第一章　端面密封

作用原理

在旋轉軸的各种密封类型中，根据結构形式的不同，端面密封的类别最多，尽管这些結构的工作原理图是相同的。

图 1 示出为某一端面密封。旋轉軸 1 和环 2 一起旋轉，环 2 紧靠在靜环 3 上，而环 3 则与靜止的壳体 5 相連接。因此，环 2 和 3 形成摩擦副。它們之間的間隙决定了机壳內压力为 p 的工作液的泄漏量。以后把联結件 4 称为端面密封的弹性元件，它应保証环 2 和 3 相互間經常紧密地接触。

在上世紀末发明了端面密封的第一个結构，本世紀四十年代时端面密封开始广泛应用在工业中。第二次世界大战后，端面密封发展得更快，代替了填料函和其它形式的密封。这可由端面密封的下列优点来解释：1）它們运轉时几乎不泄漏；2）在正常工作时不需要維护；3）端面密封內的摩擦功率損失相当小（根据美国的一些数据約为填料函內功率損失的 0.1—0.5）；4）正确选择出来的端面密封具有非常好的耐磨性，因而使用寿命长；5）当机器軸的振摆相当大时，端面密封也能良好地工作，同时，軸对壳体孔的偏斜也不敏感。

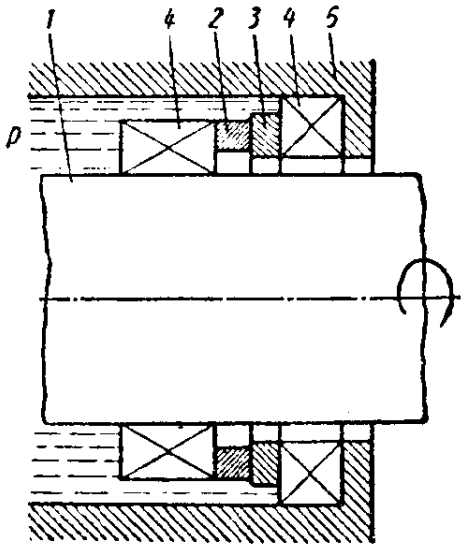


图 1　端面密封

制造复杂、专业性較强、价格相当貴、損坏时不易更換（因为要拆卸机器的一部分），摩擦副和其它元件的材料不好选择等

需要全本请访问 www.ertongbook.com

缺点，妨碍了端面密封的推广使用。特别是最后的一个缺点，大大地阻碍了端面密封的使用。只有为摩擦副創造了各种各样的耐磨材料（例如碳石墨）以及某些塑料后，才能使端面密封有效地用于抽送低粘度和化学活性液体的操作。

端面密封的分类

在分类中（图 2），端面密封是根据其弹性元件的結构特点[2]来进行分类的，因为这些特点不仅决定端面密封的外形，也决定它們的动力特性。

端面密封的弹性元件有密封碗及橡胶圈的弹簧、弹性垫圈以及有弹簧或沒有弹簧的波紋管及膜片。

端面密封基本結构形式的分类中仅示出原理图。它們分为静止和旋轉弹性元件的端面密封（在图 2 中用方筐图表示）。

旋轉和静止弹性元件的密封可以是內式的及外式的。在第一种情况下，大部分密封表面和液体接触；而外式端面密封的弹性元件則在外面。

从分类中可見，对各种型式的端面密封来說，弹性元件可能用波紋管、密封碗及有弹簧的密封环。有弹簧或沒有弹簧的膜片只做为静止弹性元件。

端面密封可能有单层、双层、三层等。最常見的是单层密封，双层就少用了，双层是两个单层密封的組合。三层或更多层端面密封的組合則更少用，只用于特殊易流动介质（例如大型透平压縮机的气体[3]）的密封中。这种結构完全代替了紧密式結构(无填料)。通常，双端面密封需注入有压力的密封液，此密封液的压力稍高于工作液的压力。这种密封用于化学活性液体和气体。单层密封可用于中性和化学活性介质。这种分法是有条件的，因为任何介质在某种程度上都是化学活性的。然而，研究和应用端面密封的实驗証明，它們的結构在很大程度上取决于端面密封用在化学活性介质（酸、碱等）中，还是用在中性介质（水及石油产品）中。

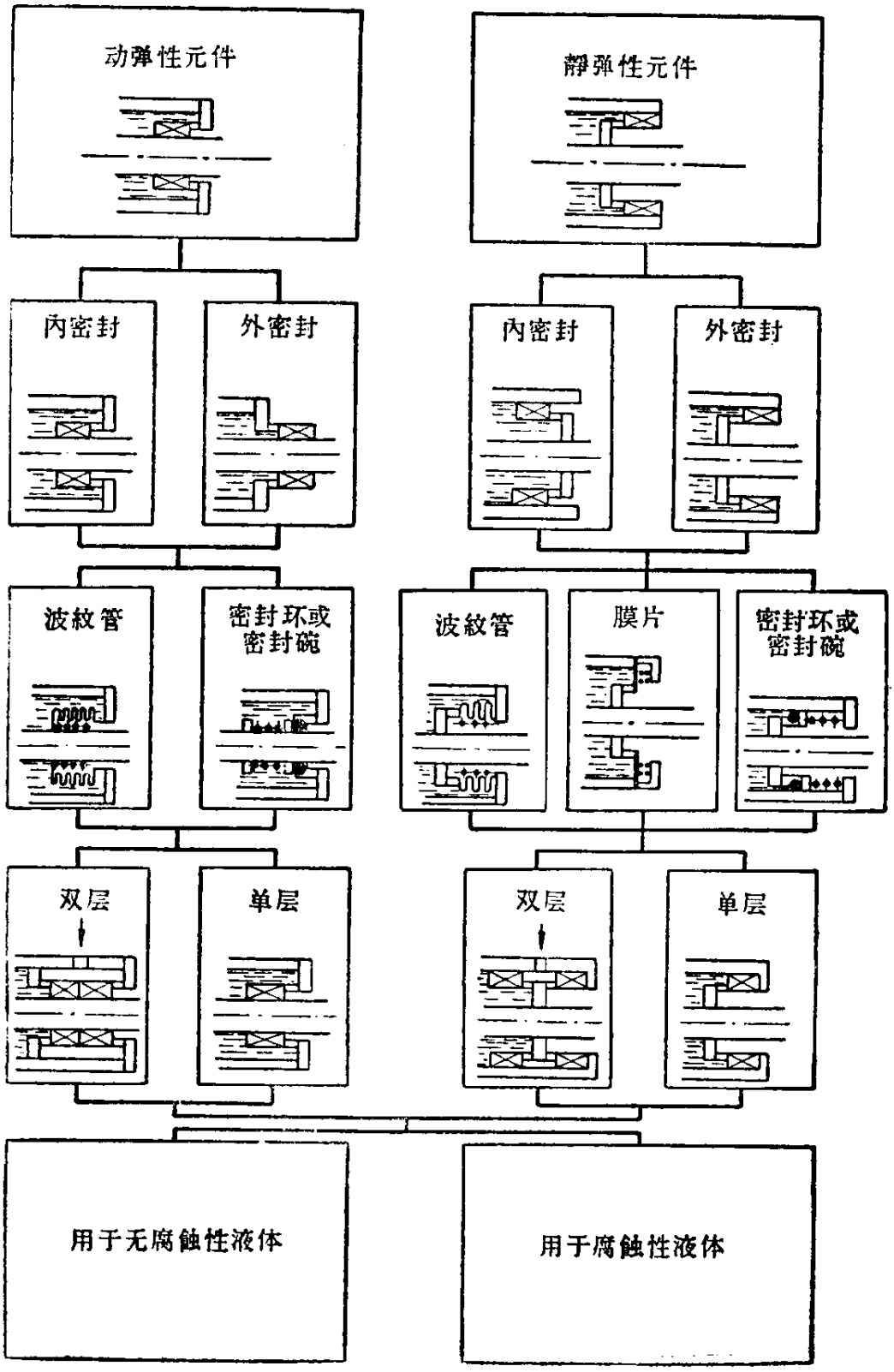

动弹性元件
静弹性元件
内密封
外密封
内密封
外密封
波纹管
密封环或
密封碗
波纹管
膜片
密封环或
密封碗
双层
单层
双层
单层
用于无腐蚀性液体
用于腐蚀性液体

