

# 核电站循环水虹吸出水设计

阎丽静, 李晓爱

(深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 滨海核电站循环水采用淹没式虹吸管双重出流设计, 在保证 CC 虹吸井合理水位控制基础上, 对压力主流道、无压辅助流道及排水暗涵处采取了消能、减泡、拦泡、消涡等措施, 并结合外海拦截和化学加药消泡系统, 从而使 CC 出水不仅满足凝汽器真空度要求而且解决了排水泡沫问题。

**关键词:** 核电站; 循环水; 虹吸出水设计; 泡沫治理

**中图分类号:** TV135   **文献标志码:** B   **文章编号:** 1008-0112(2014)07-0019-05

滨海核电站采用经过滤和加药处理的海水直流冷却凝汽器, 并排入 CC 虹吸井和溢流堰, 最后流入大海。CC 虹吸井和溢流堰的设置是使凝汽器水室内形成适当的虹吸高度, 从而利于电站的基建投资和循环水泵用电消耗的合理控制, 同时维持凝汽器热交换管在允许的真空度内(不宜大于 8.0 m), 避免凝汽器出现空化现象<sup>[1]</sup>。循环水从 CC 溢流堰 5 m 多高处自由跌落飞跃消能后, 与溢流堰后下垫水体产生强烈的掺混和剪切作用, 并伴有大量掺气, 产生泡沫污染。由于循环冷却海水中经次氯酸钠杀药处理导致海水表面张力降低, 使得水面易于形成大量相对稳定的微黄色泡沫并吸附于海生物残体等悬浮物表面, 气泡难以溃灭消除<sup>[2-3]</sup>。根据海水水质相关规范要求<sup>[4]</sup>, 按海域的不同使用功能和保护目标, 其中第 I、II、III 类海水水质中漂浮物要求为不得出现油膜、浮沫和其它漂浮物质。由于核电站基本在这三类海水分区内, 为降低对核电站附近的养殖区和附近海域的生态环境的影响, 核电站内循环水出水必须采取有效的泡沫治理措施, 从而解决温排水泡沫的视觉污染问题。

## 1 工程概况

某核电站为 2 台 100 万 kW 级压水堆核电站, 该厂址内共有 6 台机组, 循环冷却水取水口相同, 设置共用明渠取水。该核电站每台机组配备 2 台循环水泵, 每台水泵与 2 台凝汽器半个水室连接。2 台机组共有 4 条独立的循环冷却水回路, 每条回路以单元制无阀直流冷却, 循环冷却水经凝汽器换热后通过排水管沟、虹吸井、溢流堰和暗涵, 汇入 6 台机组合排明渠, 流

入大海。

2 台机组共用 1 座 CC 虹吸井, 由 4 格独立的虹吸水池和 1 座溢流堰组成, 虹吸水池进口与 4 孔内截面为 3.5 m × 3.5 m (宽 × 高) 钢筋砼暗沟相联接。虹吸井平面尺寸为 37.1 m × 70.2 m, 顶部标高为 7.20 mPRD, 底板标高为 -3.50 mPRD, 设置中隔墙, 将两台机组的溢流水道分开。溢流堰采用实用堰, 堰顶标高为 4.20 mPRD, 堰高为 7.7 m, 溢流堰后采用长 12 m 的渐变段进入 6 孔内截面为 4.0 m × 3.0 m (宽 × 高) 跨越长度约 257 m 的潜孔暗涵过渡到合排明渠。CC 排水布置如图 1 所示。

## 2 CC 出水设计条件

### 1) CC 设计流量

循环水出水设计流量包括以下几部分:

- ① 循环冷却水系统和常规岛辅助冷却水总设计流量为 128.66 m<sup>3</sup>/s;
- ② 安全厂用水排水(GS)设计流量为 1.89 ~ 5.0 m<sup>3</sup>/s;
- ③ 雨水和污水排水设计流量 9 m<sup>3</sup>/s;
- ④ 毗邻核电站排水量 190.4 m<sup>3</sup>/s;
- ⑤ 百年一遇排洪量入合排明渠 42.7 m<sup>3</sup>/s。

