国内的机械密封目前与国外相比，在使用温度、压力、轴径、转速以及介质种类方面还较落后，在使用寿命和漏泄量方面也有一定的差距。因此，机械密封要获得更加广泛的应用，不仅有普及方面的任务，还有提高方面的重任。而本书则是编者在多次“机械密封学习班”上讲授“机械密

封基础”的过程中所遇到的一些实际问题，以技术问答的形式编写的普及读物，供工厂企业的工程技术人员和技术工人在推广应用机械密封时参考。也可作为大专院校的教学参考书。

本书在编写过程中，曾得到大庆石油化工总厂总机械师尹久征同志的指导和帮助，脱稿后，又曾请刘志国、石富江两同志指教，他们提出了许多宝贵意见，在此表示深切的谢意。

由于编者水平有限，书中不当之处在所难免，敬请广大读者批评、指正。

编者

1984.12

目 录

一、基本知识——原理、组成、分类及受力分析	7
题 1. 什么是机械密封?	7
题 2. 机械密封是如何工作的?	7
题 3. 机械密封有那些主要组成部分?	3
题 4. 机械密封的密封机理是什么?	4
题 5. 机械密封在流体密封技术中所占的位置如何?	7
题 6. 机械密封主要零件的功用是什么?	10
题 7. 衡量机械密封水平的主要标志有那些?	12
题 8. 机械密封与填料密封相比有那些优点?	12
题 9. 机械密封有那些缺点?	15
题 10. 目前国内的机械密封与国外相比有那些差距?	14
题 11. 机械密封按结构可分为那几大类? 其主要特点 是什么?	15
题 12. 波纹管型机械密封根据制造方法分为几类? 有何特点? 目前适用条件如何?	20
题 13. 目前国外机械密封有那些具有代表性的新结构?	21
题 14. 机械密封目前国内有那些典型结构?	31
题 15. 影响机械密封使用寿命和密封性能的主要因素 有那些?	39
题 16. 什么是机械密封的非平衡型结构?	42
题 17. 什么是机械密封的平衡型结构?	43
题 18. 什么是机械密封的加荷面积和加荷系数?	44
题 19. 什么是机械密封的平衡面积和平衡系数?	45
题 20. 什么是机械密封端面的反压系数? 密封端面间的 压力是如何分布的?	46
题 21. 什么是机械密封的端面比压? 目前在设计时如何	

计算端面比压?	48
二、机械密封设计	54
题 22. 机械密封设计的评价条件有那些?	54
题 23. 机械密封动环的常用结构型式有那些?	54
题 24. 机械密封静环的常用结构型式有那些?	56
题 25. 机械密封辅助密封圈的主要结构型式有那些?	56
题 26. 机械密封动环的传动方式主要有那几种?	57
题 27. 机械密封静环的支承方法有那几种?	58
题 28. 机械密封动环的支承方法有那几种?	59
题 29. 机械密封端面宽度的选择原则是什么?	59
题 30. 机械密封常用的端面宽度为多少?	60
题 31. 如何确定机械密封辅助密封圈的尺寸?	61
题 32. 如何确定机械密封的弹簧比压?	62
题 33. 选择机械密封用弹簧结构型式的原则是什么?	63
题 34. 如何确定机械密封用弹簧的尺寸?	64
题 35. 机械密封用受压缩圆柱螺旋弹簧的计算程序如何?	66
题 36. 机械密封用受压缩——扭转联合作用的圆柱螺旋 弹簧的计算程序如何?	68
题 37. 如何计算机械密封的摩擦功率?	73
题 38. 机械密封的端面摩擦热与那些因素有关?	76
题 39. 为了减少机械密封摩擦副环的变形, 在结构设计, 材料选择、制造工艺等方面应注意些什么?	76
题 40. 影响机械密封端面热裂的主要因素有那些?	80
题 41. 机械密封端面热裂的机理是什么?	83
题 42. 机械密封摩擦副环考虑耐粘性在设计时应注意些 什么?	85
题 43. 机械密封静环考虑耐扭性在设计上应注意些什么?	86
题 44. 机械密封静环考虑耐压性在设计上应注意些什么?	87
三、机械密封端面的摩擦磨损与漏泄	88

