

The Feasibility Analysis of Application of Condenser Tube Cleaning System to the Domestic Nuclear Power Plant

Zhiwei Tao, Chao Gao

China Nuclear Power Engineering Co. Ltd., Shenzhen
Email: taozhiwei@cgnpc.com.cn

Received: Aug. 11th, 2012; revised: Aug. 25th, 2012; accepted: Sep. 6th, 2012

Abstract: This article mainly focuses on the feasibility of applying Condenser Tube Cleaning System to the domestic nuclear power project. Through acknowledging the situation of the application both home and abroad, analyzing on aspects range from the technical feasibility, economic feasibility, potential risks to engineering design plan and other aspects that as a conclusion, Condenser Tube Cleaning System can be installed on domestic nuclear project and its economic efficiency is very considerable.

Keywords: Condenser Tube Cleaning System; Feasibility Analysis

CTCS 在核电厂应用的可行性分析

陶志伟, 高超

中广核工程公司设计院, 深圳
Email: taozhiwei@cgnpc.com.cn

收稿日期: 2012 年 8 月 11 日; 修回日期: 2012 年 8 月 25 日; 录用日期: 2012 年 9 月 6 日

摘要: 本文主要讨论将凝汽器在线清洗装置应用于核电厂的可行性。对该系统的技术可行性、经济可行性、运行风险以及工程设计进行分析, 认为核电厂可安装凝汽器在线清洗装置, 且经济效益十分可观。

关键词: 凝汽器在线清洗; 可行性分析

1. 引言

中国早期建设的核电厂没有凝汽器在线清洗系统(CTCS: Condenser Tube Cleaning System), 没有安装 CTCS 的核电厂, 检修时已经发现凝汽器冷却管内结垢现象严重, 清洁系数不高, 凝汽器真空度有逐年恶化的趋势, 长此以往会影响核电厂的安全运行。部分新建核电厂凝汽器安装 CTCS 后, 凝汽器运行时具有较高的清洁度, 凝汽器换热效果和真空度也维持在较高水平, 保证了机组性能; 同时, 还可以避免或减少凝汽器维修时人工冲洗时间和费用。同时, 考虑到

未来的核电厂采用 18 个月换料周期的技术及厂址条件等适应性因素。因此, 本文对新厂址的核电项目中是否采用凝汽器在线清洗技术进行可行性分析。

2. 国外技术应用状况

目前国内建成运行核电机组数量有限, 根据调研国外数据显示, 从六十年代到现在, 世界其他国家的核电机组安装 CTCS 比较普遍, 代表性国家的核电机组安装胶球清洗工程例举表(参见表 1)。

表 1 还可以观察, 美国、法国、德国等欧美国家

Table 1. Data list of some nuclear power plants with CTCS abroad
表 1. 国外部分核电机组安装 CTCS 的数据清单

国家	业主公司	工程	机组容量 MW	冷却形式	水源	循环水管 mm	交货时间
法国	E.D.F. (ELECTRICITE DE FRANCE)	C.N. de Chinon B	900	直流	河水	2100	1977
德国	ENBW KERNKRAFT GMBH	ENBW Neckar	1300	直流	河水	2200	1983
日本	CHUGOKU ELECTRIC, MISUMI	Misumi	1000	直流	海水	3000	1996
韩国	KOREA HYDRO & NUCLEAR POWER CO. LTD.	KHNP Ulchin	950	直流	海水	2134	2000
俄罗斯	SMOLENSKENERGO	Smolenskaja	1000	冷却塔	河水	1800	2005
美国	FLORIDA POWER & LIGHT	Turkey Point	400	冷却塔	海水	1524	1982
乌克兰	NAEK ENERGOATOM	Rowenskaja	1000	直流	河水	2400	2003
捷克	CESKE ENERGETICKE ZAVODY	Temelin NPP	1000	冷却塔	河水	1600	1991

核电机组多数为六、七十年代的建造的。法国机组冷却形式多是淡水直流供水或淡水塔冷却，也安装了 CTCS。日本、韩国大部分核电厂采用海水直流冷却，基本采用 CTCS 技术。

所以 CTCS 技术在全球核电行业内属于一种通用技术。

3. 核电厂凝汽器系统特点及传统清洗方法介绍

3.1. 核电厂凝汽器系统功能

凝汽器是核电厂设备中至关重要的部件之一，它的作用是通过引入冷却水把核电厂内部循环的蒸汽凝结成水，保证汽轮发电机组运行在一个比较低的真空中，由于冷却水中是外部引入的，含有各种污垢，当凝汽器中的管道结垢后，会导致机组真空度恶化，机组出力下降，上网电量减少，影响电厂收益。尤其对于大容量机组，其电厂经济性影响相当可观。安装 CTCS，可以保证机组在运行时凝汽器高的清洁度、高的整体换热系数，维持凝汽器高的真空度，从而保证机组性能。

3.2. 凝汽器结垢分类

海边的核电厂凝汽器主要问题来自于微生物垢，同等厚度的微生物垢层所形成的热阻是化学垢的 5~10 倍，且在海水中的生成速度快。海边的核电厂凝汽器常用凝汽器钛管，而钛管相对铜管的管壁内侧更

