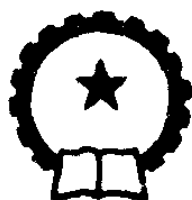


国外氢冷汽輪发电机軸 密封結構及其油系統介紹

第一机械工业部技术情报所第五室編



机械工业出版社

目 次

一、氦冷汽輪发电机的結構特点	1
二、軸密封結構的基本型式及油系統	4
1 軸密封的原理	4
2 沒有真空处理的軸密封油系統	6
3 有真空处理的軸密封油系統	8
4 軸密封結構的两种基本型式	11
三、国外軸密封結構及油系統介紹	13
1 苏联軸密封結構的发展与改进	13
2 美国几种軸密封結構及油系統介紹	22
3 英国几种軸密封結構及油系統介紹	38
四、結束語	44
参考文献	45

一、氦冷汽輪发电机的結構特点

应用氦气作为冷却介质給大容量、高效率的汽輪发电机創造了广闊的发展前途。在用空气作为冷却介质的条件下，最大的汽輪发电机曾做到 15 万千瓦，单机容量的繼續增长受到了限制。由于氦气的低密度和良好的导热、散热性能，使更大机組的制造得以实现。在同样条件下，采用氦气冷却可以比空气冷却增加 20~25% 的容量。此外，氦冷却的汽輪发电机还有效率高、材料省等优点。

氦冷技术在現代各技术先进的国家都已掌握，并获得广泛的应用，而空气冷却方式，一般都只用在容量較小的发电

机上。在苏联，近年来 3 万瓩及以上的汽輪发电机都采用了氦冷方式。

早期制造的氦冷却汽輪发电机，其机壳內之氦压一般稍高于大气压，約为 0.035 公斤/厘米²表大气压（即 $\frac{1}{2}$ 磅/吋² 表大气压）。在获得相当的运行經驗后，氦压就逐漸提高。当氦压提高到 2 表大气压时，发电机的容量就比 0.03 表大气压时增加 25%。氦压超过 2 表大气压后，容量的增长就不显著。随着导綫內部冷却方式的出現，較高的氦压就显得有利，因为此时获得了更有效的冷却效果。

采用氦气冷却，在制造和运行技术上是有一定困难的，主要是必須防止气体在发电机內爆炸，必須使机壳有可靠的密封以防漏泄过多的氦气。此外，由于氦冷发电机比空气冷却的发电机多了包括監視和控制部分在內的供气系統和供油系統，因而保証气体系統和油系統的安全和可靠地运行，也成为氦冷发电机制造和运行上所面对的重大課題。

首先发电机內必須有足够純度的氦气。当在氦与空气的混合气体中氦含量在 5~75% 范圍內时，就有爆炸的危險。为了防止爆炸气体的形成，在机壳內要經常保持氦气压力高于大气压，以免空气渗入。机內氦气純度要保持在 95% 以上。混合气体中氧气的含量不应超过 2%。为此就必须定期地用純氦来吹洗发电机。

为了防止爆炸气体的形成，在向发电机內輸入氦气之前，必須先将原有的空气驅除干淨。要做到这一点，可以有两种方法：一是真空法，即在充氦前在机壳內造成真空（低于 0.2 絕对大气压即可），一是置換法，即先用二氧化碳（或其他惰性气体，如氮）排去空气，再用氦排去二氧化碳，不使氦

气与空气直接接触。

尽管采取了上述措施，但在特殊情况下，电机内部仍有可能发生爆炸。因此电机的机壳应做得足够坚固，能耐受万一爆炸时所产生的压力。一般氢爆炸时压力不会超过6个表大气压。因此，氢冷发电机的机壳都做成圆筒形，壁厚达14~20毫米，机壳和端盖都要经过10个表大气压力的水压试验而不产生有害的变形。

为了减少氢气消耗量，所有的焊缝都要焊成密封的，保证不漏气。铸件也要求非常紧密，不能有细孔。端盖、视察窗、各段气体冷却器、引出线、瓷套管座板以及结构中各个接合面处都应做成密封。这些构件在装合时都加垫橡胶衬垫。

