

某核电项目主泵电机定子氦检漏试验失败原因分析

王亚松 韩松 刘原君

(国核示范电站有限责任公司 山东 威海 264300)

摘要: 某核电项目一台屏蔽主泵电机定子在进行氦检漏时试验失败, 通过采用故障树方法分析排查, 排除了试验过程失效和定子屏蔽套及焊缝存在漏孔的可能性, 经过多项试验和分析, 确定由于试验时工具密封面处 O 型密封圈密封性失效导致氦气泄漏至环境中, 环境中氦浓度升高并进入外接管路系统, 导致检漏仪示值升高, 最终试验失败。

关键词: 主泵; 定子屏蔽套; 焊缝; 氦检漏; O 型密封圈

0 引言

屏蔽主泵系立式、单级、无轴封、高惯量离心泵^[1], 是三代核电技术中一种典型主泵类型。这种泵的叶轮直接安装在电机转子上部, 其电机和所有的转动部件均包含在一个能够承受反应堆冷却剂系统全部压力的密封壳体内, 没有轴密封装置, 因此不用考虑因轴密封失效而导致放射性一回路介质泄漏的可能性, 形成了完全无泄漏的一回路压力边界, 极大提高了安全性。屏蔽主泵简图见图 1^[2]。

屏蔽主泵电机的定子绕组通过定子屏蔽套封闭从而与一回路介质隔绝。定子屏蔽套为高电阻、非磁性的哈氏合金薄钢板, 采用专用的剪切、滚筒成型、焊接设备制造完成, 带有纵焊缝; 定子屏蔽套上下两端分别与机座焊接形成屏蔽腔室^[3]。

1 定子氦检漏简介

屏蔽主泵电机定子屏蔽套及焊缝(定子屏蔽套自身纵向焊缝、机座上下与屏蔽套环焊缝)、定子绕组引出线等结构的密封可靠性是影响电机绝缘寿命的重要因素, 必须采用严格的试验来检测其密封性, 其中氦检漏用于定子屏蔽套及焊缝密封性检验。

如图 2 所示, 屏蔽主泵电机倒立放置在试验工作台上, 定子主法兰端朝下, 通过工具进行密封; 定子下法兰端朝上, 通过定子底盖密封。首先, 检漏仪及管路系统通过定子上部、下部的检漏孔与定子绕组腔联通, 将定子绕组腔抽真空直至检漏仪可以工作的真空度; 然后在检漏仪处于工作状态下, 记录探测到的本底氦漏率指示值, 这个指示值将用来在氦检漏过程中判断被检系统是否存在漏孔。

