

密封技术



CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM TECHNOLOGY

内 容 提 要

这是一本专门介绍密封技术的书。它吸收了美、日、英、苏、德等先进工业国家密封技术的精华，结合我国各部门比较成熟的经验，全面系统地介绍了各种密封方法，包括密封机理、泄漏计算、材料选择、结构设计、使用维护以及事故处理方法等，供从事液、气输送、炼制、加工以及液压、气动、润滑等部门的科研、设计、施工、运行和检修人员参考，亦可供大专院校师生参考。

密 封 技 术

刘后桂 编 著
责任编辑：李遂平

*

湖南科学技术出版社出版
(长沙市展览馆路14号)

湖南省新华书店发行 湖南省新华印刷二厂印刷

*

1981年12月第1版第1次印刷
开本：787×1092毫米 1/32 印张：18.375 插页：1 字数：423,000
印数：1—5,200
统一书号：15204·32 定价：1.95元

前 言

在电力、给水、石油、化工、机械工程和原子能工程等部门，都有油、水、气的输送设备、加工设备和运输设备，目前普遍存在着泄漏问题。它不仅造成经济上的损失，而且还造成环境污染，能源流失，乃至损害工作人员的健康。所以泄漏不是机器上的小问题了！随着我国社会主义建设事业的蓬勃发展，大容量、高速度、高温、高压、强腐蚀、强辐射、高真空和超低温等苛刻条件下工作的机器设备越来越多，密封技术已成为急待解决的关键之一。

为了交流经验，为了使我国的密封技术迅速得到发展，笔者在大量中外文献和多年工作经验的基础上编写了《密封技术》一书。本书较全面、较系统、较为结合实际地介绍各种密封方法，包括密封垫、O形密封圈、金属空心O形环、密封胶、压盖填料密封、成型填料密封（唇形密封圈）、油封、迷宫密封和浮环密封等的密封机理、泄漏计算、材料选择、结构设计、使用维护以及事故处理方法等，供从事液、气输送、炼制、加工以及液压、气动、润滑等部门的科研、设计、施工、运行、检修人员参考，亦可供大专院校师生参考。

笔者水平有限，书中谬误之处在所难免，敬希广大读者批评指正。

刘后桂

一九八一年六月

目 录

第一章	概论	(1)
第一节	密封方法.....	(2)
第二节	密封技术中的问题.....	(5)
第三节	密封的分类及其特征.....	(13)
第二章	密封垫的特性与特征	(17)
第一节	管道的密封方法.....	(17)
第二节	密封垫的泄漏现象.....	(21)
第三节	密封垫的特征参数.....	(25)
第四节	纸垫与软木垫.....	(31)
第五节	橡胶密封垫.....	(35)
第六节	石棉橡胶板密封垫.....	(36)
第七节	石棉布折叠密封垫.....	(41)
第八节	聚四氟乙烯密封垫.....	(42)
第九节	石墨板密封垫与石墨带.....	(47)
第十节	聚四氟乙烯包密封垫.....	(51)
第十一节	金属包密封垫.....	(54)
第十二节	缠绕密封垫.....	(57)
第十三节	金属密封垫.....	(69)
第十四节	自封型金属环形密封垫.....	(71)
第十五节	双锥金属密封垫.....	(78)
第三章	密封垫的选用与计算	(84)
第一节	密封垫的选择.....	(84)
第二节	垫片的实际选用举例.....	(89)

