

# 核电发电机防漏油的研究

陈锦辉

(上海电气电站设备有限公司发电机厂, 上海 200240)

**摘要:** 以核电发电机防漏油为研究对象, 对旋转轴密封原理及结构、漏油途径、漏油现场处理及预防措施等方面进行了系统论述和研究。通过对实际案例的原因分析、制定措施以及后续验证, 阐述了处理漏油的经验。该经验对现场处理发电机漏油问题具有较强的参考价值和重要的指导意义。

**关键词:** 核电发电机; 旋转轴密封; 防漏油; 防范措施

中图分类号: TB42

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)01-0125-04

## Research on the Oil Leakage Prevention for Nuclear Power Generator

CHEN Jinhui

(Shanghai Electric Power Equipment Co., Ltd., Generator Plant, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Oil leakage of nuclear power generator has been the research object. We researched the gland seal principle and structure. Based on the analysis of some case, we got oil leakage treatment and preventive measures. The paper provided reference value and important guidance for the oil leakage problem.

**Key words:** nuclear power generator; gland seal; oil leakage prevention ; preventive measures

核电以其“高效、清洁”的优势在能源市场中占有重要的地位, 与火电、水电共同成为能源的三大支柱。美欧发达国家的核电发电量超过20%; 中国核电起步晚、占比较低。根据我国核电发展规划: 到2020年, 我国核电运行装机容量将达到58 GW, 发电量占全国发电量的4%。对核电发电机的原材料采购、工艺制造、部件组装、现场总装、调试、运行维护等各个环节均严格把关, 严控产品质量, 打造核电精品。因此核电发电机的性能、可靠性明显优于火电机组、故障率远低于火电机组。

针对部分核电发电机的机内漏油现象, 本文将重点论述防漏油机理及解决办法。

### 1 轴密封设计

通常汽轮发电机冷却方式主要有: 氢冷、水

冷、空冷等。氢冷以其优良的冷却效果, 在汽轮发电机中得到广泛应用。目前国内外大容量核电汽轮发电机普遍采用氢气冷却方式。在氢冷发电机中, 为了实现转子与定子间动、静间隙内密封氢气的目的, 在设计时引入了轴密封装置和密封油系统。

#### 1.1 轴密封原理<sup>[1]</sup>

氢冷发电机在旋转轴密封处采用压力油来密封氢气。在转轴和支座之间设置密封瓦, 向密封瓦内注入比氢气压力略高的密封油, 从而形成油膜, 将氢气密封在发电机内。密封油沿转子表面分成两路油, 分别为空侧油(流向机座外侧)和氢侧油(流向机座内侧, 回流至端盖消泡箱、回油箱)。轴密封原理如图1所示。密封油系统的工作原理如图2所示。

