

A Feasibility Study of Repairing the AP1000 Reactor Coolant Pump

Yanlong Qiao, Jun Liang, Zhaoxi Wang, Mingtao Sun

Department of Equipment and Materials Department, CPI Nuclear Power Research Institute, Beijing
Email: woqiaoyanlong@126.com

Received: Jun. 9th, 2014; revised: Jul. 1st, 2014; accepted: Jul. 8th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The nuclear power plant reactor coolant pump is the first class nuclear safety equipment. The operation reliability is directly related to power plant nuclear safety, radiation safety and economy, the operation reliability is also vital to prevent the occurrence and development of nuclear power plants accident. The overhaul of the failure main coolant pump may be one of the important tasks during the overhaul period. AP1000 reactor main pump is a unipolar, centrifugal canned motor pump with flywheel and canned motor. There is no prototype pump and less operation experience for reference at domestic and abroad. The feasibility study of repairing the AP1000 reactor coolant pump is significant for the safety and economy of nuclear power plant after commercial operation. The main pump failure case during the life of pump is analyzed. The maintenance necessity and feasibility about AP1000 canned main pump over the 60-year design life are analyzed from the aspects of removal, lifting, decontamination, disassembling, maintenance, component replacement and assembly test.

Keywords

AP1000, Main Pump, Maintenance, Feasibility

AP1000屏蔽式主泵维修可行性分析

乔彦龙, 梁 军, 王兆希, 孙明涛

中电投核电技术中心设备与材料室, 北京
Email: woqiaoyanlong@126.com

收稿日期：2014年6月9日；修回日期：2014年7月1日；录用日期：2014年7月8日

摘要

核电厂反应堆冷却剂泵是核安全一级设备，其运行的可靠性直接关系到电厂核安全、辐射安全及经济性，对防止核电厂事故的发生和发展极为重要，并且发生故障主泵的解体检修可能是核电厂大修期间的重要工作之一。AP1000反应堆主泵采用单级离心飞轮带屏蔽电机的屏蔽泵，目前国内外没有原型泵可供参考，以及较少运行经验，开展AP1000主泵维修可行性研究对核电厂商运后的安全性和经济性具有重要意义。分析了主泵寿命期内故障和失效原因；从现场拆卸，吊装，去污，解体，检修和部件更换以及回装试验等方面分析判断AP1000屏蔽式主泵在60年设计寿命期内维修的必要性和可行性。

关键词

AP1000，主泵，维修，可行性

1. 引言

反应堆冷却剂泵是核岛一回路系统重要设备，用于提供堆芯冷却流量来保证足够的热量传递[1]，对保持堆芯冷却、防止核电厂事故发生和发展极为重要。AP1000主泵选用单级、离心式、高惯量、飞轮、带屏蔽电机的离心泵[2]-[4]，结构如图1所示。屏蔽泵将电机和转动部件包含在一个由泵壳、定子盖、主法兰、定子外壳、下部法兰和定子端盖组成。屏蔽电机是一种专门设计的立式、单绕组、四极、三相、鼠笼式电机，电机中定子和转子被封在厚度很小的抗腐蚀的屏蔽套中，以防止转子和定子绕组与反应堆冷却剂接触，由于叶轮和转子的轴包括在压力边界中，不需要轴密封来限制冷却剂泄露。电机由变频器启动，并在泵连续运行中提供60Hz的电源。屏蔽电机和泵共用一根主轴，带动叶轮旋转以驱动冷却剂循环。

目前国内外没有AP1000屏蔽泵原型泵并且较少运行经验可供参考，国内外对于AP1000屏蔽式主泵维修基本上为空白，开展维修可行性分析十分必要。

2. 主泵失效经验反馈

目前大型压水堆主泵主要是轴承泵，屏蔽式主泵不存在轴封泵的泄漏问题，至于轴封泵的轴承，叶轮，泵轴等部件的损坏属于常规性机械损伤，上述问题对于屏蔽泵仍然存在，所以关于轴封泵轴承、叶轮、泵轴等部件的失效对屏蔽泵仍有借鉴意义。

国内外核电厂主泵故障经验反馈如表1所示，主泵在寿命期内，主要失效部位为轴承、泵轴等。引起主泵失效机理包括机械设计原因[5][6]；材料设计原因[7]；装配、操作原因以及气蚀，环境等。另外在AP1000屏蔽式主泵制造和试验中推力瓦，推力盘和转子轴颈出现过度磨损和裂纹。