氢冷却汽轮发电机的各段气体冷却器不像空气冷却时那样放在外面，而是一直放在机壳内面，这样可以不因密封的要求而使结构过分复杂。

汽轮发电机轴的两端必须伸出机壳，轴两端的密封是否可靠是整个发电机密封问题中的关键所在。由于一方面是高速旋转的轴，一方面是静止的端盖，要在这两者之间达到完全的密封是非常困难的，因此直到现在，在这方面还进行着大量而紧张的研究工作和结构设计。而且直到目前为止，还不能肯定地说，已经令人完全满意的解决了这问题。

虽然如此，现有的几种密封结构已可以使氢气漏得较少，当氢压在0.03~0.05表大气压时每昼夜漏氢0.1~0.2立方米。但是随着氢压的提高，漏氢便迅速增加。由于导体内部冷却方式的采用和氢压的提高，这个问题成了主要的困难，因而寻找更良好的轴密封结构就显得更加迫切了。

在我国，汽轮发电机制造业还很年轻，只有六、七年的

历史。但在这短短的时期内，在党的正确领导下，在苏联及其他兄弟国家的无私援助下，却取得了极大的成就。单机容量已达5万千瓦。在氢冷技术方面，我们已试制完成5万千瓦的普通氢冷的汽轮发电机和5万千瓦高氢压导体内部冷却的氢冷汽轮发电机。前者已投入生产。10万千瓦氢内冷的汽轮发电机已开始试制，更大容量的机组正在设计。在设计 and 制造这些重大产品中，转轴两端的密封结构的选择与改进，显然是一项重大的课题。目前在我国各地的电站内，已有150万千瓦左右的氢冷汽轮发电机投入运行，今后还将大量增加。对于这些发电机的安全与可靠的运行来说，轴密封的调整、检修与改进也是一个关键。为了配合设计、制造及其他部门的需要，本书将着重在轴密封结构的介绍。

二、轴密封结构的基本型式 及油系统

1 轴密封的原理

对各种各样的密封结构都曾经进行过研究，但目前世界各国的各工厂都采用液体密封结构。其原理都是在旋转的轴与静止的端盖间的间隙内维持一连续的油膜，以防止氢气的外泄。这连续的油膜是靠用压力把油不断压入此间隙来维持的。企图试用不要循环系统的液体密封结构，但没有取得成功。这是因为由于摩擦作用，油很快就发热了，而气体又会溶入油中，此时由于发热与轴旋转所引起的搅拌作用，这种可溶性更加增加，因而会造成被密封所隔开的两种气体有

相互渗入的可能性。

发了热的油，含有被吸收的气体，它应该立即从密封間隙排出去，进行冷却和除气处理。这样就有必要在氦冷却的汽輪发电机上附加一套油处理装置。

一切現有的各种密封装置都基于一个原理：油不断压入静止部分与轉軸之間的間隙內，再从此間隙分成两股流走，一股向氦气方面流，一股向空气方面流。密封中的間隙愈小，循环油的需要量也就愈少，而这一套油处理的装置也就愈简单。可見油处理设备的复杂与否取决于密封間隙的大小。

进入密封处的潤滑油会吸收空气和氦气，或者吸收两者的混合气体。在通常的油溫下，潤滑油大致吸收5%的氦和10%的空气（按体积計）。

从軸密封排出的油必須經過專門的处理，以除去被吸入的气体，然后再压入軸密封。如果不經处理，則油进入氦气側后，会放出空气而吸取氦气。这不仅增加了氦的消耗，而更重要的是由于放出了空气而使氦气純度下降。空气一經与氦气混杂，就很难把它分开，因而必須放出一定量的气体，并补充一定量的純氦，以保持机壳內所需要的氦純度。这就更进一步地增加了氦消耗量。显然，减少流入氦气側的油量极其重要。如果这部分油量少，只要在运行中补充一定量的氦气，就能达到滿意的运行要求。如果这部分的油量相当多，則需要經常补充相当可觀的氦气量，这在运行上是极不經濟的，因此一般都采用真空处理，以便在油进入軸密封之前除去其中的空气和水分。

