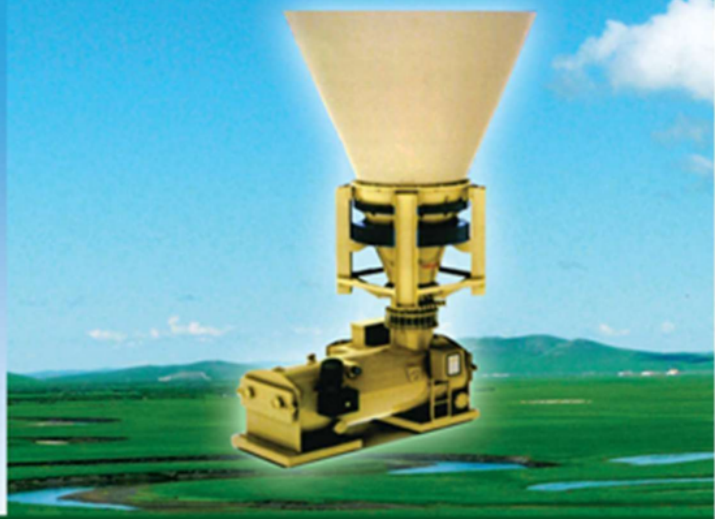


 哈尔滨空调股份有限公司
HARBIN AIR CONDITIONING CO., LTD.
国家能源电站空冷系统研发中心
NATIONAL ENERGY BOARD POWER PLANT AIR COOLING R&D CENTER



空冷技术研究

(2015年度)

主编 杨凤明 刘万里 尹继英 王吉特



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

空冷技术研究

(2015 年度)

主编	杨凤明	刘万里	尹继英	王吉特		
编委	齐志广	朱剑平	龚宇洋	魏家现	裘新	
	冯峰	莫非	袁萌	王立志	解轲	
	武春旭	李凤满	边鑫			



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

哈尔滨空调股份有限公司暨国家能源电站空冷系统研发中心在国家空冷产品国产化中扮演着重要的角色,致力于空冷先进技术的研发与创新。本书是以 2015 年度哈尔滨空调股份有限公司承接的项目为载体,以工程实际遇到的问题为科研出发点,以解决问题并满足工程需要为目标的科研著作;同时,本书也关注国内外先进的空冷技术、环保技术及新能源发展等。

本书共有 10 章,内容涵盖了空冷钢结构各种支撑平台综合性分析,间冷管束性能分析研究,变频电动机特性工程实例研究分析,电厂管道汽锤在 CAESAR 中的应用,空冷大管道噪声 ANSYS 分析,湿式电除尘初步分析,非晶材料初步分析,干雾抑尘和旋转清堵机技术分析,火力发电厂烟气脱汞技术分析,以及新能源发展现状与展望等,并附有火力发电厂空冷岛钢结构安装及验收标准(哈尔滨空调股份有限公司企业标准)。

本书在紧密结合实际工程项目的同时,还关注国内外相关先进技术的发展。笔者希望通过工程实例及简单的语言将笔者掌握的知识及空冷技术发展趋势介绍给广大读者。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

空冷技术研究. 2015 年度 / 杨凤明等主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2016. 4

ISBN 978 - 7 - 5682 - 2160 - 3

I. ①空… II. ①杨… III. ①空气冷却-技术-研究 IV. ①TK264. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 075154 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 9

字 数 / 171 千字

版 次 / 2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷

定 价 / 45.00 元

责任编辑 / 梁铜华

文案编辑 / 梁铜华

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 本社负责调换

科 技 创 新
永 攀 高 峰

杨凤明

哈尔滨空调股份有限公司董事长杨凤明先生
于 2016 年 1 月为本书题词

本书编委会

主编：	杨凤明	刘万里	尹继英	王吉特		
编委：	齐志广	朱剑平	龚宇洋	魏家现	袁 新	
	冯 峰	莫 非	袁 萌	王立志	解 轲	
	武春旭	李凤满	边 鑫			

序

哈尔滨空调股份有限公司是国内最大的电站空冷器、石化空冷器、核电空气处理机组的专业生产厂和出口基地。公司的产品种类、生产规模、技术水平、生产质量、经济效益均处在全国同行业的领先地位。与此同时，随着科学技术的迅猛发展，空冷技术也在不断地更新、进步，公司也明确地认识到科技研发创新将成为企业可持续发展的核心动力。

