

DL04/19

发电厂空冷技术

山西省电力工业局 丁尔谋 主编

水利电力出版社

目 录

题词
序
前言

第一篇 概 论

第一章 发电厂空冷技术概述	(1)
第一节 空冷技术发展简介	(1)
第二节 汽轮机排汽冷却过程	(2)
第三节 直接空冷系统与间接空冷系统	(4)
第四节 空冷散热器技术	(7)
第二章 空冷技术在电厂的应用	(8)
第一节 空冷电厂的特点	(8)
第二节 空冷系统的技术经济比较	(12)
第三节 发电厂的空冷与环境	(17)
第一篇参考文献	(22)

第二篇 空冷系统基本原理与设计计算

第三章 散热元件传热理论与计算	(23)
第一节 传热理论	(23)
第二节 翅片管束散热与阻力	(32)
第三节 散热器表面积的优化	(35)
第四章 间接空冷系统的基本原理与设计计算	(37)
第一节 间接空冷系统的基本原理	(37)
第二节 空冷塔热力计算和空气动力计算	(40)
第三节 海勒式空冷系统优化设计	(49)
第四节 海勒式空冷系统水力计算	(59)
第五章 直接空冷系统的原理与设计计算	(64)
第一节 直接空冷系统的原理与空冷凝汽器结构型式	(64)
第二节 直接空冷的热力计算	(67)
第三节 风机选型计算	(74)
第四节 变工况计算	(76)
第五节 设计参数的优化	(77)
第二篇参考文献	(78)

第三篇 间接式空冷系统设备与布置

第六章 汽轮机	(79)
第一节 空冷汽轮机的技术特点和结构要求	(79)

第二节	空冷汽轮机设计背压的确定	(83)
第七章	凝汽器	(86)
第一节	表面式凝汽器	(86)
第二节	喷射式凝汽器	(91)
第三节	表面式凝汽器与喷射式凝汽器的比较	(111)
第八章	散热器	(112)
第一节	铝管铝翅片散热器	(112)
第二节	钢管钢翅片散热器	(118)
第三节	铝管铝翅片散热器的维护与防腐	(123)
第四节	钢管钢翅片散热器的维护与防腐	(126)
第九章	水力机械	(127)
第一节	循环水泵	(127)
第二节	水轮机	(129)
第三节	阀门	(131)
第十章	空冷塔及其设备	(133)
第一节	空冷塔结构	(133)
第二节	空冷塔的选择和优化	(137)
第三节	双曲线空冷塔的设计	(140)
第四节	间接空冷散热器的设置	(148)
第五节	直接空冷散热器的设置	(153)
第六节	塔内附属设备	(156)
第十一章	空冷系统的热控装置	(157)
第一节	检测仪表和可编程序控制器	(159)
第二节	调节控制系统	(162)
第十二章	空冷系统设备的布置	(171)
第一节	凝汽器的布置	(171)
第二节	水力机械的布置	(173)
第三节	管道与空冷塔的布置	(178)
第十三章	空冷机组的水化学与防腐	(182)
第一节	空冷机组的水化学	(182)
第二节	铝制冷却元件的外表面处理	(191)
第三节	海勒式空冷系统钢管道的内表面钝化处理	(193)
第四节	空冷塔散热器的尘埃沉积物及其清除	(194)
第十四章	空冷机组的凝结水处理	(196)
第一节	凝结水处理系统和设备	(196)
第二节	凝结水处理仪表和控制	(211)
第三篇	参考文献	(216)

第四篇 海勒式空冷系统的安装

第十五章	散热器组合与安装	(217)
第一节	散热器组合前的准备	(217)
第二节	散热器组合	(220)
第三节	散热器安装前的准备	(225)
第四节	散热器运输与安装	(228)

第五节 散热器附属设备安装	(233)
第十六章 喷射式凝汽器与水轮发电机安装	(236)
第一节 喷射式凝汽器安装	(236)
第二节 水轮发电机安装	(242)
第十七章 空冷系统内表面的防腐与冲洗	(247)
第一节 空冷系统内表面的防腐处理工艺	(247)
第二节 空冷系统管道的冲洗	(249)

第五篇 海勒式空冷系统的调整与试验

第十八章 空冷系统调试概要	(254)
第一节 空冷系统调试的目的和意义	(254)
第二节 空冷系统调试的内容与组织	(254)
第三节 空冷系统调试的特点	(258)
第十九章 空冷设备和系统的启动调试	(259)
第一节 空冷系统调试方案和系统网络图	(259)
第二节 主要设备的分部试运	(259)
第三节 空冷系统启动试运	(264)
第四节 汽轮机振动监测	(266)
第二十章 空冷热控系统的启动调试	(267)
第一节 调试准备工作及调试方法	(267)
第二节 热控系统的静态调试	(268)
第三节 热控系统的动态调试	(271)
第二十一章 凝结水处理系统的启动调试	(273)
第一节 凝结水处理系统的分部试运	(273)
第二节 凝结水处理系统的联合试运	(279)
第二十二章 空冷系统保证值测试	(280)
第一节 概述	(280)
第二节 试验前的准备工作	(282)
第三节 测点布置与仪表	(283)
第四节 试验方法与步骤	(290)
第五节 数据处理与计算	(291)
第六节 空冷系统的评价方法	(292)
第七节 引进空冷系统的保证值测试结果与分析	(294)
第二十三章 空冷汽轮机组性能试验	(295)
第一节 性能试验的准备工作	(296)
第二节 试验方法与测量	(297)
第三节 数据整理与计算	(300)
第四节 试验结果与分析	(310)
第五篇参考文献	(312)