### 2) CC 设计水位

核电站循环冷却水汇入明渠, 因此 CC 出水水位高于外海设计水位, CC 排水渠出口处水位值如表 1 所示, 其中平均潮位为设计水位, 100 年一遇高潮位为安全校核高水位, 100 年一遇低潮位为安全校核低水位, 历时 1% 高潮位和历时 98% 低潮位为设计高水位和设计低水位。

收稿日期: 2014-05-06; 修回日期: 2014-06-23

作者简介: 阎丽静(1971), 女, 博士, 高级工程师, 从事核电站水工设计工作。

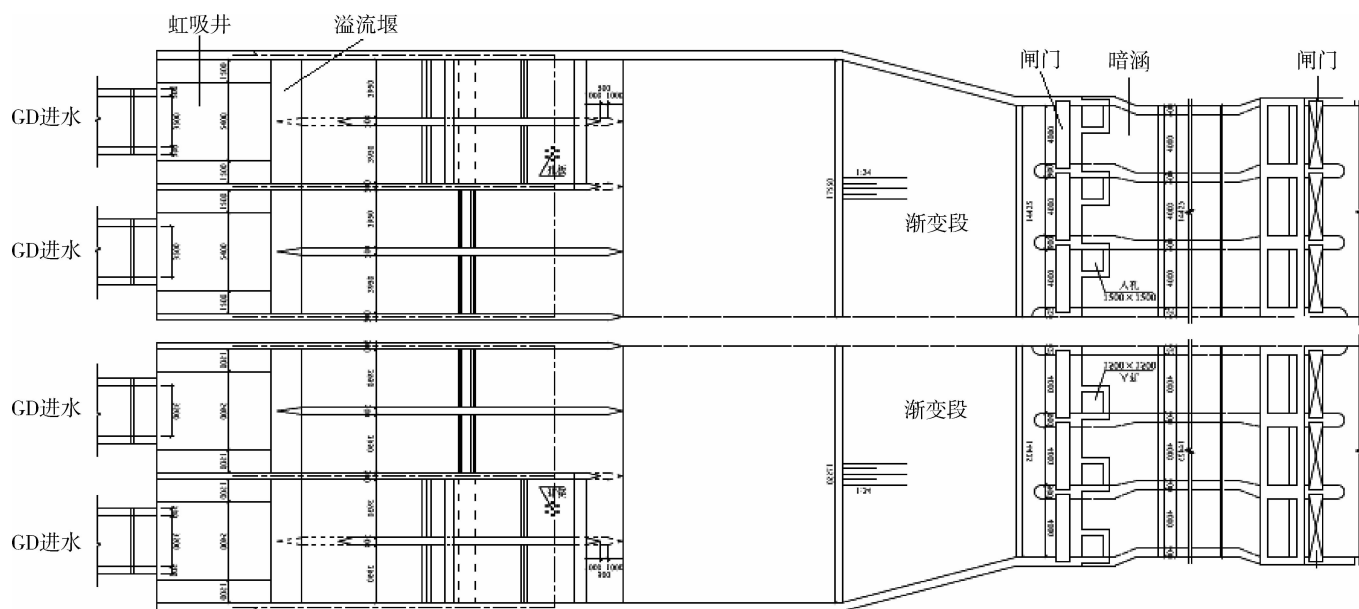


图1 某核电站CC排水布置

表1 某核电站CC排水暗涵出口处水位

(单位: mPRD)

	平均潮位	历时1%高潮位	历时98%低潮位	100年一遇高潮位	100年一遇低潮位
外海潮位	-0.20	0.87	-1.16	2.89	-2.18
排水渠水位	-0.07	0.94	-0.88	2.92	-1.47

### 3 CC出水总体设计

1) 百年一遇低潮位(-2.18 mPRD)时,凝汽器虹吸利用高度应维持不超过8 m。由于凝汽器管顶标高为13.3 m,虹吸井水位应不低于5.30 mPRD,由此设置CC主压力流道坝标高为5.30 mPRD。

2) 百年一遇高潮位(2.89 mPRD)时,CC溢流堰后水位不能影响堰后安全厂用水(GS)的顺利出流,即CC出水口水位<GS排水口水位(3.15 mPRD)。在GS排水口上游设置拦泡板,板顶标高为2.0 mPRD,以减少壅水高度对GS排水的影响。

