

发电工程设计项目经理（设总）培训课题

第三部分：综合设计技术

第十章：冷却塔排烟技术

华北电力设计院工程有限公司

2012 年 9 月 北京

编写：王宝福

校审：李玉峰

目 录

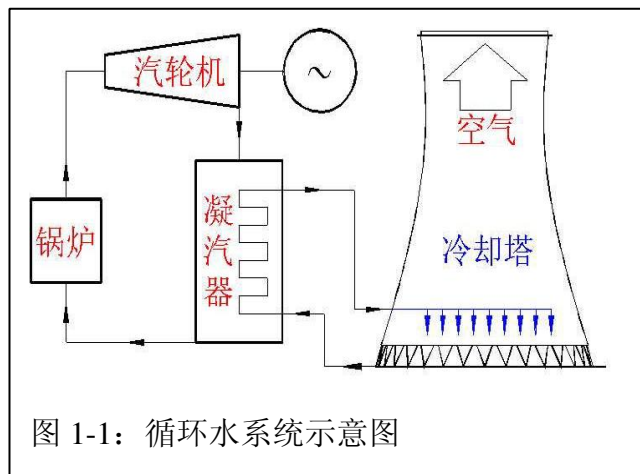
1 冷却塔基本介绍	1
1.1 冷却塔的基本用途	1
1.2 冷却塔的分类:	1
1.3 排烟冷却塔的基本形式	2
2 排烟冷却塔的适用条件	3
3 排烟冷却塔设计分界和范围及与相关专业的关系	3
3.1 设计分界	3
3.2 设计范围	3
3.3 与相关专业的关系（强调烟道支架及其基础对厂区的影响，加强配合）	4
4 排烟冷却塔设计条件（设计原则）	6
4.1 设计基本条件	6
4.2 排烟冷却塔特点	6
4.3 供热机组的排烟冷却塔设计	6
5 排烟冷却塔和烟道布置	6
5.1 排烟冷却塔的布置	6
5.2 烟道布置方式	7
6 公司排烟冷却塔技术优势	7
6.1 排烟冷却塔热力性能分析和计算	7
6.2 进塔烟道选材及结构形式的研究	8
6.3 排烟冷却塔特殊防腐体系研究	8
6.4 排烟冷却塔塔体开洞结构计算和稳定性分析	9
7 排烟冷却塔技术的工程应用	10
8 设总在烟塔工程中的主要工作	11

1 冷却塔基本介绍

1.1 冷却塔的基本用途

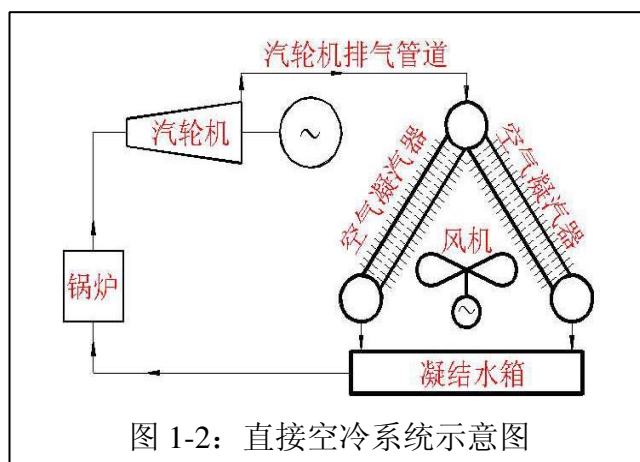
1.1.1 是综合了流体力学、空气动力学、热力学、弹性力学、结构力学和气象、材料、地质等多学科，属知识密集型产品。

1.1.2 冷却塔受运行工况、气象条件、地质地貌等诸多因素的直接影响，设计上应考虑各种条件的不利组合，全面满足主体工艺的要求。施工制造上，面对复杂的结构和高精度的要求，在整个施工和制造过程中均要求在安全和质量的控制下进行。运行管理办法上要随着运行工况和气象条件的变化采取行之有效的调整措施。



