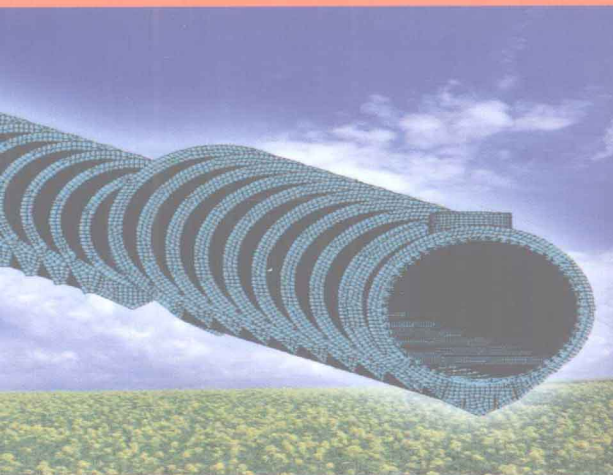


 哈尔滨空调股份有限公司
HARBIN AIR CONDITIONING CO., LTD.

国家能源电站空冷系统研发中心
NATIONAL ENERGY BOARD POWER PLANT AIR COOLING R&D CENTER

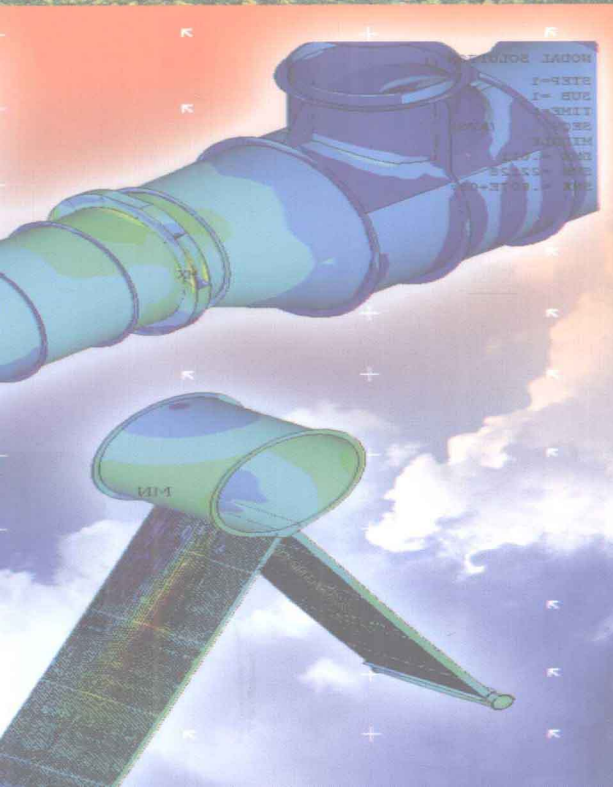
向哈尔滨空调股份有限公司
建企60周年献礼



空冷技术研究

(2011年度)

主编 荆云涛 刘万里 王吉特

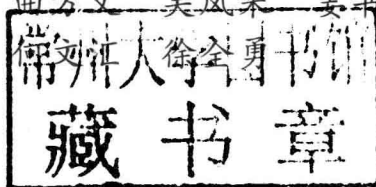


 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

空冷技术研究

(2011 年度)

主编	荆云涛	刘万里	王吉特
编委	齐志广	朱剑平	周顺燕
	裘新	冯峰	龚宇洋
	冯增辉	魏家现	李凤满
	曲方文	吴凤来	姜书寅



内 容 简 介

制造业作为国家的支柱产业,在我国的经济活动中扮演着举足轻重的角色。然而我国的制造业一直处于材料加工的地位,产品科技含量不高、创新不足。作为装备制造业的一员,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,一直致力于技术研发及科技创新。