下面借用英国茂偉公司的两种油系統來說明油系統的結構和运行情况〔2〕。

密封油进入軸密封后分为两路。流入空气側的一路油經過軸承回油管，回到地下总油箱（透平油箱）。流入氫气側

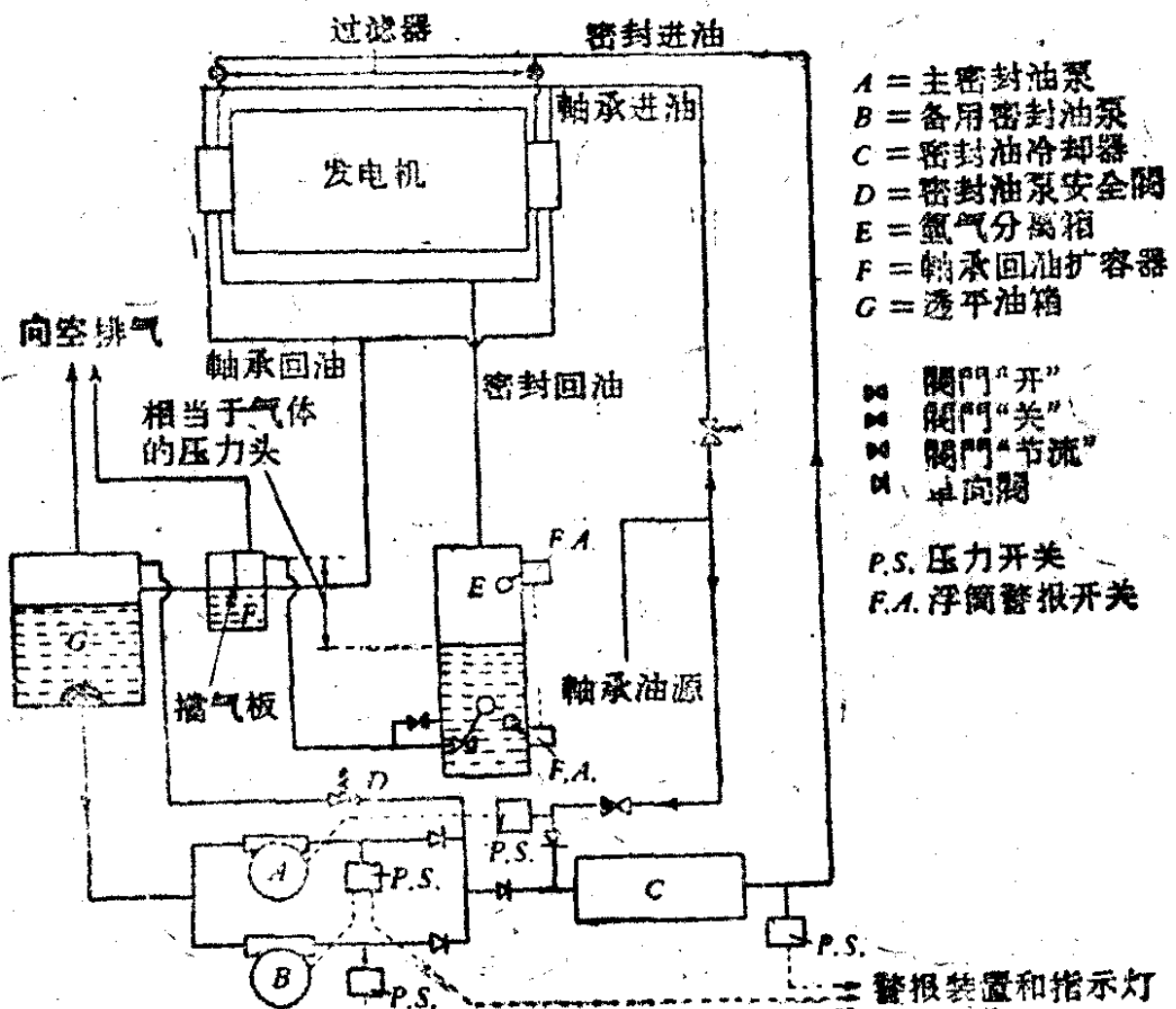


圖 1 沒有真空处理的油系統示意图。

的一路油被每个密封内侧的刮油器所阻挡，不使流入机壳，而经过密封回油管被排入氢气分离箱。油在此箱内逗留相当长的时间，足以使直径大于 25 微米的氢气泡升到油面，返回发电机机壳。