容易产生生物垢，因为铜材对微生物有毒性，微量铜离子可抑止海藻生物的生长。生物垢的产生与水温、流速、水域环境有不同程度的关系，我国东南部沿海城市多处于中亚热带地区，有大量水产养殖业，凝汽器产生生物垢的可能性较大。因此，需要考虑如何避免或减少生物垢对运行机组凝汽器性能影响的措施。这些污垢的特点参见表 2 海水凝汽器污垢说明表。

3.3. 传统清洗方法介绍

凝汽器冷却管传统清洗方法主要在停机大修期间采用人工清洗。人工清洗采用高压水枪与橡胶子弹的方式清洗凝汽器的冷却管。这种方式的缺点主要包括：

1) 只能在机组停机维修时清洗凝汽器，无法有效保证凝汽器在整个运行周期内的清洁度。

2) 人工清洗无法清洗生物垢(微小)和油垢。由于生物垢和油垢形成周期很短，用别的方法在停机时将其清除后，启动电站运行后此类污垢又会迅速附着到冷凝管上。

3) 凝汽器主凝结区就有 5 万多根钛管，核电厂大修时间非常紧，留给人工清洗凝汽器冷凝管的时间又非常短，人工清洗无法有效保证凝汽器的清洁度。

4) 高压水枪与子弹的方式清洗钛管容易拉毛管壁，对钛管的损比较大，降低凝汽器寿命。

5) 未来机组 18 个月换料周期，进一步加重运行时凝汽器结垢的程度。

Table 2. List of dirt in sea condenser
表 2. 海水凝汽器污垢说明表

污垢名称	结垢的原因	是否作用于钛管	常见水质	停机后人工清洗	在线清洗	影响换热	备注
化学垢	由电化学因素形成。	是	海水	可以清洗	可以清洗	结成硬垢后热阻较大。	形成周期较快(2~3周)
黏泥垢	黏附在换热管上	是	海水、江水都有	可以清洗	可以清洗	黏泥垢热阻接近硬垢热阻。	形成周期较快
微生物垢	生物依附在管壁上生长	是	海水、江水都有	无法清洗	可以清洗	生物垢热阻是硬垢的5~10倍。	形成周期非常快
油垢	附着在管壁上形成油膜	是	港口、工厂、码头附近海水	无法清洗	可以清洗	热阻与生物垢相当,具体和油的种类有关	形成周期非常快

4. 在线清洗装置的原理和优点

4.1. 在线清洗装置的原理

CTCS 系统主要包括收球网、装球室、胶球泵、胶球、以及管道阀门管件等。胶球从装球室手孔处投入系统,胶球被胶球泵送入凝汽器循环水进水管内,球随水流进入凝汽器进水室,扩散后胶球均匀的分布进入钛管,并被挤压通过达到凝汽器的后水室,同时带走凝汽器冷却管内壁污垢,随后胶球被循环水出水管安装的收球网收集,再通过收球网两侧出球管道,经胶球泵汇集到装球室,完成一次循环。系统流程参见图 1 凝汽器在线清洗系统流程图。

4.2. 在线清洗装置的优点

凝汽器在线清洗方式相比人工清洗方法优势十分明显,主要有:

- 1) 凝汽器在线清洗装置在线运行可以在污垢形成初期清除掉凝汽器冷凝管壁上的微观污垢,保证运行的凝汽器始终保持管壁的高清洁,经济效益显著。
- 2) 可以避免核电大修时人工冲洗,节约了维修时间和费用。
- 3) 对生物垢和油垢可以在线有效的清除。
- 4) 在线凝汽器在线清洗对凝汽器的钛管没有损害。

4.3. 案例分析

下面用 2 个典型的案例事实说明不同清洗方法的效果。第一个典型案例是某核电机组。

人工清洗凝汽器钛管的照片(图 2),装有 CTCS 系统的凝汽器钛管运行后的照片(图 3)。

根据某核电厂多年的凝汽器试验数据显示的清洁度年变化图(图 4)可知,凝汽器的清洁度即使经过人工清洗也无法恢复到设计值 0.9。而且在大修结束之后,凝汽器很快就会再次被海水污垢附着,导致清洁度迅速下降至 0.84 左右,导致机组出力无法达到额定功率。因为凝汽器清洁度系数的设计值为 0.90,所以 0.84 的清洁度系数必然会影响机组出力。提高钛管的清洁度系数可以提高凝汽器的热性能,从而提高机组出力。

若核电厂安装的在线清洗装置正常运行,清洁度系数能达到 0.95 以上。这样经济性收益十分可观,在下面的经济性分析做具体说明。

5. 可行性分析^[1,2]

单台核电机组出力 1089 MWe,年运行小时数 7000 小时,上网电价(税前)为 0.38/kW,同时不考虑冬季 4 个月收益,取年运行系数 2/3,则安装 CTCS 后两台机组在安装和不安装 CTCS 的情况下的综合投资收益请见下表(表 3)。