2012年,哈尔滨空调股份有限公司在建企60周年之际,本书作为公司2011年的部分科研成果汇总,是给哈尔滨空调股份有限公司60周年华诞的献礼之作。本专著共分为9章,内容涵盖了空冷凝汽器内部流场分析,空冷管束的变形分析,主排汽管道应力分析,空冷凝汽器局部应力分布,核级离心风机流场、运行性能、振动特性及抗震分析,蒸汽分配管应力分析,电动汽车充电桩的发展趋势及生物柴油的实际情况。

本专著紧密结合实际项目,是笔者丰富的经验与理论知识融合的成果,力求用工程实例及简单的语言将笔者掌握的知识介绍给广大读者。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

空冷技术研究. 2011年度 / 荆云涛, 刘万里, 王吉特主编. -- 北京: 北京理工大学出版社, 2012. 3

ISBN 978 - 7 - 5640 - 5615 - 5

I. ①空… II. ①荆… ②刘… ③王… 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 (2012) 第 026991 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 9

字 数 / 198 千字

责任编辑 / 胡 静 王玲玲

版 次 / 2012 年 3 月第 1 版 2012 年 3 月第 1 次印刷

责任校对 / 陈玉梅

定 价 / 38.00 元

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题,本社负责调换

序

随着 20 世纪 30 年代德国第一台直接空冷凝汽器的投入使用,标志着直接空冷技术的形成。然而在漫长的岁月中,由于历史的原因及当时的环境影响,这一技术并没有得到应有的重视和推广。直到 20 世纪 80 年代,随着工业的迅速发展和人们生活水准的不断提高,以及水资源紧缺、环境污染日趋严重,直接空冷这一技术才得以在欧洲逐步应用于火力发电厂冷却系统,并逐步走向成熟。我国接触该技术始于 20 世纪 60 年代。1966 年在哈尔滨工业大学试验电站的 50 kW 机组上首次进行了直接空冷系统的试验。在随后的 30 多年间我国虽然建设了一批采用空冷系统的发电厂,但均为国外企业设计、制造、安装,该技术在国内一直属于空白。

哈空调从 1964 年为我国研制出第一台空冷器以来,经过多年的发展已成为国内空冷技术行业的领导者,其一直致力于空冷技术的国产化。作为国内最大的空冷企业,哈空调承建了国内第一台 300 MW 国产化直接空冷机组——内蒙古乌拉山电厂 (2×300 MW)、国内第一台 600 MW 国产化直接空冷机组——中电投通辽电厂 (1×600 MW) 及世界第一台 1 000 MW 直接空冷机组——华电灵武电厂 ($2 \times 1\,000$ MW)。

近年来,国际间的交流与合作,对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用。但我国制造业与工业发达国家相比仍然有较大差距,因此必须加大技术创新,在实践中学习和吸收国外的先进技术,提高自主创新能力。传统的试验性研发方式因其周期长、投入高、指导性差,已无法满足快速发展的市场需求。随着 ANSYS、CAE-SAR II、CFX、STAAD 等大型通用有限元分析软件的出现,科研的方法更为多样化、快速化。

本书的作者代表着国内一流空冷设计水平,有着扎实的理论基础及丰富的实践经验;他们利用软件进行模拟、分析实际产品的性能,并提出相应的改进方案,大大提升了哈空调产品的竞争力。

单丝不成线、独木不成林,本书将其中几个科研成果汇编成册与同行交流,希望通过我们的抛砖引玉,能为我国制造业的发展提供帮助。



前 言

进入 21 世纪以来,我国经济持续快速增长、人民生活水平得到提高的同时,我国经济社会的发展也付出了极大的代价。自然资源的大量消耗、生态环境的大肆破坏已经威胁到了我国经济的可持续发展道路。节约能源、保护环境已成为每一个公民应尽的义务。火力发电厂直接空冷技术由于其节水效果好,得到了迅速的推广。哈尔滨空调股份有限公司作为空冷行业的领航者,投入了大量的精力进行技术研发及科研创新。