3) 溢流堰前虹吸井水位变化应保证循环水泵在稳定流量范围( $0.9Q \sim 1.15Q$ ,  $Q$ 为额定流量)。通过水力物理模型试验显示安全校核高水位和低水位间,CC虹吸井水位变化幅度约1 m,由此计算循环水泵流量变化在 $0.93Q \sim 1.07Q$ 之间,满足循环水泵稳定运行要求。

4) CC消能消泡构筑物应考虑防腐和维护,正常情况下GS排水与CC出水在溢流堰后混合排出,当CC构筑物检修时,暗涵入口设置闸门,同时增加GS排往暗涵入口闸门后的备用流道,保证GS排水不受CC检修影响。

### 4 CC出水消泡设计

CC溢流堰后水流飞跃消能跌落入水垫塘的过程

中,水体掺气量主要与堰流单宽流量、水流落差、水流入射角、消能率及水垫塘水深有关,因此减小下跌水体的单宽流量、以分级消能方式减小水流落差,改变水流入射角和增加消力池水深及采用洞塞内消能等均可起到消能减泡作用<sup>[5-7]</sup>。某核电厂CC造工程防盐雾消减泡沫的正态物理模型试验表明淹没式虹吸管双重出流方案是一种较好的出水消泡方案<sup>[8-9]</sup>,为此,该核电站主体仍采用虹吸管双重出流,并经中国水利水电科学研究院进行物理模型试验后采取适应性修改<sup>[10]</sup>。机组调试验证后在CC排水暗涵出口增设了化学药剂消泡和外海拦截等措施,具体设计内容说明如下。

#### 4.1 物理消泡设计

##### 1) 主流道设计

每条循环冷却回路的CC溢流堰设2孔压力主流道,每孔净宽为3.95 m,中间为0.5 m厚的隔墩,虹吸管的进口淹没在虹吸井水位以下,出口则保证在设计低潮位时亦处于淹没状态,这样在水体下泄消能过程中,实现水体与大气的完全隔离,从而解决水流下泄的掺气问题。为减少压力虹吸流下虹吸井水位降低过多,维持凝汽器的适宜虹吸效应,在坝顶设置4根 $\Phi 50$  mm的通气管,通气管孔口高程设在5.35 mPRD,由于压力主流道坝顶为负压,当虹吸井水位低于

5.35 mPRD, 通气管进气, 过流量减少, 保证虹吸井水位不再下降。

压力虹吸流进入消力池后, 经底板的2条与水流方向平行的窄缝(高0.176 m)消能, 使不掺气的压力流较平缓地流向排水暗涵。由于窄缝高度影响压力流的过水断面面积, 其尺寸确定的原则为百年一遇低潮位

下CC虹吸井水位不低于5.30 mPRD。此外, 主压力流入口设置翻板门以提高压力过流量, 增大消泡效果, 使设计低潮位下明流过流量不超过总流量5%, 设计高潮位下明流过流量不超过总流量20%。主流道布置设计如图2所示。

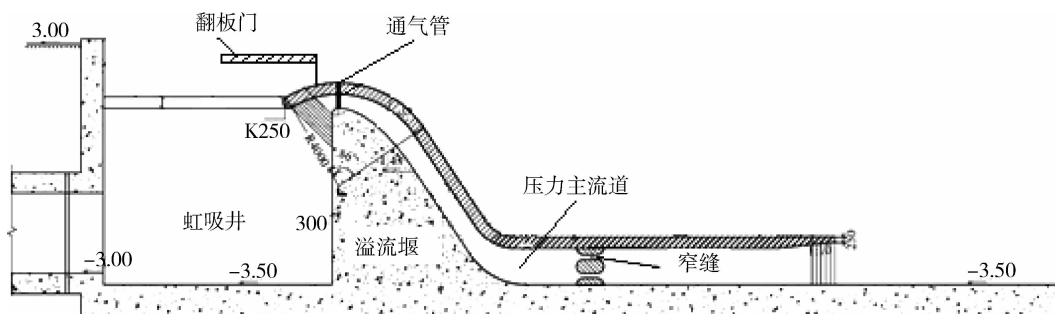


图2 某核电站CC出水主流道消泡布置

## 2) 辅助流道设计

与压力主流道相似, 每个循环冷却回路的CC溢流堰设计2个明流辅助流道, 以利于控制虹吸井内水位变化, 保证循环水泵的稳定运行, 但无压明流存在严重跌水和掺气导致水雾和泡沫问题, 其消泡布置设计见图3所示, 主要由消能减气室和拦泡消泡室组成。