第三节	法兰连接计算·····	(96)
第四节	法兰连接中的温度分布·····	(105)
第五节	自紧型金属环形密封垫预紧力的确定·····	(109)
第六节	垫片的安装·····	(114)
第七节	扳手力矩与力矩损失·····	(117)
第八节	法兰连接螺栓的紧固方法·····	(126)
第九节	振动引起的泄漏及其防止方法·····	(133)
第十节	腐蚀引起的泄漏及其防止方法·····	(142)
第四章	金属空心O形环·····	(148)
第一节	金属空心O形环的用途和断面型式·····	(148)
第二节	金属空心O形环的密封机理·····	(151)
第三节	金属空心O形环的压扁度与预紧力·····	(153)
第四节	金属空心O形环的安装槽设计·····	(156)
第五节	金属空心O形环的选择·····	(159)
第六节	金属空心O形环的制造·····	(162)
第七节	金属空心O形环的性能检查试验·····	(166)
第五章	胶密封·····	(171)
第一节	胶密封的特点及胶的分类·····	(171)
第二节	胶的密封机理与泄漏计算·····	(174)
第三节	密封胶的特性·····	(175)
第四节	几种常用胶粘剂的特性·····	(177)
第五节	胶层特性的影响因素·····	(180)
第六节	胶的选用·····	(182)
第七节	封口设计·····	(185)
第八节	涂胶工艺·····	(189)
第九节	胶密封的泄漏原因及注意事项·····	(196)
第十节	胶密封的典型示例·····	(198)
第六章	O形圈密封·····	(207)
第一节	概述·····	(207)

第二节	O形圈的压缩变形率与内径伸长率	(210)
第三节	O形圈的密封机理	(213)
第四节	往复运动用O形圈的泄漏特性	(216)
第五节	O形圈的摩擦特性	(220)
第六节	O形圈的摩擦力计算	(224)
第七节	转动用O形圈的摩擦特性	(231)
第八节	O形圈的扭曲	(234)
第九节	O形圈安装槽的设计	(235)
第十节	其他槽形的设计	(247)
第十一节	O形圈的材料及其选定	(252)
第十二节	O形圈的耐寒性	(255)
第十三节	O形圈的耐热性	(257)
第十四节	O形圈的耐油性	(259)
第十五节	O形圈的耐化学品性能	(264)
第十六节	挡圈	(267)
第七章	O形圈及其他密封圈的使用	(272)
第一节	O形圈的安装	(272)
第二节	O形圈使用中的若干问题	(275)
第三节	方形断面密封圈	(287)
第四节	其他断面形状的密封圈与组合密封	(292)
第五节	真空用O形圈	(299)
第六节	聚四氟乙烯O形圈	(304)
第七节	氟塑料包橡胶O形圈	(309)
第八章	填料密封	(317)
第一节	填料的技术要求与分类	(317)
第二节	绞合填料与编结填料	(318)
第三节	塑性填料	(325)
第四节	金属填料	(329)
第五节	碳纤维填料	(330)
第六节	填料密封的机理与泄漏计算	(340)

第七节	填料密封的摩擦、磨损与润滑	(339)
第八节	填料的选定	(344)
第九节	填料腔的结构设计	(347)
第十节	填料的合理装填与使用	(351)
第九章	成型填料密封	(357)
第一节	成型填料的特点与材料	(357)
第二节	V形密封圈的特点与特性	(360)
第三节	V形填料的密封设计	(366)
第四节	聚四氟乙烯V形圈	(373)
第五节	U形与Y形密封圈的特性与特征	(375)
第六节	U形(或Y形)填料的密封设计	(382)
第七节	气动用U形密封圈	(386)
第八节	L形密封圈的特性、特征与设计	(389)
第九节	J形密封圈	(394)
第十节	其他断面形状的密封圈	(395)
第十章	油封与防尘密封	(402)
第一节	油封的结构与分类	(402)
第二节	油封的密封机理	(406)
第三节	润滑油对油封性能的影响	(410)
第四节	机械要素对油封性能的影响	(413)
第五节	温度对油封性能的影响	(417)
第六节	油封的摩擦磨损特性	(419)
第七节	油封材料与型式的选择	(426)
第八节	油封配合部位的设计	(429)
第九节	油封的安装与使用	(431)
第十节	防尘密封	(439)
第十一章	迷宫密封与螺旋密封	(443)
第一节	迷宫密封的特点、应用与分类	(443)
第二节	迷宫效应	(447)