氢分离箱下部的油经出口管流回地下总油箱。地下总油箱与氢气分离箱两者在高度上的相互位置应这样安排，使在低氢压下氢气分离箱的油位始终保持一定的高度，以封住出口管，避免漏氢。机内氢气压力的有使油从氢气分离器内压出的趋势。能够承受的最大氢压受氢气分离箱深度的限制，这一压力通常为 $0.2 \sim 0.3$ 公斤/厘米²。为了在高于上述压力下保持一定的油位，在出口处装一浮筒阀，当油位下降时就关闭出口管。

整个油系统的运行是半自动的。在机组充氢前，应调整密封油泵的安全阀和密封油系统上的透平油进口阀，使密封油压高于氢气压力的 $0.35 \sim 0.70$ 公斤/厘米²。系统上的各压力开关的动作压力调整到稍低于透平油压和密封油压，然后进行校验，保证两个密封油泵能在透平润滑油系统停止工作时，按正确的程序自动起动。

通常在油系统中装有信号装置，用以指示出任何不正常的工作情况。油系统中装有指示灯，以表示哪一台油泵在运行，同时还装有声和光的信号装置，在油压下降时会发出警报。虽然油压完全降落到零（即油泵停止工作）是不可能的，但由于过滤器脏污或某一弹簧调节阀失灵而引起压力下降是可能发生的。因此在氢气分离箱内装有浮筒高、低位警报开关，以便在浮筒阀损坏而油位过高或过低时发出警报。浮筒阀在开启状态时损坏，在氢压较高的情形下，会引起气体密封的

失灵；浮筒閥在關閉狀態時損壞，則會使油面升高，最後可能會從密封回油管溢出，流到機殼里去。如果發生上述故障之一，就必須隔斷浮筒閥，使油走旁邊並聯的閥門，並用手動方法來調節它。

3 有真空處理的軸密封油系統

圖 2 表示具有真空處理的油系統示意圖。它比前面所講的系統要複雜一些。

密封油首先通過真空油箱 *A*，由於真空泵 *M* 的運轉，真空油箱內保持真空度 750 毫米水銀柱。油通過一組噴咀被吸入真空油箱，噴咀把油噴散成霧狀，便於從其中除去氣體和水汽。主密封油泵 *B* 是連續工作的。它把油從真空箱底部抽出，通過壓差控制閥 *D* 和密封油冷卻器 *C* 而進入軸密封。壓差控制閥由油壓和氬壓的差額來調整。所需之差額通常為 0.35 公斤/厘米^2 ，是用一彈簧來控制的。密封油泵的流量一般較軸密封所需之油量大一些，多餘的油量通過安全閥 *E* 和另一組噴咀重新回入真空油箱作進一步的真空處理。這一組噴咀朝下對着油面，以便激來泡沫，便於除氣。

油通過軸密封後，空氣側的油排入軸承回油管；而氬氣側的油則進入氬氣分離箱 *F*。油在氬氣分離箱放出一部分氬氣後，進入真空油箱以便進一步除去剩留的氣體。為了補償流向空氣側的油量，所需之油從軸承回油管的擴容器 *H*● 經過空氣分離箱 *G* 而進入真空油箱。油箱 *A* 和 *G* 均裝有浮筒閥，當油位下降時即打開閥門放油入箱。

軸密封油的正常供應有賴於主密封油泵和真空泵的正常

● 擴容器英文為 Enlargement。

連續运行。当机組运行时，上述两泵中之任何一个发生故障，則紧急油控制閥 J 由于失去油压而自动打开，于是未經处理的潤滑系統的油經過压差控制閥 K 而进入軸密封。如果机組在靜止状态，不能从軸承潤滑系統取得油时，則备用密封油泵 L 就由压力开关操作而自动启动，把油从空气分离箱抽出而供給軸密封。

这种油系統的起動操作大体与上述一种系統相似。所例外的是必須在密封油泵开始工作之前先启动真空系統。在第一次启动真空泵前，整个真空系統必須先进行 1.05 公斤/厘米^2 的空气压力試驗，以檢查其严密性。

当来自軸承潤滑系統的油充入空气分离器后，系統即可启动。首先启动真空泵，在真空油箱內造成真空，于是油被吸入真空油箱，直到規定的油面。然后起動主密封油泵，并調节油压，使稍高于軸密封所需之正常值。最后調节压差控制閥，使軸密封的油压达到正常需要值。