第六篇 海勒式空冷系统的运行与维护

第二十四章 启动、运行与停运	(313)
第一节 空冷系统的启动	(313)
第二节 系统总压力的试验和调整	(318)

第三节 凝汽器水位调整	(320)
第四节 其它参数调整	(321)
第五节 空冷系统的停运	(322)
第六节 一台循环水泵运行的可行性	(324)
第二十五章 运行性能试验与分析	(326)
第一节 概述	(326)
第二节 测点布置及仪表	(327)
第三节 气象条件对空冷机组运行参数影响的试验	(329)
第四节 百叶窗开度对散热性能影响的试验	(338)
第五节 防冻试验	(344)
第二十六章 运行安全性和经济性分析	(353)
第一节 系统安全性分析	(353)
第二节 经济性分析	(360)
第二十七章 故障预防及处理	(364)
第一节 系统总压力异常	(364)
第二节 空冷塔内设备故障	(365)
第三节 热控系统故障	(367)
第四节 其它故障	(371)
第二十八章 散热器的防冻	(373)
第一节 冻结状态分析	(373)
第二节 防冻技术措施	(375)
第六篇 参考文献	(381)

第七篇 发电厂空冷技术的发展

第二十九章 干湿联合冷却系统	(382)
第一节 干湿联合冷却系统的特点和分类	(382)
第二节 湿冷塔、干冷塔、联合塔的技术经济比较	(384)
第三节 干湿联合冷却系统的应用	(385)
第三十章 空冷系统的评价与发展	(390)
第一节 空冷系统的效益分析	(391)
第二节 直接空冷技术的应用	(397)
第三节 直接空冷发电厂运行分析	(400)
第四节 直接空冷技术的发展	(402)
第七篇 参考文献	(409)

第三节 凝汽器水位调整	(320)
第四节 其它参数调整	(321)
第五节 空冷系统的停运	(322)
第六节 一台循环水泵运行的可行性	(324)
第二十五章 运行性能试验与分析	(326)
第一节 概述	(326)
第二节 测点布置及仪表	(327)
第三节 气象条件对空冷机组运行参数影响的试验	(329)
第四节 百叶窗开度对散热性能影响的试验	(338)
第五节 防冻试验	(344)
第二十六章 运行安全性和经济性分析	(353)
第一节 系统安全性分析	(353)
第二节 经济性分析	(360)
第二十七章 故障预防及处理	(364)
第一节 系统总压力异常	(364)
第二节 空冷塔内设备故障	(365)
第三节 热控系统故障	(367)
第四节 其它故障	(371)
第二十八章 散热器的防冻	(373)
第一节 冻结状态分析	(373)
第二节 防冻技术措施	(375)
第六篇 参考文献	(381)

第七篇 发电厂空冷技术的发展

第二十九章 干湿联合冷却系统	(382)
第一节 干湿联合冷却系统的特点和分类	(382)
第二节 湿冷塔、干冷塔、联合塔的技术经济比较	(384)
第三节 干湿联合冷却系统的应用	(385)
第三十章 空冷系统的评价与发展	(390)
第一节 空冷系统的效益分析	(391)
第二节 直接空冷技术的应用	(397)
第三节 直接空冷发电厂运行分析	(400)
第四节 直接空冷技术的发展	(402)
第七篇 参考文献	(409)

第一篇 概 论

第一章 发电厂空冷技术概述

第一节 空冷技术发展简介

一、空冷技术简介

兴建大容量火力发电厂需要充足的冷却水源，而在缺水地区兴建大容量火力发电厂，就需要采用新的冷却方式来排除废热。

发电厂采用翅片管式的空冷散热器，直接或间接用环境空气来冷凝汽轮机的排汽，称为发电厂空冷。研究空冷新装置及其使用的一系列技术，称作发电厂空冷技术。采用空冷技术的冷却系统称为空冷系统。采用空冷系统的汽轮发电机组简称空冷机组。采用空冷系统的发电厂称为空冷电厂。

发电厂空冷技术也是一种节水型火力发电技术。

发电厂空冷系统也称干冷系统。它是相对于常规发电厂湿冷系统而言的。常规发电厂的湿式冷却塔是把塔内的循环水以“淋雨”方式与空气直接接触进行热交换的，其整个过程处于“湿”的状态，其冷却系统称为湿冷系统。空冷发电厂的空冷塔，其循环水与空气是通过散热器间接进行热交换的，整个冷却过程处于“干”的状态，所以空冷塔又称为干式冷却塔或干冷塔。因为大多数发电厂的冷却系统都采用常规的湿冷系统，所以在不需要与空冷系统相区别时，前者的冷却系统不必特别指出是“湿冷系统”。