1.1.3 在火力发电厂中，冷却塔的主要作用就是降低循环水的温度，从而降低凝汽器内的汽水温度，增加汽轮机的端差，也就增加了汽轮机做功的推动力，如图 1-1 所示。对于排烟冷却塔而言,除具有前述的用途外还具有排放烟气的功能。

1.2 冷却塔的分类:



①按热水与空气的接触方式可分为：湿冷系统、空冷系统、混合冷却系统。

空冷系统又可分为直接空冷系统和间接筒接空冷系统。图 1-2 为直接空冷系统示意图。

②按通风方式可分为：自然通风冷却塔、机力通风冷却塔、混合通风冷却塔；

③按热水与空气的流动方向可分为：逆流塔、横流塔、混流塔；

1.3 排烟冷却塔的基本形式

1.3.1 湿冷机组排烟冷却塔

目前国内外常用的排烟冷却塔其完整的定义应当为：逆流式自然通风排烟冷却塔，如图 1-3 所示：

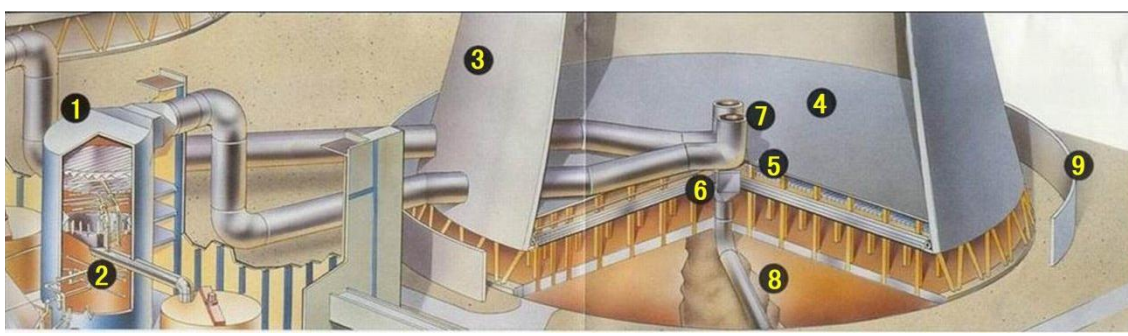


图 1-3 排烟冷却塔剖析图

1—脱硫装置 2—吸收塔喷淋层 3—冷却塔 4—收水器 5—配水层
6—填料层 7—烟道 8—进水管（沟） 9—防噪墙

这个图,说明了解以下几点:

- 1)排烟冷却塔总和湿法脱硫联系在一起的；
- 2)烟气是从冷却塔内淋水装置上方进入冷却塔的；
- 3)塔内没有必要再设置一独立的烟囱；
- 4)烟气通过冷却塔中心排放，正常情况下，烟气不会与冷却塔内壁接触；

1.3.2 间接空冷机组排烟冷却塔

- 1) 通常将脱硫塔放在间接空冷塔内，塔内为干的热空气，
- 2) 塔内腐蚀环境要比湿冷塔好的多，而且腐蚀区域较小，仅发生在喉部以上部分。
- 3)脱硫塔既可布置在间接空冷塔内，也可布置在间接空冷塔外；
- 4)烟道可根据脱硫方式选择玻璃钢烟道或钢烟道。



图 1-4 间接空冷排烟冷却塔照片

2 排烟冷却塔的适用条件

- 1) 采用湿法脱硫的燃煤电厂；
- 2) 建（构）筑物对周围环境的影响（如：机场限高等）；
- 3) 城市的景观要求（无烟囱电厂）；
- 4) 环保要求。（有争议）
- 5) 采用海水二次循环的电厂（防腐工程可统一考虑）