本书的作者们都是行业资深的工程师，并在国家能源电站空冷系统研发中心的平台上工作了多年，拥有扎实的理论基础及丰富的工程经验，并能够熟练掌握诸如 ANSYS, CAESAR II, CFX, STAAD 等先进的国际通用软件技术，达到国际一流的设计研发水平。

本书是继《空冷技术研究（2010 年度）》《空冷技术研究（2011 年度）》、《空冷技术研究（2012 年度）》与《空冷技术研究（2013 年度）》之后的又一科研成果汇编集，是在继承前几年科研成果基础上的进一步创新与突破。

愿将此书的科研成果与广大读者共享与交流，在行业内营造频繁切磋、交流技术的良好氛围，提高全行业的设计研发水平，为我国空冷行业的发展尽绵薄之力。

A handwritten signature in black ink, appearing to be '刘万里' (Liu Wanli), written in a cursive style.

(哈尔滨空调股份有限公司总经理刘万里为本书作序)

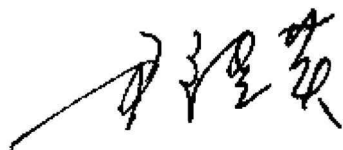
前 言

本书以哈尔滨空调股份有限公司的工程项目及科研项目为实例，内容涵盖空冷系统设计的各专业问题，国内外先进的空冷技术、环保技术，以及新能源发展情况等。

本书共包括 10 章：第 1 章，空冷钢结构各种支撑平台综合性分析；第 2 章，间冷管束性能分析研究；第 3 章，变频电动机特性工程实例研究分析；第 4 章，电厂管道汽锤在 CAESAR 中的应用；第 5 章，空冷大管道噪声 ANSYS 分析；第 6 章，湿式电除尘初步分析；第 7 章，非晶材料初步分析；第 8 章，干雾抑尘和旋转清堵机技术分析；第 9 章，火力发电厂烟气脱汞技术分析；第 10 章，新能源发展现状与展望。此外，本书还附有火力发电厂空冷岛钢结构安装及验收标准（哈尔滨空调股份有限公司企业标准）。

本书由国家能源电站空冷系统研发中心、哈尔滨空调股份有限公司负责编写。本书在 4 位主编的指导、统筹下，在全体编委的辛勤工作下，得以顺利完成。哈尔滨空调股份有限公司北京空冷技术研发中心（国家能源电站空冷系统研发中心北京空冷技术研发中心）全体成员在编辑过程中付出了大量辛勤工作，在此一并感谢。

由于时间仓促，加之作者水平有限，书中难免存在不足和疏漏之处，敬请广大读者批评指正，同时欢迎相关技术人员进行交流学习。



目 录

第 1 章	空冷钢结构各种支撑平台综合性分析	1
第 2 章	间冷管束性能分析研究	7
第 3 章	变频电动机特性工程实例研究分析	14
第 4 章	电厂管道汽锤在 CAESAR 中的应用	19
第 5 章	空冷大管道噪声 ANSYS 分析	29
第 6 章	湿式电除尘初步分析	35
第 7 章	非晶材料初步分析	39
第 8 章	干雾抑尘和旋转清堵机技术分析	44
第 9 章	火力发电厂烟气脱汞技术分析	47
第 10 章	新能源发展现状与展望	51
附录	哈尔滨空调股份有限公司企业标准·火力发电厂空冷岛钢结构 安装及验收标准	57

第 1 章 空冷钢结构各种支撑平台综合性分析

1.1 前 言

进入 21 世纪以来,随着人类对电能的依赖程度日益增加,对大型火力发电厂的需求变得更为迫切。然而,火力发电厂的大量建设不仅对大气和水资源等会造成极大的污染,而且传统的火力发电厂水冷机组会消耗大量的水资源,而我国是一个水资源严重短缺且分布严重不均的国家。火力发电厂直接空气冷却技术的发展和运用,为在严重缺水的煤矿和电力负荷中心区域建设大型火力发电厂既开辟了一条节水、经济、安全、可靠的途径,也保护了水资源。