- 题 45. 机械密封摩擦副常见的摩擦状态有几种?
最佳状态是那一种? 88
- 题 46. 什么是机械密封的密封准数? 试述其物理意义? 89
- 题 47. 影响机械密封端面摩擦系数的主要因素有那些? 91
- 题 48. 机械密封摩擦副环端面耐磨性的物理意义是什么? 94
- 题 49. 机械密封端面的磨损主要有那几种形式?
其磨损机理是什么? 95
- 题 50. 如何建立机械密封的端面流体润滑? 100
- 题 51. 要获得摩擦副端面流体润滑应具备那些条件? 101
- 题 52. 机械密封常采用的端面漏泄量计算公式有那些? 102
- 四、机械密封标准** 107
- 题 53. 国内有那些现行的机械密封标准? 107
- 题 54. 国外现行的机械密封标准主要有那些? 107
- 题 55. ISO标准中与机械密封有关的标准有那些?
其主要内容是什么? 108
- 题 56. 国内泵用机械密封标准的主要内容是什么? 110
- 题 57. 国内釜用机械密封标准的主要内容是什么? 120
- 题 58. 国内机械密封的型号是如何表示的? 128
- 题 59. ISO标准中关于机械密封型号标志草案的
主要内容是什么? 132
- 题 60. 泵用耐强腐蚀机械密封有那几种主要结构型式?
其适用条件是什么? 135
- 题 61. 釜用耐强腐蚀机械密封的结构特点是什么?
其适用条件是什么? 139
- 题 62. 泵用及釜用耐强腐蚀机械密封的技术要求有那些? 140
- 五、机械密封的辅助装置** 142
- 题 63. 机械密封常用的辅助装置有那些? 142
- 题 64. 如何选择机械密封的冲洗冷却介质流量? 149
- 题 65. 常用的机械密封间接冷却方式有那几种? 151

题 66. 常用的机械密封冲洗冷却方式有那些?152

题 67. 常用的机械密封骤然冷却方式有那些? 流体动力
作用的冷却方式主要有几种?154

六、机械密封常用材料及选择原则159

题 68. 机械密封常用的摩擦副环材料有那些? 其机械
物理性质如何?159

题 69. 机械密封摩擦副环材料的选择原则是什么?169

题 70. 如何选择常见的密封介质的摩擦副组对材料?173

题 71. 常用的辅助密封圈材料有那些? 其机械-物理
性质如何?182

题 72. 在高温条件下如何选择辅助密封圈?187

题 73. 机械密封用石墨主要有那几大类? 其摩擦 磨损
特性如何?189

七、机械密封的加工制造与检验194

题 74. 机械密封用石墨材料的浸渍工艺如何?194

题 75. 机械密封用波纹管是如何制造的?196

题 76. 机械密封摩擦副环如何堆焊硬质合金?200

题 77. 机械密封主要零件的公差配合是怎样规定的?200

题 78. 机械密封主要零件的技术要求有那些?201

题 79. 机械密封摩擦副环端面的研磨原理是什么?205

题 80. 研磨机是如何工作的? 其摩擦副环端面的研磨
工艺如何?206

题 81. 研磨剂主要有那几种? 其规格及机械-物理性能
如何?209

题 82. 摩擦副环端面平直度的检验方法主要有那几种?
常用的是那一种?212

题 83. 如何用光学平晶检验摩擦副环端面的平直度?
其原理是什么?213

题 84. 常用的光学平晶检验装置的结构如何?218

题 85. 如何检验摩擦副环端面的光洁度?	219
八、机械密封的安装、选用、修复及故障处理	222
题 86. 如何将填料密封改装成机械密封?	222
题 87. 机械密封安装的要领是什么?	225
题 88. 机械密封在开、停车时应注意些什么?	226
题 89. 对安装机械密封的机器有那些技术要求?	226
题 90. 机械密封在运行过程中的维护保养要点有那些?	227
题 91. 常见的机械密封的故障有那些? 应如何进行处理?	227
题 92. 机械密封对轴振有何具体要求?	242
题 93. 机械密封对轴与填料腔的同心度有何具体要求?	244
题 94. 机械密封对轴与填料箱的垂直度有何具体要求?	244
题 95. 机械密封对轴向串量有何具体要求?	245
题 96. 高速机械密封在弹簧选用方面有那些应特别注意 的地方?	246
题 97. 机械密封的热镶摩擦副环在使用温度方面有那些 具体要求?	247
题 98. 如何计算高温条件下机械密封摩擦副环与轴之间 的许用间隙?	248
题 99. 机械密封摩擦副环的修复通常有那些具体规定?	249
题 100. 高温、高压、低温及含有悬浮性颗粒的密封 介质在选用机械密封时应特别注意些什么?	250
主要参考资料	253
附表	255
书中可与法定计量单位制并用的单位及其与法定计量单位的 关系	255

一、基本知识——原理、组成、 分类及受力分析

题 1 什么是机械密封？

答 机械密封是一种旋转轴用动密封，通常又称为端面密封。所以把机械密封称为端面密封主要是为了区别于密封面为圆柱面的填料密封。机械密封的最主要特点就是密封面为垂直于旋转轴线或大体上垂直于旋转轴线的端面。机械密封还必须具有由弹性元件、辅助密封圈等构成的轴向缓冲机构，以解决轴向振动和端面磨损给密封面紧密接触所带来的不利影响。因此，有人把机械密封定义为：“机械密封是一种带有缓冲机构，并通过与旋转轴大体垂直并做相对转动的两个密封端面进行密封的装置。”根据不同的使用条件，机械密封有不同的结构型式，其基本结构型式如图 1 所示。