图 2　端面密封的分类

显然，上述的分类不能包括端面密封的各种可能型式[5]，[4]。特别是在分类中，沒有区分出水力減荷及无水力減荷的端面密封，因为这些密封結构还是刚刚提出，尚未大量应用在密封結构中。

端面密封的結构

图 3*а* 上示出有旋轉弹性元件的密封。有弹簧 2 的长方形断面橡胶圈 1 是密封的弹性元件，它和軸一起旋轉。环 1 紧压在軸上。摩擦副旋轉环 3 装于环 1 上，环 3 和靜止环 4 相接触。(有时将环 4 和盖做成一体)。当密封周围的液体压力 p 改变时，弹簧 2 保持摩擦副接合处的密封性，以及当环 3 和环 4 磨損时，能使环 1 沿軸綫方向移动。环 3 和 4 防止了密封环 1 和 5 很快地磨損。內密封用于压力不大于 3 大气压的中性液体（水、油等）。例如，它們应用在齿輪泵、螺杆泵及叶片泵中[1]。

图 3*б* 上列出美国用于化学中性液体有旋轉密封碗的端面密封結构[4]。由于大量生产，因此在美国就用鍛造零件。該密封

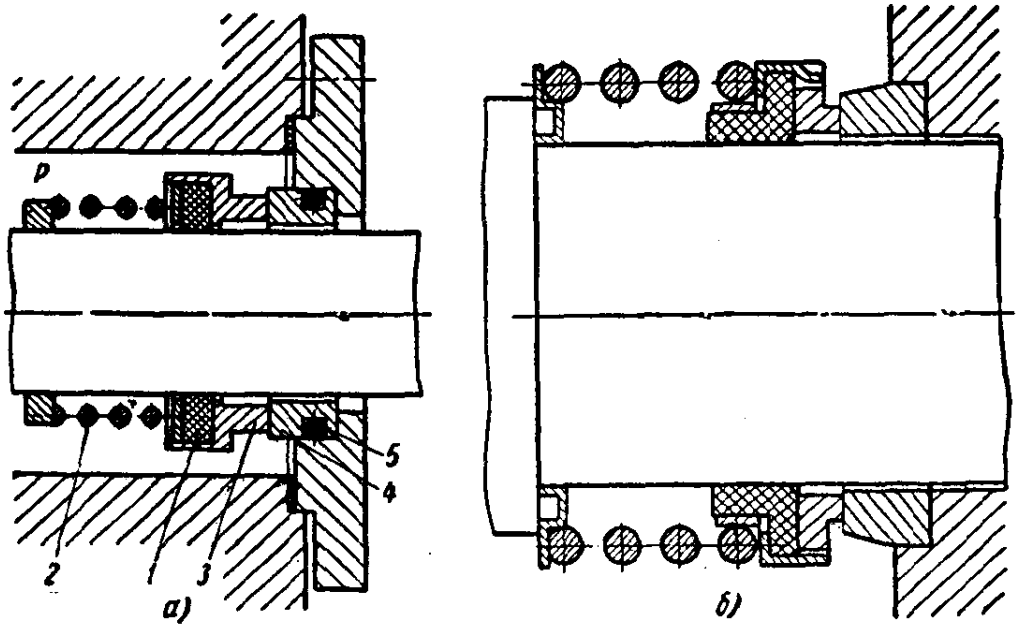


图 3　端面密封

а—有旋轉橡胶环的；*б*—有密封碗的

适用于軸轉数达5000轉/分，压力达10大气压的装置。也可用在汽車、拖拉机和其它机器的加热系統中。

有旋轉弹性元件的端面密封之另一种結构是具有圓断面橡胶密封环(图4*а*)的美国高压密封[6]。这种密封装置的結构特点是用弹簧3将摩擦力矩由旋轉环1传递給軸套2。弹簧最后几圈的距离小幵包围軸套和环的末端。当軸旋轉时，摩擦力矩扭动弹簧，它把这些零件更张紧，因而就可防止环1对軸的轉动。此外，弹簧能緩冲机器起动时作用在密封装置上的冲击負荷。这种密封装置适于高压液体（20大气压以上)。

图4*б*所示的端面密封装置和上述結构不同之点是它的弹簧1不直接和液体接触。安装密封橡胶圈2就能实現这点。在很多情况下这种結构可保护弹簧不受腐蝕（例如，在海水內工作的密封装置)。这种密封适用于液体压力达20大气压的設备。

图4*в*示出克朗巴金公司(Crane Packing)生产的有橡胶密封圈的密封装置[7]，适于溫度由－40到＋80℃的液体（水，石油产品)，压力达85大气压，轉数約3000轉/分，軸径在90毫米以下。和图3及图4*а*与*б*所示結构不同的是密封装置有几个弹簧1。此外，不必拆卸环2就可将密封部件和环3进行套装，从而可預先防止摩擦副的損坏。

以后，高压密封結构[63]在很大程度上是克朗巴金型式的改进。改进的端面密封結构示于图4*г*上，适于溫度由－40到100℃的液体，压力达100大气压，軸的轉数达3000轉/分。和图4*в*所示結构不同的是在这里用一个弹簧，軸径达100毫米。此外，还特别注意从石墨环2传到軸上的摩擦力矩的传动可靠性。为此装有四个銷3和两个鍵4。靜金属环5有槽，以便更好地导出由摩擦副产生的热量。在某种程度上碳石墨环是利用橡胶圈7，密封金属压紧环6。

