

©赵顺安 著

# 海水冷却塔

Salt Water Cooling Tower



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

责任编辑 林京

E-mail:lj@waterpub.com.cn

北京瑞兴文化艺术中心 / 李路超

Tel: (010) 68311017 63202286-2702

E-mail: art@waterpub.com.cn

www.waterpub.com.cn / art

封面设计

ISBN 978-7-5084-4344-7



9 787508 443447 >

定价: 22.00 元

# 海水 冷却塔

SEAWATER COOLING TOWER

©赵顺安 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

海水冷却塔是沿海地区节约淡水资源与减低海洋热污染的有效途径,在德国、美国、日本等国家采用较多,我国从20世纪90年代开始进行海水冷却塔的研究,先后列入了“八五”、“九五”及“十五”的国家攻关计划,建立了100t/h、2500t/h及14000t/h海水循环冷却塔的示范工程,在海水循环的水处理药剂研究方面取得了丰硕成果,但是,海水冷却塔本身研究却没有进展,作为海水循环冷却技术并不完整。本书着重介绍海水冷却塔工艺原理、设计计算、大型(海水)冷却塔的优化设计方法及作者有关的研究成果,可促使海水循环冷却技术的发展。

本书共分八章,内容包括总论、循环水蒸发冷却基本理论、冷却塔的设计计算、海水冷却塔特性、海水冷却塔塔芯材料、大型自然通风(海水)冷却塔塔型优化、自然通风(海水)冷却塔配水与计算和大型自然通风(海水)冷却塔二维优化设计方法。

本书可供从事冷却塔设计、科研、生产制造及运行管理人员阅读,也可供大专院校相关专业师生及从事环境保护的相关人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

海水冷却塔 / 赵顺安著. —北京: 中国水利水电出版社, 2007

ISBN 978-7-5084-4344-7

I. 海… II. 赵… III. 海水—冷却塔 IV. P742

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第163943号

书 名	海水冷却塔
作 者	赵顺安 著
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	850mm×1168mm 32开本 7.125印张 192千字
版 次	2007年1月第1版 2007年1月第1次印刷
印 数	0001--2000册

# 前 言

沿海工业的发展对冷却水的需求量不断增大，直流冷却水向海洋排放大量废热，特别是火（核）电厂每天要有成百万吨的含热废水排放到海洋，对海洋造成的热污染是严重的。首先，表现为局部海域中生物耗氧量和化学耗氧量的升高导致溶解氧的减少。有关资料表明，海水温度每升高  $10^{\circ}\text{C}$ ，生物的代谢速度加快 1 倍，从而引起生物耗氧量的增加。其次，随着海水温度的升高，海水中的溶解氧量下降。其结果是海洋生物对溶解氧需要量增加时，海水中可利用的溶解氧反而减少了。这将使适应于正常水温下生活的海洋动物发生死亡或迁徙；还可以诱使某些鱼类在错误的时间进行产卵或季节性迁移；也有可能引起生物的加速生长和过早成熟。海水溶解氧降低的第二原因是，当海水温度升高时，废物的分解加快，分解的速度越快，化学耗氧量越高，导致海水中的溶解氧不能满足鱼类生存的必需值。为此，《中华人民共和国海洋环境保护法》第四章第三十六条明确规定：“向海域排放含热废水，必须采取有效措施，保证邻近渔业水域的水温符合国家海洋环境质量标准，避免热污染对水产资源的危害。”

社会要进步，工业与能源必然是要发展的，但是，必须减低排向海洋的废热，保护海洋环境。一种有效的途径就是采用海水循环冷却技术，即采用海水冷却塔。海水冷却塔不仅是减低海洋热污染的有效途径，同时，也是沿海缺水地区节约淡水资源的有效方法。

最早的海水冷却塔诞生于 20 世纪中叶的英国。至目前为止，使用海水冷却塔较多的国家是日本、美国、德国等。我国在 20 世纪 90 年代初就对海水冷却塔有了关注，海水循环冷却技术先后被列入了国家“八五”、“九五”及“十五”攻关项目，开始了

