

发电机氢气泄漏率高的原因分析与对策

李浩然 石嘉宝 杜岩松 朱珂皓
(中核核电运行管理有限公司 浙江 海盐 314300)

摘要: 方家山核电站 1 号机组在运行期间发生氢气泄漏量增大缺陷, 超出运行限值, 严重影响机组安全稳定运行。现场检查发现氢气从发电机内部泄漏至两侧轴承箱。本文以试验验证方式, 从端盖新旧密封胶混合、密封条材质等方面对漏氢原因进行分析, 找到发电机氢气泄漏量大的根本原因, 并有针对性地提出改进措施, 彻底解决发电机漏氢问题, 提高机组运行的安全性。

关键词: 发电机; 漏氢; 密封胶; 密封条

0 引言

方家山核电站所使用汽轮发电机内部采用氢气作为冷却介质, 用于将发电机运行过程中产生的大量热量带走。机组运行期间如氢气泄漏量过大, 会影响发电机冷却效果; 同时氢气属于易燃易爆气体, 达到一定浓度遇明火会造成氢爆, 严重威胁机组及人员安全。故有效控制漏氢量是保证氢冷发电机安全稳定运行的必要措施。

1 概述

方家山机组运行期间发电机内部氢气压力为 3bar, 主要依靠密封瓦、大端盖、密封条和密封胶等部件维持内部氢压, 避免氢气外泄。

该发电机采用单流环油密封结构, 压力密封油经密封座与密封瓦之间的油腔, 流入密封瓦与转轴之间的间隙, 沿径向形成油膜, 防止氢气外泄。端盖与密封座之间使用橡胶密封条密封 (详见图 1)。

发电机端盖与机座之间, 以及端盖水平中分面采用注胶密封的方式。端盖垂直把合面以及上半端盖水平合缝面设有注胶槽, 检修结束后在槽内注入一定压力的密封胶, 正常注胶工序为先从底部 D 点注胶, 待中分面两侧均有密封胶连续冒出后, 再将注胶枪移至中分面 B (或 C) 继续注胶。待

顶部 A 点开始冒胶后, 换 C (或 B) 注胶, 待 A 点冒胶后, 注胶工作结束。该密封胶为粘稠状液体, 机组运行过程中密封胶始终处于液体状态。端盖注胶示意图见图 2。

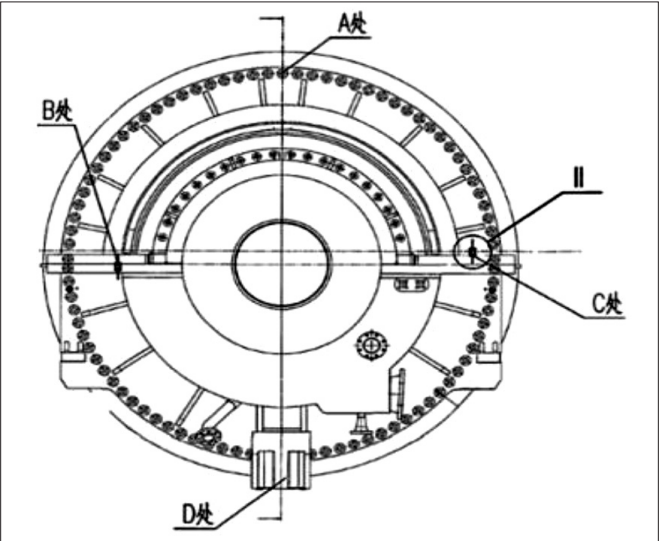


图 2 端盖注胶示意图

方家山核电站 1 号机组自 2019 年 8 月 26 日起, 至 2020 年 5 月 24 日, 先后 6 次发生氢气泄漏量增大缺陷, 超出运行限值, 严重威胁机组安全稳定运行。

2 氢气泄漏原因分析

2.1 氢气泄漏情况排查

针对 1 号机组氢气泄漏量异常增大缺陷, 采用检漏液及氢气检测仪对涉氢系统相关阀门、法兰、焊缝进行检查。均未发现氢气泄漏点, 基本排除氢气外漏可能。

在 GGR 系统排烟风机出口处测得氢气浓度约为正常浓度的五倍。随后在 8# 轴承回油管发现氢气浓度较高。因此判断氢气泄漏量增大是由于氢气从发电机本体内漏至两端轴承箱内。