图5和图6上示出全苏水力机械研究院內研究的有圓断面橡胶圈的密封結构，这将在"端面密封实驗"这一节內介紹。

图7*а*上示出克朗巴金公司生产的有轉动橡胶波紋管的端面

需要全本请访问 www.ertongbook.com

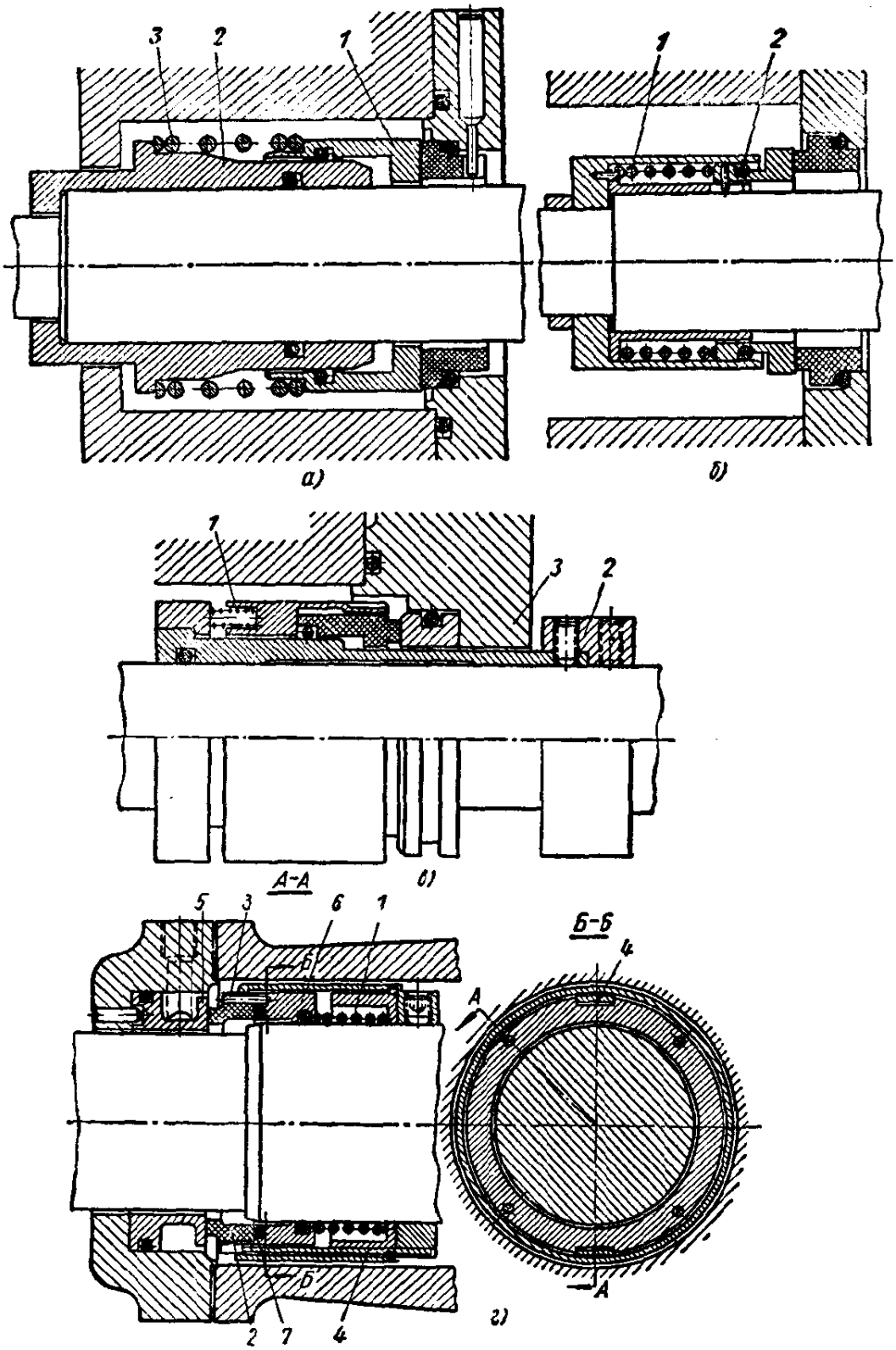


图 4　圆断面橡胶密封环的高压液体密封

а—借弹簧传动的密封；*б*—弹簧被隔离的密封；

в—克朗巴金公司的密封；*г*—克朗巴金公司的密封（改进的结构）

密封[7]。这种密封常装于离心泵内，其中也包括装于食品工业的离心泵（抽送牛奶等）。它的特点是紧凑和結构簡单。圓錐弹簧2将波紋管1压向摩擦副的动环3，保証它和环紧密接触。弹簧末圈直径小，包围波紋管并将它压于軸上。因此，密封的旋轉部分和軸紧密連接。环3靠向摩擦副靜环4，后者安装在厚橡胶垫圈5上。这种密封結构适于不超过1大气压条件下工作。

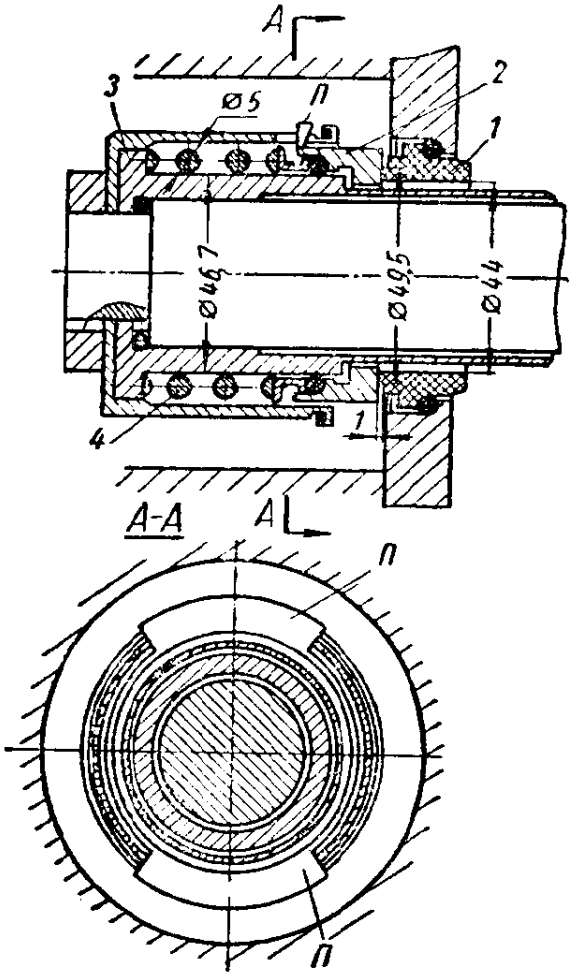


图 5　用于水压在20大气压以下的密封

第二个例子（图7*б*）是在美国工业中应用的有旋轉波紋管和承受压力不大的端面密封[4]。波紋管1和上述結构相同，起着密封圈的作用。摩擦副动环2和靜环3之間的摩擦力矩由盘4的两个凸緣来传递，并承受波紋管和盘之間、波紋管和軸之間的摩擦。靜环3安装在被称为"振动环"的厚垫圈5上。

图7的密封結构和图3上不同的地方，是它們用一个整部件安装在軸上。在大量生产和运行中这是它的优点。

在国外广泛应用图7*в*所示的端面密封結构[7]。它和图7*б*的結构不同之处是波紋管的形状。在液体溫度由－40到＋80°C及軸径100毫米、轉数約3600轉/分的情况下，这种密封結构可用于14大气压。它适用于化学中性液体的工作。

在有环或密封碗的端面密封中，旋轉元件在軸向的可动性和环与軸之間的摩擦力有一定关系(要用試驗来确定)，摩擦力之值是不定的，与液体压力及溫度有关。在有波紋管的端面密封內，軸