海水冷却塔的探索与实践，建立了 100t/h、2500t/h 和 14000t/h 示范工程。主要成果集中在海水的水质稳定剂与杀菌灭藻的药剂研究方面，而海水冷却塔的工艺特性研究却未有进展，作为海水循环冷却技术并不完整。国外有关海水冷却塔的工艺特性、理论与设计等方面技术掌握在冷却塔企业内部，公开的文献也很少见。现在尚没有一本系统介绍海水冷却塔工艺原理的著作。目前，国内已经运行的最大容量的海水冷却塔也只是处理水量约 3500t/h 的机械通风冷却塔，装机容量为 1000MW 机组的冷却水量达 10 万 t/h，冷却塔的淋水面积可达 10000m<sup>2</sup> 以上。随着经济的发展，将会大量使用大型海水冷却塔。因此，更深入地了解海水冷却塔的热力阻力特性、建立海水冷却塔的理论体系及设计计算方法是非常必要的。

本书的宗旨在于将把关于海水冷却塔的一些新的研究成果系统化地介绍给读者，包括对海水冷却塔研究的一些体会及冷却塔基本的理论与计算方法，以适应海水冷却塔发展的要求，同时，也促进海水冷却塔的研究和设计制造工作的不断发展。

海水冷却塔是一个新的环保型工艺设备，是未来沿海地区冷却塔的主要发展方向。海水冷却塔的发展与应用离不开各相关单位和人士的关注、支持和参与。借本书出版之际，对浙江国华宁海电厂的赵华、曾李、张辉等人对海水冷却塔的研究所给予的大力支持表示衷心感谢，同时对西南电力设计院的周显得、廖内平、唐勇、吴浪洲所给予的帮助与指导及我的同事段杰辉、宋志勇、谭水位、黄春花、李福田、张丽娟等同志在海水冷却塔研究工作中所付出的努力一并表示衷心感谢！

由于时间仓促、水平所限，错误或不妥之处在所难免，望读者批评指正。

作者

2006 年 9 月 20 日

## **Abstract**

The salt water cooling tower is an efficient way to save fresh water and prevent the sea from heat pollution. The first salt water cooling tower was erected in England during the middle of last century and many others were used one after another in Japan, Germany, America and etc. The program of salt water cooling tower was ranked as national key scientific and technological project in the 8th, 9th, and 10th five-year plan and a series of model towers with the capacities of 100t/h, 2500t/h, 14000t/h have been built respectively in China. The previous researches only focus on the salt water treatments but the principle of the salt water cooling tower itself. The book has tried to present the aspects about the principle, methods of design based the results of author's researches on salt water cooling tower. It would be helpful to develop the salt water cooling tower in China.

There are eight chapters in this book, including general of cooling tower, basic characteristics of the salt water, the fill, nozzle and drift eliminators, the shape of the large scale natural draught (salt water) cooling tower, (salt) water distribution system, bi-dimensional optimizing design methods of the cooling tower and etc.

This book has been designed as a reference work for engineers who engaged in the research, design, management and manufacture of cooling tower. It is also an optional reference work for students concerning fields.





# 目 录

## 前言

<b>第一章 总论</b> .....	1
第一节 工业循环水与冷却塔 .....	1
第二节 冷却塔的种类 .....	3
第三节 海水冷却塔的提出 .....	17
<b>第二章 循环水蒸发冷却基本理论</b> .....	20
第一节 水蒸发冷却原理 .....	20
第二节 湿空气的性质 .....	24
第三节 蒸发冷却极限 .....	30
<b>第三章 冷却塔的设计计算</b> .....	36
第一节 冷却塔的热力计算分类 .....	36
第二节 冷却塔淋水填料特性 .....	49
第三节 逆流式冷却塔的设计计算 .....	58
第四节 横流式冷却塔的设计计算 .....	69
<b>第四章 海水冷却塔特性</b> .....	81
第一节 海水的物理特性 .....	81
第二节 海水冷却塔的特点 .....	87
第三节 海水与淡水散热特性比较 .....	91
第四节 海水冷却塔热力特性评价 .....	97
第五节 海水冷却塔填料热力特性试验 .....	102
<b>第五章 海水冷却塔塔芯材料</b> .....	109
第一节 国内外塔芯材料发展简介 .....	109
第二节 海水冷却塔淋水填料性能试验 .....	122