2.2 氢气泄漏初步原因分析

结合发电机氢气密封部件结构特点, 当氢气从发电机内部泄漏至轴承箱后, 分析认为漏氢主要有以下几个可能:

- (1) 端盖中分面变形, 导致中分面间隙超标;

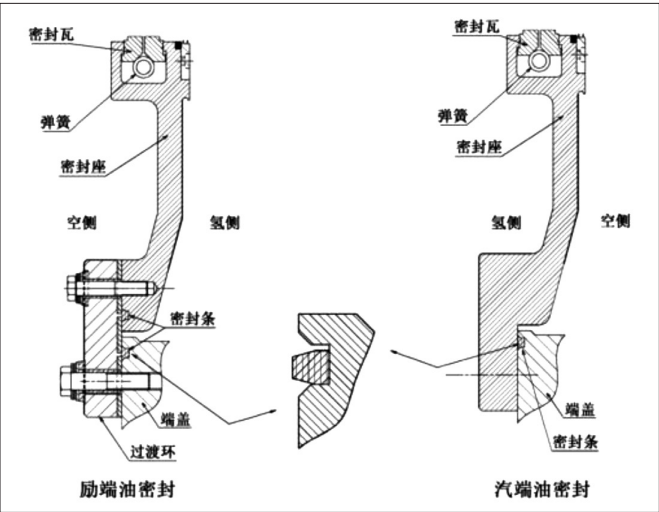


图 1 发电机油密封结构示意图

- (2) 密封座与端盖拧紧力矩不足，氢气从密封座与端盖之间泄漏；
- (3) 密封胶局部固化失效或密封胶存在局部断线；
- (4) 密封条失效，未起到密封作用。

2.3 氢气内漏原因分析论证

2.3.1 端盖间隙检查

发电机端盖上下半结合面为硬密封，若端盖中分面存在变形，则结合面无法彻底贴合，可能存在微小间隙，氢气不断冲击端盖结合面上的密封胶，一定时间后，氢气突破密封胶，可能导致氢气从发电机内部泄漏至轴承箱。

在方家山 105 大修期间，打开发电机两侧端盖，清理端盖后，使用红丹粉进行中分面接触试验，在拧紧端盖 1/3 螺栓后，使用塞尺对中分面间隙进行测量。在检查过程中，确认中分面间隙小于 0.02mm，满足检修要求。因此可排除中分面间隙过大，导致氢气泄漏。

2.3.2 密封座检查

发电机端盖与密封座之间使用橡胶密封条密封，密封座上下半结合面为硬密封，无密封垫。若密封座与端盖拧紧力矩不足，密封条未压紧，无法起到密封作用。若密封座上下半结合面力矩不足，也可能导致氢气从氢侧通过结合面内漏至空侧。

在方家山 105 大修期间，对密封座与端盖结合面螺栓力矩进行复验，未发现密封座螺栓存在松动情况。拆除密封座后，检查密封座中分面，密封油流道无堵塞现象，且密封座中分面无气体吹蚀痕迹，故可排除密封座螺栓拧紧力矩不足导致氢气泄漏。

2.3.3 密封胶试验

方家山发电机端盖密封胶使用的是型号为 Part No.T25-75 密封胶，由于原密封胶已停产，根据厂家澄清采购了新的发电机密封胶 Medium Weight Part No.N25-75。新旧密封胶外观无明显差别，化学成分基本相同，主要为蓖麻油、纤维素、硅酸铝等，仅在含量上有细微差别。在机组第 4 次换料大修期间，拆除发电机上半端盖进行检修作业。在检修工作结束后，从底部注入新密封胶 Medium Weight Part No.N25-75。

在密封胶流道中，发电机端盖中分面槽道存在大量折角（见图 3）。由于旧胶在系统中使用年限较长（4 年），密封胶流道存在折角区域，新胶在注入后无法彻底置换旧胶，导致未形成连续相体系。

由于该密封胶较为粘稠，无法充分混合，针对该推断，进行模拟试验，将 Part No.T25-75 胶注入透明针筒后压实，再将混有红色素的 Medium Weight Part No.N25-75 胶（为紫酱红色）注入针筒后端，加压将两种密封胶压实，放置 24 小时后，两种密封胶仍然存在清晰界面，并无互相溶解现象。