密封油供油装置主要由油泵、压差阀、平衡阀、氢侧回油箱、油过滤器及控制仪表等组成。整个密封油系统包括密封油供油装置、密封瓦、支座、端盖、管道等。

轴密封装置及密封油系统可分为单流环式和双流环式。单流环是指只有一股密封油, 该密封油在

转子表面分成空侧密封油(流向空侧、机外)、氢侧密封油(流向氢侧、机内)。

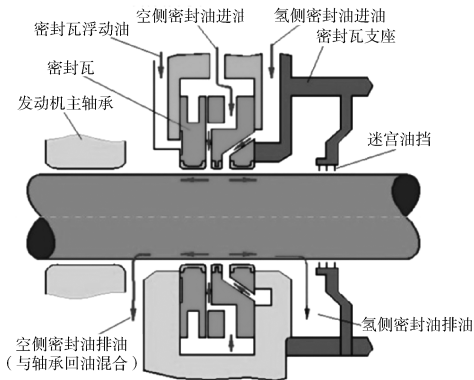


图1 轴密封原理示意图

Fig. 1 Gland seal theory

确保油及油雾经多道迷宫油挡后不能渗漏至机内。轴密封结构如图3所示。

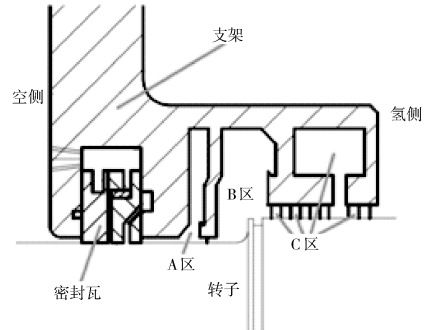


图3 轴密封结构示意图

Fig. 3 Oil baffle structure

图3中，A区通过油齿阻挡约90%以上的液态密封油；B区通过转子沟槽和转子台阶阻挡剩余的液态密封油；C区通过多道油齿阻挡油雾进入机内，油雾凝结回流至端盖消泡箱。

在机组运行过程中，当安装不当、支座变形、密封油齿磨损时，仍然会有极少量油雾进入机内。

## 2 机内漏油

### 2.1 机内漏油的分类

机内漏油按漏油位置，分为两种：支座油挡处渗漏、支座哈夫面处渗漏。

支座油挡处渗漏：油挡部分失效、油挡磨损后间隙变大、密封油量变多、消泡箱液位高油倒灌机内、回油不畅、回油孔堵塞等。

支座哈夫面处渗漏：上下半支座变形、平面度超差、局部凸起使得支座哈夫面的间隙变大，密封油渗漏至机内。

支座哈夫面采用油封结构来阻止氢气的逸出。从空侧密封油中引出的一小股油充满哈夫面上的空侧小油槽、逐步渗透至氢侧小油槽内，从而在支座哈夫面上形成完整的密封油膜能有效地阻挡机内氢气的逃逸。当支座哈夫面不平整、变形、间隙过大，都将引起该小股密封油渗漏至机内。

机内漏油按严重性，分为两种：少量漏油和大量漏油。

少量漏油是指机组运行时，每天漏油量约10 L以内。少量漏油一般具有漏油量小、每天漏油量基本相同、长期性泄漏的特点，通常与本体密封结构以及安装有关联，由支座结构装配不当、变形、磨

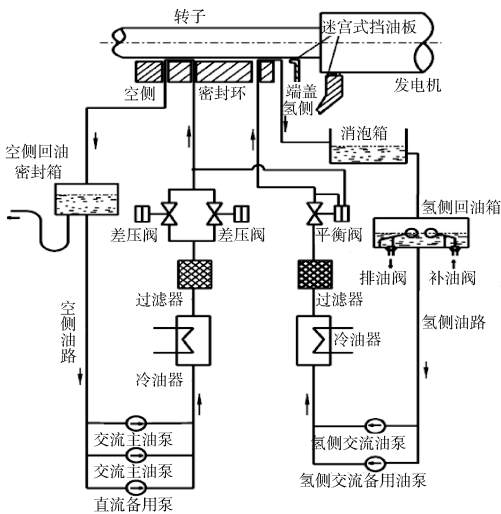


图2 密封油系统工作原理示意图

Fig. 2 Seal oil system

双流环是指有两股密封油(空侧密封油、氢侧密封油)，两股密封油在转子表面结合处压力相同，不发生窜流，空侧密封油流向空侧、氢侧密封油流向氢侧。

单流环系统的机内氢气纯度高。双流环系统因空侧、氢侧易发生窜流，会导致机内氢气纯度比单流环系统略低一些。

### 1.2 轴密封结构

为防止氢侧密封油、油雾进入机内，设置了多道迷宫式密封油挡。迷宫密封是在转轴周围设多个环形密封油挡，使油挡与油挡之间形成一系列截流间隙与膨胀空腔。油及油雾在通过迷宫间隙时会产生节流效应、摩阻效应，其流速减慢、泄漏减少，