第三节	喷溅装置性能试验 .....	129
第四节	收水器 .....	132
<b>第六章</b>	<b>大型自然通风(海水)冷却塔的塔型优化 .....</b>	<b>133</b>
第一节	大型自然通风冷却塔塔型曲线推导 .....	133
第二节	自然通风冷却塔塔型试验 .....	136
第三节	发电厂自然通风冷却塔的优化计算 .....	140
<b>第七章</b>	<b>自然通风(海水)冷却塔配水与计算 .....</b>	<b>148</b>
第一节	冷却塔配水方案 .....	148
第二节	槽管结合配水水力计算方法 .....	158
第三节	虹吸配水 .....	163
<b>第八章</b>	<b>大型自然通风(海水)冷却塔的二维热力     优化设计方法 .....</b>	<b>171</b>
第一节	二维热力优化设计的意义及发展 .....	171
第二节	二维数值模拟基本方程 .....	173
第三节	计算方法 .....	181
第四节	海水冷却塔二维优化设计实例 .....	183
第五节	一维、拟二维与二维设计方法比较 .....	187
<b>附录</b> .....		<b>191</b>
附录 A	饱和水蒸气压力 .....	191
附录 B	湿空气密度曲线图 .....	195
附录 C	湿空气湿度曲线图 .....	196
附录 D	湿空气焓曲线图 .....	196
附录 E	湿空气含湿量 .....	197
附录 F	空气过饱和的热力计算方法 .....	197
附录 G	逆流式冷却塔填料热力阻力特性 .....	199
附录 H	横流式冷却塔填料热力阻力特性 .....	205
附录 I	逆流式海水冷却塔填料热力阻力特性 .....	208
<b>参考文献</b> .....		<b>213</b>

# Contents

## Chapter

<b>I. General</b> .....	1
1. Circulated cooling water and cooling tower .....	1
2. Class of cooling tower .....	3
3. Introduction of salt water cooling tower .....	17
<b>II. Basic theories</b> .....	20
1. Principle of cooling by water evaporation .....	20
2. Property of wet air .....	24
3. Limit of cooling by water evaporation .....	30
<b>III. Formulas of cooling tower design</b> .....	36
1. Class of cooling tower design methods .....	36
2. The characteristics of fill .....	49
3. Design formulas of counter-flow cooling tower .....	58
4. Design formulas of cross-flow cooling tower .....	69
<b>IV. Basic characteristics of salt water cooling tower</b> .....	81
1. Physical characteristic of salt water .....	81
2. A special feature of salt water cooling tower .....	87
3. Heat transfer difference between the salt water and fresh water .....	91
4. Evaluating of the salt water cooling tower efficiency .....	97
5. Fill test of the salt water cooling tower .....	102
<b>V. Fill, nozzle and drift eliminator of salt water cooling tower</b> .....	109
1. History of development of the fill, nozzle and drift eliminator .....	109
2. fill .....	122
3. Nozzle .....	129
4. Drift eliminator .....	132

<b>VI. Optimize of the shape of lager scale (slat water) natural draught cooling tower</b> .....	133
1. Theoretical shape of large natural draught (salt water) cooling tower .....	133
2. Model study on the shape .....	136
3. Optimizing design of cooling tower for power plant .....	140
<b>VII. (Salt) Water distribution system and design</b> .....	148
1. (Salt) Water distribution system .....	148
2. Hydraulic formulas of the water distribution system design .....	158
3. (Salt) Water distribution system with siphon .....	163
<b>VIII. Bi-dimensional optimizing design methods of lager scale natural draught (slat water) cooling tower</b> .....	171.
1. History and purpose of the bi-dimensional optimizing design .....	171
2. Basic equations of the methods .....	173
3. Computational method .....	181
4. An example of bi-dimensional optimizing design of salt water cooling tower .....	183
5. Comparing with one dimension and approximate bi-dimension method .....	187
<b>Appendix</b> .....	191
A. Pressure of saturation water steam .....	191
B. Chart of wet air density .....	195
C. Chart of humidity of wet air .....	196
D. Chart of enthalpy of wet air .....	196
E. Chart of water vapor content of wet air .....	197
F. Formulas of heat transfer of super saturation air .....	197
G. Test results of heat transfer and resistance of fill for counter-flow cooling tower .....	199
H. Test results of heat transfer and resistance of fill for cross-flow cooling tower .....	205
I. Test results of heat transfer and resistance of fill for salt water counter-flow cooling tower .....	208
<b>Reference</b> .....	213