二、空冷技术发展概况

1. 国外空冷技术发展概况

早在30年代末，德国首先在鲁尔矿区的1.5MW汽轮机组应用了直接空冷系统。50年代，卢森堡的杜德兰格钢厂自备电站13MW机组和意大利的罗马电厂36MW机组分别投运了直接空冷系统。进入60年代后，英国拉格莱电厂于1962年在一台120MW机组上投运了间接空冷系统，采用喷射式凝汽器及自然通风型空冷塔。这个系统是由匈牙利的海勒教授在1950年世界动力会议上首先提出的，亦称为海勒式空冷系统。1968年，西班牙的乌特里拉斯坑口电厂投运了尖屋顶式布置的机械通风型直接空冷系统。至此，形成了直接与间接两种空冷系统并存的局面。继而，1971年，在苏联拉兹丹电厂的200MW级机组、匈牙利加加林电厂的200MW级机组、南非格鲁特夫莱电厂的5号200MW机组上，都应用了海勒式间接空冷系统。1977年，美国沃伊达克矿区电厂的330MW机组应用了机械通风型直接空冷系统。同年，联邦德国施梅豪森核电站的300MW机组应用了表面式凝汽器配自然通风空冷塔的间接空冷系统。80年代以来，空冷技术进一步发展起来，投运机组容量最大的电厂有南非马廷巴电厂（665MW机组，采用机械通风型直接空冷系统）和南非肯达尔电厂（686MW

机组,采用表面式凝汽器的自然通风空冷塔间接空冷系统)。

迄今为止,世界上公开报导过已建造的单机容量在100MW以上的空冷电厂如表1-1所示。

表 1-1 世界上已建造的配单机容量100MW以上机组的空冷系统

序号	电 厂	国 家	容量 (MW)	投产年份	系统	制 造 厂	凝汽器 型 式	冷却元件 布置形式	冷却塔壳体
1	拉格莱 (Rugeley)	英 国	1×120	1962	间接	EGI/Transelektro	混合式	垂直	混凝土
2	伊本比伦 (Ibbenbüren)	联邦德国	1×150	1967	间接	EGI/Transelektro	混合式	垂直	混凝土
3	乌特里拉斯 (Utrillas)	西 牙 牙	1×150	1968	直接	GEA	直 接	尖屋顶式	—
4	加加林 (Gyöngyös)	匈 牙 利	2×100	1969/1970	间接	EGI/Transelektro	混合式	垂 直	混凝土
5	格鲁特夫莱 (Grootvlei5号)	南 非	1×200	1971	间接	Birwelco	混合式	阶 梯 式	混凝土
6	加加林 (Gyöngyös)	匈 牙 利	2×220	1971/1972	间接	EGI/Transelektro	混合式	垂 直	混凝土
7	拉兹丹 (Razdan)	苏 联	1×220	1971/1971	间接	EGI/Transelektro	混合式	垂 直	钢/铝
8	格鲁特夫莱 (Grootvlei6号)	南 非	1×200	1977	间接	Balcke-Dürr/DBT	表面式	水 平	混凝土
9	沃依达克 (Woydak)	美 国	1×365	1977	直接	GEA	直 接	尖屋顶式	—
10	伊斯法罕 (Isfahan)	伊 朗	1×210	1982/1984	间接	EGI/Transelektro	混合式	垂 直	钢
11	施梅豪森 (Schmehausen)	联邦德国	1×300	1985	间接	Balcke-Dürr/GEA	表面式	锥 形	钢/铝 (绳索悬吊)
12	托斯 (Touss)	伊 朗	1×150	1986/1987	直接	Balcke-Dürr	直 接	尖屋顶式	—
13	马廷巴 (Matimba)	南 非	6×665	1987/	直接	GEA	直 接	尖屋顶式	—
14	坎迪奥塔 (Candiota)	巴 西	2×160	1987/	间接	GEA	表面式	锥 形	混凝土
15	哈米特阿巴特 (Hamit Abat)	土 耳 其	1×200	1987	间接	EGI/Transelektro	混合式	垂 直	混凝土
16	肯达尔 (Kendal)	南 非	6×686	1988/	间接	Balcke-Dürr/DBT	表面式	锥 形	混凝土
17	大同 (Datong)	中 国	2×200	1987/1988	间接	EGI/Transelektro	混合式	垂 直	混凝土
18	马尤巴 ^① (Ma juba)	南 非	3×657	1991/1993	直接	GEA	直 接	尖屋顶式	—

① 系规划资料。

2. 我国空冷技术发展概况

我国电厂空冷技术起步并不太晚。1966年在哈尔滨工业大学试验电站的50kW机组上首次进行了直接空冷系统的试验。1967年在山西侯马电厂的1.5MW机组上又进行了工业性直接空冷系统的试验。进入80年代后,庆阳石化总厂自备电站3MW机组投运了直接空冷系统。1987年和1988年,山西大同第二发电厂的两台200MW机组首次引进了匈牙利的海勒式间接空冷系统,使我国火电厂空冷技术的发展进入一个新的阶段。目前,国产200MW机组海勒式间接空冷系统和表面式凝汽器间接空冷系统的电厂正在建设中,这将有助于电厂空冷技术的推广使用。