损等引起。这说明有固定的渗漏通道或缝隙。少量漏油无需停机,只要每天及时将漏油排出,记录漏油量、漏油报警位置、待停机时再仔细检查渗漏通道、处理即可。

大量漏油是指机组运行时,每天漏油量约10 L以上。大量漏油一般具有漏油量大、突发性的特点,通常与密封油系统、设备以及调试有关联,由密封油系统装置设备故障或操作不当或管道回油不畅等引起。大量漏油会使消泡箱液位升高、密封油倒灌机内。大量漏油需停机处理,检查密封油系统设备、管道等查找原因,并及时处理。

## 2.2 机内漏油的影响

当机内存在少量漏油时,机内产生油雾,暂时对发电机运行无影响、无需停机处理。但其可能存在一定的潜在隐患,如污染机内零部件、氢气纯度下降等。

国内外较多氢冷机组曾发生过机内少量漏油事件,有的每天漏油几十毫升,有的每天漏油约几千毫升。通过及时将漏油排出,机组仍然正常运行,待停机时再处理渗漏通道。比如宁海电厂(600 MW级发电机)珠海电厂(740 MW级发电机)、北京高安屯电厂(300 MW级发电机)、大亚湾核电(980 MW级发电机)机组、阳江核电(1 100 MW级发电机)机组等曾发生机内漏油。

机组运行时需实时监测漏液报警。从国内外少量漏油机组运行来看,每3个月漏油产生报警1~2次是被允许的、安全的,并不会影响发电机运行。而当报警次数增多,则说明密封油系统或者轴密封结构有异常,需及时核查或调整密封油运行参数,待停机时检查轴密封结构。

当机内大量漏油时,机内产生积油,必须立即停机处理。

## 2.3 机内漏油的在线处理措施<sup>[1]</sup>

当机内少量漏油时,在不停机状态下,采取如下措施以缓解漏油。

### 1) 降低油氢压差

密封油量与油氢压差成正比。当发生漏油时,适当地降低油氢压差,能够减少氢侧密封油量,泄漏至机内的漏油量也会相应减少。

### 2) 降低进油温度

密封油量与油的黏度成反比,当发生漏油时,适当地降低进油温度,则油的黏度会增大、氢侧密

封油量会减少,泄漏至机内的漏油量也会减少。同时,当油温较低时,油中的含水量、含气量会减少,漏至机内油所含的油蒸气也会减少,降低了机内的污染程度。

## 3 核电发电机机内漏油分析及处理

阳江核电发电机、大亚湾核电发电机等曾发生机内漏油情况,以下将以此为案例,分析核电发电机机内漏油处理措施。

### 3.1 阳江核电发电机漏油

阳江核电发电机2015年曾发生过机内漏油:每天漏油量约500~600 mL,从机座底部的漏液报警器排出。因少量进油对发电机运行无影响,机组不需停机,待大修停机时检查再处理。后大修检查判定为油雾从支座油挡处渗漏至机内。

制定“疏”“堵”相结合的处理措施:

1)“疏”措施:疏通、修刮、扩大回油孔使得回油顺畅;降低油氢压差。

2)“堵”措施:调小油挡间隙以提高挡油效果;支座哈夫面涂 Hylomar 密封胶以防止密封油从支座哈夫面处渗漏至机内。

经处理后重新启机,机内漏油得到解决。

### 3.2 大亚湾核电发电机漏油

大亚湾核电发电机2002年曾发生过机内漏油<sup>[2]</sup>:励端每天漏油量约900 mL。后机组检修时发现内油挡哈夫面间隙偏大达到0.30~0.42 mm、内油挡哈夫面有贯穿性凹槽。因此判定密封油是从内油挡哈夫面间隙处、凹槽处渗漏至机内。

现场采取研磨内油挡哈夫面、涂抹平面密封胶等处理措施,解决了机内漏油问题。

## 4 漏油量的计算

### 4.1 液态油漏油计算

若是液态油通过缝隙处渗漏至机内,则可根据经验公式(1)计算:

$$Q = \frac{\delta^3 b \Delta p}{12 \eta L} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为漏油量;  $b$  为缝隙宽度;  $\delta$  为间隙;  $\Delta p$  为油氢压差;  $\eta$  为油粘度;  $L$  为缝隙长度。