本专著以哈尔滨空调股份有限公司的工程项目为实例,全面、系统地介绍空冷系统中管道、流体、管束及核级离心风机的受力分析、力学性能。

本专著共分 9 章:第 1 章由荆云涛、裘新完成编写,主要对电站空冷凝汽器内部流场分布均匀性进行分析;第 2 章由刘万里、周顺燕完成编写,主要对空冷凝汽器管束在不同温度工况下的变形情况进行分析;第 3 章由王吉特、朱剑平、周顺燕完成编写,主要对电站空冷凝汽器大管道应力进行分析;第 4 章由齐志广、周顺燕、冯增辉完成编写,主要对石化空冷器管箱开孔处局部应力进行分析;第 5 章由裘新、齐志广、徐全勇完成编写,主要对核级离心风机气动特性、轴承应力、振动及噪声进行分析,并提出合理解决方案;第 6 章由周顺燕、朱剑平、王吉特、何文汇完成编写,主要验算核电空冷器在强地震作用下的性能;第 7 章由冯增辉、周顺燕、姜书寅完成编写,主要对直接空冷凝汽器蒸汽分配管的应力进行分析;第 8 章由龚宇洋、魏家现、吴凤来完成编写,调研和分析电动汽车充电站项目的可行性;第 9 章由冯峰、李凤满、曲方文完成编写,深入研究二氧化碳养殖海藻提炼生物柴油技术的实施情况及可行性分析。

本专著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,本专著在 3 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,加之作者水平的局限性,对书中存在的不足和疏漏之处,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。

编 者

目 录

第 1 章 直接空冷系统两种直径大管道流场动力学分析	1
1.1 概 述	1
1.2 几何构型与工况参数	1
1.3 网格划分及计算设置	2
1.4 计算结果与分析	3
1.4.1 直径 5.8 m 排汽管道计算结果	4
1.4.2 直径 6.2 m 大管道计算结果	8
1.5 结 论	13
第 2 章 直接空冷系统管束有限元力学分析	14
2.1 前 言	14
2.2 凝汽器管束及其几何模型	14
2.3 有限元模型	16
2.4 管束变形分析	16
2.4.1 工况一作用下的管束变形分析	16
2.4.2 工况二作用下的管束变形分析	18
2.4.3 工况三作用下的管束变形分析	19
2.5 夹板数量与管束变形的关系	21
2.6 夹板刚度与管束变形的关系	22
2.7 结 论	23
第 3 章 百万机组排汽管道力学分析	24
3.1 概 述	24
3.2 几何模型	24
3.3 有限元模型	26
3.4 荷载数据	27
3.5 模态分析	27
3.6 计算结果	30
3.7 结 论	39
第 4 章 空冷器管箱长圆形开孔应力分析	40
4.1 前 言	40
4.2 几何模型	40
4.3 材料参数	42

4.4	有限元模型	42
4.5	载荷定义	42
4.6	分析结果	43
4.7	结论	46
第5章	核级离心通风机流场、运行性能及振动特性分析	60
5.1	概 述	60
5.2	几何模型及网格划分	60
5.2.1	流场及噪声分析计算模型	61
5.2.2	振动振型分析计算模型	64
5.3	参数及设置	65
5.3.1	流场及噪声分析参数设置	65
5.3.2	振动振型分析设置	65
5.4	离心通风机气动性能验证	66
5.5	叶轮受力分析	70
5.6	气动噪声大小及声源位置的结果	71
5.7	叶轮振动振型计算结果	72
5.8	对通风机结构改型的建议	76
5.9	结 论	82
第6章	核电厂公共区域冷却器结构抗震能力分析	83
6.1	前 言	83
6.2	分析工具	87
6.3	规范和标准	87
6.4	几何模型	88
6.5	设计条件	90
6.6	材料参数	90
6.7	有限元模型	90
6.8	载荷定义	92
6.8.1	正常载荷 N	92
6.8.2	热载荷 T	92
6.8.3	动载 (L)	93
6.8.4	部件载荷 (CL)	93
6.8.5	地震载荷 (SL)	93
6.9	分析结果	93
6.9.1	机组应力分析	93
6.9.2	底座构架挠度分析	97
6.9.3	壳体框架挠度分析	100
6.9.4	面板挠度分析	102