机械密封主要是利用弹性元件的弹性力和密封流体的压力促使端面贴紧，当然也可利用密封流体以外的其它流体的压力及磁力等。

题 2 机械密封是如何工作的？

答 如图 1 所示，机械密封由动环 2 和静环 1 组成密封端面，动环 2 与旋转轴一起旋转，并与静环 1 紧密贴合接触。静环 1 是静止固定在设备壳体上而不做旋转运动。静环密封圈 10 和动环密封圈 9 通常称为辅助密封圈。静环密封圈 10 主要是为了阻止静环 1 和密封压盖 12 之间的漏泄。动环密封圈 9 则主要是为了阻止动环 2 和旋转轴之间环向间隙的漏泄，动环密封圈 9 随旋转轴一起回转。弹簧 4 是机械密

机械密封工作的最显著特点就是动环和静环之间的接触和相对运动，因此把它列为接触型动密封的一种。

由于机械密封具有这样的结构型式和工作过程，所以可以有效地解决下面四个漏泄渠道

- (1) 动环与静环端面之间；
- (2) 静环与密封压盖之间；
- (3) 动环与旋转轴之间；
- (4) 密封压盖与壳体之间；

的密封问题（如图 1 所示）。

为了适应不同密封条件的要求，机械密封虽然可以设计成各种各样的结构型式，但其基本元件和工作原理则是相同的。

题 3 机械密封有那些主要组成部分？

答 机械密封从设计结构上虽可千差万别，但必需具有下面四大组成部分：

第一部分是动环和静环组成的密封端面，这是机械密封组成中的核心，机械密封的出现改变了传统的圆柱面密封形式，同时，密封端面的密封性能在很大程度上标志着机械密封的技术水平，因为其它漏泄渠道的密封问题是较易解决的。

第二部分是弹性元件为主要零件的缓冲补偿机构，这是机械密封保证可靠密封性能的重要条件。因为轴的振动如果不加缓冲地直接传递到密封端面上，那么密封端面就不能始终保持紧密贴合而使漏泄量增加，或者由于给摩擦副施加过大的轴向载荷而导致密封端面严重磨损，从而使密封失效。同时，由于端面的摩擦必然会产生磨损，而如果机械密封没有缓冲补偿机构，那势必会造成端面的间隙越来越大，

漏泄量增加。所以，所有的机械密封都要有效的利用弹性元件和辅助密封圈建立缓冲补偿机构，以缓解振动、磨损给密封端面带来的不良影响。

第三部分是辅助密封圈，这是解决除密封端面以外的微动密封问题所不可缺少的组成部分。

第四部分是带动动环随旋转轴一起回转的传动机构，这是机械密封做为动密封的基本条件，因此传动机构也是机械密封必不可少的组成部分之一。

题 4 机械密封的密封机理是什么？

答 机械密封所以能成为一种先进的密封结构，最主要的是因为该种密封具有长久的使用寿命和良好的密封性能两个特点，而机械密封要保持长久的使用寿命，就必须在密封端面间维持一个极薄的液膜以避免端面间的干摩擦，因为干摩擦的结果势必会使密封端面造成严重磨损，从而使机械密封的使用寿命变短。而机械密封要保持良好的密封性能就要求密封端面间形成的压力分布的合力大于密封端面两侧的压力差，从而才能完成密封端面间的密封作用。那么，密封端面间的密封作用是如何形成的呢？围绕着这个人们所关心的问题出现过许多关于密封机理的学说。

其中最早提出的是 A.Brkich 的表面张力理论，该理论认为密封端面间稳定而可靠的密封作用主要是由于表面张力作用的结果。该理论所假定的密封端面实际上并不是理想的平直平行平面，密封端面由于加工制造还会带来粗糙不平的突起，从而造成突起部分的直接接触。另外，由于旋转轴回转精度的关系还会引起密封端面的倾斜和振动，特别是密封环的变形影响更为显著。因此，密封端面间的密封作用是受多种因素影响的复杂问题，这样过分的简化模型只认为是表