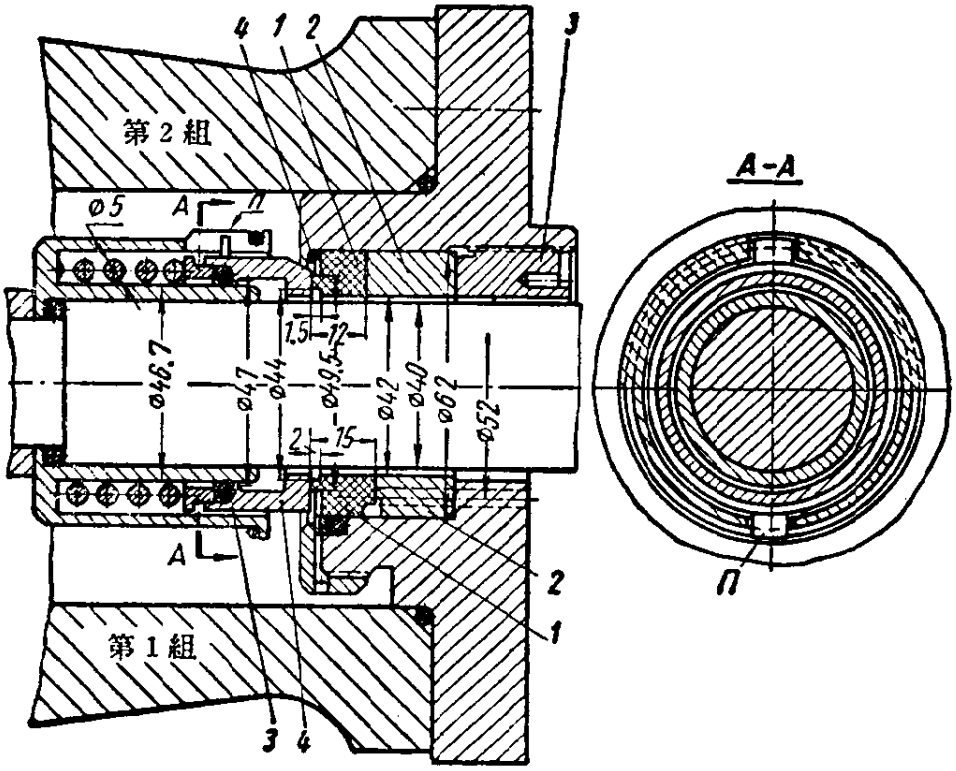


图 6　用于水压在100大气压以下的密封

向移动性仅和波紋管的弹性有关。这就是波紋管比密封环或者密封碗显著优越的地方。此外，波紋管可保証摩擦副动环和軸連接具有良好的弹性。

在大多数情况下，有旋轉弹性元件的上述結构用于化学中性液体的工作中。用于化学活性液体的圓錐环密封結构示于图 8 上，环由聚四氟乙烯制成。这种密封結构常用在苏联（全苏水力机械研究院及苏联国立石油机器設計院）和其它国家內 [7]。密封的旋轉弹性元件（图 8 *a*）是弹簧 2 及用聚四氟乙烯做的圓錐环 1。环 1 的弹性保証軸的密封。此外，弹簧和液体压力产生作用在环 1 上的力，使得密封环 1 的圓錐表面和摩擦副动环 3 之間的接触面密封。在該力的作用下及由于有圓錐形，則使环本身的圓柱表面紧紧貼在軸上。

聚四氟乙烯的摩擦系数比鋼小，故动环 3 磨損小，易于沿軸移动。偏斜时，圓錐保証环 3 有些移动，不破坏它和环 1 接触面的密封性。

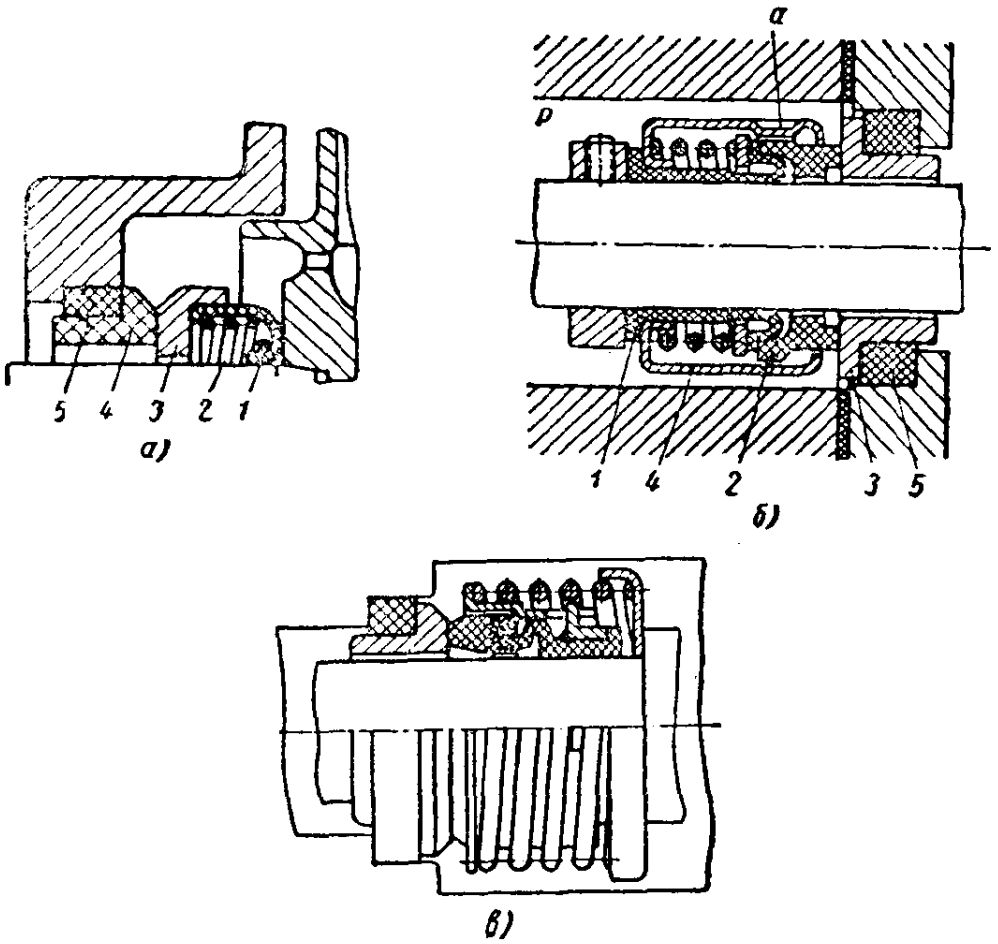


图 7　有旋轉橡胶波紋管的密封

а—低于 1 大气压的克朗巴金公司密封；*б*—美国密封；*в*—压力在 14 大气压以下的克朗巴金公司的密封

然而由于聚四氟乙烯的摩擦系数小及弹性不够，和橡胶圈密封（图 3*а*）不同的是在这种密封結构內，环 3 对軸易轉动。为了防止轉动，环 3 的两凸緣放入张紧环 4 的槽沟內，环 4 用弹簧 2 和軸相連；弹簧的非工作圈以銷子 5 压入环 4 和 6 內。环 1 由聚四氟乙烯制成，对軸具有良好的密封性。

这种密封結构适于在化学活性介质中工作。这靠具有化学稳定性的聚四氟乙烯（代替橡皮）制成的环来完成，全部金属零件（包括弹簧）和摩擦副的环要用耐腐蝕材料制成。

图 8*в* 上示出克朗巴金公司生产的、由聚四氟乙烯制成的圓錐环密封結构。和图 8*г* 上所示密封結构的差别是它成套生产。此外，密封內用几个弹簧。該公司生产这样的密封結构，用于軸