通过该试验，验证了新旧密封胶无法融合，端盖内密封胶在新旧混合情况下密封效果不佳。另一方面，端盖内存在大量折角区域，不利于密封胶混合，导致密封胶局部断线，未起到密封作用。运行期间通过对发电机励端端盖加注密封胶，促使密封胶在端盖内流动，将密封胶局部断线部位封堵。



图 3 端盖中分面密封胶槽道

注胶后轴承回油管氢气含量降为 0，发电机漏氢量恢复至正常水平。因此，密封胶局部断线，导致氢气泄漏量增大可能性较高。图 4 所示为注胶前后氢气实时泄漏率。

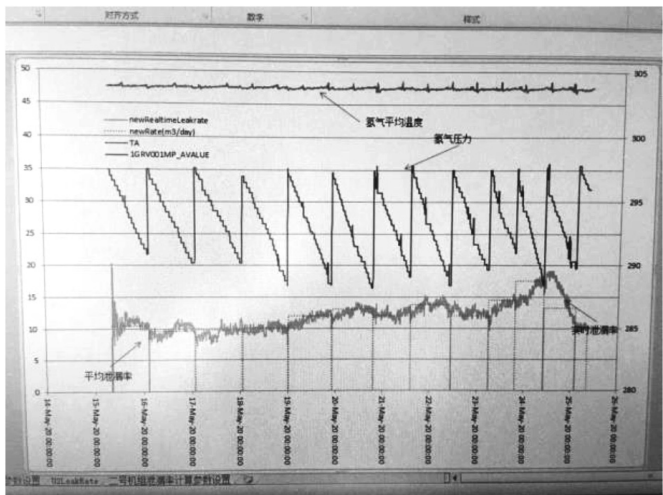


图 4 注胶前后氢气实时泄漏率（绿线）

2.3.4 密封条检测

由于端盖密封胶较为粘稠，正常注胶时压力为 2000psi。查阅设备安装说明书并咨询设备厂家，无运行期间端盖注胶方法及经验。为封堵氢气泄漏点，曾尝试对密封胶加压，最高加压至 4500psi。运行期间发电机端盖密封槽内为满胶状态，但实际由于发电机漏氢，已多次向端盖内压注密封胶。结合发电机本体结构，密封胶可能通过端盖注胶槽中心汇合孔与密封条安装槽之间的槽口进入密封条安装槽。该槽口主要用于修后注胶期间对密封胶槽道排气（见图 5）。

在方家山 105 大修期间，拆除密封瓦后发现在励端密封条槽道内存在大量密封胶（详见图 6），密封条存在局部老化失效现象，验证了注入端盖的密封胶进入了密封条安装槽且密封条失效。

为明确密封条失效原因，将旧密封条与新密封条材质进行检测对比，发现老化的密封条材质为氯丁橡胶，新密封条



图 5 密封胶排气口

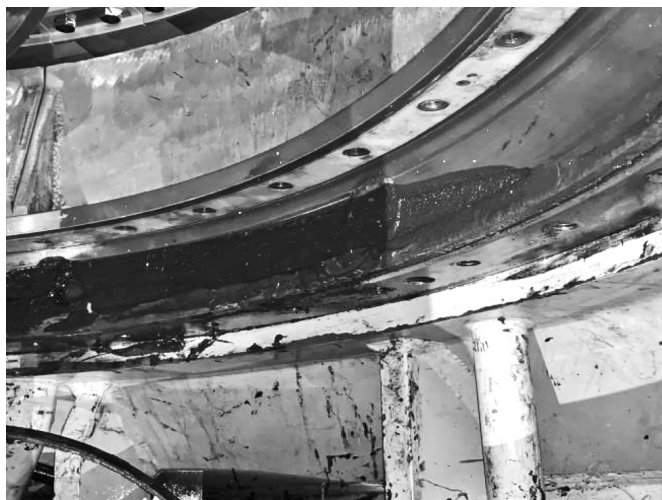


图 6 1 号机励端密封条安装槽

材质为氟橡胶。

常温下,氢气的性质很稳定,不容易与其他物质发生化学反应,故氢气在密封环境中一般不会对密封条造成影响。由于密封胶通过排气孔进入密封条槽道内,密封胶的主要成分为蓖麻油。查阅资料可知,氯丁橡胶耐油性比氟橡胶差,氯丁橡胶相比氟橡胶更容易被密封胶(主要成分为蓖麻油)溶胀。