第二节 汽轮机排汽冷却过程

一、蒸汽动力循环

蒸汽动力装置的基本循环是朗肯循环,该循环的工质为水蒸气。水蒸气是在锅炉中形成的,水先被加热成饱和蒸汽,再经过热器继续加热为过热蒸汽。这个过程为定压吸热过程。过热蒸汽引入汽轮机内膨胀作功,这个作功过程一般视为绝热膨胀过程。在汽轮机内作完功的乏汽排入凝汽器内,在循环水的冷却下放出排汽的汽化焓变(或称汽化潜热)并

凝结成水。这个过程为定压放热过程。排汽冷凝为凝结水后通过汽轮机回热系统预热，再次进入锅炉，开始蒸汽的下一个动力循环。

为保证工质在凝汽器内定压放热，必须要有一个起冷源功能的冷端装置。这个冷端装置一般是由在真空状态下定压放热的凝汽设备和保证冷源温度的冷却设备共同组成的冷却系统。这个冷却系统既保存了纯净的凝结水又完成蒸汽动力循环。

二、冷却过程

冷却过程是火力发电厂生产全过程的一部分。一方面，它与全过程有着密切关系，因为冷却过程的各项参数是根据全过程来确定的。另一方面，冷却过程通常又是火电厂生产全过程和环境之间的一个环节。冷却介质的取用、消耗及排放，对环境都有影响，其不利影响是使环境受到污染。

(一) 冷却介质

火力发电厂冷却系统的主要冷却介质是水或空气。由于世界大部分地区水资源的普遍缺乏，水的利用受到各种因素限制，于是着眼于用空气作为火力发电厂汽轮机冷却系统的冷却介质。表1-2对以水和空气作为冷却介质进行了比较。

表 1-2 水和空气作为冷却介质的比较

序号	项 目	用 水 冷 却	用空气冷却	注
1	冷却介质的传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$	1762	62	湿冷时, 管外为冷却水, 管内为工质水; 空冷时, 管外为空气, 管内为工质水
2	管内污垢程度	显著	几乎没有	
3	管内清扫难易程度	难	易	
4	管内清扫频度	频繁	极少	
5	管内泄漏危险	有	微	
6	管内材料腐蚀	有	微	
7	基建费用	小	大	
8	运行费用	一般	稍多	

(二) 冷却过程

冷却过程是系统排放的废热与环境间的能量转换过程，在此过程中，有热量与质量的传递。水的蒸发冷却过程称为水冷却过程，仅与环境空气间发生的传热过程称为空气冷却过程。

汽轮机排汽的冷却凝结过程中，伴随着排汽的压力损失，汽轮机低压缸末级叶片出口截面处的静压力称为汽轮机的背压 p_T 。排汽以高速流过排汽缸蜗壳后，汽轮机此排汽口处的压力为 p'_T ，且有 $p'_T > p_T$ （性能良好的排汽缸蜗壳）或 $p'_T < p_T$ （性能差的排汽缸蜗壳）关系，一般认为 $p'_T \approx p_T$ 。

(1) 当采用直接空冷系统时，粗大排汽总管与汽轮机排汽口处相接，经由几十米长的排汽总管、分管和支管将排汽送至各个空冷凝汽器群组。排汽经长距离输送必然产生压力损失，设最后（最远）一组空冷凝汽器进汽管处压力为 p_1 ， $p_T - p_1 = \Delta p_c$ 为排汽管道压力损失。排汽为饱和蒸汽，与 p_1 相对应的饱和温度 t_1 降低，对空冷及回收热量不利。因此，在采用直接空冷时，空冷凝汽器群组宜靠近汽机房布置，以维持温度 t_1 较高。

(2) 当采用间接空冷系统时，用喉部过渡段连接汽轮机排汽口与凝汽器。凝汽器冷

器所有元件和排汽管道采用两层焊接结构,焊接质量要求十分严格,以保证整个空冷系统的严密性。

直接空冷系统中,空冷凝汽器的布置与风向、风速及发电厂主厂房朝向都有密切关系。中小型机组可直接在汽机房屋顶布置空冷凝汽器。大型机组的空冷凝汽器通常在紧靠汽机房 A 列柱外侧,与主厂房平行的纵向平台上布置若干单元组,其总长度与主厂房长度基本一致。每个单元组由多个主凝器与一个辅凝器组成“人”字形排列结构,并在每个单元组下部设置一台大直径轴流风机。

直接空冷系统的优点是设备少,系统简单,基建投资较少,占地少,空气量的调节灵活。该系统一般与高背压汽轮机配套。这种系统的缺点是运行时粗大的排汽管道密封困难,维持排汽管内的真空困难,启动时为造成真空需要的时间较长。