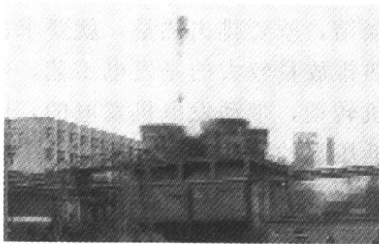
# 第一章 总 论

## 第一节 工业循环水与冷却塔

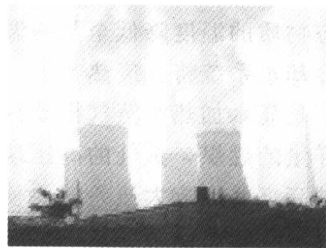
在工业生产与人们的日常生活中，往往需要排出大量的废热，才能得以维持。可以说工业生产越发达、人的物质生活水平越高，需要排出的废热就越多。如冶金行业，要保证产品质量与正常生产，就需将生产过程中的废热排放掉，以轧板工艺为例，轧板的轧辊在轧压热钢板后温度升高，如果不对轧辊进行冷却，其温度将一直升高，最后生产将无法继续进行，同时轧板质量也无法保证；再如化工行业的蒸流工艺中，需将某气态物质的温度降低至某一温度凝结，就要排出热量，就要求由冷却水系统将其废热带走；废热排放量较大的是发电工艺，电厂是靠水加热为蒸气推动汽轮机转动，带动发电机发电的，同样量的燃煤，蒸气的高压端与低压端的压差越大，发电效率才越高，要形成大压差就要使汽轮机末级叶片排出的约 500℃ 高温蒸气降温凝结为水，形成真空，真空度（真空中的绝对压力大小的标志）的好坏与蒸气冷却后的温度有关，温度越低真空度越高。蒸气的热量需要用冷却水将其带走。人们生活中也处处可见废热的排放，如建筑物内的空调系统、冷库系统等，就需要冷却水将其中的废热带走或排向大气。所以，要进行生产、提高生活水平必然相伴的是排出大量废热。这种废热的排出一般是通过冷却水带向环境或遗散向大气的。在火力发电厂中，燃料燃烧的能量仅 40% 转化为电能，12% 随烟气排放，48% 随冷却水排放掉。核电站的能量仅 33% 转化为电能，其余的 67% 均变为废热全部由冷却水带走。一台 1000MW 的燃煤电厂需要的冷却水量可达  $10^5$  t/h。这就是为什么冷却水用量占

工业总用水量的 80% 的原因。较经济的办法是利用已有的江、河、湖、泊或海洋作为冷却水的水源，经过工艺装置后将带热的水排回江、河、湖、泊或海洋中，热量由江、河、湖、泊或海等散向大气。

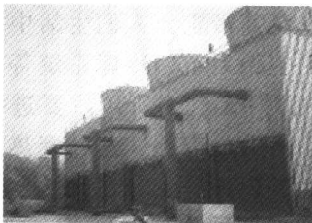
随着冷却水用量的不断增大，很多江、河、湖、泊资源已经用尽，或由于远离这些水源、取水工程投资过高等原因，冷却水就必须循环使用。要循环使用，就必须把冷却水中的热量在短时间内散发掉。这种把循环冷却水中的热量在短时间内散发到大气中的装置就是冷却塔，即冷却塔是将冷却水在其内与大气充分接触，使水的热量传给大气的装置。冷却塔成了工业生产的一个组成部分，凡有工业文明的地方，便随处可见到冷却塔的身影，如图 1-1 所示为冶金、电力、化工及民用的冷却塔。



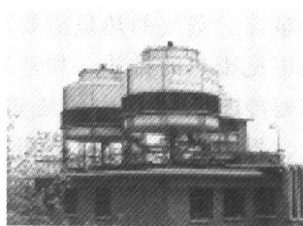
(a)



(b)



(c)



(d)