需要全本请访问 www.ertongbook.com

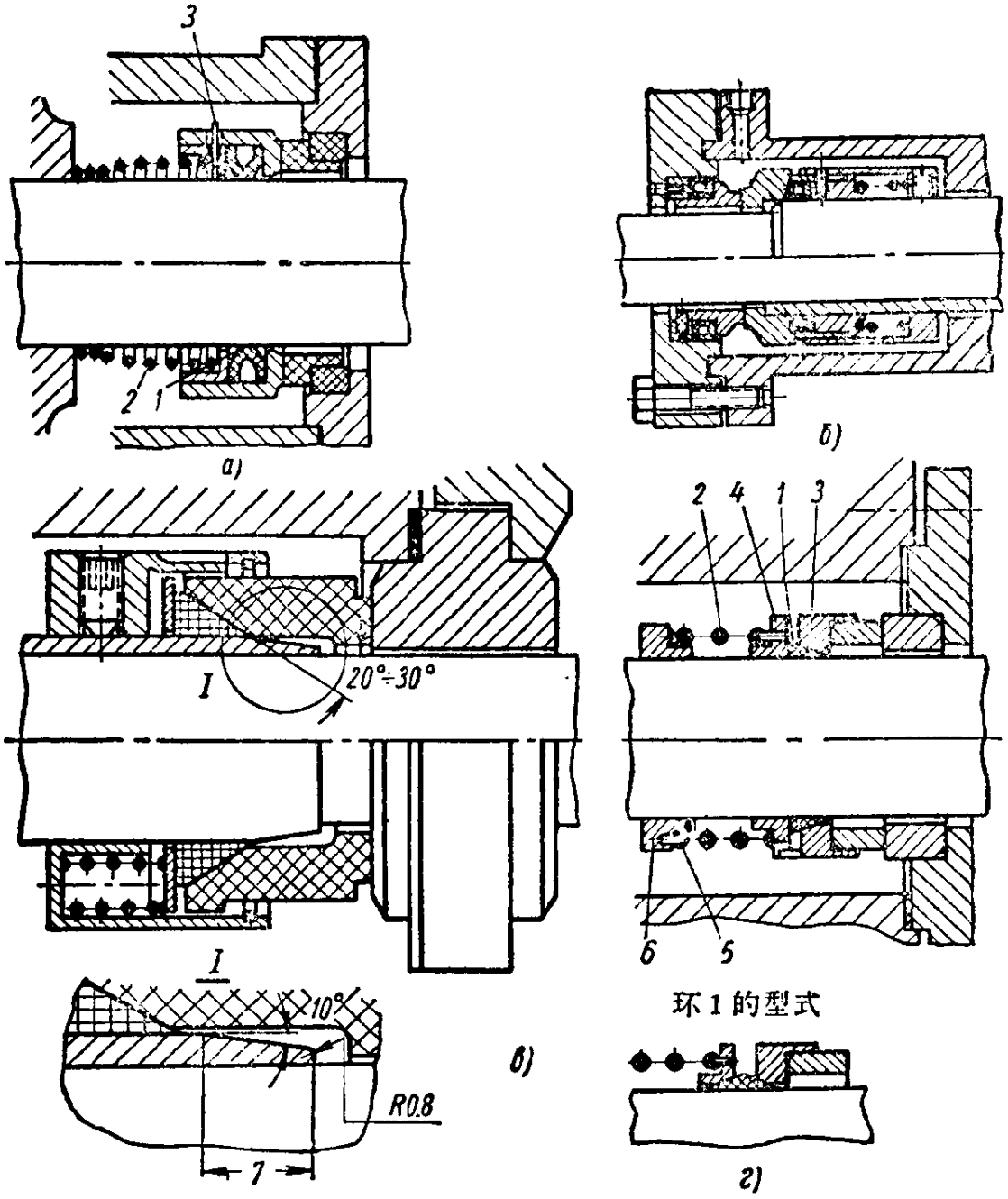


图 8　用聚四氟乙烯制成的密封碗及环的密封
а—意大利罗顿公司的密封；*б*—日本瓦亚公司的密封；*в*—英国克朗巴金公司的密封；*г*—全苏水力机械研究院的密封

径 160 毫米、轉数約 3000 轉/分。允許液体的压力可达 50 大气压（密封經水力减荷）或 10 大气压（密封不經水力减荷）。液体溫度不超过＋250°C。最低溫度不低于－84°C。在 1961 年的样本內[63] 举出和图 4 *г* 上所示的結构相似的密封，其內用由聚四氟

乙烯制成的圓錐环和垫圈代替橡胶环。按該公司的数据，它也适用于压力达 100 大气压的装置內。

意大利罗頓公司(Roten)的密封結构（图 8 *a*）[12] 和上述結构不同的是用聚四氟乙烯制成的具有特殊形状的密封皮碗 1 及圓錐形弹簧 2。弹簧紧装在軸上，另一端用銷子 3 和动环連接，防止密封对軸的滑动。用聚四氟乙烯制成密封結构的另一种形式是日本瓦亚公司(Valqua)[65]的結构。在軸径 60 毫米及轉数 3600 轉/分时，液体的許用压力不超过 5 大气压。图 8 *б* 上示出这种密封經水力減荷的結构。軸径 15 毫米及轉数 1500 轉/分时，液体（和水的粘度相近）的最大許用压力可达 34 大气压。

适于化学活性介质的更完善密封結构是用聚四氟乙烯制成的波紋管的端面密封。图 9 上示出这种密封的两种結构。

用聚四氟乙烯制成的旋轉波紋管 1 的密封(图 9 *a*)是外式的。波紋管 1 的外径被弹簧 2 包围，弹簧圈位于聚四氟乙烯的管內。摩擦副由陶瓷靜环 3 和动环 4（有玻璃充填的聚四氟乙烯）組成，动环和波紋管是一个整体。此密封結构适于在各种化学活性液体中工作。密封前的許用压力和介质溫度、密封尺寸有关。当溫度在 +20 到 +125°C 时，对 20 毫米軸径密封的許用压力为 10 到 3 大气压。軸径由 20 毫米增加到 75 毫米，100°C 时，許用压力由 5 降到 1.4 大气压。軸的轉数約为 3000 轉/分。

有聚四氟乙烯波紋管 1 的美国密封結构示于图 9 *б*[4]，和前一种結构相同，用来抽送化学活性大的液体。它和图 9 *a* 結构的差别是摩擦副：陶瓷 3 改为石墨 2 和片状弹簧 4。介质溫度 +75°C 及摩擦副內滑动速度 11 米/秒的情况下，此密封装置可用于压力不大于 7 大气压。

它仅仅不适用于氟氢酸和浓碱。

图 10 上示出有旋轉弹性元件的双端面密封結构。此密封結构（图 10 *a*）适用于化学活性的液体（蒸煮）[9]。它由两个密封 1 和 2 組成。密封 1 和 2 之間的空隙內，注入有压力的密封液体（水、油等），此密封液体压力稍高于工作液体压力，从而防止