3 排烟冷却塔设计分界和范围及与相关专业的关系

3.1 设计分界

排烟冷却塔设计分界下部为：环型基础外 1m 为界内的冷却塔全部建筑安装工程
程设计。

上部为：脱硫塔出口烟道接口法兰（含法兰）至冷却塔内的全部烟道及支架（含基础）的设计。

3.2 设计范围

设计界限内全部排烟冷却塔的设计及施工、设备和材料招标书的编写，参与招标及合同签订；提供调试、验收、竣工审计、正常商业运行的过程中的设计技术

服务。主要设计内容有：

- 1) 冷却塔的壳体、支柱、环基、水池设计（含地基处理）；
- 2) 淋水架构及基础的设计（含地基处理）；
- 3) 淋水装置的设计及塔心设备（材料）的选型；
- 4) 水塔内、外烟道及支架（含基础）和附件的设计；
- 5) 冷却塔内、外壁、构架、水池、配水系统的防腐设计；
- 6) 施工、设备及材料招标书编制、提供相应设备、材料清单；
- 7) 冷却塔防雷、接地设计；
- 8) 冷却塔冬季防冻措施设计；
- 9) 航空障碍照明系统；
- 10) 冷却塔防噪装置的设计。

3.3 与相关专业的关系（强调烟道支架及其基础对厂区的影响，加强配合）

排烟冷却塔涉及的专业有：水工结构、水工工艺、热机、总图、勘测、环保、电气、热控。

排烟冷却塔各设计阶段各专业分工表

序号	勘测设计内容	负责专业	配合专业	备注
可行性研究阶段				
1	冷却塔设计说明	水工结构	工艺、热机、总图	
2	冷却塔总平面位置	总图	水工结构、工艺	
3	冷却塔专题报告（含各方案技术经济比较）	水工结构	水工工艺、总图、热机、环保	必要时
4	冷却塔工程量提资	水工结构	工艺、热机	
初步设计阶段				
1	冷却塔设计说明	水工结构	工艺、热机、总图	
2	冷却塔总平面位置	总图	水工结构、工艺	
3	冷却塔专题报告（含各方案技术经济比较）	水工结构	水工工艺、总图、热机、环保	必要时
4	冷却塔土建工程量提资	水工结构	水工工艺、热机、勘测	含烟道
5	淋水装置及塔内管道、设备工程量提资	水工工艺	水工结构	
6	冷却塔优计算（冷端）	水工工艺	水工结构、水文气象	

序号	勘测设计内容	负责专业	配合专业	备注
7	冷却塔热力计算	水工工艺	水工结构、水文气象	
8	冷却塔配水计算	水工工艺	水工结构	
9	冷却塔立剖面图	水工结构	水工工艺	
10	冷却塔各层平面布置图	水工工艺	水工结构	配水层、 填料层 及柱基
施工图设计阶段				
1	烟塔防雷接地图	电气	水工结构	
2	烟塔照明	电气	水工结构	
3	冷却塔总图及运行说明	水工工艺	水工结构	
4	设备及主要材料清册	水工工艺		
5	冷却塔配水系统安装图	水工工艺	水工结构	
6	冷却塔除水器安装图	水工工艺	水工结构	
7	冷却塔淋水填料安装图	水工工艺	水工结构	
8	冷却塔进水管安装图	水工工艺	水工结构	
9	集水池防冻管道安装图	水工工艺	水工结构	
10	冷却塔进风口喷水管	水工工艺	水工结构	
11	排烟冷却塔地基处理	水工结构	勘测	
12	塔筒塔基施工图	水工结构	水工工艺	风筒、支柱 及基础
13	塔筒附属设施施工图	水工结构	电气	扶梯、爬 梯、栏杆等
14	淋水架构施工图	水工结构	水工工艺	
15	玻璃钢烟道布置及安装	水工结构	总图、热机、脱硫、热控	
16	排烟冷却塔防腐	水工结构		
17	冷却塔进出水口	水工结构	水工工艺	
18	玻璃钢烟道检测平台	水工结构	热机、环保、脱硫公司	
19	塔外烟道支架及基础	土建结构	水工结构	