在发电机充氩前，必須校驗从軸承潤滑油源和备用密封油泵来的备用油系統，并調整各种压力控制閥和开关，以保証在任何情况下能保持合适的軸密封油压。

这种油系統的工作也是自动的。为了充分正确地監視工作情况，必須有一套相当完善的信号警报系統，使能报导密封油压的降低、真空度不够、三个油箱中油位的过高与过低以及密封回油管中过高的油面等情况。

密封油完全停止供应是不大可能的。但由于增加了真空处理的設備，这部分油的供应就成了薄弱环节。除了密封油泵和真空泵的可靠連續运行之外，浮筒閥的可靠运行以保証有足够的补充油供应真空油箱也是极重要的。如果从軸承回

油管来的补充油不足，則会造成真空油箱缺油。如果軸承回油管的扩容器有足够的容量，这种情况就不会发生。但是万一在停机时发生这种情况，而且机内有氬气时，則必須保持透平油泵滿負荷运行。

为了防止在高油位时油被吸入油泵，通常在泵进口管上裝一只由高油位警报器操作的电磁閥。在停机时，如果在冷油情况下油起泡沫，則須将真空度降低一些。

如果須要长期用来处理的油供給軸密封，最好要調整紧急压差控制閥K以尽可能减少流向氬气側的油量，并且最好在90~95%的氬純度下运行以减少氬气的消耗。

4 軸密封結構的两种基本型式

上面已談到过軸密封的基本原理。根据此原理，曾設計和制造过各种不同的軸密封結構。但其基本型式不外以下两类：（一）环式軸密封，或称軸向式；（二）端面式軸密封，或称徑向式。

在环式軸密封中，間隙是在軸的外表面与密封环的内表面之間，其情况与軸承相似。这种結構的密封装置一般与軸承联接在一起。显然，在这种情况下，密封装置的間隙一般不会小于軸承中的間隙（0.5~0.8毫米）。即使把間隙做得小一点，因为軸的振动及軸在油膜中的浮动，它仍会扩大的。因此这种密封的耗油量常常很大。例如，按苏联經驗，对于25,000瓩的汽輪发电机，这种密封装置的耗油量，在氬压为0.035表大气压时，約为40升/分；而当氬压为1表大气压时，約为80升/分[1]。这样大的耗油量当然不能令人满意的。

在端面式軸密封中，間隙是在軸的圓盤側表面與密封裝置圓盤側表面之間。當用彈簧把密封瓦壓到軸圓盤側表面上去時，這裡的間隙可以做得很小，因為軸的橫向振動和軸在油膜中的浮動不會影響密封間隙的大小。雖然軸在軸向上也會有些串動，但依靠彈簧壓力的調節，可以使間隙保持在適當的數值。顯然，這種密封結構的耗油量會比上一種少得多。

在端面式軸密封中，密封瓦上開有環形溝，從其中把油壓送進去。整個密封瓦面被環形溝分成兩部分，一部分靠內，油通過它流向氬氣側，一部分靠外，油通過它流向空氣側。在製造上可以把外面的間隙做得大些，把內面的間隙做得尽可能小。這樣，在運行時，由於兩邊間隙大小不同，以及由於旋轉時的離心力作用，絕大部分油向外（即向空氣側流），而使氬氣側的油量減得很小。而在環式軸密封中，油向兩側的油量基本上是均勻分布的。根據英國茂偉公司的經驗，端面式軸密封中，流向氬氣側的油量約為環式的三十分之一〔2〕（此僅為茂偉公司的經驗，各公司的數值並不一致）。因此，一般環式軸密封的油系統中需要真空處理設備，而在端面式軸密封中就可以不要真空處理設備。

雖然目前端面式軸密封由於上述優點而應用得較廣，但這種密封裝置在結構設計和製造加工上以及在運行的調整與安裝上都比較複雜，要求比較高，並且要占用較多的軸向位置。因此，改進環式軸密封的工作從未停止過。浮環式軸密封就是改進結構中的一種。