1.2 直接空冷凝汽器工作原理

直接空冷凝汽器系统的工作原理是,从汽轮机中排出的乏汽在空冷凝汽器中被空气冷却后凝结成水,而排汽与空气之间的热交换是在表面式空冷凝汽器内完成的。在直接空冷换热过程中,利用散热器翅片管外侧流过的冷空气,可将从凝汽器中处于真空状态下的汽轮机中排出的热介质饱和蒸汽冷凝,所凝结成的水经处理后被送回锅炉。为了提高冷却效率,一般在管束下面装有风扇机组进行强制通风或将管束建在自然通风塔内。在现有运行的机组中,强制通风方式由于其可控性能较好等优点而被广泛应用。由于特点突出,世界各国都在开展直接空冷凝汽器的技术研究并逐步推广其应用。

1.3 直接空冷构筑物结构设计条件

直接空冷凝汽器系统是利用环境中的冷空气将进入翅片管的饱和蒸汽冷却。其结构设计的目的是按照工艺要求,将翅片管束及相关设备固定于指定的高度和位置,并保证在自重荷载、风荷载、地震等作用下稳定运行。根据当地温度、湿度、年平均风速、电厂装机容量,直接空气冷凝汽器构筑物平台的高度在 20 ~ 60 m,且平台桁架(梁)的跨度在 9 ~ 13 m。

由于直接空冷构筑物上部的 A 型架、风机桥架等是根据工艺要求布置的,一旦工艺被确定后结构设计的可变化性就大大降低,因此,影响结构工程量的主要因素集中在支撑柱系统和平台桁架(梁)系统中。直接空冷结构平面布置应力求规则,在平面上应使结构形心与结构设备重心重合,以减少结构的偏心作用。

1.4 各种结构体系比较

直接空冷凝汽器系统由于采用大直径轴流风机,其结构跨度一般都较大(基本在 12 m 左右,而特大结构则采用 24 m 跨度),因此,其上部平台大多采用大跨度钢结构桁架支撑(个别工程采用混凝土梁),而下部结构则根据工艺要求可以采用钢柱支撑系统及混凝土柱支撑系统。

当换热面积被确定后直接空冷管束也随之确定。因此,对于直接空冷结构而言,其 A 型架、挡风墙、风机桥架的布置也随之确定。其工程量的变化对项目整体而言可被忽略不计。本次仅研究当下部支撑结构(包括柱子、支撑、梁)采用不同材料(混凝土、钢结构)时结构工程量的变化。

1.4.1 小机组工程量分析

(1) 首先采用全钢结构设计思路进行分析。在进行结构计算时采用钢结构设计软件 3D3S 9.0。按照布置图给定的尺寸进行结构建模,并输入相应的恒荷载、活荷载、地震荷载、风荷载及荷载组合进行结构分析计算。通过调整构件的截面、支撑系统的方式,以及平台桁架的高度等最终得到满足《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)要求的稳定结构。结构第一平动周期 $T_1 = 0.86$,第一转动周期 $T_2 = 0.46$,满足结构周期比 0.9 的要求;位移比、层间受剪承载力比、刚重比、刚度比、剪重比等参数均满足相关规范的要求。通过统计可知,下部钢结构(支撑柱系统和平台桁架)需要的钢结构工程量为 240 t 左右。其中,钢柱子 15 根,钢桁架 22 榀,钢支撑 10 跨。结构布置如图 1-1 所示。

(2) 下部支撑结构采用全混凝土。在进行结构计算时采用中国建筑科学研究院的结构设计软件 PKPM。按照布置图给定的尺寸进行结构建模,并输入相应的恒荷载、活荷载、地震荷载、风荷载及荷载组合进行结构分析计算。通过调整柱子、混凝土梁的截面等最终得到满足《混凝土设计规范》(GB 50010)要求的稳定结构。结构第一平动周期 $T_1 = 1.15$,第一转动周期 $T_2 = 0.95$,满足结构周期比 0.9 的要求;位移比、层间受剪承载力比、刚重比、刚度比、剪重比、轴压比等参数均满足《混凝土设计规范》(GB 50010)及《建筑抗震设计规范》(GB 50011)的要求。通过对下部混凝土结构(支撑柱系统和平台桁架)工程量进行统计知:柱需要混凝土 72 m^3 ,梁需要混凝土 225 m^3 ,大开空楼板需要混凝土 30 m^3 ,总计需要混凝土 327 m^3 。