将氦气通过下部水压工具上的气孔充入定子内腔, 分阶段平均加压至最大压力, 并在最大压力处保压一定时间。在氦气充压及保压过程中, 观察分析检漏仪显示的氦

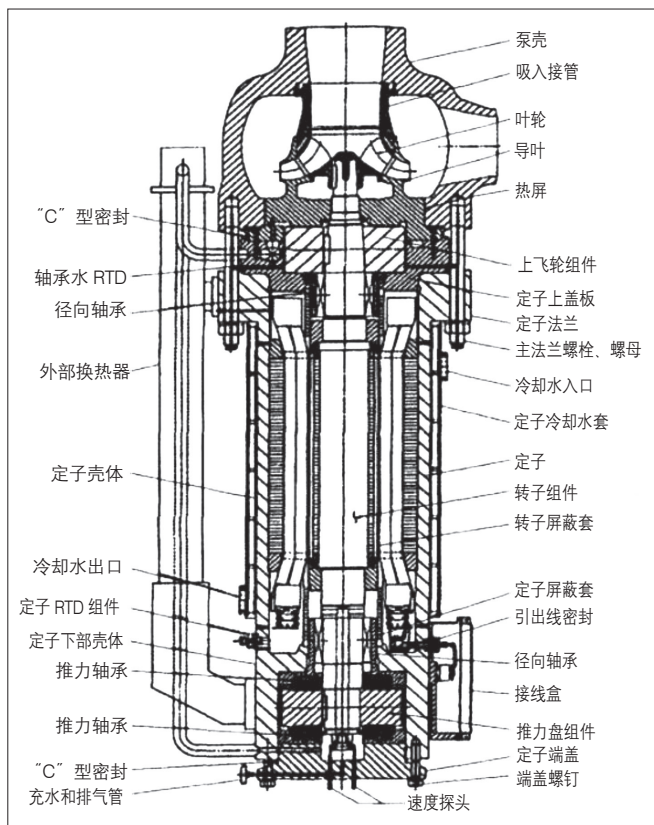


图 1 屏蔽主泵简图

漏率指示值的波动, 当观测到的氦漏率指示值比本底氦漏指示值高且高出数值超过规程要求时, 应视为试验失败。若发生试验失败的情况, 应深入分析原因, 从而判断定子屏蔽套纵焊缝、环焊缝是否存在漏孔。

2 案例概述

2.1 事件描述

某核电项目一台屏蔽主泵电机定子进行氦检漏, 如图 3、图 4 所示, 在对定子绕组腔抽真空达到一定真空度后, 向定子内腔充入氦气, 发现在充氦加压前期检漏仪的氦漏

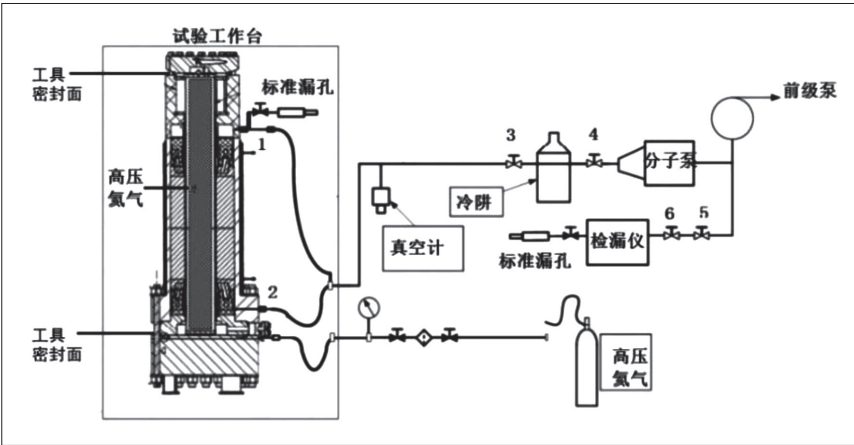


图 2 屏蔽主泵电机定子氦检漏示意图



图 3 屏蔽主泵电机放置于试验工作台



图 4 外接检漏管路系统

率指示值波动在合格范围，当继续加压至一定压力（未达到最大压力）时氦漏率指示值升高超过规程要求，表明本次试验失败。

2.2 原因分析方法

故障树分析（Fault Tree Analysis, FTA）是一种自上而下的图形演绎式失效分析法，首先将与事件发生有关的各种因素进行分类，然后画出逻辑关系图（故障树），最终通过分析排查确定事件发生的真实原因^[4]。

本次屏蔽主泵电机定子氦检漏试验失败事件，采用故障树分析法进行原因分析。

根据屏蔽主泵电机定子的结构和氦检漏试验特点，列出了定子氦检漏试验失败可能原因的故障分析树，如图 5 所示。针对故障树中列出的可能原因，逐项进行分析排查。

2.3 试验过程失效排查

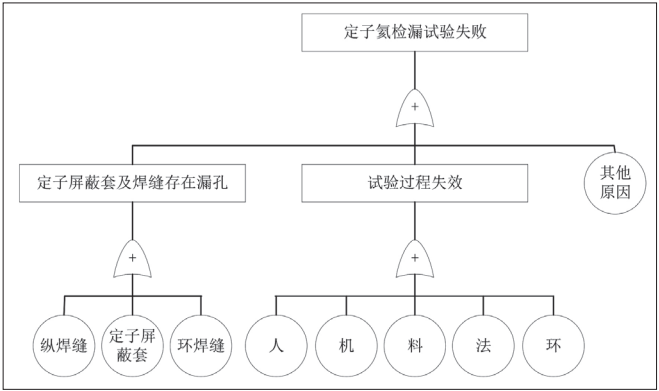


图 5 定子氦检漏试验失败 FTA 示意图

针对定子氦检漏试验过程全部流程环节（人机料法环）分别进行排查，结果未发现影响氦检漏试验的偏离项，氦检漏执行过程符合相关规程要求，可以排除试验过程失效的可能性。具体如下：