4 排烟冷却塔设计条件（设计原则）

4.1 设计基本条件

4.1.1 排烟冷却塔设计应满足循环水冷却和烟气排放要求，符合烟气抬升、扩散等环保标准，并考虑烟气排放对冷却塔的影响。

4.1.2 排烟冷却塔宜布置于炉后，在满足建筑间距的前提下减少烟道长度。

4.1.3 排烟冷却塔的设计参数主要包括：循环水量、烟气量、烟气温度、烟气密度、烟气压力及主要化学成份等。

4.1.4 排烟冷却塔除增加烟气系统外，其它与常规冷却塔一致。

4.2 排烟冷却塔特点

4.2.1 排烟冷却塔的配水系统与常规冷却塔基本一致，中央竖井及配水方式要考虑烟道支撑结构的影响。

4.2.2 为降低烟气对塔筒的腐蚀，烟气气流在冷却塔内不宜扩散，排烟口的烟气流速宜控制在 $15\text{m/s}\sim 25\text{m/s}$ ”

4.2.3 影响排烟冷却塔烟气扩散的因素有空气热容量、环境风速、逆温层和相对湿度等。

4.2.4 为满足环保对烟气抬升和扩散的要求，混合气体在冷却塔顶部出口处的平均流速不宜小于 3m/s 。

4.3 供热机组的排烟冷却塔设计

4.3.1 排烟冷却塔冬季供热工况下运行的特点是空气热容量低，机组抽汽量越大，对排烟冷却塔运行越不利。

4.3.2 可采用扩大单元制循环供水系统，纯凝工况按 1 机 1 座排烟冷却塔运行，供热工况循环水系统和烟气排放系统可按 2 机 1 座排烟冷却塔运行。

5 排烟冷却塔和烟道布置

5.1 排烟冷却塔的布置

5.1.1 对于逆流式自然通风排烟冷却塔，脱硫装置宜布置在冷却塔外。

5.1.2 排烟冷却塔的位置应靠近脱硫吸收塔，以缩短塔外烟道距离，降低烟道的费用。

5.1.3 排烟冷却塔的外露铁件、管道和机械设备均应采取有效防腐蚀措施。

5.1.4 排烟冷却塔及烟道应有供验收、测试、监测使用的仪表设备的安装位置及设施。

5.2 烟道布置方式

5.2.1 排烟冷却塔烟道的进塔标高应根据脱硫塔出口标高确定。进塔烟道宜采用高位布置，以减小烟道的压力损失；当进塔烟道采用低位布置时，应减少烟道拐弯数量。

5.2.2 烟道数量和直径应根据烟气量和流速计算确定，并经技术经济比较后确定。

5.2.3 排烟口应布置在除水器上部和冷却塔中央；当采用双烟道布置时，排烟口宜对称布置。

5.2.4 在排烟冷却塔的烟道上应设置人孔，其位置宜设在便于出入的烟道侧壁下部。

5.2.5 排烟冷却塔内的烟道在容易积灰处应设除灰孔，除灰孔宜设在烟道底部。

5.2.6 烟道布置应便于运行时的检修和维护。

5.2.7 脱硫装置与冷却塔间的烟道宜设置不小于 1% 的纵向坡度，且坡向脱硫装置，以便于烟道内凝结水的收集和处理。

6 公司排烟冷却塔技术优势

冷却塔排烟技术设计研究的重点内容包括：

- 排烟冷却塔热力性能分析和计算；
- 进塔烟道选材及结构形式的研究；
- 排烟冷却塔特殊防腐体系研究；
- 排烟冷却塔塔体开洞结构计算和稳定性分析；

6.1 排烟冷却塔热力性能分析和计算

冷却塔排烟技术的关键是让烟气按排量及温度参与冷却塔的热力计算，从而确定冷却塔的冷却能力（修定冷却塔的淋水面积及高度等）。另一方面，从环境评价方面也要求在排烟冷却塔设计的同时提供烟水混合气体的出口（排烟冷却塔出口）流速、流量和温度，以便确定烟气的抬升高度和扩散浓度。编制《排烟冷却塔热力计算程序》是实现上述目标的重要手段。

北京国电用了 2 年多的时间，通过理论分析和模型试验，在国内首次研究成功排烟冷却塔的热力性能计算方法，并完成了《排烟冷却塔热力计算程序》的编

制，实现了常规淡水冷却塔、排烟冷却塔、海水冷却塔热力性能计算的整合及集成。该软件计算方法和理论正确，具有创新性，数学模型成熟可靠，功能完善，具有广泛的工程实用价值，处于国内同行业领先水平。该软件已通过了电力规划设计总院组织的专家评审和北京国电的技术鉴定，完成了多个冷却塔排烟工程的热力计算，计算结果正确、合理，满足工程设计的要求。对冷却塔排烟先进技术的进一步推广提供了有力的支持。