通过以上两个方案的比较不难看出,对小机组而言采用全钢结构比采用全混凝土结构所使用的原材料成本要增加很多。因两个方案的总体工程量都不是很大,总的工期相差不是很多,故推荐采用全混凝土结构体系(见图 1-2)。

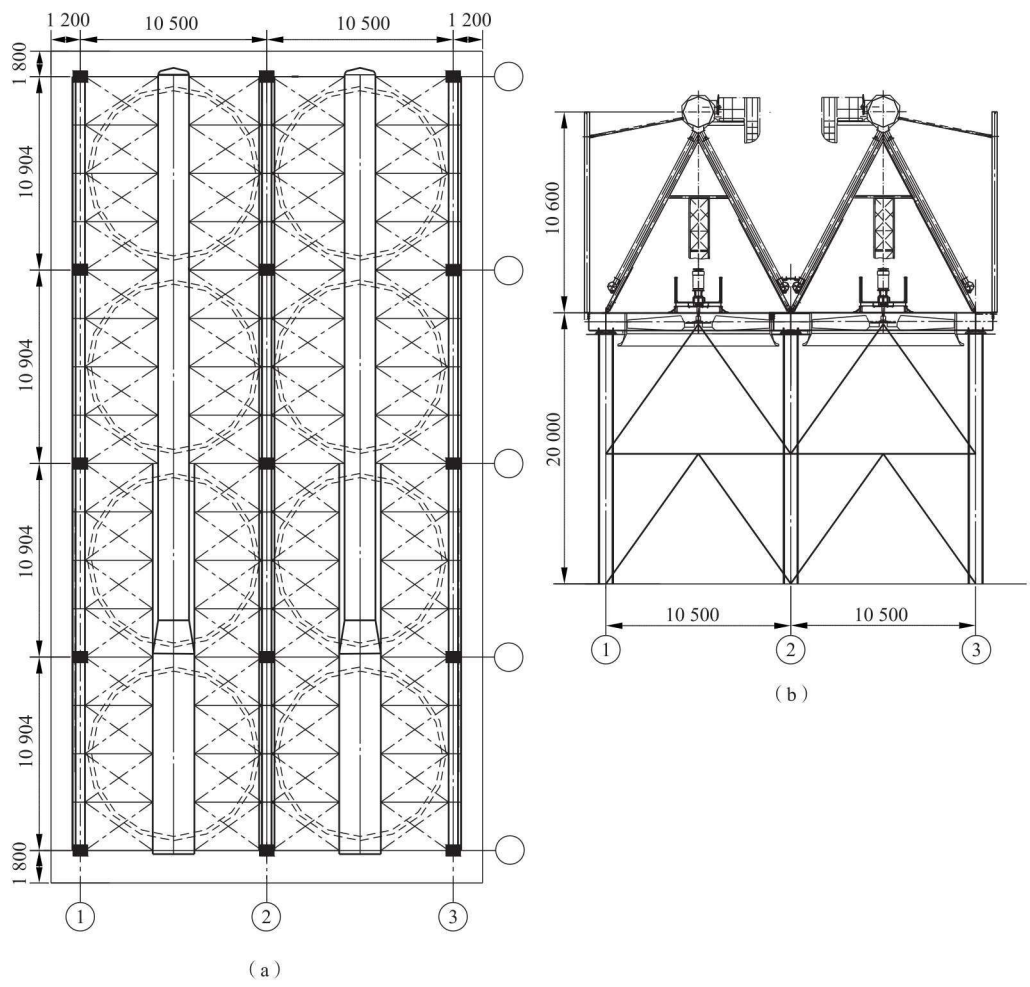


图 1-1 钢结构布置

(a) 直接空冷构筑物平面图；(b) 直接空冷构筑物立面图



图 1-2 全混凝土结构体系

1.4.2 大机组工程量分析

大机组与前述小机组构筑物在上部结构上区别不大,只是 ACC 单元数增加较多,ACC 平台标高增加到 40 ~ 50 m,且其上部荷载基本与前述小机组类似。

(1) 按照全混凝土结构(柱子、梁、大开孔楼板)并采用中国建筑科学研究院的结构设计软件 PKPM 2005 进行结构计算。最终需要的工程量为:柱子 11 247 m³,梁 5 767.6 m³,楼板 609.5 m³。按照《混凝土设计规范》(GB 50010)的要求,按框架结构的伸缩缝布置后如图 1-3 所示。