根据计算结果,两台机采用 CTCS 方案相比不采用 CTCS 的方案增加收益 2 亿多(40 年静态);因此从经济技术分析的结果分析,核电厂安装 CTCS 是有益的。

6. 结论

凝汽器在线清洗装置对机组运行的风险比较小,机组运行时,如果清洗装置出现问题,也不影响机组安全运行。因为当胶球清洗装置正常运行时,收球网在正常运行情况下,通常水阻为 200~300 mm H₂O。当胶球清洗不运行时,凝汽器出水管上的收球网电动

CTCS 在核电厂应用的可行性分析

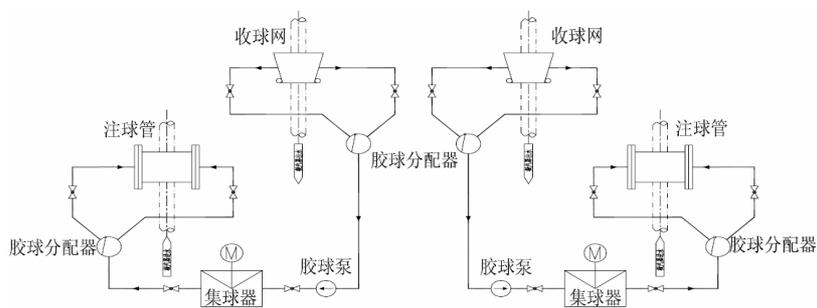
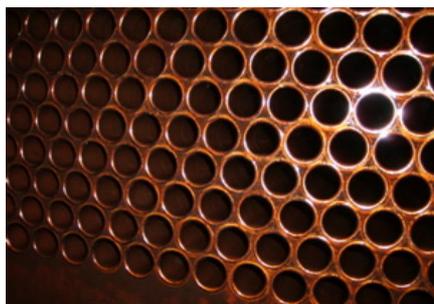
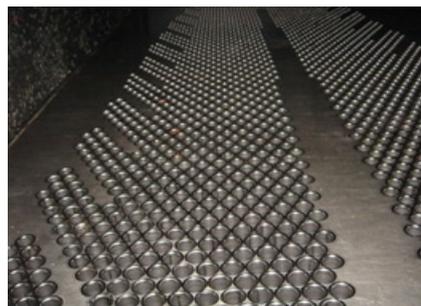


Figure 1. System diagram of CTCS
图 1. 凝汽器在线清洗系统流程图



说明：手指触摸有明显的红褐色污垢，且经过 18 个月的运行，凝汽器钛管表面已经覆盖了一层薄薄的污垢。

Figure 2. Cooling tubes in condenser with no CTCS
图 2. 某核电机组检修时凝汽器钛管



说明：从这两张照片上显示，安装有 CTCS 的凝汽器钛管内表面非常干净，光洁，胶球清洗的非常均匀，基本可以清洗到全部的钛管。

Figure 3. Cooling tubes in condenser with CTCS
图 3. 某机组检修时凝汽器钛管

1号机组大修前后清洁度的变化（设计值0.9）

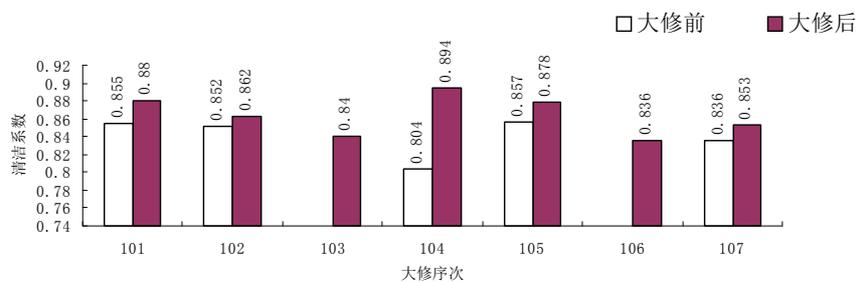


Figure 4. Cleanliness coefficient of condenser in a unit
图 4. 某核电机组凝汽器清洁系数

Table 3. Comparative results between CTCS installed and CTCS not installed in two units**表 3. 对比两台机组安装和不安装 CTCS 的经济技术分析结果(静态)**

比较项	安装 CTCS (单位万元)	不安装 CTCS (单位万元)
初投资增加(设备)	-1600	0
每年运行维护费	-20	-20
40 年运行维护费 (静态)	-800	-800
每年收益	$+289.674 \times 2 =$ 579.348	0
40 年静态收益	$579.348 \times 40 =$ 23173.92	0
40 年静态总计	+20773.92	-820

或人工打开，收球网水阻可以忽略，收球网可手动打开，使其从循环水系统中解列，保证循环水系统的安全运行。

因此，清洗装置的设置对整个机组安全运行风险影响很小，而带来的经济性又比较可观，且 CTCS 对于保证核电厂凝汽器的运行安全性具有较大的作用，建议在有条件的核电项目中安装 CTCS。

参考文献 (References)

- [1] Standards for steam surface condensers. Tenth Edition, Heat Exchange Institute, Inc. 2006.
- [2] 西北电力设计院编. 电力工程水务设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.