图 1-1 用于不同行业的冷却塔

(a) 冶金；(b) 电力；(c) 化工；(d) 民用



## 第二节 冷却塔的种类

### 一、冷却塔的种类

经过 100 多年的发展，冷却塔根据使用条件、目的与地区等形成了很多种类与形式，总体可按以下几种方式进行划分。

#### 1. 按通风方式分

##### (1) 自然通风冷却塔。

1) 自然通风逆流式冷却塔，通过塔筒内外空气密度差产生空气流动，水与空气的流动方向相反。

2) 自然通风横流式冷却塔，通过塔筒内外空气密度差产生空气流动，水与空气的流动方向相垂直。

##### 3) 自然通风干式冷却塔。

##### (2) 机械通风冷却塔。

1) 抽风式机械通风逆流式冷却塔，由风机动力产生空气流动，水与空气的流动方向相反，风机为抽风式。

2) 抽风式机械通风横流式冷却塔，由风机动力产生空气流动，水与空气的流动方向垂直，风机为抽风式。

##### 3) 鼓风式机械通风逆流式冷却塔，风机为鼓风式。

(3) 混合通风冷却塔。由风机动力与塔筒内外空气密度差同时产生塔内空气流动，可以是横流式，也可以是逆流式。

#### 2. 按水气接触方式分

水与大气的热交换主要通过蒸发传热与接触传热两种方式，将水的热量传给大气的冷却塔称为湿式冷却塔，简称湿冷塔。湿冷塔的传热效率高，冷却极限是空气的湿球温度，而缺点则是蒸发使部分冷却水损失到大气中，造成水资源浪费，余下的水由于含盐量增大，还需进行水质稳定处理，否则，造成工艺设备的腐蚀或结垢。为节约用水，缺水地区只能使用干式冷却塔，简称空冷塔，空冷塔是将热水的热量传给散热金属片，散热金属片与空气通过接触传热的方式将热再传给大气。空冷塔没有蒸发，所



以，循环水不损失，可节约用水。但是，空冷塔效率低，冷却极限为空气干球温度。

#### (1) 湿式冷却塔。

1) 自然通风冷却塔，由风筒内外空气密度差产生抽力，使空气流动。

2) 机械通风冷却塔，由机械风机转动使空气流动。

3) 混合通风冷却塔，在塔筒子的抽力作用的同时，增加风机鼓风或抽风。

(2) 干式冷却塔。即空冷塔，空气与水不直接接触，水的热量是间接传给空气的。

(3) 干湿式冷却塔。冷却塔中安装有空冷塔的散热器，同时也有湿冷塔的填料换热。

#### 3. 按冷却介质分

(1) 海水冷却塔。冷却塔的冷却介质是海水或盐水等非淡水介质。

(2) 淡水冷却塔。冷却塔的冷却介质是淡水。

#### 4. 按用途分

(1) 民用冷却塔。用于楼宇的空调系统、冷库的制冷系统等。分为横流式民用塔和逆流式民用塔。其中逆流式民用塔又分为圆形逆流塔和方形逆流塔。

(2) 工业冷却塔。用于工业生产过程中的冷却水系统中。

#### 5. 按水气流动方向分

(1) 逆流式冷却塔，水流与空气流动方向相反。

(2) 横流式冷却塔，水流与空气流动方向垂直。

(3) 混流式冷却塔，水流与空气的流动方向介于横流与逆流之间。

#### 6. 其他类

还有其他一些用量较少的冷却塔，如喷射式冷却塔、开放式冷却塔、无填料塔等。



## 二、各种冷却塔简介

### 1. 机械通风逆流式冷却塔

机械通风逆流式冷却塔分为抽风式和鼓风式，鼓风式可用于冷却水中含有腐蚀性物质的冷却水系统，为避免风机被损而采用的一种方式，一般常用的

为抽风式。如图 1-2 所示，机械通风逆流式冷却塔主要包括五大部分：风机系统、配水系统、淋水填料、收水器及塔体。风机系统包括风机、电机和风筒。热水通过热水管或槽并由其附带的喷溅装置将热水喷洒于填料顶部，在填料区，热水与空气充分接触将水的热量传

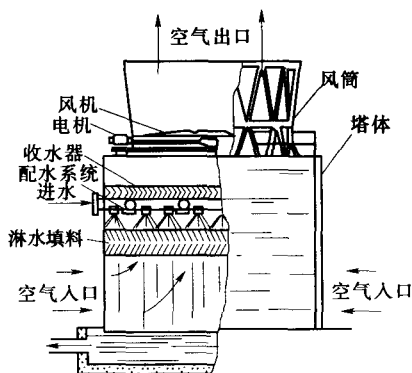


图 1-2 机械通风逆流式冷却塔示意图

给空气，空气是通过位于塔顶部的风机将空气抽出塔外的；风机系统包含风机、变速箱、叶片、传动轴或带、电机及风筒，风筒主要是将部分风机的出口损失的动能回收，并将空气导向高处，减低或消除出现热空气回流至塔进风口内的短路现象；收水器是将空气流动挟带的水滴拦挡于塔内；塔体是冷却塔的骨架，小型塔一般采用玻璃钢结构或钢结构，大型塔一般采用钢筋混凝土结构与钢结构。

机械通风逆流式冷却塔几个部分都很重要，都能影响冷却塔的效率与使用。填料是冷却塔的热交换的核心部件，70%的散热靠填料完成。但填料能发挥效果的前提是配水均匀，若配水损坏或极不均匀，填料效率再高，填料上多处无水，效率也无法发挥。风机系统是塔的另一核心部件，风机的风量大小影响冷却塔的冷却效果，风机的效率高低影响冷却塔的运行费用，若风机出现故障，冷却塔则无法运行。