6.9.5 锚定机构受力分析	105
6.9.6 模态分析 (表 6-7)	106
6.10 结 论	106
第 7 章 空冷系统蒸汽分配管应力分析	107
7.1 简 述	107
7.2 几何模型	107
7.3 材料参数	108
7.4 有限元模型	108
7.5 载荷定义	109
7.6 分析结果	111
7.7 结 论	117
第 8 章 电动汽车充电站项目可行性分析	118
8.1 背 景	118
8.2 电动汽车的充电模式	118
8.2.1 整车充电系统——常规充电 (图 8-1)	119
8.2.2 整车充电系统——快速充电 (图 8-2)	119
8.2.3 地面充电系统 (图 8-3)	120
8.3 充电市场的设想	121
8.4 风险分析	123
第 9 章 二氧化碳养殖海藻提炼生物柴油技术及经济技术对比分析	124
9.1 引 言	124
9.2 微藻生物柴油的研发现状	124
9.2.1 高油脂微藻的筛选与生理生化调控研究	124
9.2.2 应用基因工程技术构建高油脂工程微藻	124
9.3 微藻生物柴油的技术流程	125
9.4 微藻制油的技术瓶颈	126
9.4.1 微藻的生长速率和规模培养问题	126
9.4.2 藻类中外源基因表达效率问题	127
9.4.3 成本问题	127
9.5 前景与展望	127

第1章 直接空冷系统两种直径大管道流场动力学分析

1.1 概 述

本流体动力学分析是针对某项目前期方案论证而进行的流场分析。直接空冷凝汽器排汽管道内部为蒸汽流场，排汽管道原设计为5.8 m 直径，因为排汽流量增大，排汽主管道直径需作相应的调整，现将排汽主管道直径调整为6.2 m，构型的改变将会对管道内的流场与性能产生较大的影响，因此需要借助必要的流场数值计算与分析来对两种方案作对比，选择流动性能较好的方案。

直接空冷凝汽器排汽管道的设计，除了需要考察结构与强度等因素，还需要考虑管道内的流场特性，其参数指标主要包括管道压阻，蒸汽分配管流量分配的均匀程度以及换热而产生的凝结水量的大小。本计算分析通过数值计算，对比了上述两种构型在3种典型工况下的压降、蒸汽分配管的流量及凝结水量的大小。

1.2 几何构型与工况参数

几何构型如图1-1、图1-2所示。主管道直径5.8 m 的构型严格按照详图建模，包括弯头、导流叶片的尺寸。主管道直径6.2 m 的构型由于暂无详图，特别是导流叶片的布置情况未知，因此参考了直径5.8 m 的详图，做了一些修改，包括大弯头处导流叶片的设置，上升管道与主管道相交处设置导流板，并添加一片导流叶片，如图1-3所示。