二、海勒式间接空冷系统

海勒式间接空冷系统如图1-2所示,主要由喷射式凝汽器和装有福哥型散热器的空冷塔构成。由外表面经过防腐处理的圆形铝管、套以铝翅片的管束所组成的“八”形排列的散热器,称为缺口冷却三角,在缺口处装上百叶窗就成为冷却三角。系统中的冷却水是高纯度的中性水($\text{pH}=6.8\sim 7.2$)。中性冷却水进入凝汽器直接与汽轮机排汽混合并将其冷凝。受热后的冷却水绝大部分由冷却水循环泵送至空冷塔散热器,经与空气对流换热冷却后通过调压水轮机将冷却水再送至喷射式凝汽器进入下一个循环。受热的循环冷却水的极少部分经凝结水精处理装置处理后送至汽轮机回热系统。

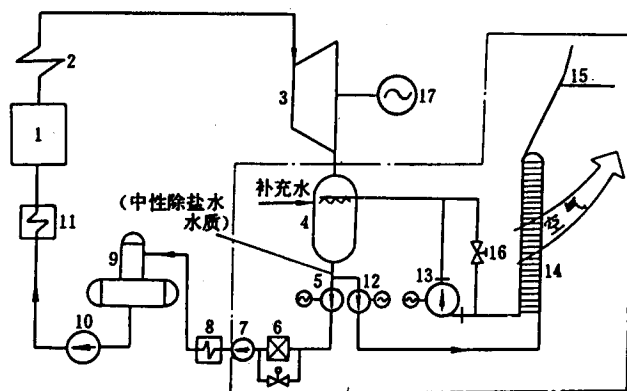


图 1-2 海勒空冷机组原则性汽水系统

- 1—锅炉；2—过热器；3—汽轮机；4—喷射式凝汽器；5—凝结水泵；6—凝结水精处理装置；
7—凝结水升压泵；8—低压加热器；9—除氧器；10—给水泵；11—高压加热器；12—冷却水
循环泵；13—调压水轮机；14—全铝制散热器；15—空冷塔；16—旁路节流阀；17—发电机

该系统中的调压水轮机有两个功能：一是通过调节水轮机导叶开度来调节喷射式凝汽器喷嘴前的水压，保证形成微薄且均匀的垂直水膜，减小排汽通道阻力，使冷却水与排汽充分接触换热；另一是回收能量，减少冷却水循环的功率消耗。调压水轮机在此空冷系统中的连接方式有两种。一种是在许多空冷电厂已采用过的立式水轮机与立式异步交流发电机连接；另一种是卧式水轮机与卧式冷却水循环泵、卧式电动机的同轴连接。后一种连接

方式可以在工程中使用,但目前尚未见投运的实例。水轮机的两种连接方式各有其优缺点,可视实际情况选用。

海勒式间接空汽系统的优点是以微正压的低压水系统运行,较易掌握。可与中背压^①汽轮机配套。配用海勒系统的汽轮机,其年平均背压低于直接空冷机组,稍低于哈蒙式间接空冷机组,故机组煤耗率较低。缺点是设备多、系统复杂、冷却水循环泵的泵坑较深、自动控制系统复杂、全铝制散热器的防冻性能差。

三、带表面式凝汽器的间接空冷系统

该系统又称哈蒙式间接空冷系统,如图1-3所示。这种空冷系统是在海勒式间接空冷系统的运行实践基础上发展起来的新系统。鉴于海勒式间接空冷系统采用的喷射式凝汽器,其运行端差实际值和表面式凝汽器端差相比较没有明显的减小;在喷射式凝汽器中,循环冷却水与锅炉给水是连通的,由于锅炉给水品质控制严格,系统中要求设凝结水精处理装置;对高参数大容量的火电机组给水水质控制和处理尤为困难,于是在单机容量300MW级和600MW级火电机组发展了哈蒙式间接空冷系统与直接空冷系统。

哈蒙式间接空冷系统由表面式凝汽器与空冷塔构成。该系统与常规的湿冷系统基本相仿,不同之处是用空冷塔代替湿冷塔,用不锈钢管凝汽器代替铜管凝汽器,用除盐水代替循环水,用密闭式循环冷却水系统代替开敞式循环冷却水系统。

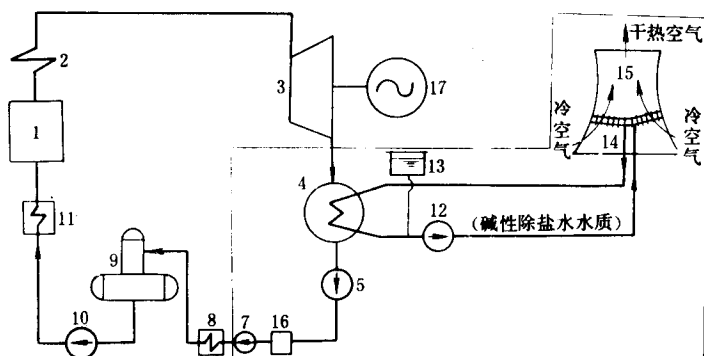


图 1-3 哈蒙式空冷机组原则性汽水系统

- 1—锅炉；2—过热器；3—汽轮机；4—表面式凝汽器；5—凝结水泵；6—凝结水精处理装置；
7—凝结水升压泵；8—低压加热器；9—除氧器；10—给水泵；11—高压加热器；12—循环水泵；
13—膨胀水箱；14—全钢制散热器；15—空冷塔；16—除铁器；17—发电机