通过大修期间对密封条检查及其材质检测证实,在机组首次发生漏氢缺陷后,从端盖加压注入密封胶,导致密封胶进入密封条安装槽。密封胶与密封条接触后,加速了密封条的老化,导致密封失效,增大了氢气泄漏概率。

3 氢气泄漏改进措施和效果

3.1 已采取的措施

因氢气泄漏对机组安全运行的严重危害,电厂也针对性地采取了一些措施提高设备可靠性,改善运行期间氢气泄漏量。

3.1.1 严控密封座密封条材质

密封座与端盖的垂直结合面是最易漏氢的部位之一,对此处的密封条材质必须严格把控。氟橡胶对比氯丁橡胶更耐高温油老化,氟橡胶具有很好的耐油性、耐候性。故针对密

封条材质应选择氟橡胶。

3.1.2 优化注胶孔结构

当前端盖上的注胶孔为普通直通直堵头设计,在注胶结束拆下注胶枪至重新安装堵头期间,密封胶会向外挤压溢出,导致密封胶压力降低,甚至造成密封胶断线空槽,运行期间存在漏氢风险。目前已在端盖注胶孔上加装单向注胶阀,拆除注胶枪前先关闭单向阀,保持密封胶压力,避免密封胶向外挤压溢出。

3.1.3 增加发电机轴承回油管氢气在线监测装置

发电机轴承箱为回油顺畅,轴承箱内部存在微负压,内部气体会被 GGR 系统排烟风机抽离。若氢气从氢侧内漏至空侧轴承箱,可在发电机轴承回油管检测出氢气。为提高氢气泄漏监测能力,已对发电机轴承回油管加装氢气在线监测装置,将回油管内气体抽取,实时监测氢气浓度。对后续判断漏氢缺陷提供依据。

3.2 改进效果及后续措施

在大修期间,对大端盖重新压注密封胶并更换密封条后,进行发电机氢检及气密试验,未发现发电机存在气体泄漏现象。机组并网后运行至今,未再发生氢气泄漏量大缺陷。

为控制发电机漏氢量,保证氢冷发电机安全稳定运行。

3.2.1 优化检修项目,避免新旧密封胶混合

发电机上下半端盖密封胶槽道上均存在密封胶,正常检修工序为拆除上下半端盖后,清理密封胶槽道。端盖回装后重新从下半端盖底部开始注胶。若只拆除上半端盖,由于该密封胶粘性较高,旧胶与新胶可能无法彻底融合,会增加运行期间漏氢风险。后续设定检修项目时,应将上下半端盖同时拆除,避免回装后新旧密封胶混合。

3.2.2 优化注胶工艺

通过对发电机端盖注胶来降低氢气泄漏量时,不应向密封胶额外加压。若向密封胶加注过大压力,密封胶会通过上半端盖中分面处排气口进入密封条槽道,改变密封条状态,影响密封性能。以水平面另一端注胶口连续冒胶无气泡为宜,通过密封胶的流动来封堵泄漏口。

4 结语

发电机氢气内漏至轴承箱是存在多种可能的,本文通过方家山核电站 1 号机组实际运行情况,从端盖新旧密封胶、密封条材质进行分析,明确缺陷产生的原因,并从大修检查项目,发电机端盖注胶工艺等方向出发,提出优化措施。对于发电机类似缺陷的排查处理具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 宋桂明,1150MW 核能发电机端盖漏氢问题分析及处理[J],科技信息,2013(19):403-404.
- [2] 李明涛,1000MW 发电机漏氢原因分析与治理[J],神华科技,2017(11):42-45.
- [3] 罗贤龙,百万千瓦氢冷发电机端盖漏氢处理及优化[J],科技创新导报,2020(08):39.
- [4] 马安良,常用耐油橡胶性能及密封性研究[J],橡塑技术与装备,2019,(45)23:1-4.