选用THA 工况（工况一）和阻塞背压（工况五）进行考察。

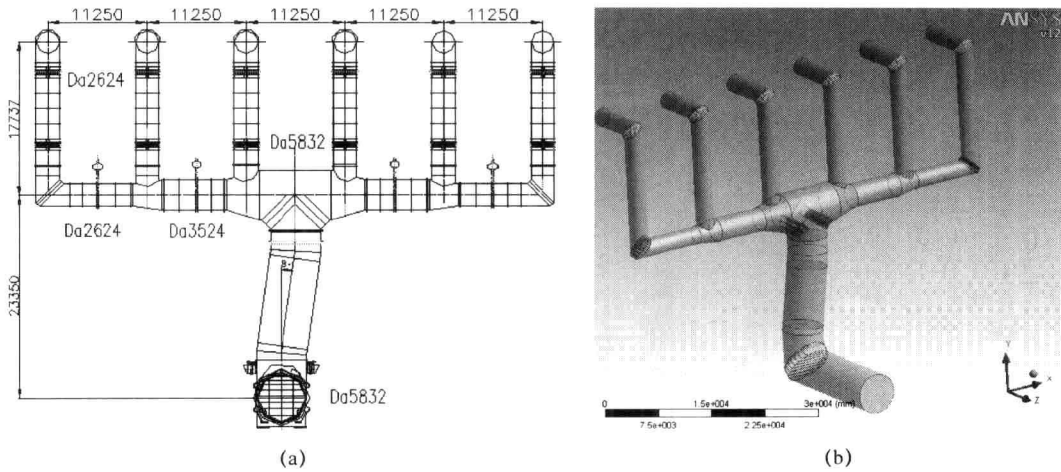


图1-1 直径5.8 m 排汽管道构型

(a) 直径5.8 m 排汽管道设计总图；(b) 直径5.8 m 排汽管道三维模型

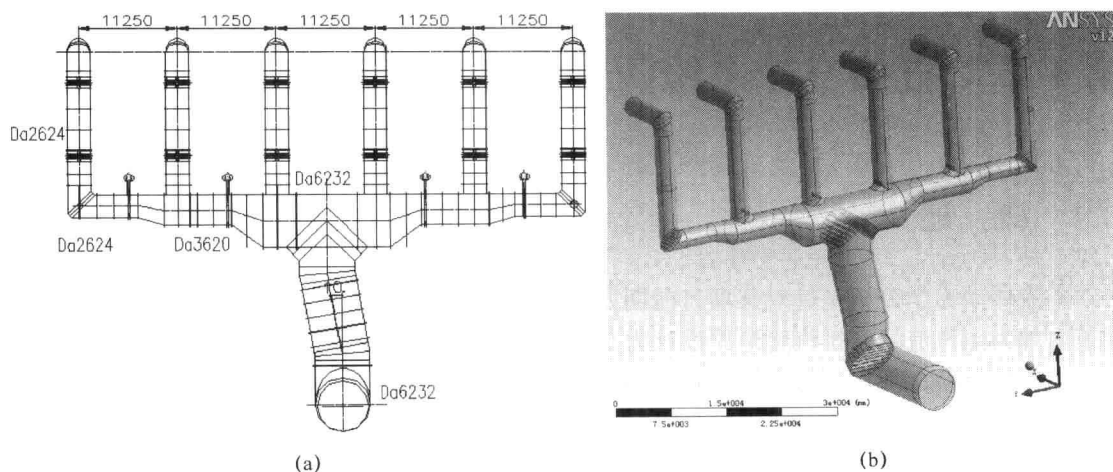


图 1-2 直径 6.2 m 排汽管道构型

(a) 直径 6.2 m 排汽管道设计总图；(b) 直径 6.2 m 排汽管道三维模型

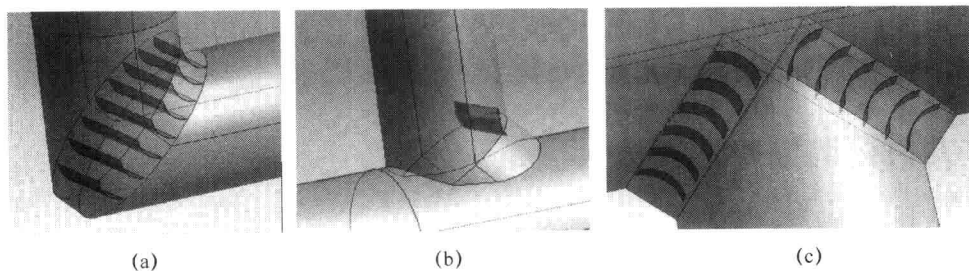


图 1-3 直径 6.2 m 排汽管道构型细节部分

(a) 大弯头；(b) 分配管与主管相交处；(c) T 形分叉处导流叶片

1.3 网格划分及计算设置

采用 ICEM 软件进行网格划分, 由于结构复杂, 利用 free 模式生成四面体网格, 如图 1-4 ~ 图 1-6 所示, 在壁面和导流叶片处进行网格加密, 如图 1-5 ~ 图 1-7 所示。