在哈蒙式间接空冷系统回路中,由于冷却水在温度变化时体积发生变化,故需设置膨胀水箱。膨胀水箱顶部和充氮系统连接,使膨胀水箱水面上充满一定压力的氮气,既可对冷却水容积膨胀起到补偿作用,又可避免冷却水和空气接触,保持冷却水品质不变。

在空冷塔底部设有贮水箱,并设置两台输送泵,可向冷却塔中的空冷散热器充水。空冷散热器及管道满水后,系统即可启动投运。

哈蒙式空冷系统的散热器由椭圆形钢管外缠绕椭圆形翅片或套嵌矩形钢翅片的管束组

① 设计背压为9.8kPa左右称为中背压汽轮机,设计背压为4.9kPa左右称为低背压汽轮机,设计背压为9.6kPa左右称为高背压汽轮机。

成。椭圆形钢管及翅片外表面进行整体热镀锌处理。

该系统采用自然通风方式冷却。将散热器装在自然通风冷却塔中。

哈蒙式间接空冷系统类似于湿冷系统,其优点是节约厂用电;设备少,冷却水系统与汽水系统分开,两者水质可按各自要求控制;冷却水量可根据季节调整,在高寒地区,在冷却水系统中可充以防冻液防冻。缺点是空冷塔占地大,基建投资多;系统中需进行两次换热,且都属表面式换热,使全厂热效率有所降低。

发电厂空冷技术是发电厂冷却方式的特殊手段,其适宜条件可归纳如下:

- (1) 建厂地区缺水,这是前提条件或先决条件;
- (2) 燃用当地劣质煤,是利用资源的基本条件;
- (3) 煤价低廉,是经济比较的关键条件;
- (4) 海拔高度、环境温度、风向、风速、大气逆温层等,是设计的影响条件;
- (5) 降低空冷散热器造价,是大范围采用空冷系统的推广条件。

第四节 空冷散热器技术

一、应用情况概述

空冷散热器是空冷电厂的主要设备之一。空冷散热器技术,许多国家都给以极大的关注并逐渐完善。

1. 匈牙利福哥型空冷散热器

福哥型散热器由板片式翅片管束组成。主要产品采用福哥T-60型全铝制的圆形管外套矩形大翅片结构,整体内外表面作防腐处理。该散热器主要应用于海勒式间接空冷系统。

从表1-1可以看出,采用海勒式间接空冷系统的有18台机组,最大单机容量为220MW,装机总容量3430MW,占空冷机组装机总容量的22%。

2. 德国巴克-丢公司空冷散热器

巴克-丢公司散热器由绕片式翅片管束组成。主要产品采用各种系列的全钢制的椭圆形管、外绕等高椭圆形翅片结构,然后整体外表面进行热镀锌处理。该散热器主要应用于哈蒙式间接空冷系统。

从表1-1可看出,采用哈蒙式间接空冷技术的有12台机组,最大单机容量为686MW,装机总容量4936MW,占空冷机组装机总容量的32%。

3. 德国GEA公司空冷散热器

GEA公司散热器由套片式翅片管束组成。主要产品采用各种系列的全钢制的椭圆钢管、套嵌矩形翅片结构,然后整体外表面进行热镀锌处理。该散热器主要应用于机械通风的直接空冷系统或自然通风的哈蒙式间接空冷系统。

从表1-1可看出,采用直接空冷技术的有15台机组,最大单机容量为665MW,装机总容量7071MW,占空冷机组装机总容量的46%。

二、应用情况分析

目前使用较多的空冷散热器的应用情况见表1-3。

表 1-3

空冷散热器在电厂中的应用情况

序号	名 称	[匈] 全铝制福哥T-60型	[德] 全钢制巴克-丢产品	[德] 全钢制GEA产品
1	配套的机组容量	220MW及以下	300MW及以上, 现应用最大机组容量为686MW	各种容量, 现应用最大机组容量为665MW
2	使用寿命 (a)	约20	约25	约25
3	总传热系数 $[W/(m^2 \cdot K)]$ (在风速1.7m/s时)	29.76	—	36.75
4	气动性能	一般	最优	优
5	对冷却水质要求	中性除盐水, 需设置凝结水精处理装置	碱性除盐水	碱性除盐水
6	运行维护 (1) 水冲洗 (2) 管长与连接 (3) 泄漏 (4) 抗冻性能	只能用低压水冲洗 每节长5m, 需多节连成15m, 每片有接头1200个 机率大 一般	可用高压水冲洗 整根15m 机率小 优	可用高压水冲洗 整根15m 机率小 优
7	适用范围	调峰电厂	核电站、老电厂扩建	各类电厂