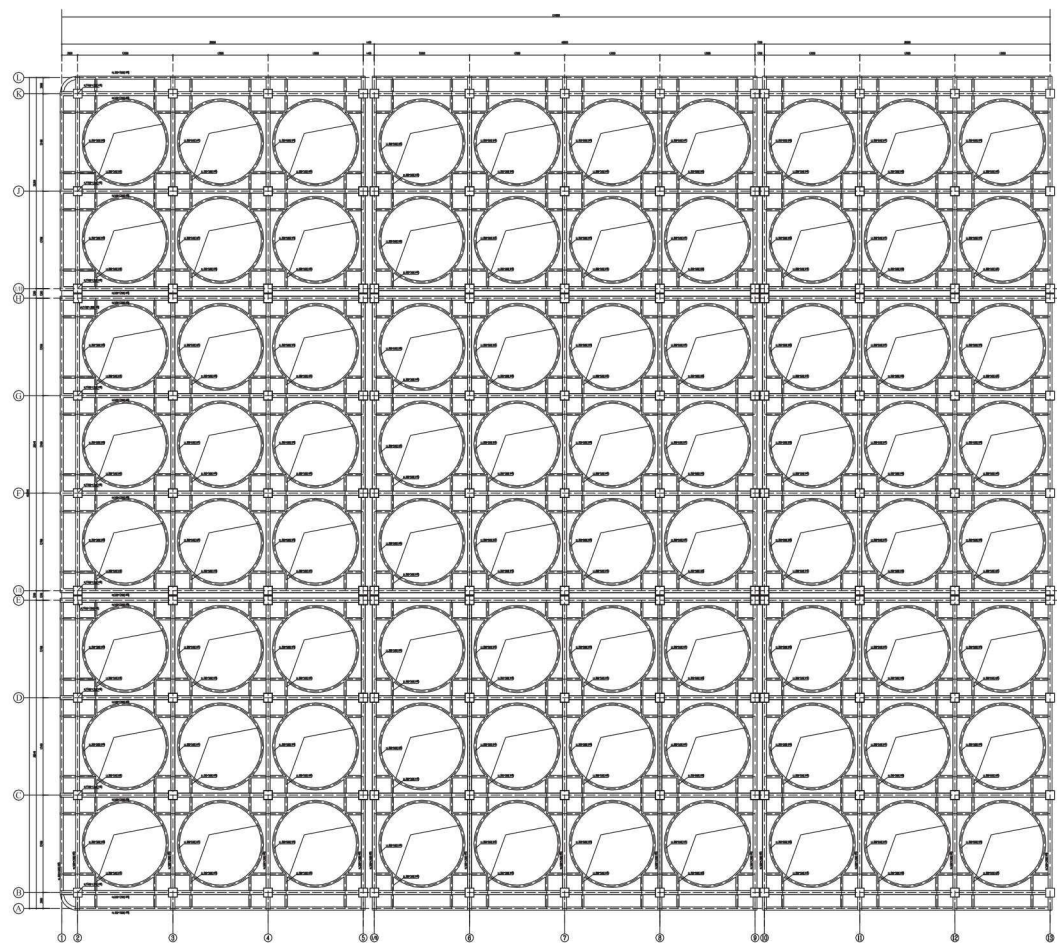


图 1-3 全混凝土结构布置

(2) 考虑采用全钢结构(钢柱、钢桁架、钢次梁)并采用同济大学钢结构设计软件 3D3S 9.0 进行结构计算。由于本构筑物柱子高度达到 50 m,钢柱采用大尺寸的矩形截面。通过初步分析发现,其用钢量巨大,对工程总体投资非常不经济,因此对大机组不建议采用此种方案。