第三节	理想迷宫的泄漏特性与泄漏计算	(451)
第四节	直通形迷宫的理论及泄漏计算	(456)
第五节	迷宫特性的影响因素分析	(463)
第六节	参差形迷宫的特性与计算	(467)
第七节	径流迷宫的特性	(471)
第八节	运动对迷宫特性的影响	(475)
第九节	单纯间隙密封的泄漏计算	(480)
第十节	迷宫密封的最新应用	(483)
第十一节	螺旋密封的特性	(488)
第十二节	螺旋密封的影响因素	(492)
第十三节	复合直通形螺旋密封	(497)

第十二章 浮环密封 (501)

第一节	浮环密封的特点及应用	(501)
第二节	浮环密封的密封机理	(503)
第三节	浮环密封装置的结构	(506)
第四节	浮环的特性	(510)
第五节	浮环的受力与工作分析	(514)
第六节	浮环的泄漏计算与尺寸的决定	(518)
第七节	油膜密封注油系统的设计及压差控制分析	(521)
第八节	油膜密封设计中应注意的几个问题	(528)

附录

- 表1. 各种橡胶板的特征与适用范围
- 表2(a). 国产工业用橡胶板的性能与应用范围
- 表2(b). 国产工业用橡胶板的性能与应用范围
- 表3. 金属垫片的耐化学品性能
- 表4. 非金属垫片的耐化学品性能
- 表5. 密封垫材料的允许放射线量
- 表6. 石油部垫片选用标准 (SYJ11—65)
- 表7. 法兰垫片使用情况

- 表8. 垫片的选用标准与设计参数
- 表9. 垫片的实际有效压紧压力Y值(更正值)
- 表10. 垫片计算参数
- 表11. 几种金属密封环的试验结果
- 表12. 管道内的适当流速
- 表13. 金属空心O形环及其在法兰上的安装槽尺寸
- 表14. 国产液态密封胶性能
- 表15. 国产厌氧胶性能
- 表16. 常用胶粘剂的特点与用途
- 表17. 各种胶粘剂的一般特性
- 表18. 国产橡胶的一般性能
- 表19. 各组胶料的使用范围 (GB1235—76)
- 表20. 各种胶料的特性
- 表21. 国际石油与天然气开采业所用O形圈材料
- 表22. 与机械密封通用的填料腔尺寸 (ISO—3069)
- 表23. V形防尘圈及其安装槽尺寸(毫米)

主要参考文献

第一章 概 论

泄漏，在我们的日常生活中是一种常见现象，它常常给我们带来许多不便，有时甚至造成灾害。例如家庭的自来水漏了，必须立即设法把水封住；煤气管漏气会引起中毒或起火，必须及时地把漏洞堵死；高压锅的密封圈坏了，会失去效用，必须更换新的……，这些仅仅是我们生活中反映的几个小小密封问题。工程中的泄漏问题要严重得多！那些输送气体、液体的管道、阀门、泵类、压气机、搅拌机以及加工液体、气体的化工设备、反应装置、液压设备和运输工具等一旦泄漏，轻则不能工作，重则使整个工厂、整个系统陷于停顿，严重的甚至对人类造成很大危害（例如原子反应装置）；而那些在泥土里滚来滚去的农业机械、工程机械、矿山机械以及在灰尘环境下工作的粉碎机械、砂轮机械和转筒等，其周围的环境十分恶劣，一旦泥土、砂石、磨料、微粒浸入到机器的肌体，那么机器将很快磨损和损坏。因此，人们在生产实践中千方百计地设法防漏和防尘。工程中不但要求作到少漏或者不漏，而且要求作到方法简便、取材容易、维修方便、价格低廉、坚固耐用、功耗极少。要同时满足这许多要求常常是困难的，但却是必须的，所以人们采用了许多密封材料，制造了许多密封元件，设计了各种密封机构，通过不断地试验、改进，终于找到了许多有效的密封方法。同时，各国还成立了许多研究机构，对这些方法进行深入的理论研究和设计计算，使之上升为完整的理论。因此，密封在工程上已发展成为一项专门的技术——密封技术。