①消能减气室, 由消力坎、挡泡墙和防盐雾板组成, 其中消力坎前后分别形成顺时针和逆时针竖向漩流, 从而减少掺气量同时利于气泡快速浮至水面, 挡泡墙下设0.8 m高过流孔, 以使在设计高潮位时, 室内水位不会过高, 消能室内顶板为防盐雾而设, 在设

计高潮位时承受一定水压;

②拦泡消泡室, 由阻泡孔板、拦泡墙和喷淋消泡装置组成。为提高拦泡效果, 拦泡墙底缘高程为-0.9 mPRD, 过流孔高为0.5 m。在顶孔出流处设有喷淋消泡装置, 即从堰前虹吸井通过4条预埋的喷淋主管( $\Phi 200$  mm)取水, 喷淋可消除拦泡室内堆积壅高的泡沫, 防止泡沫越过挡泡墙顶跌落到下游水中。由于室底孔板(长为3.2 m、孔径为0.1 m)可壅高水位, 增大水深, 使一部分水流流向由水平改为竖直向, 从而利于更多的气泡依靠自身的上浮速度浮向水面并进行喷淋消泡和拦泡处理。

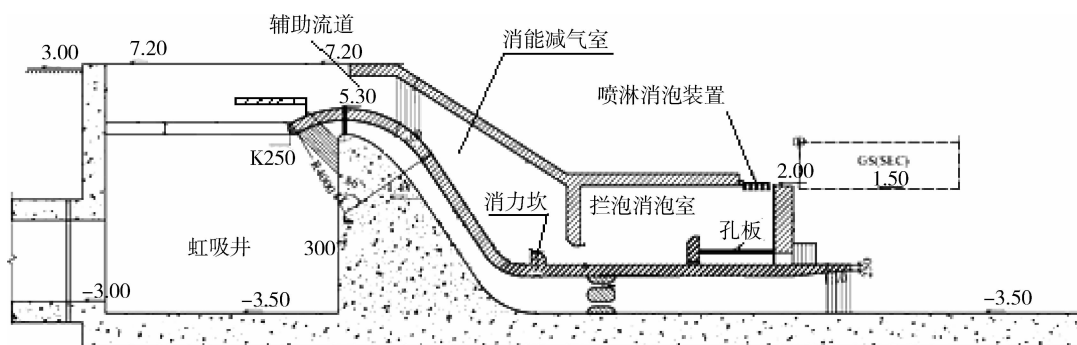


图3 某核电站CC出水辅助流道消泡布置

## 3) 排水暗涵设计

CC井出水通过渐变段过水断面缓慢变化为6孔内截面为4.0 m×3.0 m(宽×高)的暗涵, 以减弱暗涵入口处的进气漩涡, 同时CC底标高由-3.5 mPRD降低到-4.0 mPRD, 由此使暗涵内始终保持有压流状态, 避免明满流的交替。在暗涵入口处闸门槽处设置消涡

浮力圆筒(见图4), 消除暗涵入口处及闸门槽内的进气漩涡, 避免二次泡沫的形成。此外, 在暗涵出口处设置收泡消泡室, 经辅助流道流出的水流, 所挟带的少量未溃灭和未被拦截的少量气泡和泡沫至此已浮至暗涵顶部, 绝大部分泡沫被挡泡器挡在收泡室内堆集, 不再随水流流入合排明渠。