(3) 通过仔细讨论并查阅相关资料，确定采用大直径混凝土管柱加大跨度钢桁架的形式。此种方案很好地利用了钢筋混凝土结构的抗压性能和大跨度钢桁架的抗弯性能。本方案结构布置如图 1-4 所示。

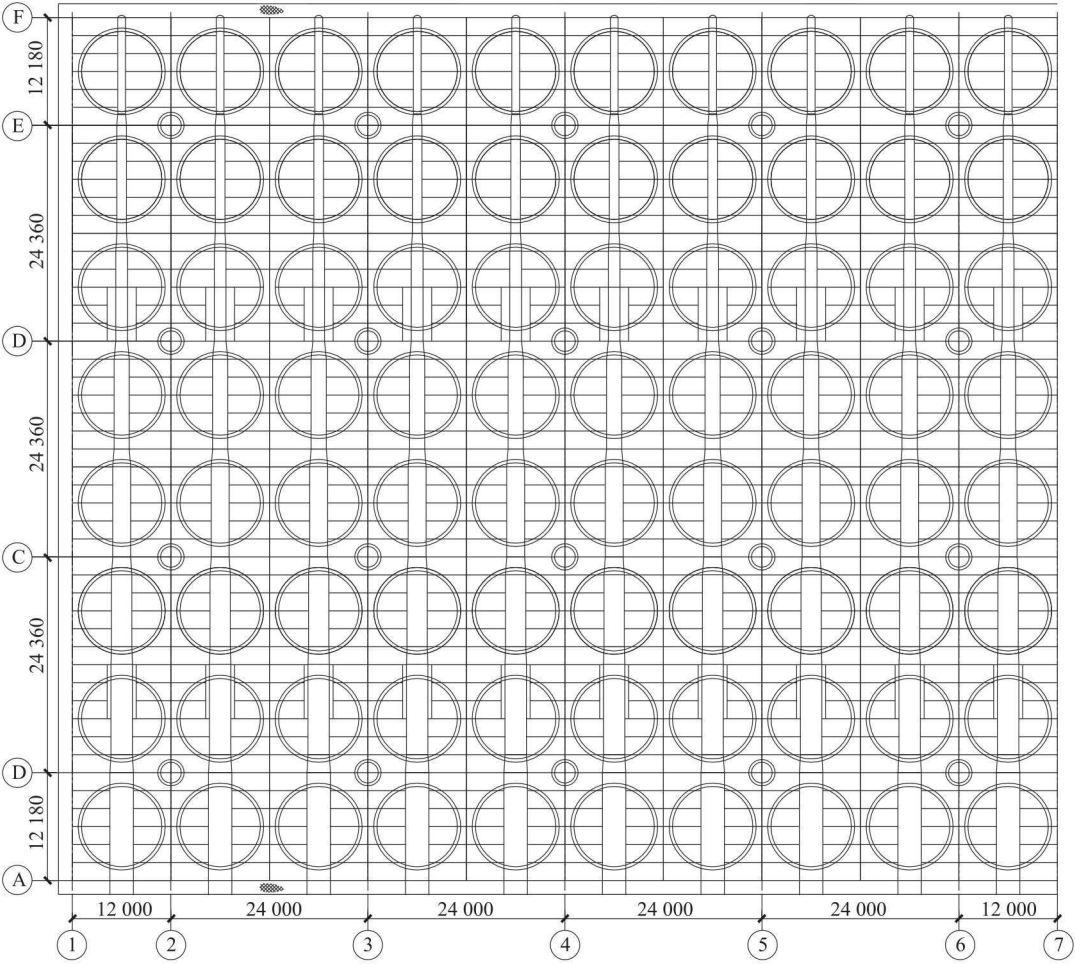


图 1-4 大直径混凝土管柱加大跨度钢桁架结构布置

(4) 通过对比分析可知，对于大型空冷岛采用全钢结构或全混凝土结构都不是最经济合理的结构形式。充分利用混凝土抗压能力和钢结构抗拉能力的大直径混凝土圆管加大跨度钢桁架的结构形式能更好地满足工程需要。

1.5 结 论

通过以上两个项目的简单分析并结合国内外目前已经完成的项目情况，对于 ACC 平台高度小于 15 m、ACC 单元数小于 10 个的小机组直接空冷构筑物，如果工期比较宽