通过对多个工程排烟冷却塔的热力计算表明：在冷却塔主要外形尺寸相同的条件下，排烟冷却塔的冷却效率高于常规冷却塔。对于 300MW 机组，排烟冷却塔的出塔水温比常规冷却塔低 $0.2\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ ，当排烟冷却塔较高时(比如塔高 120m)，可减少冷却塔面积约 500m^2 ，对于 600MW 机组，排烟冷却塔均可比常规冷却塔减少冷却面积 500m^2 。

6. 2 进塔烟道选材及结构形式的研究

含饱和水蒸汽的净烟气温度一般在 50°C 左右，塔内冷凝液局部 PH 值可到 1，且含有残余的 SO_2 、 HCL 和 Nxx ，会造成对烟道内壁的腐蚀；烟道外部被冷却塔的饱和水蒸汽所包围。且烟道跨度大，支撑高度高，这就要求烟道的选材具有耐化学腐蚀、比重轻、导热率低、在较高温度条件下有较好的力学性能等特点。经相应力学设计的玻璃钢烟道在使用过程中可以满足上述所有的机械，化学和热力性能的要求。

大跨度、大直径玻璃钢烟道的结构设计和力学计算是采用国际上通用的 ANSYS 有限元软件来完成的。国内已投入运行的多个排烟冷却塔的工程实践也表明：国内目前已有的设备和加工工艺有能力生产大直径的玻璃钢烟道。

6. 3 排烟冷却塔特殊防腐体系研究

脱硫后的净烟气通过玻璃钢烟道直接进入冷却塔与水蒸汽混合后排入大气，烟气中的腐蚀介质 (CO_2 、 SO_2 、 SO_3 、 HCL 及 HF) 与水蒸汽接触，凝结的水滴回落冷却塔并在冷却塔筒壁形成较大液滴。这些液滴含有烟气中的酸性物质，局部 pH 值可能达到 1，会在向下流动时对冷却塔的壳体产生严重的腐蚀。冷却塔的防腐处理对冷却塔的结构安全至关重要，由于冷却塔需处理的面积大，塔内湿度高、且不宜维护，因此需要选择附着力强、耐腐蚀性能好、耐久性好，同时又经济的

防腐涂料。为此，我们从排烟冷却塔混凝土腐蚀机理入手，分析了腐蚀介质及腐蚀过程各个阶段的特点，确定了排烟冷却塔防腐试验研究的内容和方法，进行了多种防腐涂料的性能对比性测试和综合价格比较，最终制定了合理的防腐技术体系。

排烟冷却塔外涂层防腐设计原则为：防腐涂料与混凝土表层、金属结构有良好的附着力，涂料具有良好的耐水、耐化学介质、耐冲刷、耐侯、耐老化，保光、保色性能突出，施工方便等。

从已经完成的试验结果来看，国外几家知名公司的防腐产品虽然在性能上存在一定的差异，但均能满足排烟冷却塔特殊防腐的基本要求。国内现在还没有针对排烟冷却塔的专用涂料，但考虑到排烟冷却塔的腐蚀环境并不是十分严酷，因此我们完全有可能在已有的国产防腐涂料的基础上，结合排烟冷却塔的特点，与有关科研院所合作，研制出我国自主知识产权的排烟冷却塔专用防腐涂料。

6. 4 排烟冷却塔塔体开洞结构计算和稳定性分析

目前排烟冷却塔通风筒开孔的直径约在 5~10m 之间，开孔数量一般为 1 孔至 2 孔。这些与机组大小及工艺系统有关。对于一般的冷却塔，在不考虑施工载荷影响的前提下，由于冷却塔几何结构的旋转对称性，在不同风向下的临界风速应该是一样的。但是对于开洞以后的冷却塔，由于失去了对称性，因此不同风向下的临界风速就不同了。这就要求我们计算出不同风向下的临界风速，通过比较不同风向下的临界风速的大小，找出临界风速最小的风向，即临界载荷因子最小的风向，在这个风向下，冷却塔最容易失去稳定性而发生倒塌事故。