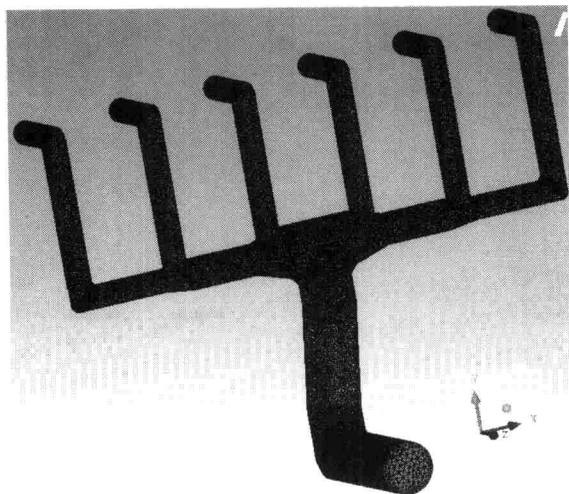


图 1-4 直径 5.8 m 排汽管道构型网格划分

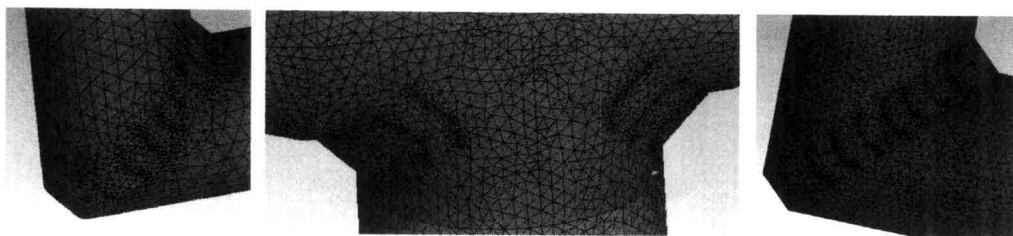


图 1-5 导流叶片处局部网格加密

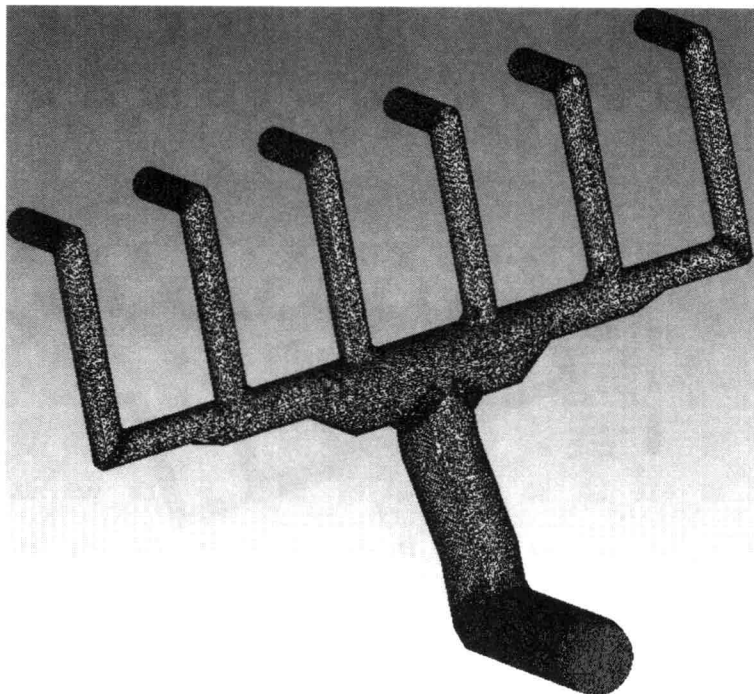


图 1-6 直径 6.2 m 构型网格划分

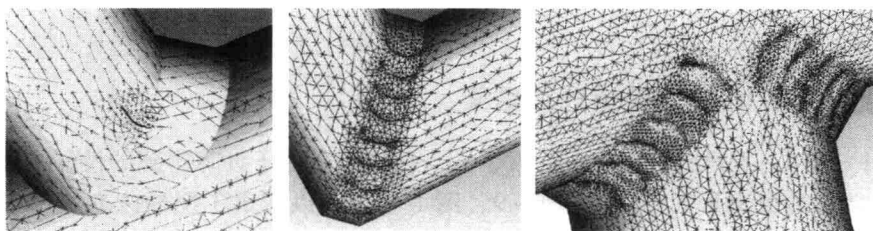


图 1-7 局部导流叶片处网格

1.4 计算结果与分析

计算得到了两种构型在 3 种不同工况下的流场结果，并进行了对比与分析。

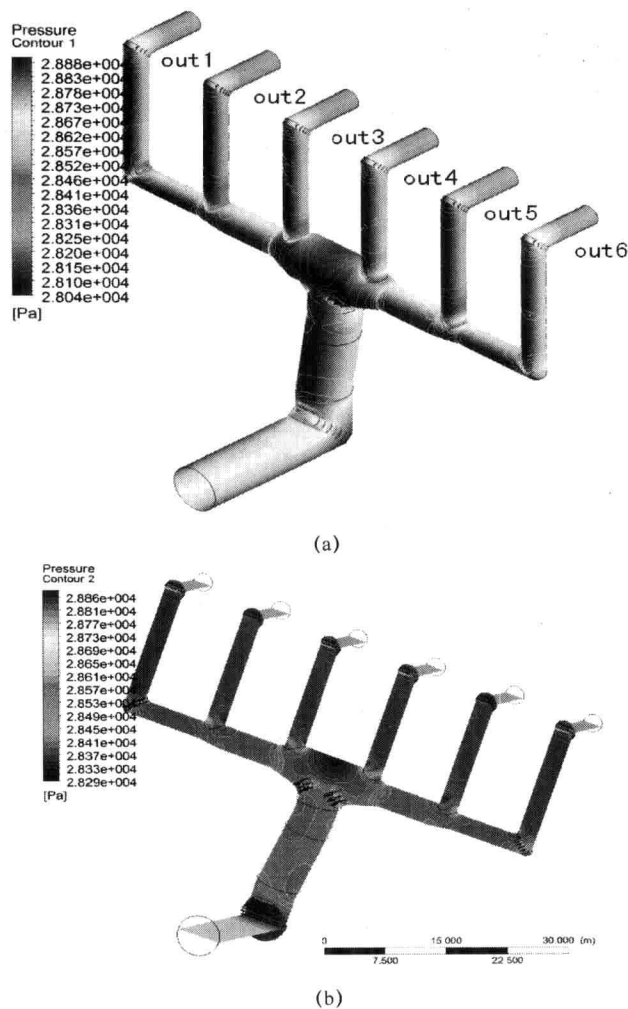


图 1-8 直径 5.8 m 管道工况一时对应的静压云图
(a) 壁面压力云图; (b) 中心面切片压力云图

1.4.1 直径 5.8 m 排汽管道计算结果

表 1-1 ~ 表 1-3 列出了工况一、五、七 3 种运行条件下计算得到的性能参数, 包括出口流量、压降、冷凝水量大小。从图 1-9、图 1-10 可以看出工况的改变几乎不影响各支管的流量分配, 但却能严重影响压阻大小, 运行参数的改变则能直接关系到压阻的变化。而且可以看出流量分配比较均匀, 但仍有改进的空间, 支管 1 与支管 6 更占优, 而支管 2 与支管 5 分配到的流量较少; 压降的曲线与流量的相反, 压降大表明阻力大, 流量少; 随工作条件苛刻程度的增强, 各支管压阻之差亦增大。