松且有很方便的场地进行混凝土结构施工，则下部支撑体系采用混凝土结构。其经济性比钢结构要好。对于 ACC 平台高度大于 40 m 且单元数比较多的大机组直接空冷构筑物，建议采用底部大直径混凝土圆管柱与大跨度钢桁架结合的形式。介于两者之间的直接空冷构筑物最好采用全钢结构的形式。

第2章 间冷管束性能分析研究

2.1 概 述

本文通过流动数值模拟，对间冷管束的换热性能进行计算分析，以初步评估该型管束的传热系数、流动阻力等特性。此外，通过前期建模也得到了该型管束翅片的重量、（与空气接触的）散热面积等几何信息。

2.2 模 型

该型管束翅片（见图2-1）被紧密套在基管上。一片管束共有多层翅片。翅片采用高低桥的设计方式，如图2-2所示。

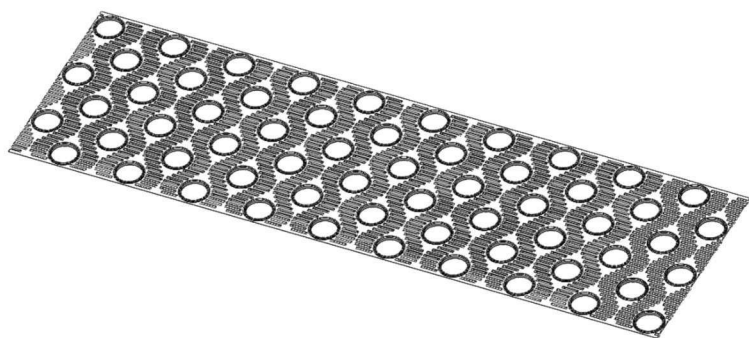


图2-1 新型的6排管束的翅片（单层）

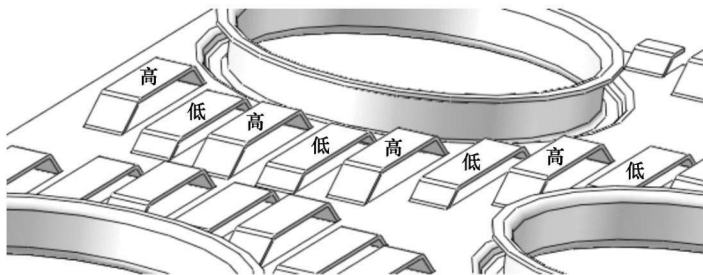


图2-2 翅片上的高低桥布置方式

2.2.1 用于流动与传热的计算模型

翅片的结构具有重复性。为减小计算量，计算模型取为整个结构不能重复的最小单元，如图2-3所示。

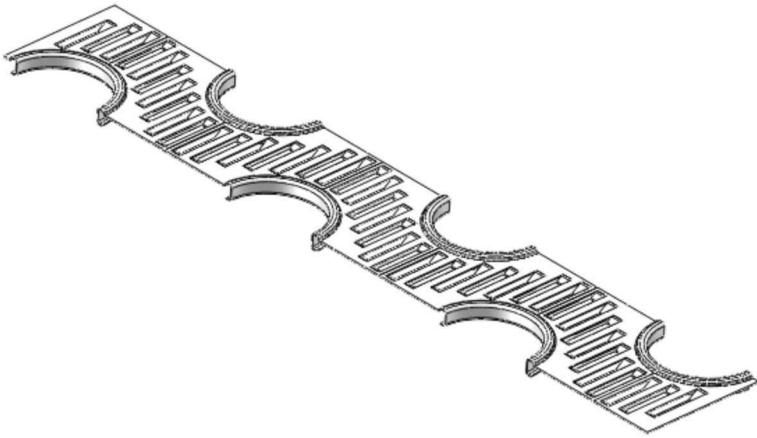


图 2-3 用于计算的翅片部分的最小模块

空气从翅片周围的空间流过。图 2-4 给出了流动模拟需要考察的区域。

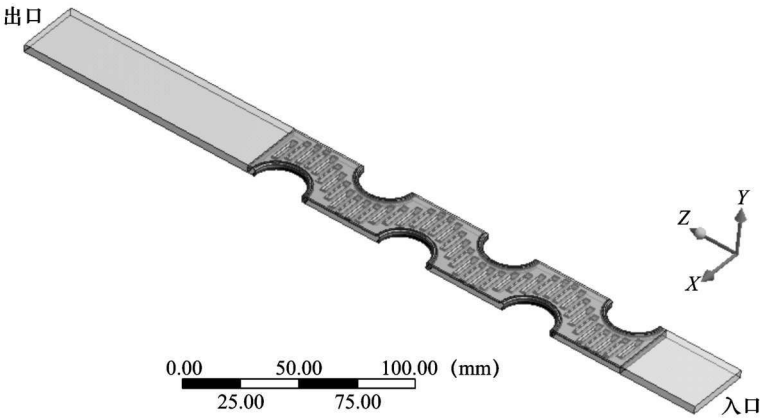


图 2-4 用于流动模拟的流场区域