另一方面，由于通风筒上孔洞的出现，改变了孔洞周围的壳体刚度及应力分布状态，这就需要对开洞后的冷却塔壳体进行内力计算和稳定分析。

公司已针对排烟冷却塔的结构特点，分析论述了排烟冷却塔稳定性分析方法及有限元模型建立的理论方案，开发了国际通用的 ANSYS 有限元软件进行排烟冷却塔结构分析计算的前、后处理专用程序，对排烟冷却塔的结构特性进行了深入的研究，研究表明：

①冷却塔开洞后其整体稳定安全系数明显下降，但在对洞口周围适当加固后，冷却塔的稳定安全系数明显回升，且不低于未开洞时的整体稳定安全系数。这说

明设计采用在孔洞周围局部加厚的方案是可行的；

②采用人字柱非对称布置的设计方案既有利于烟道安装，又不影响冷却塔的整体稳定性，且环基配筋仍能控制在最小配筋率附近。因此该方案是可行的。

7 排烟冷却塔技术的工程应用

通过多年来的技术攻关和积累，国内冷却塔排烟技术已实现了从无到有的重大突破，国内的第一座排烟冷却塔——北京高碑店热电厂排烟冷却塔已于 2006 年 9 月投入商业运行，三河电厂二期工程 2 座 4500m² 排烟冷却塔是由我公司自主设计的国内首座排烟冷却塔，也于 2007 年 9 月投入运行，天津东北郊热电工程 2×330MW 机组的 2 座 5000m² 排烟冷却塔之 1#排烟塔已于 2009 年 8 月 11 日投入运行，这也是中国国电集团有限公司在国内的首座排烟冷却塔。

除此之外，国内还有 6 个电厂的 10 座排烟冷却塔已投入运行或正在设计和施工中，它们分别是：①大唐国际锦州热电厂 2×300MW 机组的 4000m² 排烟冷却塔，②大唐哈尔滨第一热电厂 2×300MW 供热机组 2 座 3850m² 排烟冷却塔，③国华徐州发电厂 2×1000MW 机组 2 座 12000m² 排烟冷却塔等。

已建和在建排烟冷却塔主要技术参数汇总表

序号	工程名称	烟塔面积	塔高	烟塔数量	备 注
1	华能高碑店热电厂	3000	120	1	投运，脱硫技改 4 机 1 烟塔
2	国华三河电厂	4500	120	2	投运，扩建工程，1 机 1 烟塔
3	天津东北郊电厂	5000	110	2	投运，新建工程 1 机 1 烟塔
4	哈尔滨第一热	3850	105	2	投运，新建工程，1 机 1 烟塔
5	辽宁锦州热电厂	4000	120	1	投运，新建工程 2 机 1 烟塔
6	天津军粮城电厂	5000	110	1	在建、扩建工程 2 机 1 烟塔
7	大连甘井子电厂	4000	120	1	在建、新建工程 2 机 1 烟塔
8	天津南疆电厂	5000	110	2	新建工程 1 机 1 烟塔
9	高碑店热电厂二期	4500	1400	1	新建工程 2 机 1 烟塔
10	石家庄良村热电厂	5500	103	1	在建、新建工程 1 机 1 烟塔
11	徐州发电厂	12000	167	2	新建工程 1 机 1 烟塔
12	广东中山热电厂	5000	129	2	新建工程 1 机 1 烟塔

13	山西神头电厂	12000	150	2	间接空冷排烟塔 1 机 1 烟塔
----	--------	-------	-----	---	------------------

8 设总在烟塔工程中的主要工作

- 1) 优化烟塔工程的总平面布置；
- 2) 协调与烟塔工程有关的各专业的关系；
- 3) 关注防腐和玻璃钢烟道的设计、采购、施工等；
- 4) 协调、把握与脱硫公司的联系配合。