（1）人：氦检漏试验人员均持有国家核安全局颁发的民用核安全设备无损检验人员泄漏检测资质证书，并且具备丰富的操作经验。

（2）机：氦检漏用的压力表、真空计、标准漏孔等计量设备，在试验开始前，经计量部门检定合格，在有效期内，满足试验要求。

（3）料：氦检漏所需的氦气浓度符合规程、国家标准要求。检查检漏仪所在的管路系统上的阀门、连接软管、管路配件等，在试验前均检查无失效破损情况，满足试验要求。

（4）法：氦检漏试验人员严格按照已通过审批的试验规程和技术文件对氦检漏试验各环节进行质量控制，试验前准备、抽真空、定子内腔充氦、数据观察记录等

过程均满足试验要求。

(5) 环: 试验场地、温度等环境条件均满足试验要求。

2.4 定子屏蔽套及焊缝存在漏孔排查

排除了试验过程失效的因素后, 初步判断定子屏蔽套表面或焊缝上可能存在漏孔。为进一步确定原因、制定改进措施, 查找漏孔位置是很有必要的。

通过水分段浸泡不同区域定子屏蔽套进行氦检漏的方式来查找漏孔位置: 分三个阶段向定子内腔充水至不同水位, 在定子内腔不同水位状态下进行氦检漏。具体如下:

(1) 将定子内腔充水至下法兰端定子屏蔽套环焊缝附近, 水位低于环焊缝一段长度: 用于验证定子屏蔽套高于本轮水位部分 (含上端环焊缝、高于水位的纵焊缝) 是否存在漏孔。

(2) 将定子内腔水排水至定子主法兰端定子屏蔽套环焊缝附近, 水位高于环焊缝一段长度: 用于验证定子屏蔽套高于本轮水位 (低于上轮试验水位) 部分 (含纵焊缝) 是否存在漏孔。

(3) 将定子屏蔽套内腔水排空: 用于验证定子屏蔽套低于上轮试验水位部分 (含下端环焊缝及纵焊缝) 是否存在漏孔。

定子内腔不同水位的三次氦检漏结果均为合格, 则可判断定子屏蔽套及焊缝不存在漏孔, 而是其他原因导致案例事件氦检漏试验不合格。

2.5 其他原因排查

在其他原因排查过程中, 进行了多次试验项目, 分别为重新氦检漏、验证试验、氦检漏最终试验。

2.5.1 重新氦检漏

为进一步验证该定子屏蔽套及焊缝密封性质量, 确保不存在漏孔, 决定对该台定子重新进行氦检漏试验。

在充氦升压过程中, 主法兰水压工具密封面处的 O 型密封圈一处发生漏气, 随即氦气压力表数值开始下降, 检漏仪氦率指示数值升高, 最终超过规程要求, 试验失败。拆除检查 O 型密封圈, 发现因压紧而表面破损情况较明显, 如图 6 所示。经检查发现:

(1) 该批 O 型密封圈的制造厂同类型部件供货经验较少;

(2) 该批 O 型密封圈厂内存放时间较长;