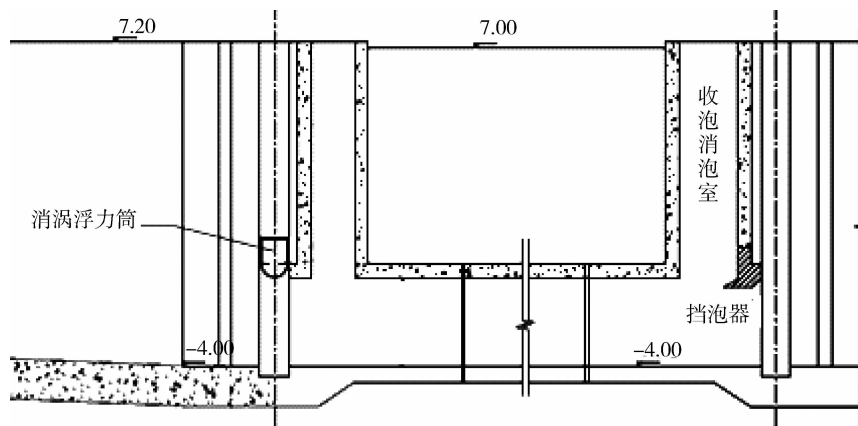


图4 某核电站CC暗涵处消泡方案

#### 4.2 物理消泡实施效果

CC物理消泡的设计参数均通过物理模型试验确定,机组经实际运行后,通过CC虹吸井和暗涵处的物理消(减)泡措施可大幅减少排水泡沫,如图5所示,在平均潮位下CC物理消泡可起到良好作用,外海基本没有泡沫带,但是在外海潮位较低时及夏季海生物繁殖期则无法保证完全消泡,具体分析如下:



图5 某核电站在平均潮位下CC暗涵排水泡沫

1) 水力物理模型试验(模型比尺为10)存在缩尺效应,模型比尺对水流紊流强度、掺气量和气泡上浮距离等均有影响,尤其在外海潮位较低时,模型试验与实物水体的水力作用存在偏差。

2) 机组夏季运行期间,海生物大量繁殖期循环水中加药量增加,以确保循环水系统管道和设备内不能滋生海生物,由此不仅海水粘度增加,使产生的水体泡沫不易溃灭,同时药剂作用后大量细小海生物残体悬浮于海水中,使气泡上升释放过程中吸附于悬浮物形成稳定泡沫体。

3) 外海潮位较低时,由于溢流堰后水位降低,堰前后水位差增大,导致堰后水流紊动加剧,增加了泡沫量,同时堰后水位降低,使得拦泡墙淹没深度减少,其拦泡效果减弱。

4) 循环水排水暗涵入口顶标高为 $-1.0$  mPRD,外海在平均潮位下暗涵为淹没流状态,但是随着海外潮位降低,以及受毗邻核电站排水量和排洪量等影响,可能出现暗涵排水处于非淹没状态,导致二次泡沫的形成,影响物理消泡效果。

#### 4.3 CC拦泡网设计

在CC排水暗涵出口进入合并明渠处,通过设置外海拦截措施,即2道带浮筒的拦泡网将排入外海前的泡沫实施拦截,如图6所示。拦泡网主要是考虑机组调试期间,循环水泵运行尚不稳定,单泵运行时导致CC排水暗涵不能全部淹没,导致排水泡沫增多。由于排水进入外海的流速很小,拦截的泡沫不易被水流带走,泡沫可控制在一定的海域范围内,不会影响外海附近海域,同时使泡沫有一定的时间溃灭消失,为物理消泡起到补充作用。由于拦泡网存在定期清理问题,且拦泡效果受外海波浪影响,因此拦泡网仅作为辅助手段。