面张力作用的结果显然是不完全适用的。

其次提出的理论是假设密封端面间的边界润滑膜会发生吸附作用。这种认为由于边界润滑作用是构成密封的主要作用的理论就是边界润滑理论。E. Mayer 考虑了密封端面粗糙度 h_{um} 的影响, 根据密封端面的平均接触压力 p_s 和密封介质的压力 p_1 的比 $k = p_s/p_1$ 及间隙内液膜平均压力 P_s 的关系, 得出 k 值在边界润滑范围内为:

$$k \approx 0.25 + 0.175 h \quad (h > 5)$$

$$k \approx 0.25 + 0.5h^{0.42} \quad (h < 5)$$

同时得出漏泄量 Q 为:

$$Q = \pi d_1 (p_1 - p_2) h^2 \cdot s / p_1^2$$

式中 Q ——漏泄量, ml/min;

d_1 ——密封流体进口直径, cm;

p_1 ——密封流体压力, kgf/cm²;

p_2 ——外部流体压力, kgf/cm²;

h ——密封端面间隙, μm ;

s ——间隙系数, kgf/cm²·s, (间隙系数随滑动速度的增大而增大。);

p_s ——密封端面平均接触压力, kgf/cm²。

但是, 该理论由于没有考虑端面间的磨损以及端面摩擦热给密封环所带来的变形影响, 因此, 边界润滑理论也不能构成稳定的密封端面密封作用的机理。

为了保证稳定的密封作用, 由流体液膜使密封端面分开并产生承载能力是必要条件, 因此, 关于密封机理近来的许多研究报告都立足于流体润滑理论。

除此而外, 近来还有根据向心流控制漏泄做为密封机理研究的对象。向心流由于与密封作用有关而引人注目, 向心

流可以根据维森伯格效应给予解释，即具有粘弹性的液体在一件回转，另一件静止的平行同心环状平面之间受剪切作用会产生一种阻拉离心力作用的向心作用力。Reiner研究了具有非牛顿流性质的空气的向心泵作用，在Taǎner引进了粘弹性流体的缓冲时间 $\lambda_1 = \eta_0/G$ 以后，根据Reiner效应可求出产生的压力差 Δp 为

$$\Delta p = -\eta_0 \lambda_1 (R_2 \omega / h)^2 \{1 - (\rho h^2 / 6\lambda \eta_0)\} \{1 - (R_1 / R_2)^2\}$$

式中 η_0 ——粘度；
 G ——介质刚度；
 h ——间隙；
 ρ ——介质密度；
 ω ——角速度；
 R_1 ——端面内半径；
 R_2 ——端面外半径。

另外，Nau在根据倾斜环状端面之间的流体润滑研究了向心流作用以后，表明端面间产生汽蚀和出现向心流的原因密切相关。因此，有人认为目前研究密封机理的重点是密封端面间的汽蚀作用。广义的汽蚀作用是在密封端面的宏观范围内发生的，在端面很小的微观范围内也会产生汽蚀。宏观范围内的汽蚀主要是由于端面加工产生的波度以及振动、偏摆使密封端面间的间隙增大时而产生的；在微观范围内则主要是由于表面粗糙度微小突起部分后面流动而形成的。基于这个学说密封端面间气液二相流动是做为稳定密封作用的必要条件，而目前还没有得出它的充分条件。

关于密封端面密封机理的研究最近Anno-Walowit-Allen又提出微小突起理论，该理论主要根据密封端面上微

小突起后部产生的微观汽蚀，使端面间的连续液膜断裂，从而完成阻止漏泄作用并产生承载能力。根据该理论密封端面的漏泄量计算公式为

$$Q = (c \cdot h^3 \cdot \Delta p / 12\mu L) \cdot f_1(A) \cdot f_2(\sigma \cdot \Delta p) \cdot f_3(\omega)$$

式中 c ——密封端面的平均周长；
 h ——密封端面的平均间隙；
 L ——密封端面宽度；
 Δp ——密封端面内外压差；
 μ ——密封介质粘度；
 A ——密封端面凸起面积与总面积之比；
 ω ——转速；
 σ ——表面张力；
 $f_1(A)$ ——端面漏泄截面积修正系数；
 $f_2(\sigma \cdot \Delta p)$ ——表面张力效应修正系数；
 $f_3(\omega)$ ——转速修正系数。

随着对密封机理研究的深入，除上述各种学说以外，关于偏心、振动、光洁度、浓度等因素对密封性能的影响的研究报告也很多，日本的石渡、平林还提出了密封的条件式。尽管如此，由于机械密封的密封性能影响因素太多，加之在这样小的端面间隙中进行研究测试技术所出现的困难，使之至今仍然没有一个完善的密封理论被人们所接受，但是，由于人们已经意识到随着密封参数的提高要改善密封性能和使用寿命必须从经验性设计转入机理性设计，所以必须进一步研究机械密封的密封机理以更好的为机械密封设计、制造服务。

题5 机械密封在流体密封技术中所占的位置如何？

答 流体密封技术是一项重要的节能技术，它所以受到