现在，对一般的泄漏，很容易实现密封；对那些高温、高压、高速、强腐蚀条件下的密封，也有了许多有效的密封方法；对那些低温、深冷（超低温）、辐射、有毒等苛刻条件下的密封，也有了许多成熟的经验，而且还在不断完善之中。可以这样说，没有良好的密封技术，机器就不能可靠地运转，设备就不能有效地工作，卫星升空、人类航天、宇宙考察、艇潜海底等都只不过是幻想！

第一节 密封方法

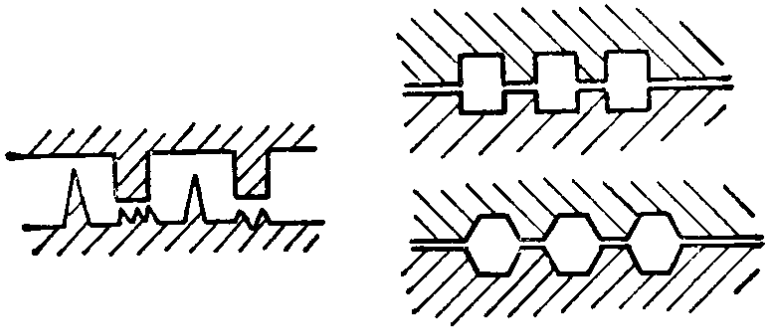
密封技术所要解决的问题，简言之，就是设法防止或减少泄漏。办法有很多，但总括起来，不外从下列几方面着手。

1. 尽量减少设置密封的部位。在机器的方案设计时，结构上应选择密封部位少的方案，这一点对那些易燃、有毒、强腐蚀性介质尤为重要。例如轻质油泵，可以同时选择单级单吸和单级双吸两种结构时，则宜取前者，因为单吸泵比双吸泵少一处密封。

2. 堵塞或隔离泄漏通道。静密封采用各式密封垫就属于这一类。对于动密封，高低压相联通的具有相对运动的部位是泄漏发生的地方，因为要相对运动，所以必有间隙，把间隙堵塞，即可作到防漏，压盖填料密封、成型填料密封、滑环密封属于这一类。隔离泄漏通道，就是在通道中间设置障碍，使通道切断（泄漏液流亦被切断）。机械密封、油封、防尘密封等接触式密封以及泵的水封环等都属于这类。

3. 增加泄漏通道中的阻力。根据流体力学得知，流体在通道中作泄漏流动时，会遇到阻力（水力摩阻）。阻力的大小与通道两端的压差、通道的长短、壁面的光洁度、棱缘的圆滑程度

以及通道中是否开槽(突然扩大、突然收缩损失)等有关。因此，在同样的压差之下，可把通道加设很多齿(见图1—1a)，人为地加长泄漏时的路程，或同时把齿作得尖锐，或开各式沟槽(见图1—1b)，以增加泄漏时液流的阻力。如果阻力与压差平衡则可作到不漏。各种型式的迷宫密封就属于这一类。