漏油量与支座哈夫面间隙的三次方成正比,因此通过现场检查该装配平面的平面度、研磨该平面、提高装配质量等措施以减小该间隙,从而减少

漏油量。同时,通过在该平面均匀地涂抹密封胶,能起到良好的防漏油效果。

## 4.2 油雾漏油计算

若是油雾通过迷宫密封处渗漏至机内,则可根据经验公式(2)计算:

$$Q = \frac{1700 \cdot C \cdot K \cdot A \cdot P_0}{\sqrt{P_0 \cdot V_0}} \sqrt{\frac{1 - \frac{1}{\rho^2}}{n + \ln \rho}} \quad (2)$$

式中:  $Q$  为漏油量;  $C$  为流量系数;  $K$  为动能系数;  $A$  为油挡间隙的面积;  $P_0$  为进口压力;  $V_0$  为比容;  $n$  为油齿的数量;  $\rho$  为压差比。

漏油量与油挡间隙的面积成正比,因此通过调小油挡的密封间隙,能大大减少油雾的泄流量。

## 5 漏油分析及防范措施

### 5.1 漏油原因分析

少量漏油的原因主要有:(1)支座变形导致缝隙漏油;(2)装配不当产生缝隙漏油;(3)密封瓦磨损、密封油量变多;(4)回油孔堵塞、回油不畅等。

大量漏油的原因主要有:(1)对密封油供油装置上设备操作不当;(2)设备故障等;(3)回油管道坡度不符合要求。

### 5.2 防范措施

少量漏油的主要防范措施如下:

1) 支座检查:因支座磕碰或内应力释放,检查支座有无变形,支座哈夫面的平整度有无超差;若有异常应及时处理。

2) 平面密封胶:支座哈夫面涂密封胶,以增强密封能力,防止密封油渗漏机内。

3) 油挡间隙:仔细检查油挡有无磨损、变形、回油孔有无堵塞,按设计图纸要求安装支座、调整油挡间隙等。

4) 密封瓦自由度检查:装配后检查密封瓦的自由度以确保密封瓦安装就位正常,不发生卡涩,若

有异常需排查原因并消除。

大量漏油的主要防范措施如下:

1) 回油管道的坡度:检查氢侧回油管道的坡度是否符合要求,不能上翘;否则可能回油不畅引起消泡箱油位升高、油倒灌机内。

2) 管道清洁度:检查密封油管道,严防异物进入,如橡胶片、纱布等进入回油管道,从而造成堵塞引起发电机漏油。

3) 氢侧回油箱:检查氢侧回油箱的清洁度及浮球阀灵活度。

## 6 结论

通过分析发电机防漏油的机理以及漏油治理、防范措施,结论如下:

1) 少量漏油不影响发电机正常运行,不需停机处理。每3个月漏油报警1~2次是被允许的、安全的。

2) 大量漏油需立即停机,查找原因、制定处理措施。

3) 漏油与轴密封结构、零部件制造、发电机总装配、密封油管道系统、机组运行维护等紧密关联,任何一环节出现偏差都有可能导致漏油。

4) 漏油是可控可防的。

参考文献:

- [1] 汪耕,李希明.大型汽轮发电机设计、制造与运行[M].上海:上海科学技术出版社,2012.  
WANG G, LI X M. Design manufacture and operation of large turbo generator [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2012.
- [2] 邱逵达.大亚湾核电站发电机密封系统有关问题的原因分析及处理[J].润滑与密封,2004(3):116-118.  
QIU K D. Cause analysis and treatment of generator sealing system in dayawan nuclear power plant [J]. Lubrication and Seal, 2004(3): 116-118.

(责任编辑 郑文棠)