浮環式軸密封結構在下面還要介紹。它的特点是密封環可以隨着軸的振動而在油膜中作輻向的浮動。在這種結構中，密封的間隙可以比上述環式密封裝置做得小得多。儘管如此，

往氦气侧流去的油量还是比端面式轴密封的多很多，它仍然不能减少到可以不用真空处理的程度。

密封结构的改进工作在各國仍在努力进行中。又可靠又简单的密封结构及油系统是制造高氦压氦内冷汽轮发电机的重要条件。

三、国外轴密封结构 及油系统介绍

1 苏联轴密封结构的发展与改进

苏联制造的汽轮发电机中，环式密封和端面式密封都曾应用过。在最初的环式密封中，曾将密封环与轴承的支承瓦刚性地联成一体（见图3）。这样的结构有很大缺点，运行性能也不能令人满意。在这种结构中轴承外壳分成两个区域，一个区域向着定子，其内充满氦气，另一个区域在外面，与空气接触。如果要把轴承拆开，势必会从发电机内放出氦气。此外，由于密封环与轴承支承瓦作刚性联接，不能保证密封环与轴间所需的最小间隙，此间隙不可避免地会达到与轴承间隙一样的数值。由于间隙大，流入每一端的密封油量也很大，这就导致必须采用真空处理。

如所周知，是否有必要真空处理完全取决于流入氦一端的油量。因此设计人员的努力方向是尽量减少此油量。为此，首先要减少轴密封与轴之间的间隙总截面。

在TB2-100-2和TB2-150-2型的汽轮发电机中，环式结构得到了改进，采用了浮环式的轴密封（见图4）。与上述型式相比较，浮环式轴密封的优点是：不需从发电机中放

出氦气就可以拆卸轴承, 因为轴承外壳是完全与轴封分离的。

在浮环式轴密封中, 环内孔与轴之间的环状间隙可以做得比前一种型式小得多。随着轴的振动, 密封环能在油膜中作径向的浮动。尽管如此, 浮环式轴密封中流向氦气侧的油量仍然不能减少到可以取消真空处理设备的程度。虽然, 曾有连续换气法的想法和研究工作, 但未得到发展和应用, 可能是由于在运行中氦耗量会大大地增加, 很不经济。

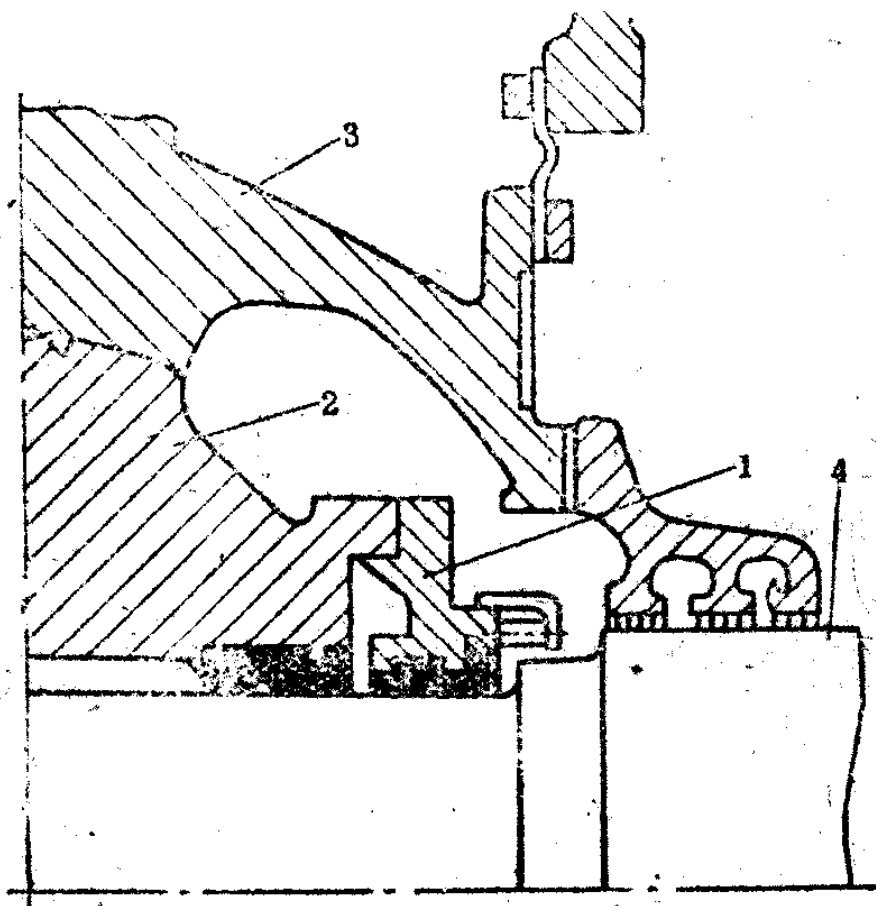


图3 密封环与轴承瓦作刚性联接的轴密封结构:

1—密封瓦; 2—轴承支承瓦; 3—轴承外壳的盖; 4—轴。

在上述同一系列的产品中, TB2-30-2 型汽轮发电机采用了完全不一样的轴密封型式——端面式轴密封 (见图5) [4]。在这种结构中, 密封间隙在轴的推力盘与密封瓦之间。

在运行时, 密封油由密封进油管进入压力油室 I。然后

分成两路。一路油經密封瓦球面与密封外壳之間的間隙流入空气室Ⅲ。另一路油沿特殊油孔进入环形油室Ⅳ，这部分油是实际起到密封作用的油。它到了环形油室Ⅳ后，又分成两条油流。一条流向空气室Ⅲ，与上述流入空气室的油一起从軸承回油管排出。另一条流向氬气室Ⅱ，它被擋油圈6和刮油器7所阻擋不使进入机壳而被排入密封回油管。运行时，密封油不断供入，在密封瓦与推力盘間形成一連續的油膜。連續不断的油，一方面起密封的作用，同时也起潤滑和冷却的作用。为了不使氬气通过密封間隙漏出，油压应經常稍高于氬压。

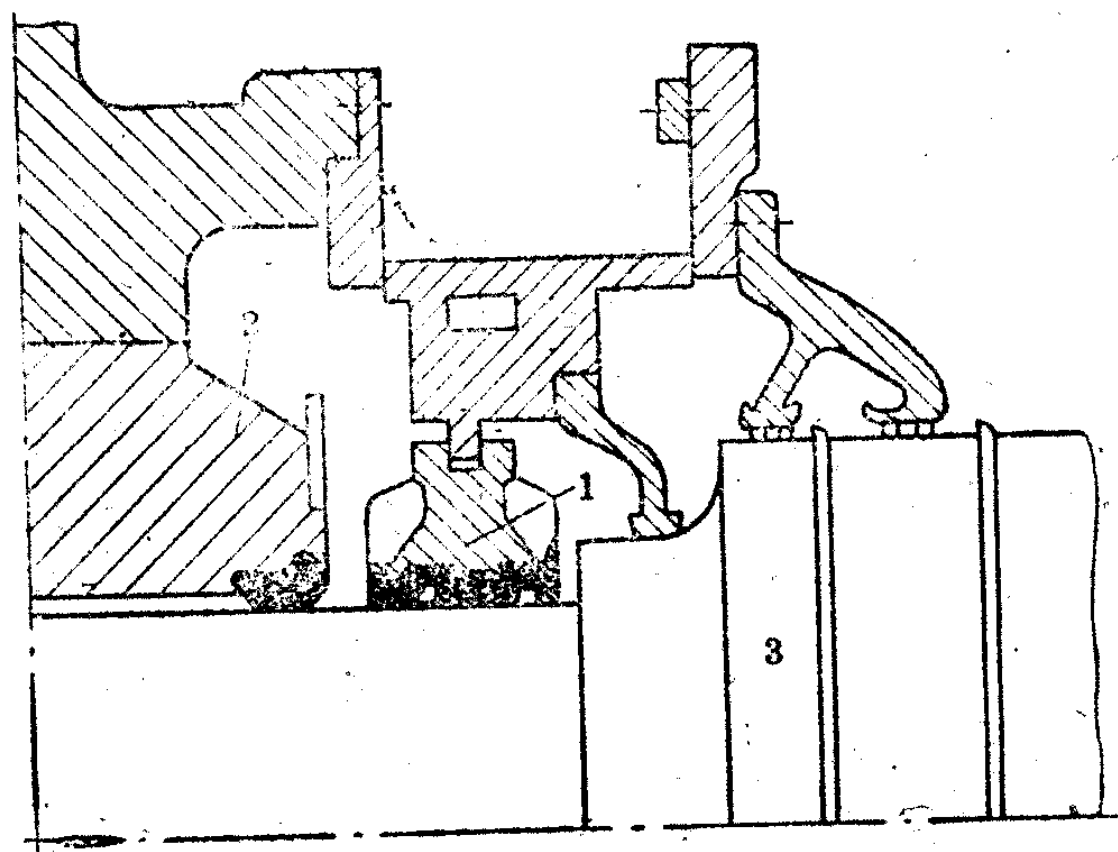


图4 浮环式軸密封結構：

1—密封瓦；2—軸承支承瓦；3—軸。