3. AP1000主泵维修必要性和可行性分析

主泵失效案例和制造与试验过程中暴露的问题，以及没有可参考的运行经验，凸显出AP1000主泵维修的必要性。另一方面，西屋公司表示在60年设计寿命期内没有拆卸主泵可拆卸部件以及维修的计划，但同时提出60年设计寿命不能看作主泵实际使用寿命。因此主泵实际运行过程中，存在维修的必要性。

AP1000屏蔽式主泵在设计上考虑了主泵可拆卸部件应能从泵壳中拆除以满足维修维护和更换需求；主泵设计制造方提供了主泵可拆卸部件安装到泵壳内过程以及拆除过程导则；核岛厂房设计中预留了主

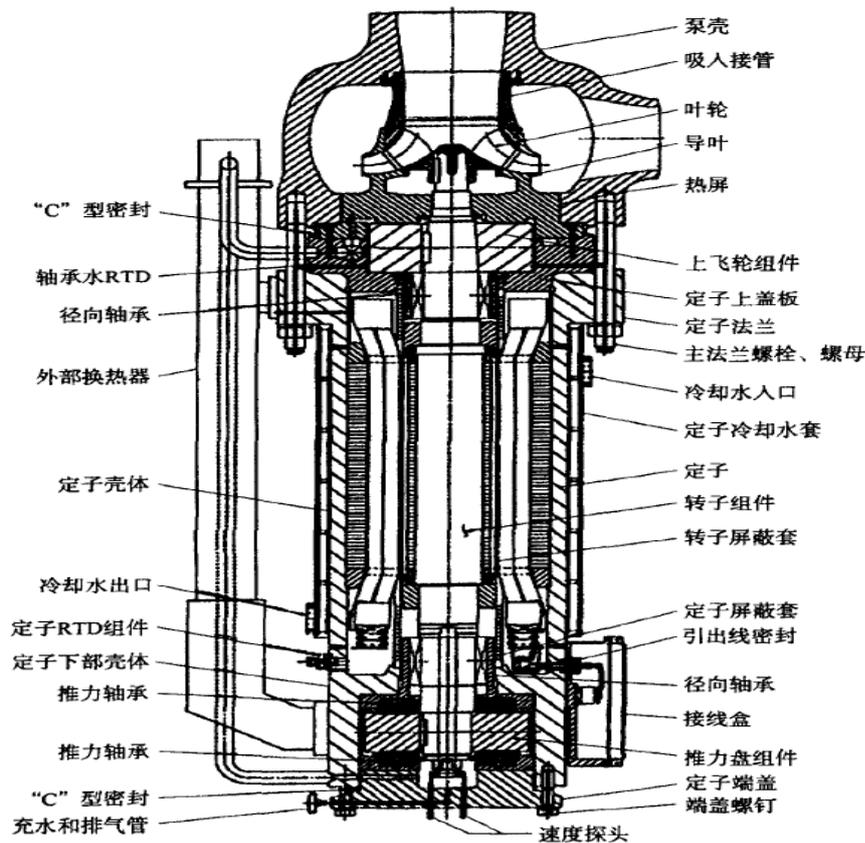


Figure 1. AP1000 main pump structure
图 1. AP1000 屏蔽式主泵结构[1]

泵维修的空间。这些技术文件为 AP1000 屏蔽式主泵的维修提供了技术可行性，从主泵维修活动分析，规划主泵维修活动流程图如图 2 所示。

3.1. 主泵可拆卸部件拆卸、吊装与运输过程可行性

主泵可拆卸部件现场拆卸过程包括：主泵疏水，附属设备移除，外部热交换器移除，可拆卸部件从泵壳移除，水力部件屏蔽，核岛内吊装，厂内翻转与运输。

主泵疏水包括外部热交换器一次侧，二次侧疏水，以及转子腔和定子夹套换热器疏水。附属设备包括电机接线盒的电缆和密封圈，测量仪表连接线，以及定子 RTD，轴承水 RTD 等各种监测装置。外部热交换器需要拆除连接管道和热交换器。从泵壳中拆除可拆卸部件过程包括拆除主螺栓和螺母，Canopy 密封环切割等，拆除后通过安装小车进行吊装运输。

AP1000 核岛厂房设计上预留检修通道，并对吊装运输进行了初步的规划，主泵可拆卸部件从泵壳中移除、水力部件带铅块屏蔽、吊运，在核岛内的翻转路径，安全壳中运输路径等均有技术支持文件，因此主泵拆运吊装运输具有可行性。