第二章 空冷技术在电厂的应用

第一节 空冷电厂的特点

一、空冷技术的应用

(一) 带基本负荷的电厂

在空冷电厂中, 由于空冷散热器价格昂贵, 因此, 可把散热器与锅炉、汽轮机、发电机并列为电厂的四大设备。

海勒式间接空冷系统目前采用的单机最大容量为200MW级。容量为300MW或600MW的机组, 目前国外仅发展直接空冷系统或哈蒙式间接空冷系统。如美国的沃伊达克电厂330MW火电机组采用直接空冷系统。该台空冷机组自1978年投运以来, 经历了最低环境温度 -44.5°C 及最高环境温度 41.1°C 的考验。从1979~1987年的九年间, 平均年利用小时数达7328h, 机组平均功率为327MW, 说明该机组的综合性能良好。又如南非肯达尔电厂规划的 $6 \times 686\text{MW}$ 火电机组均采用哈蒙式间接空冷系统, 至1990年已投运3台空冷机组, 经历了最低环境温度 -6°C 及最高环境温度 32°C 的考验。该厂1号机投运9000余小时, 空冷系统从未发生过问题。由于用碱性除盐水作为冷却介质, 表面式凝汽器不锈钢管内表面十分清洁。这两种空冷系统, 当前对300MW级、600MW级的大型火电机组都较实用, 具体选

用哪一种系统,取决于汽轮机、散热器与大直径轴流冷却风机的制造质量,管道焊接严密性,以及厂址的具体情况,应通过技术经济比较后确定。

(二) 调峰电厂

调峰电厂的特点是机组启停频繁,因此在设计空冷系统时,宜采用具有铝管铝翅片散热器的海勒式间接空冷系统。因为散热器铝管的内表面在制造厂已进行过防腐处理,可适应频繁启停工况的干湿变化。

(三) 扩建老电厂

在老电厂扩建时,采用空冷系统有着广阔的前景。

老电厂扩建增容时,水资源往往难于解决,可考虑采用空冷系统。若老电厂场地狭窄,可采用直接空冷系统,并把空冷凝汽器布置在汽机房的屋顶上,从而减少占地面积。若老电厂有湿冷塔群,可将部分湿冷塔改造为辅助通风^①的空冷塔,采用哈蒙式间接空冷系统。

(四) 核电站

核电站有轻水堆与气冷堆等几种。

效率稍高的直接氮循环高温气体冷却堆核电站有可能使用空冷技术。因为它的废热排放温度较高,提高了空冷塔进口温位,对空冷有利,故其空冷系统的基建费用比燃煤电厂可减少甚多。

空冷技术在核电站应用时,考虑到安全因素,需将凝结水与冷却水分隔开。目前,国外已投运的核电站空冷系统,多采用具有表面式凝汽器的哈蒙式间接空冷系统。

二、空冷电厂的总体特点

当发电厂采用空冷系统后,对整个发电厂的生产工艺流程有重大影响。空冷电厂的总体特点是指空冷系统对全厂的影响。空冷电厂的总体特点可简述如下:

(1) 改变厂址选择条件。空冷电厂全厂耗水量^②按设计装机容量计算约为 $0.3 \sim 0.33 \text{ m}^3 / (\text{GW} \cdot \text{s})$,因而厂址的选择基本上不受水源地的限制。空冷电厂可建在缺水的煤矿坑口或靠近电力负荷中心处,避免以水定厂址、以水定容量规模等问题。

(2) 空冷设备地位重要。空冷电厂所需的散热器体积庞大,价格昂贵(相当于电站锅炉价格,甚至超出锅炉价格),已成为电厂的主要设备之一。

(3) 节约用水。可以节约全厂65%以上的耗水量,是火电厂节水量最多的一项技术。与此同时,缩小了电厂水源地建设规模,降低了水源地工程投资费用。

(4) 减轻对环境的污染。由于空冷塔没有逸出水雾团,不发生淋水噪声,减轻对环境的污染,改善了空气的能见度。

(5) 当采用直接空冷系统时,可大幅度地减少发电厂的占地面积。直接空冷系统不仅可以取消湿冷系统的大型湿冷塔、水泵房,深埋地下管线等占地面积,还可在空冷凝汽器装置平台下面布置电气变压器,充分利用主厂房A列外侧空间。

(6) 空冷装置需要较大的施工组装机和较为复杂的调试措施。在寒冷的冬季,必

① 辅助通风是一种通风方式。它是利用现有的湿冷塔通风筒,在其外周地面上绕圆周设置若干台小型轴流冷却风机,通过进风口向通风筒内鼓风。由这种既有自然通风又有机械通风所构成的通风方式,称为辅助通风。

② 电厂全厂耗水量有两种指标。一个是按设计装机容量计算,即以1000MW耗水若干立方米每秒计,单位为 $\text{m}^3 / (\text{GW} \cdot \text{s})$ 。另一个是按运行发电量计算,当年利用小时数为6000h时,发电1kW·h耗水若干千克计,单位为 $\text{kg} / (\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

须有完备的防冻措施。

(7) 空冷电厂因没有雾气团目标暴露, 适合用于地下发电厂, 有利战备。

(8) 空冷电厂的全厂热效率稍低, 发电标准煤耗率也大。

三、空冷系统的特点

发电厂空冷有直接空冷系统、海勒式间接空冷系统和哈蒙式间接空冷系统三种。

(一) 共同特点

(1) 空冷系统的传热学特点是低温位^①、小温差、特大散热量的空气冷却热交换。

(2) 空冷系统属密闭式循环冷却系统, 它对水质的要求很严格。如间接空冷系统要求的水质为高纯度的除盐水。

(3) 空冷系统需配置高、中背压的空冷汽轮机。在条件不具备时, 可对现有低背压汽轮机加以技术改造, 以满足使用要求。如大同第二电厂的5号、6号200MW汽轮机即为一例。