(a)梳齿迷宫 (b)开槽迷宫

图1—1 迷宫密封

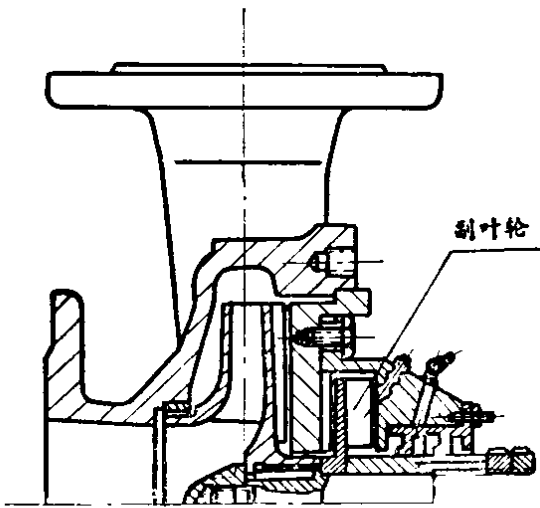


图1—2 泵的副叶轮密封

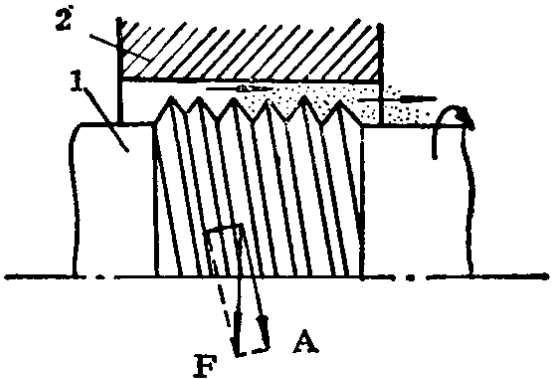


图1—3 直通型螺旋密封
1.轴 2.密封环

4. 在通道中加设小型做功元件，对泄漏液流造成压力，与引起泄漏的压差部分抵销或完全平衡(大小相等，方向相反)，以阻止介质泄漏。副叶轮密封、螺旋密封属于这类(见图1—2和图1—3)。

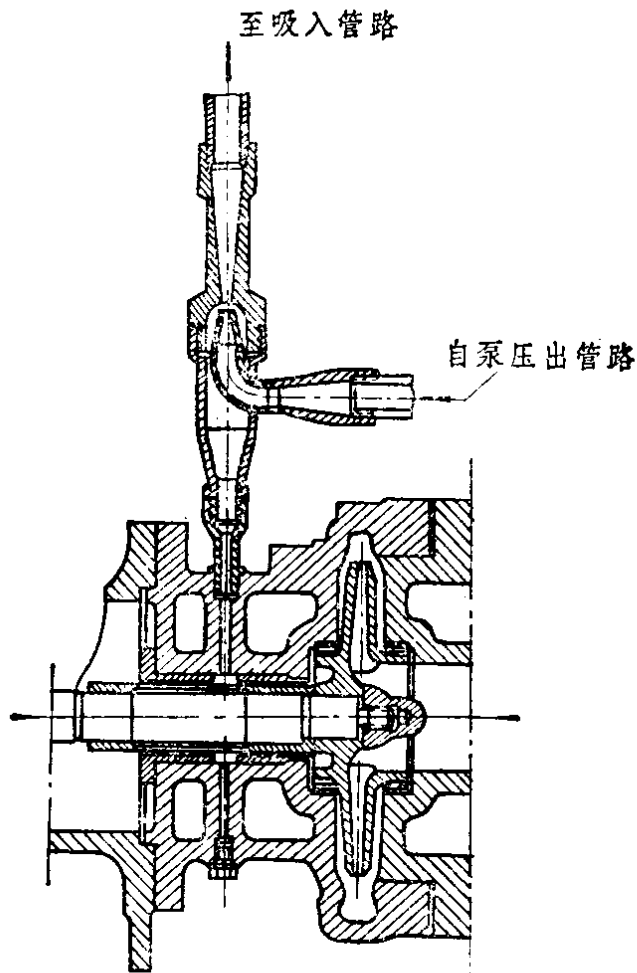


图1—4 喷射式密封

5. 借外力将少量泄漏液抽走（或送回吸入腔内）（见图1—4）、或注入比泄漏压力更高的密封介质、如液化气体泵的各种充气密封、油膜密封以及某些向泵内注入冲洗液的机械密封就属于这一类。

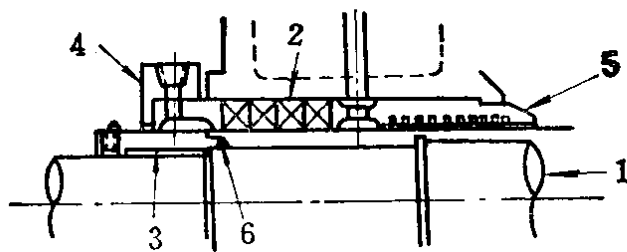


图1—5 组合密封

1. 轴 2. 压盖填料密封 3. 轴套 4. 压盖 5. 迷宫密封与水封 6. 橡胶密封圈

6.把两种或两种以上密封组合,例如迷宫-填料密封(图1—5)或螺旋-填料密封、填料-水封、波纹管机械密封等等。

7.其他,如磁流体密封等。

第二节 密封技术中的问题

密封技术不是一门孤立的技术,要搞好密封,还必须解决其他许多问题,其主要有:

一、材料

材料是密封技术的物质基础。由于被密封的介质具有各种不同的特性,因此要求材料具有不同的适性,这没有品种繁多的材料是办不到的。

以用得最多的橡胶为例,天然橡胶已远远不能满足工程上的要求,各种人工合成橡胶的出现,使密封技术取得很大进展。目前广泛应用作密封件的橡胶有丁腈橡胶、氯丁橡胶、硅橡胶、氟橡胶和聚胺脂橡胶等,国外还用到共聚氯醇橡胶、磷腈橡胶等。这要求合成化学工业不断提供新的橡胶制品。应当指出的是,在选择密封材料时,不宜笼统地采用某类耐酸胶或者耐油胶,因为不论是酸或者油(或其他介质)种类都很多,特性有明显的差异,即使同一种酸,浓度不一样,特性也不同,耐浓酸的橡胶,并不一定耐稀酸。应根据介质的具体情况,有针对性的选择合适材质。

值得一提的是,近年来国际市场上有一种密封性能优异的材料,叫“石墨带”。它是将石墨的晶格中浸入某种液体,随后强制汽化,改变晶格的矩阵(沿C轴拉长),使之按规定方向排列。这样一来,易粉碎的石墨晶体就变成了柔软的石墨带。由于是纯石墨(只要加工过程中不混入杂质),所以它几乎耐所有

的化学品，有极为优异的耐腐蚀性能、耐高温性能和密封特性。这种材料首先由美国联合碳化公司(UCC)研制成功，日本买了专利，也能生产。用这种石墨带，还可以制成多种密封再制品。

聚四氟乙烯，以优异的耐化学品性能著称，是一种用途广泛的密封材料。用它制成一卷卷密封带，用在管接头的螺纹密封上，操作简单、密封牢靠，能满足快而好的要求。

密封胶和密封膏，是别出一格的密封材料。它们象牙膏一样装在袋子里，使用时只要挤在密封面（静密封用）上，然后压紧，便可以形成一层薄薄的密封垫，使平面密封。它可以单独使用，也可以与其他密封垫片组合使用，效果良好。

二、加工工艺

良好的加工和成型工艺是保证密封件尺寸精度、表面特性和提高抗腐、耐磨能力的有效手段。与密封有关的加工工艺包括模压、浸渍、喷涂、烧结、焊接、电镀和表面热处理等。同一材料，如果处理工艺不同，几乎可以得到完全不同的材料特性。在喷涂陶瓷方面，目前采用等离子喷涂方法，但是喷涂之后的表面致密性差，多孔、易炸裂，不能满足密封件要求。如果工艺上加以改进，则是一种耗材极少，抗腐蚀性优异的好办法。在电镀方面，如果镀层厚度不均，易脱皮，用在金属空心O形环表面上会直接影响密封效果。这方面的问题大多是镀前的表面处理进行得不好所造成的。只要在酸洗、除油、除锈等方面严格操作，电镀方面就不会有什么突出的质量问题。

在烧结工艺方面，很有必要采用世界上最先进的“高速放电烧结法”。机械密封中常用的石墨密封圈和硬质合金密封圈（摩擦副）是决定密封性能和使用寿命的关键。而它们都是烧铸件，烧结工艺的好坏则有直接影响。一般的烧结法，是用高温高压，在有保护性气体炉中，把粉末原料放在金属模型中进