图 2-5 给出了模拟区域的细部。本次计算不仅要反映空气的流动（对流传热、流动阻力），而且给出了铝翅片的导热。因此，计算模型还含有固体的铝翅片区域。

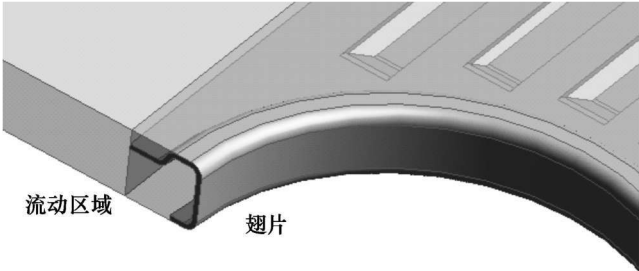


图 2-5 模拟计算区域的细部

2.2.2 计算区域边界条件的设置

对模型进行网格划分后需要指定模型的边界条件。图2-6给出了计算指定的边界条件的示意。空气从入口流入，从出口流出；将左、右边界设定为对称边界条件；上、下表面为周期性边界条件；翅片与基管的接触面为传热边界，以温度恒定的形式给出。

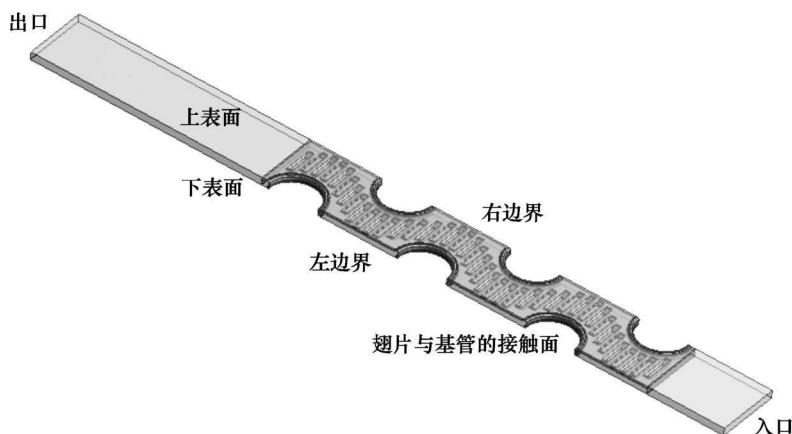


图2-6 计算区域边界条件的示意

2.3 计算结果

计算中以翅片和基管的接触面为传热边界，温度恒定。热量首先从该传热面以热传导的形式传递到翅片与空气的分界面，然后传递进入空气。来流空气的温度为正常平均温度。热量传入空气将以空气的导热、对流传热、辐射传热这3种方式进行。

2.3.1 计算得到的一些定性规律

翅片与空气接触的外表面的温度分布

图2-7~图2-10给出了4种迎面风速不同情况下翅片与空气接触的外表面的温度分布。

可见，从基管的外表面开始的热量首先通过导热在铝翅片内进行传导。铝翅片上的温度分布并不均匀。越靠近冷的来流的部位，温度越低。综合这几种情况，翅片上的最低温度随迎面风速的增大而降低。

2.3.2 空气流域中截面的温度分布

图2-11~图2-14给出了4种迎面风速情况下计算区域中截面的空气部分的温度分布。

可见，空气在流过翅片区域时，总是从入口处的平均温度逐渐吸热升温，但随着