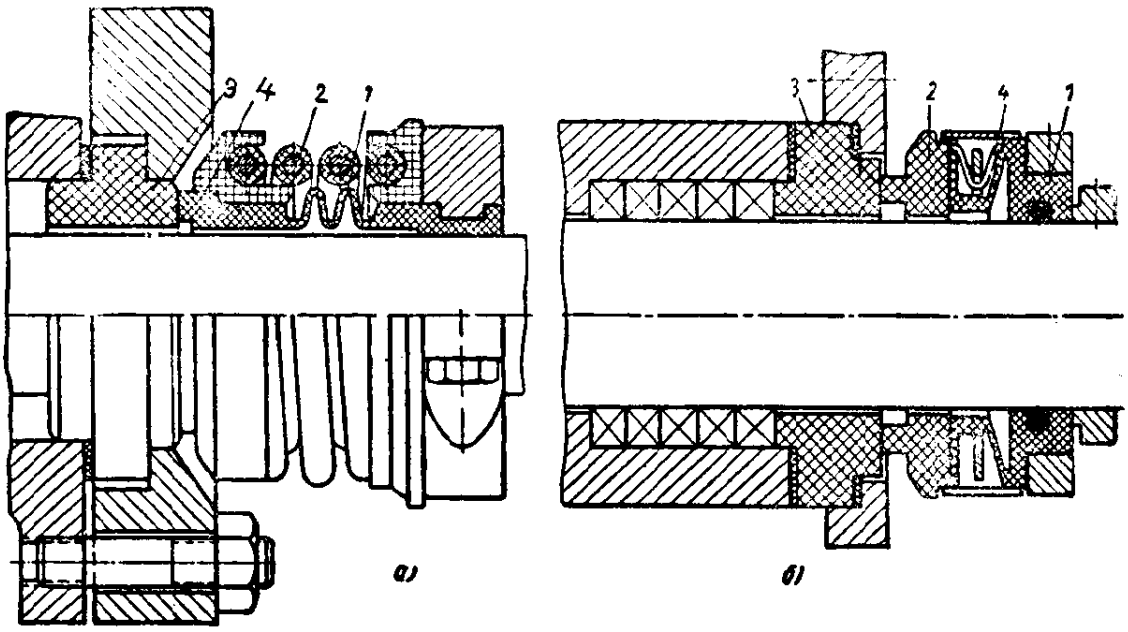


图 9　聚四氟乙烯制的旋轉波紋管的密封（外式的）
а—克朗巴金公司；*б*—美国塡料密封（用于有磨料顆粒的密封）

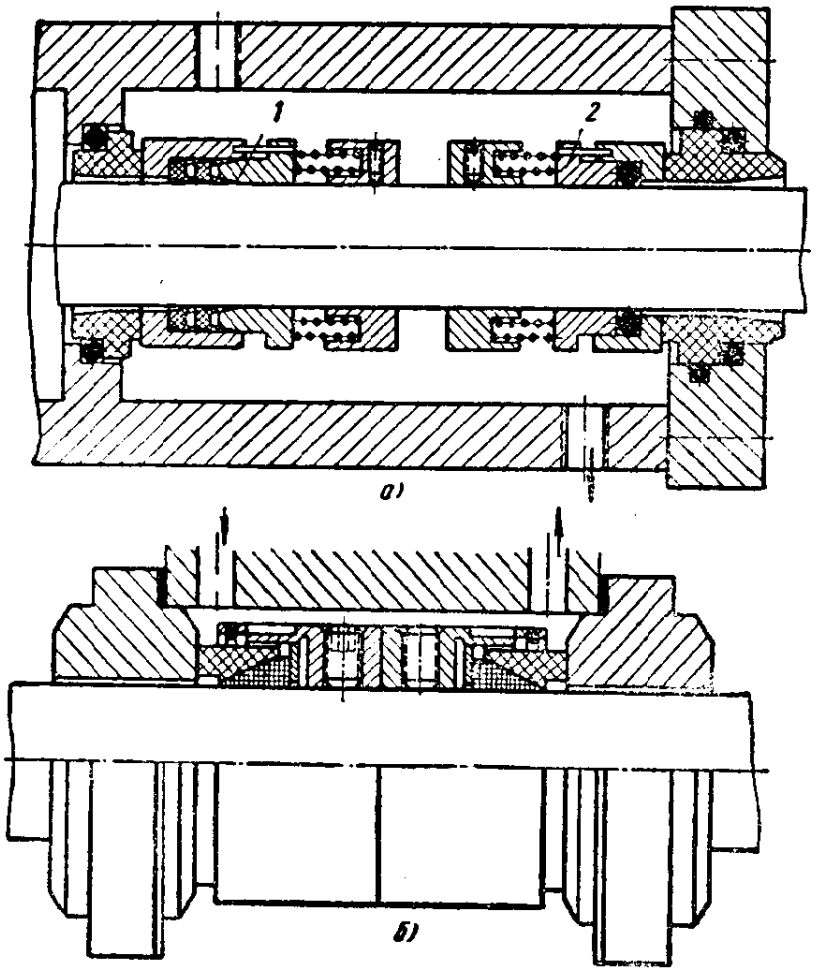


图 10　用于化学活性液体的双端面密封
а—西德所用的密封；*б*—克朗巴金公司的密封

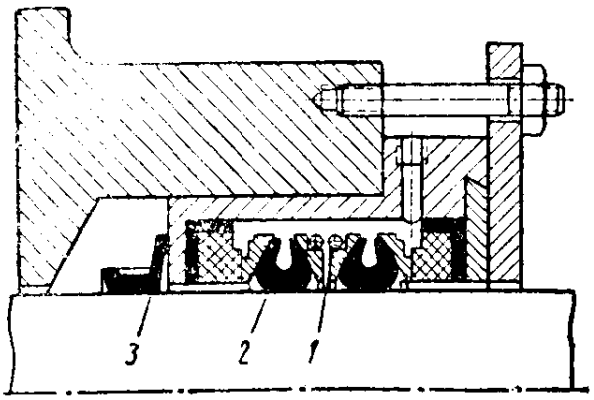


图 11　用在含有磨料顆粒的液体內工作的双端面密封

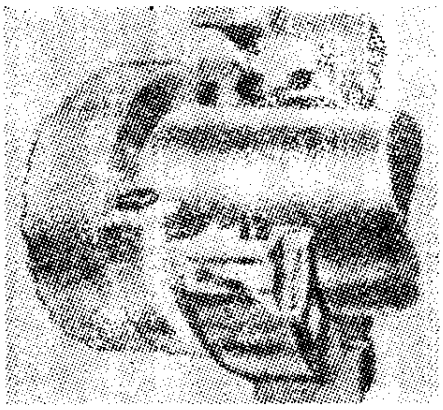


图 12　有片状弹簧和密封橡胶圈的靜弹性元件之密封

了它渗到外面去，并防止摩擦副受工作液体的破坏。用聚四氟乙烯制成密封碗的密封 1 把工作液体与密封液体分开，密封 2 防止了密封液体的外流。

图 10*б* 示出克朗巴金公司的双端面密封，用聚四氟乙烯制成的圓錐环，适用于化学活性液体。它由两个密封組成（图 8*в*），被密封的液体在 250°C 时可用于 10 大气压。

双端面密封結构（图 11）适用于含有顆粒的液体 [10]。它的結构特点是：两个密封共用一个弹簧 1；用特殊形状的橡胶密封碗 2 做为密封元件；安装了橡胶挡板3,在停車和工作时，該挡板防止了磨料顆粒进入摩擦副。

靜橡胶元件的端面密封結构和动弹性元件的密封相同。

图 12 示出有圓断面橡胶密封圈的密封結构[4]，它适用于化学中性液体。由于用波紋弹簧（片状弹簧），因而它的体积小。这种密封結构可在高轉速（达 70 米/秒）軸中工作。图 13 示出莫根坩堝公司