行烧结的。这种方法，模具加工困难，烧结时间长，成本较高。“高速放电烧结法”的特点是快而好（见表1—1）。它只需石墨作模型，很容易加工，价格便宜，烧结只需几秒钟，而且质地优良。历来所使用的密封圈是硬质合金厂生产的，然后由密封件生产厂加工并镶嵌在环座内（见图1—6a），通常磨损1~2毫米后就需更新，镶嵌部分一般都不可再用，造成一大半硬质合金浪费。而“高速放电烧结法”就无需镶嵌这么厚的密封圈，而只需在座面上烧结很薄的一层硬质合金（见图1—6b），这将大大节约昂贵的材料。更重要的是，这种烧结层，由于与座面形成合金层，对温度变化的适应性很强，可以在 $-180^{\circ}\text{C}\sim+500^{\circ}\text{C}$ 的范围内使用。而且由于比重大的硬质合金很薄，对高速转动机械因不平衡重量或不同心引起的惯性力影响甚小，故航空、火箭、飞船等的高速泵密封就用到这种密封件。这一点已被美国宇宙航行局予以确认。

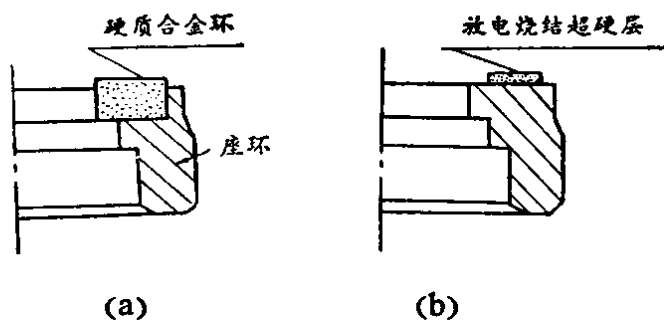


图1—6

模压工艺在密封件制造工艺中用得较多，但许多橡胶密封件模压的尺寸和精度，常常被人们所忽视，以为它们是弹性体，尺寸差一点没关系。所以压出后的成品往往形状、尺寸、特别是必要的公差得不到保证，分型面上飞边、毛刺严重。这对于密封是很不利的。以用得很多的橡胶O形圈为例，它是以给定的压缩变形量来工作的，假定往复运动的O形圈工作时压缩变

表1—1

各种烧结法比较

项 目	普通烧结	热压烧结	放电烧结	静压放电烧结
烧结环境及保护气体	氢、氮、氩、真空	氢、真空	反应气体、氢、氩、真空、大气	反应气体、大气
烧结时间	1~5小时	$\frac{1}{4}$ ~1小时	5~30秒	1~10秒
成形压力	吨 级	公斤 级	公斤 级	吨 级
烧结能 (例—Al)	$9 \times 10^5 \frac{\text{千卡}}{\text{克}}$	$14 \times 10^5 \frac{\text{千卡}}{\text{克}}$	$10^2 \frac{\text{千卡}}{\text{克}}$	$5 \times 10 \frac{\text{千卡}}{\text{克}}$
烧结状态	用金属模成形后在炉中加热	用石墨模型, 加压过程中高周波加热	在石墨耐热碳化物、绝缘物中放电加热、加压	在橡胶弹体体内加压, 由于放电急骤收缩成形

形量为10%，如果因尺寸精度差，保证不了10%，就会产生泄漏。此外，由于O形圈以预拉伸状态装在活塞上，当运动摩擦发热时，O形圈不是热膨胀，而是热收缩（拉伸状态下的橡胶受热收缩称焦尔效应），这样也可能使压缩变形量小于10%而泄漏。密封设计人员必须严格给定尺寸和精度，并考虑此种效应引起的收缩量。制造时，要以一丝不苟的精神，生产出在自由状态下具有严格尺寸和精度的密封件，而对那些易变形走样的弹形元件应密封包装，限期使用，过期报废。

三、摩擦、磨损与润滑

摩擦和磨损是接触式密封中必然存在的现象，润滑则是一种缓解手段。

接触式密封，密封件与被密封件相接触，由于有相对运动（往复运动、转动），必然有摩擦，伴之生热和零件表面磨损，这是引起泄漏和密封件损坏的主要原因。

要研究摩擦过程中的问题是很困难的，磨损的机理也很复