(4) 空冷系统的冷却性能受环境(气温、风向风速)影响很大, 导致汽轮机背压变幅增大, 汽轮机设计背压比湿冷机组提高许多, 运行背压范围也比后者大些。

(5) 空冷系统的自动化程度比湿冷系统有大幅度提高。

(6) 空冷系统的基建投资和年运行费用都高于湿冷系统。因此空冷系统的采用受到一定条件限制。

下面, 从工艺和设备两方面阐述空冷系统的特征。

(二) 工艺系统特征

发电厂三种空冷工艺系统的特征简述如下。

1. 火电厂冷端换热

海勒式间接空冷系统(以下简称海勒式空冷系统)的换热有两次: 第一次在喷射式凝汽器里进行蒸汽的冷凝, 属混合式换热; 第二次在空冷塔内进行冷却水的冷却, 属表面式换热。

哈蒙式间接空冷系统(以下简称哈蒙式空冷系统)的换热也有两次: 第一次在表面式凝汽器里进行蒸汽的冷凝, 属表面式换热; 第二次在空冷塔内进行冷却水的冷却, 也属表面式换热。

直接空冷系统的换热仅有一次, 即在空冷凝汽器内进行蒸汽的冷凝, 属表面式换热。

2. 主管道内流动的介质

海勒式空冷系统: 输送呈中性的高纯度除盐水。

哈蒙式空冷系统: 输送呈碱性的高纯度除盐水。

直接空冷系统: 输送饱和蒸汽。

3. 工艺系统的真空容积

海勒式空冷系统: 真空容积小。

哈蒙式空冷系统: 真空容积较小。

^① 温位即为热介质温度。低温位是指热介质温度较低。例如, 发电厂空冷系统的热介质温度仅有10~70℃, 属低温位。通常, 炼油厂的热介质温度为270~300℃, 冷介质也是环境的大气干球温度, 仅有十几度。显然, 炼油厂的空冷应属高温位、大温差、中等散热量的热交换。

直接空冷系统：真空容积大，约为间接空冷系统的30倍。

4. 空冷散热器排出空气

海勒式空冷系统与哈蒙式空冷系统：空气以微正压方式排出。在充水时，散热器内空气靠水压顶至排空气系统，然后排入大气。

直接空冷系统：依靠抽气器将负压区域空气抽出。启动时，由一级抽气器工作，抽出空气及不凝结的气体；正常运行时，由二级抽气器维持一定真空运行。

5. 出口介质温度的控制与防冻

海勒式空冷系统与哈蒙式空冷系统：依靠塔上百叶窗开度，调节进塔空气量；空冷塔自身设有旁路，投运时使冷却水先走旁路，待水温升高后，再进入散热器去冷却；也可用改变投入的散热器段数进行调节。

直接空冷系统：靠改变风机投运台数来调节进入空冷凝汽器的空气量；由多层百叶窗开闭进行热风再循环^①，调节冷却空气进口温度。

6. 凝结水处理

海勒式空冷系统不论单机容量大小，均要设置凝结水精处理装置。

哈蒙式空冷系统与直接空冷系统：都必须设置凝结水除铁装置。

7. 变工况运行

海勒式空冷系统：正常运行时，必须维持两台泵同时运行，但在有一台泵故障的特殊情况下，为使汽轮机组不停机，可在短时间内单泵运行。

哈蒙式空冷系统：设置可调速的循环水泵来适应热负荷、环境温度的变化，实现变工况运行。

直接空冷系统：可随时调节风机运行台数与转速。

（三）主设备特征

发电厂的三种空冷系统的主设备是不同的，现叙述如下。

1. 冷凝设备

海勒式空冷系统：水冷型喷射式凝汽器。它一般布置在主厂房内汽轮机尾部的底层上。

哈蒙式空冷系统：水冷型表面式凝汽器。它一般布置在主厂房内汽轮机尾部的底层上。

直接空冷系统：空冷凝汽器。它一般布置在主厂房外侧，紧靠汽机房的室外露天的具有一定高度的平台上。小型空冷凝汽器可布置于汽机房屋顶上具有一定高度的高架平台上。

2. 冷却设备

海勒式空冷系统：自然通风的空冷塔。在塔底外侧四周装有全铝制散热器。冷却三角竖布置。

哈蒙式空冷系统：自然通风的空冷塔。在塔内装有全钢制散热器。冷却三角锥形（与水平略成倾角）布置。

直接空冷系统：冷却设备与冷凝设备合为一体。直接空冷的空冷装置必须采用机械通

① 直接空冷的防冻措施之一是由多层百叶窗开闭，进行热风再循环。所谓热风再循环是指经空冷凝汽器受热的空气利用多层百叶窗的开闭，使受热空气引入风机进口，从而使风机鼓出的空气是加热了的空气，即热风再循环。