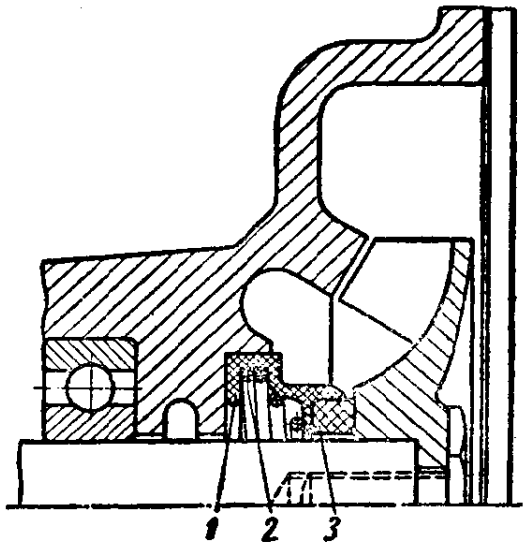


图 13　莫干可魯茨勃公司（英国）橡胶波紋管密封

(Morgan Crucible) [11] 生产的安装在离心泵上的靜橡胶波紋管密封結构。因为这种結构特别簡单而大量进行生产。这种密封只由三个零件組成：波紋管 1、圓錐弹簧 2 及碳石墨环 3。碳石墨环直接靠在泵的工作叶輪套筒上。此密封适用于 0.35 大气压以下及溫度 100°C 的液体。

图 14 示出有金属波紋管和薄膜的端面密封結构。

金属整体波紋管 1 的密封結构适用于高溫（高于 +200°C)的化学中性液体（或有弱腐蝕性液体)。波紋管和密封零件的連接采用接触焊。由于波紋管的弹性不够而用弹簧 2。

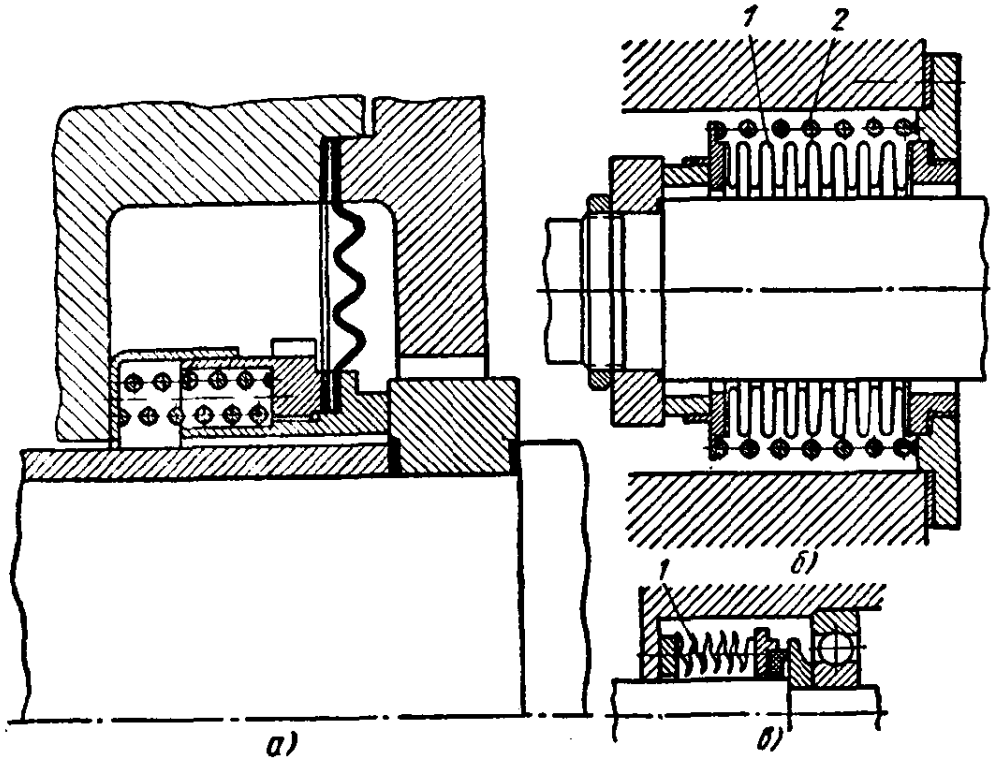


图 14　金属薄膜和波紋管的密封
а—膜片密封；*б*—压制波紋管密封；*в*—焊接波紋管密封

塞老尔公司 (Sealol Inc.) [5] 生产出有焊接波紋管 1 的密封（图 14*в*)。由于波紋管的形状特殊，則具有足够的弹性，而不必再安装弹簧。这种密封适用于液体压力达 70 大气压及溫度达 +300°C的液体。

图 14*а* 列出用金属膜片做为弹性元件的密封結构。膜片不

安装在旋轉弹性元件的密封結构內，一般很少采用这种密封結构。这說明将端面密封和膜片一起安装在机器內，在結构上有很多困难：密封的径向尺寸大，强度不够，扭斜时膜片的刚性相当大，密封的水力减荷复杂。然而，密封直径大时（当軸径＞100毫米），这些缺点就不显著。膜片端面密封的优点是縮减了軸向尺寸及任意密封尺寸的膜片均容易制造。金属膜片和波紋管的密封結构常在透平压縮机中应用[3]、[13]。

全苏水力机械研究院研究的密封結构示于图 15 上，它适于在化学活性介质內工作。这些結构的特点是波紋管用聚四氟乙烯制成的。这四种結构的差别是波紋管固定在密封零件上的方法不同，以及弹簧位置的不同。

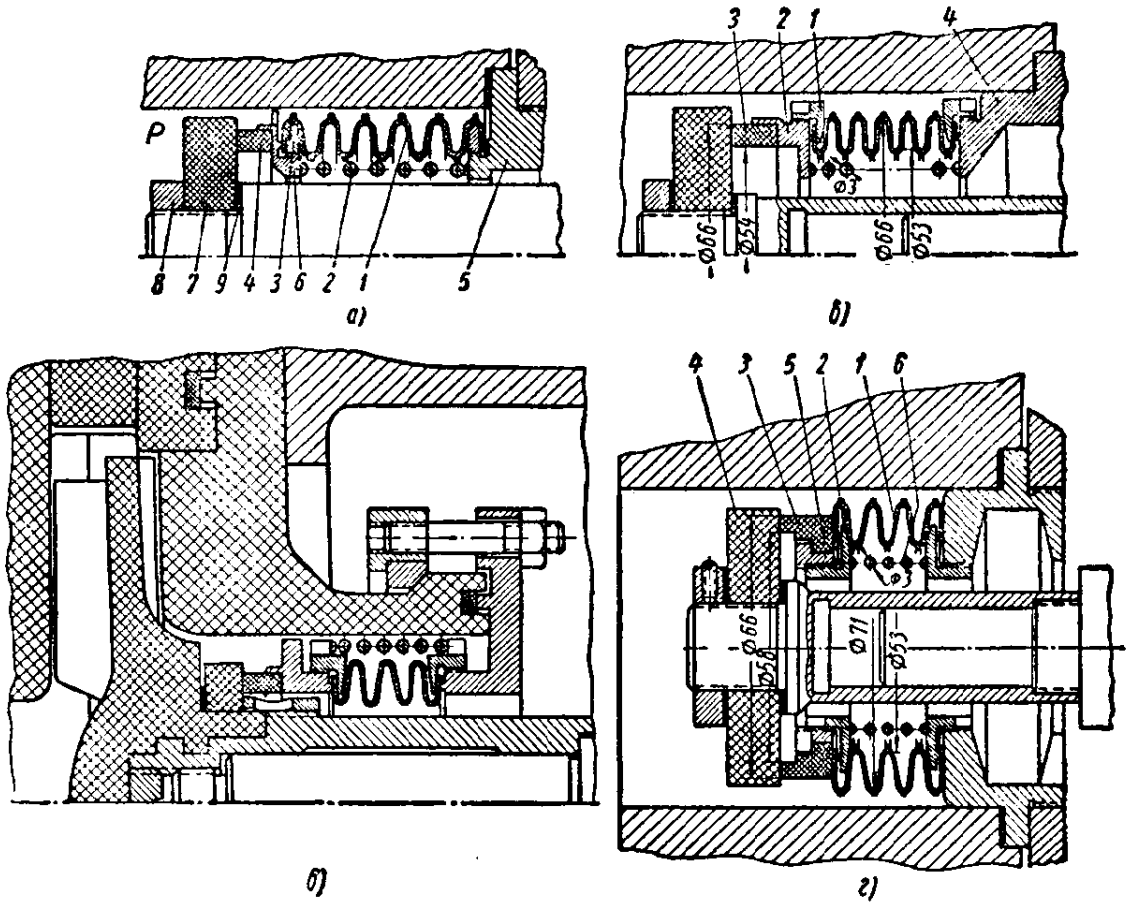


图 15　有聚四氟乙烯波紋管的全苏水力机械研究院的端面密封
а—压入螺紋环的波紋管；*б*—有外螺紋环的波紋管；*в*—2 ХМ-6 П 泵的密封；*г*—有內金属部件的密封