(3) 该批 O 型密封圈尺寸偏大, 在工具密封槽中呈松弛状态。

为进一步验证, 重新采购一批合格的 O 型密封圈, 并改进尺寸要求, 保证安装至密封槽中呈紧绷状态, 重新进行氦检漏, 结果合格。

重新氦检漏结果合格, 可进一步证明该定子屏蔽套及焊缝不存在漏孔。同时, 针对重新氦检漏过程中因 O 型密封圈漏气导致在升压过程中氦漏率指示值升高最终

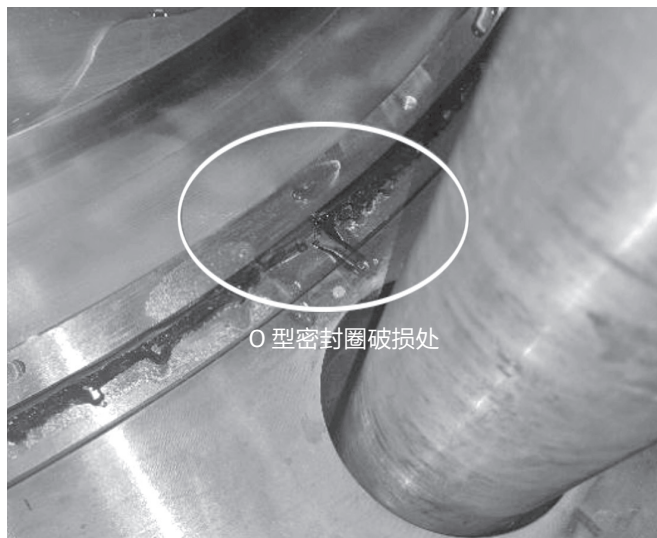


图 6 O 型密封圈因工具压紧而破损

试验失败的现象, 基本可判断: 环境中的氦气浓度和分布对定子氦检漏试验结果产生影响的可能性较大。

2.5.2 验证试验

为验证环境中氦气浓度升高会对试验结果产生影响, 选用另一台水压试验、氦检漏均合格的屏蔽主泵电机定子进行验证试验: 水压工具密封面采用新 O 型密封圈; 在 O 型密封圈附近某一处 (同 2.5.1 节中重新氦检漏过程中漏气位置相同) 释放两瓶氦气, 模拟 O 型密封圈漏气时情况, 检漏仪氦检漏指示值升高最终超过规程要求, 试验现象与预期相符, 证明环境中氦气浓度升高会对定子氦检漏试验结果产生影响甚至造成失败。

2.6 案例试验失败发生机理

氦检漏是一种基于密闭容器内外存在压差时检测介质能够从漏孔渗入或渗出原理的无损检验方法, 是在一定试验状态下的动态检漏, 工装工具密封性能的改变能够影响到试验结果^[5]。结合试验过程失效、漏孔排查结果和其他原因排查过程中多轮试验的现象, 综合分析案例试验失败的发生机理。

(1) 案例试验时, 定子主法兰水压工具密封面处的 O 型密封圈因存放时间较长, 其硬度、抗拉强度、定伸强度等性能下降; 同时, O 型密封圈尺寸偏大, 放置至密封槽中呈松弛状态, 在定子压紧时 O 型密封圈出现局部褶皱情况, 导致局部应力集中及承压面积增大, 出现破损, 其密封性能失效。

(2) 试验过程中, 充入定子内腔的高压氦气通过主法兰水压工具密封面向试验环境中渗漏, 使试验环境中的氦气浓度逐渐升高, 导致正常情况下不接触氦气的检漏管路系统与氦气接触, 氦气通过管路系统中微小的无法排除的漏孔进入管路系统, 最终导致检漏仪氦漏率指示值的上升超过规程要求, 造成试验失败, 如图 7 所示。

(下转第 98 页)

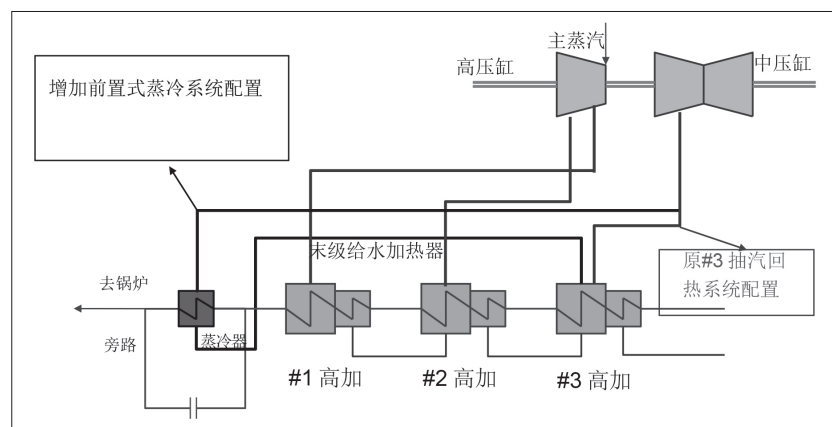


图2 增加蒸冷器示意图

一，能够为可持续发展战略的持续推进，以及绿色环保战略的实施增添卓越力量。汽轮机作为电厂当中的重要组成

装置，从根本上决定着电厂的生产效益，本文针对汽轮机在运行过程中所涉及节能技术进行论述，提出一些观点，希望对电厂汽轮机的后续发展增添微薄之力。

参考文献：

- [1] 陈志军. 某电厂汽轮机中压转子动叶片开裂的原因[J]. 理化检验-物理分册, 2021, 57(11): 33-36.
- [2] 张永峰. 电厂汽轮机运行中的常见故障及应对策略探讨[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(30): 111-114.
- [3] 胡永颖. 电厂汽轮机节能降耗的主要措施探讨[J]. 皮革制作与环保科技, 2021, 2(19): 135-136.