塑料墊圈3的作用是把压力油室Ⅰ和氬气室Ⅱ隔开。因为发电机轉子在运行中会有热膨脹以及軸向串动的現象，所

以此垫圈用軟性材料制成，以便使密封瓦能适应推力盘的軸向位移而随之移动。密封瓦的外圓制成球面形的，其原因如下：在运行时密封瓦的工作面和推力盘的工作面必須紧密相貼，而且还必須严格垂直于发电机轉子的軸向中心綫。由于发电机轉子的重量关系，使发电机轉子有一定量的自然弧度，而且这弧度的大小在运行时还会变化，因此密封瓦外圓做成了球面。这样就可以保証不論轉子弧度在規定範圍內如何变化，密封瓦都能自动調整以适应推力盘的位置。

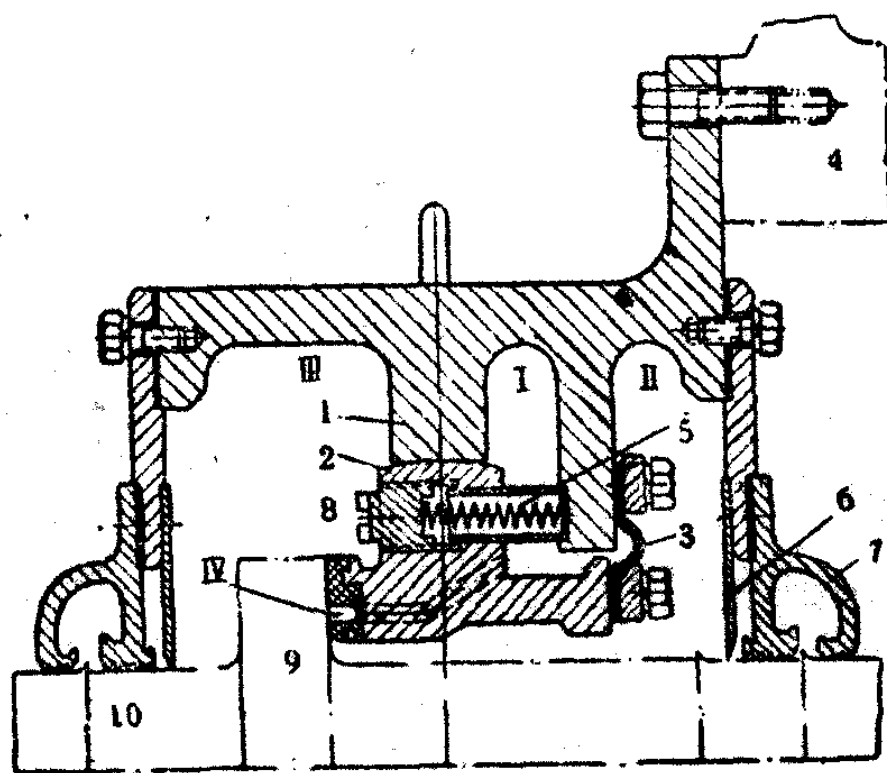


图 5 TB2-30-2型汽輪发电机的端面式軸密封:

1—密封外壳；2—密封瓦；3—塑料垫圈；4—发电机外壳；5—受压彈簧；6—擋油圈；7—刮油器；8—烏金；9—推力盘；10—軸。

密封瓦与推力盘間的間隙被烏金面上的环形油室分成两部分。一部分靠空气側，一部分靠氬气側。这两部分的間隙大小不一样，靠空气側的大于靠氬气側的。靠氬气側的間隙做得尽可能的小，只要两工作面不发生干摩擦即可。这样由