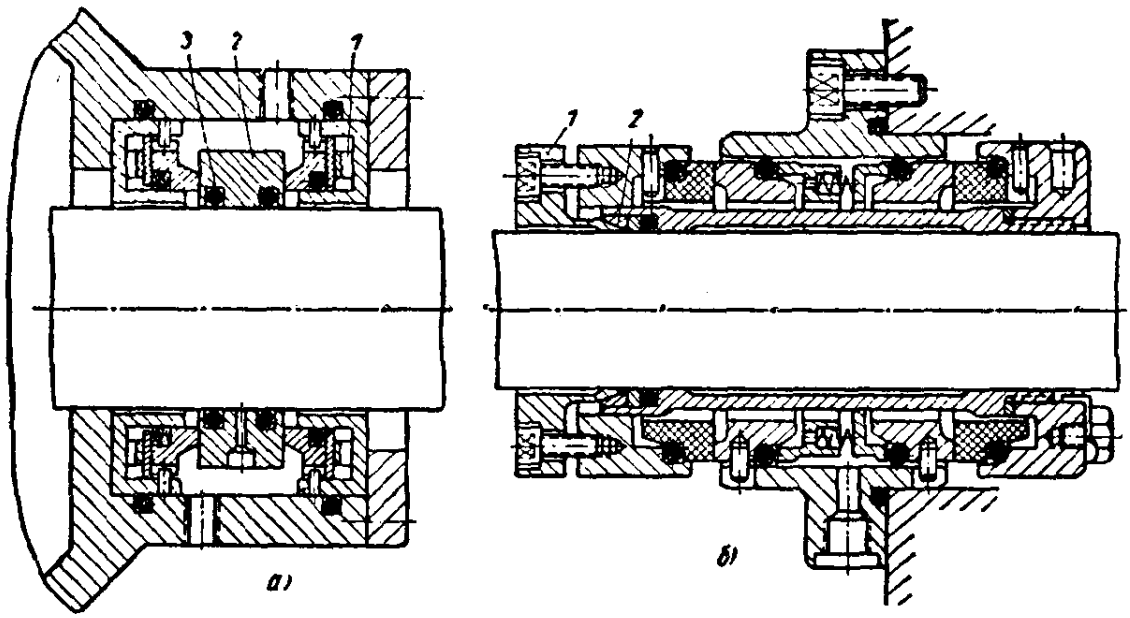


图 16　有静弹性元件的双端面密封
а—用于高轉速軸；*б*—密封部件用摩擦固定

图 16 示出有静弹性元件的双端面密封結构[9]。和有旋轉弹性元件的双端面密封結构一样，在該結构中，两密封間的空隙需注入密封液体。

結构（图 16 *а*）的特点是适于在高轉数下工作，且結构紧凑，这是由于采用了片状弹簧 1，并在两个橡胶密封环 3 上安装动环 2，环 3 防止环 2 对軸的轉动。

密封（图 16 *б*）是用摩擦套筒成套地安在軸上。特制的摩擦套筒是由楔形金属环 1 和 2 組成。因此，密封部件可以沿軸綫移动，便于密封的装卸。

端面密封的运动学和动力学

安装时摩擦副对旋轉軸綫无歪斜、偏移时摩擦副內的单位压力

假設当摩擦副（动环和静环）安装得絕对垂直并且和旋轉軸綫无偏移（虽然这种假設在实际并不存在）来分析作用在端面密封上的力。

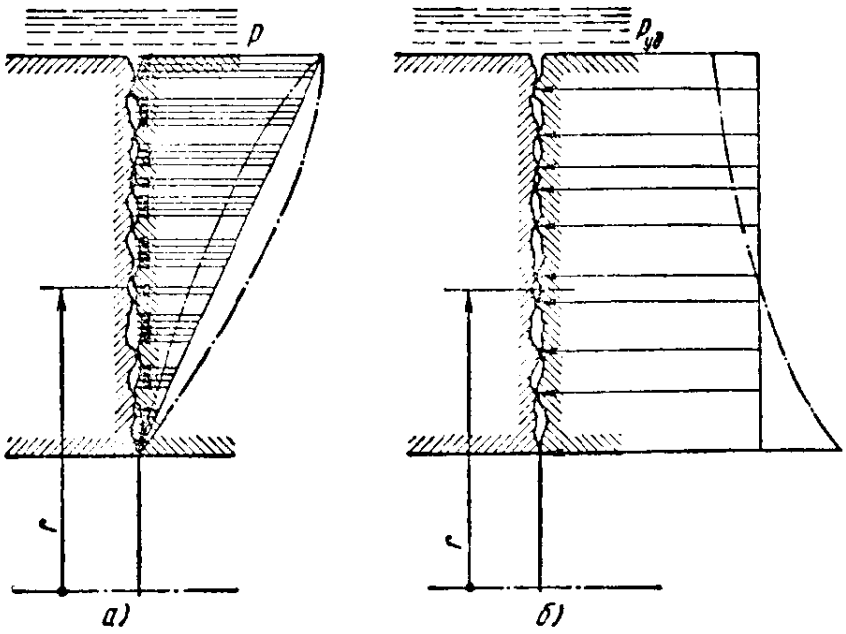


图 17　摩擦副接触中应力的計算
а—压力的分布；*б*—摩擦副內的单位压力

端面密封的最重要元件就是摩擦副。假設摩擦副摩擦表面是絕对平的，端面密封的寿命和工作质量大体上取决于它的工作能力。

多数实驗者进行端面密封的实驗确定，副內摩擦的最良好工况是半湿式。当半干式和干摩擦时，通常发現摩擦副接触面磨損大，而液体摩擦时，工作液体大量泄漏。

半湿式摩擦时[14]，作用在摩擦副接触面上的一部分力由粗糙不平的接触面承受，另一部分力由充滿摩擦副間隙內的液体所承受（图 17）。这时，位于間隙內的液体，是处于密封所受的压降 p 作用之下。

由于摩擦副接触面积用有压力的工作液体潤滑，則粗糙不平的硬接触面面积較小。因此，如果认为液体位于全部接触面积中，就沒有大錯誤。此外，我們认为，摩擦副間隙內液体流动的单位阻力沿半径方向是不变的，即不計液体的旋轉、由于沿縫隙流动时溫度升高而造成粘度的变化，环的弯曲以及其它因素等的影响。同时，沿半径 r 的压降是綫性分布，与摩擦副間隙內单位阻力的性质和数值大小无关。因此，摩擦副內的压力分布图是近

需要全本请访问 www.ertongbook.com