(上接第94页)

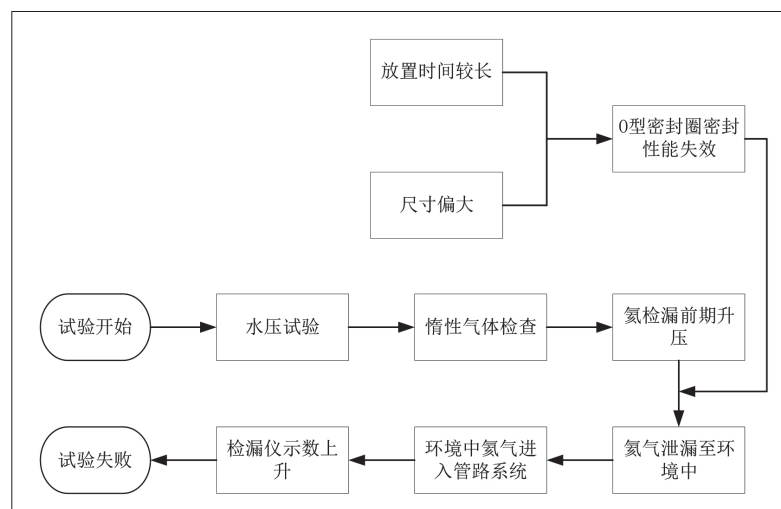


图7 案例试验失败发生机理流程图

3 结语

氦检漏是一种精度较高的密封性检验方式，环境中氦气浓度异常升高可能会影响试验结果甚至造成失败。因此，在氦检漏试验前要注意检查部件、工具、管路系统等各处密封性效果；若发生试验失败，应将氦气泄漏至环境中作为重要因素进行排查分析。为防止如案例试验中因环境氦气浓度异常升高导致定子氦检漏试验失败情形，可采取下列措施：

(1) 氦检漏试验前，不仅要检查外接检漏管路系统密封性，还要对定子部件密封工具、垫片、O型密封圈等进行检查，如有性能下降、尺寸偏差、杂质、凹坑、破损等情况，应在试验前更换，确保密封效果。

(2) 工具密封面处需选用硬度、抗拉强度、定伸强度良好的O型密封圈，O型密封圈与密封槽匹配尺寸保

证适宜，工具装配过程注意不要损坏O型密封圈。

(3) 增加氦吸枪法验证^[6]，若产品氦检漏试验失败，可通过氦吸枪方法检测工具密封处是否有氦气泄漏，如因较大氦气泄漏影响试验，则需调整密封工具，重新进行试验。

(4) 氦检漏时，可同时准备两台检漏仪，一台用于正常试验，另一台用于检测环境中氦气浓度，若出现氦检漏失败的情况，可直接通过观察另一台检漏仪示值的变化判断是否存有氦气泄漏至环境中，便于后续原因分析、问题处理。

参考文献：

- [1] 李梦启. AP1000三代核电反应堆冷却剂泵屏蔽电机的技术特点[C]//中国电工技术学会大电机专业委员会2009年学术交流会论文集. 贵阳, 2009: 1-4.
- [2] 黄成铭. AP1000反应堆冷却剂泵[J]. 国外核动力, 2007, 028(6): 20-28.
- [3] 王超, 李藏雪, 张进宝, 等. 屏蔽主泵电机定子绕组腔密封设计[J]. 防爆电机, 2015, 50(5): 11-13.
- [4] 吴健如, 段贻杰. 故障树法在压水堆一回路功率波动原因分析中的应用[J]. 科技风, 2020(21): 79.
- [5] 丁栋, 成永军, 陈联, 等. 橡胶密封对氦质谱真空压力法检漏的影响分析及试验验证[J]. 真空与低温, 2020, 26(2): 114-119.
- [6] 谢永春, 张宏彬, 黄德家, 等. 氦氮泄漏检测技术原理及应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(9): 34-35+38.