3.2. 主泵可拆卸部件去污可行性

主泵可拆卸部件运出核岛后，需要对可拆卸部件进行去污。AP1000 主泵的水力部件在设计上采用西屋 100 型主泵的成熟设计，因此二代主泵的去污操作对 AP1000 屏蔽式主泵去污具有借鉴意义。

目前国内秦山核电[8]和田湾核电[9]在大修期间均采用超声波 + 氧化 - 还原去污方法对主泵水力部件

Table 1. The main pump fault modes [5]-[7]
表 1. 主泵失效模式[5]-[7]

失效部件	常规故障	故障指示	原因描述	作用因素
轴承	抱死	启动时自动停泵	安装导致轴套降级	不当安装
	高频振动	泵振动过高	碎片引起叶轮不平衡	设计, 运行磨损
	运行参数异常	出口压力、电流下降	疲劳引起轴承座装配	设计, 振动
	振动过高	振动超过限值	日常轴承磨损	振动, 磨损, 材料
	振动过高	振动超过限值	正常磨损、支撑结构	结构设计、磨损
	过度磨损	运行时泄露	上轴瓦破裂、氢致开裂	酸性环境、磨损
	自动停泵	运行时自动停泵	下轴承瓦失去润滑	不恰当润滑
	振动过高	振动超过限值	上轴承瓦按照不当	振动、磨损
泵轴	抱死	启动后自动停泵	未对准引起轴抱死	装配不当/叶轮不平衡
	高频振动	泵壳运转, 横向移动	轴表面裂纹	振动, 磨损, 材料
	破裂	泵出口压力和电机电流下降	不平衡导致过度振动, 引起疲劳失效	设计、振动未对准
	自动停泵	自动停泵	不当设计引起轴破裂	不当设计、振动
	破裂	自动停泵	应力腐蚀开裂/制造缺陷引起失效	环境、腐蚀、振动
吸入口	运行参数异常	出口压力和流量过高	晶间应力腐蚀引起开裂	环境、腐蚀、振动
	运行参数异常	电流和振动不稳定	设计不当	设计/环境、振动
	运行参数异常	泵出口压力下降	零件缺陷引起的点蚀	气蚀/腐蚀、振动
叶轮	运行参数异常	吸入口螺栓松弛	不恰当项目管理	项目管理
	运行参数异常	出口压力和流量过低	含沙水引起叶轮磨损	磨损、叶轮调整频繁
	运行参数异常	出口压力过高	环境和设计造成叶轮与泵壳接触	设计不按照设计操作
	运行参数异常	出口压力和流量过低	环境造成叶轮磨损	操作磨损, 叶轮调整频繁
运行参数异常	电流过高	材料引起的叶轮腐蚀	设计、腐蚀	