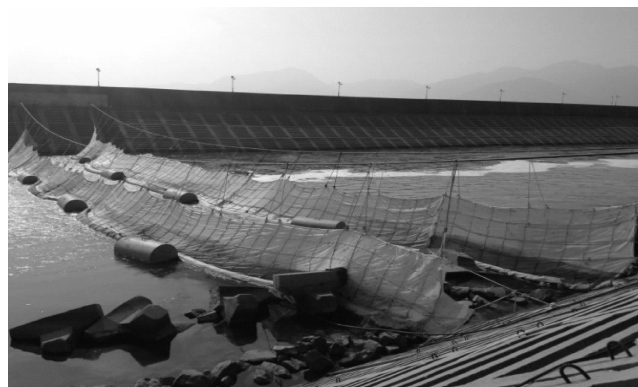


图6 某核电站CC出水口拦泡网设计

#### 4.4 化学加药消泡系统设计

海水消泡剂通过改变海水的物理化学性质(粘度和表面张力)以抑制泡沫的产生,同时使已产生的泡沫快速破灭以实现直接消泡处理。加药系统主要由消

泡剂储罐、搅拌器、插桶泵、加药泵、过滤器及阀门等组成,通过将外购药剂以饮用水混合稀释后经计量泵进行精确投加。消泡加药剂浓度控制和电站内制氮间的电解加药浓度控制相关联,在春夏季杀海生物加药量较大时启动化学消泡系统。由于化学消泡剂不仅价格昂贵,增加运行成本,且直接影响外海水水质,因此正常工况下核电站仍以物理消泡为主,辅助采用拦泡网,仅在夏季特殊工况下实施化学消泡措施。

## 5 结论

某核电站循环水采用淹没式虹吸管双重出流设计,通过主压力虹吸流道坝顶设置通气孔实现设计低潮位时虹吸井维持合理水位,满足凝汽器适宜真空度要求。此外,在主压力流道上采用翻板门增加虹吸压力流量,使明流辅道通过流量在5%~20%之间;辅助无压流道通过消能减气室和消泡减泡室进行消能、消泡和拦泡;在排水暗涵的进口处设置了消涡装置,并在暗涵的出口处设置了拦泡设计;辅助采用了外海泡沫拦截措施和化学加药消泡系统,通过上述消(减)泡相关设计有效解决了该核电站CC排水泡沫问题。

### 参考文献:

[1] 陈坤. 300 MW 发电机组凝汽器内空化现象的研究[J]. 东北电力技术, 2002(5): 25-28.

- [2] 曾令刚. 滨海电厂虹吸井排水泡沫成因及治理措施[J]. 中国科技信息, 2009(18): 67-68.
- [3] 邱静, 黄本胜, 赖冠文. 泡沫成因分析及污染治理工程措施研究[J]. 广东水利水电, 2002(5): 26-30.
- [4] GB3097 海水水质标准[S]. 北京: 国家环境保护局出版社, 1997.
- [5] 龙国庆. 核电站循环水虹吸井出水口改造设计[J]. 中国给水排水, 2004, 20(10): 67-69.
- [6] 贺益英, 杨帆. 洞塞消能工在火电核电站排水口消能消泡中的应用[J]. 水利学报, 2008, 39(8): 976-981.
- [7] 赵刚, 雷晓云, 张洪洋. 核电厂循环水系统排水口泡沫问题综合治理措施[J]. 中国给水排水, 2013, 29(22): 138-141.
- [8] 李瑞生, 田忠禄. 广东大亚湾核电站CC出水口防盐雾消泡改造工程水工物理模型试验研究[J]. 水利规划与设计, 2005(4): 40-44.
- [9] 余平. 大亚湾核电站CC出水口防盐雾消(减)泡沫研究[J]. 广西电力, 2003(1): 54-57.
- [10] 李瑞生, 田醇, 韩新生. 岭澳核电二期虹吸井防盐雾消泡工程水力物理模型试验研究报告[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2007.

(本文责任编辑 马克俊)

## Design of Circulating Water Siphon Outlet for Nuclear Power Station

YAN Lijing, LI Xiaoai

(China Nuclear Power Design Company Ltd, (Shenzhen), Shenzhen 518057, China)

**Abstract:** The submerged siphon double flow has been adopted in nuclear power station at the side of sea, which ensured the water level in CC well under control to maintain the appropriate vacuum degree of condenser. The measurements have been taken to eliminate the foam in the main flow with pressure and auxiliary flow as well as buried drainage culvert, such as the energy dissipation, bubble blockage, bubble elimination and burble deceasing. The above measurements in combination with chemical reagent addition and obstruction meshwork in sea successfully solved the CC foam problem.

**Key words:** nuclear power station; circulating water; siphon outlet design; elimination to foam