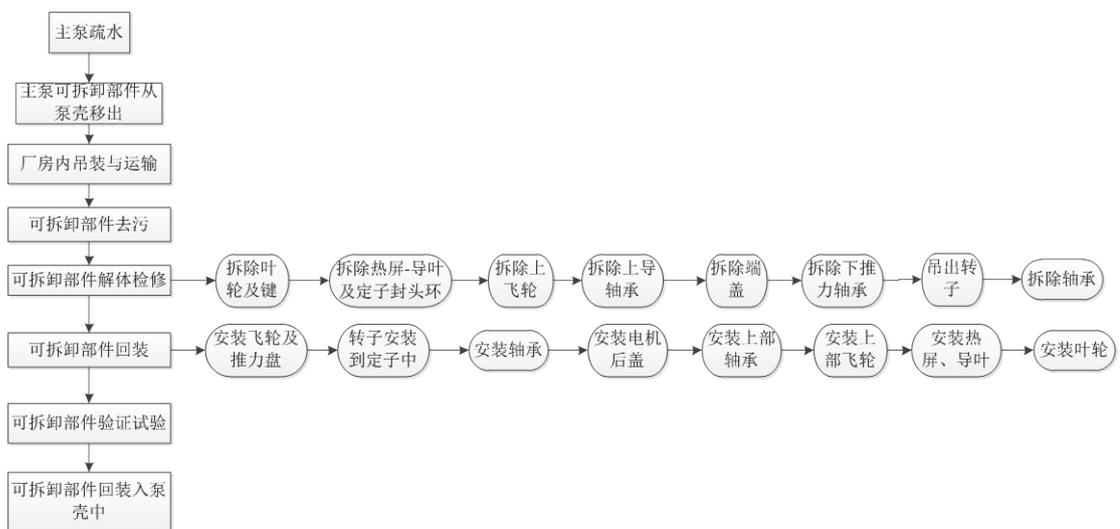


Figure 2. AP1000 main pump repairing flowchart
图 2. AP1000 主泵维修流程

进行去污，达到良好去污效果。基于上述实践，对于 AP1000 主泵可拆卸部件去污可采用相似去污方法，具体去污工艺、化学溶剂配比等需要通过试验和验证，另外由于氧化 - 还原方法采用了化学试剂，对设备材料有腐蚀作用，因此还需要对化学溶剂对设备材料腐蚀程度进行评价和验证。

3.3. 主泵可拆卸部件解体检修可行性

主泵在进行初步去污后，需要对可拆卸部件进行解体，以便对内部的叶轮，定转子等部件进行进一步去污和检修。具体解体序列为拆除叶轮，拆除热屏 - 导叶及定子封头环，拆除上飞轮和上导轴承，安装转子锁紧装置，进行定子翻转，拆除端盖螺栓，打磨下端密封环焊缝，拆除电机端盖，拆除下推力轴承及推力轴承套，吊出转子，转子拆解，拆除轴承等。在解体过程中需要使用一整套专用工具和设备，包括螺栓加热器，扳手，液压推进器，带式加热器，装配架，吊具等。

定转子检修时还涉及到定转子屏蔽套的拆卸和更换。主要包括废弃屏蔽套拆除，屏蔽套安装和焊接，屏蔽套试验等，同样需要一整套专用工具和设备。

3.4. 主泵可拆卸部件回装与试验

主泵可拆卸部件在进行检修和部件更换后，可以进行回装和相应工程试验。回装包括转子装配，转子与定子装配，总体装配，与蒸汽发生器组装等。转子组装工序包括安装下部飞轮及推力盘，安装吊装工具并翻转 180 度，安装上部飞轮，转子动平衡，安装叶轮，重新动平衡。转子与定子装配工序包括转子吊到定子中，安装轴承部件，安装电机后盖，安装转子锁紧装置，安装接线盒部分。整体装配工序包括安装上端轴承、上部飞轮，安装热屏/导叶，安装热交换器，安装叶轮。可拆卸部件安装到泵壳中工序包括安装导向螺栓，吊装到泵壳中，安装主螺栓，密封环焊接，安装外部热交换器和管道安装，安装仪表等。

主泵整体装配前需要进行相应的工程试验，试验程序由支持 AP1000 主泵试验的试验回路完成，由水力试验、泄露试验设施、转子试验设施(高速平衡)等组成[10]。目前国内技转受让方已经建立主泵试验回路，可完成相应工程试验。

4. 结论

主泵失效案例和 AP1000 屏蔽式主泵制造试验中的问题凸显了主泵在寿期内进行维修的必要性。主泵可拆卸部件现场拆卸，核岛内吊装运输，去污，解体检修，回装试验均有相关文件、实践和技转技术支持，因此主泵维修具有可行性。同时还需要对维修工序进行细化，考虑放射性环境对主泵拆卸、组装、试验影响，以及专用台架，工具开发等。

参考文献 (References)

- [1] 林诚格 (2008) 非能动安全先进压水堆核电技术. 原子能出版社, 北京.
- [2] 张明乾 (2008) 浅谈压水堆核电站 AP1000 屏蔽式电动主泵. *水泵技术*, **4**, 1-5.
- [3] 庄亚平 (2010) AP1000 屏蔽泵的应用分析. *电力建设*, **11**, 98-101.
- [4] 关锐 (2008) AP1000 反应堆主泵屏蔽套制造工艺浅析. *中国核电*, **1**, 49-53.
- [5] EPRI (1997) Centrifugal and positive displacement charging pump maintenance guide.
- [6] EPRI (1992) Evaluation of main coolant pump shaft cracking.
- [7] EPRI (2009) Plant support engineering: Large vertical pump end-of-expected-life report.
- [8] 张驰(2012) 化学 - 超声波联合去污法在主泵内插件上的应用. *辐射防护通讯*, **4**, 29-31.
- [9] 朱明山 (2010) 田湾核电站主泵检修去污方案的优化选择和分析. *辐射防护*, **3**, 181-186.
- [10] 黄成铭 (2007) AP1000 反应堆冷却剂泵. *国外核动力*, **6**, 20-28.