表 1-1 工况一（主要考核点）性能参数

项目	Out1	Out2	Out3	Out4	Out5	Out6
流量 / ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	39.89	28.34	36.08	36.42	28.41	40.11
流量 / %	19.06	13.54	17.24	17.41	13.58	19.17
(总压) 压降 / Pa	262.7	337.5	290.4	288	337.2	261.2
冷凝水 / ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.24	1.56	1.94	1.95	1.56	2.25

表 1-2 工况五（THA）性能参数

项目	Out1	Out2	Out3	Out4	Out5	Out6
流量 / ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	36.25	26.09	33.05	33.36	26.15	36.44
流量 / %	18.94	13.64	17.27	17.44	13.67	19.04
(总压) 压降 / Pa	500.9	635.5	548.5	544.1	635	498.4
冷凝水 / ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.67	1.87	2.34	2.36	1.88	2.68

表 1-3 工况七（阻塞背压工况）性能参数

项目	Out1	Out2	Out3	Out4	Out5	Out6
流量 / ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	38.03	27.81	34.94	35.25	27.88	38.21
流量 / %	18.81	13.76	17.29	17.44	13.79	18.90
(总压) 压降 / Pa	961.7	1 215.4	1 048.0	1 038.0	1 214.4	957.2
冷凝水 / ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.99	2.10	2.65	2.67	2.11	3.01

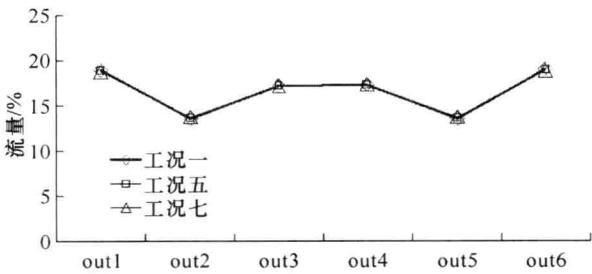


图 1-9 3 种工况下各支管出口流量分配对比

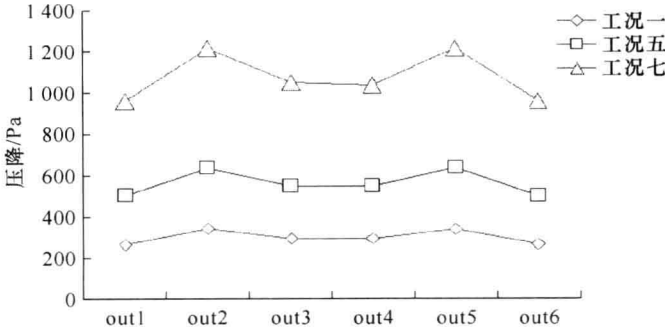


图 1-10 3 种工况下各支管出口压降对比

各工况之间流场的基本特性差异不大, 因此以下着重以工况一的结果进行分析。由图 1-11 的静压云图可以看出在大弯头处, T 形分叉处, 以及小弯头处都有较大压力变化, 特别是在大弯头的拐角处和 T 形分叉顶部, 由于几何结构迫使流动转向并使得局部出现较大压力, 如图中 G 与 K 区, 而压力分布的不均匀性则会带来较大的压阻。从图中还能看出水平主分配管与分配支管连接处的 B、C、D、E 区, 由于未加导流板和导流叶片, 因此出现了局部低压的涡与回流区, 特别是在 B、E 区, 回流区域范围更大, 图 1-12 ~ 图 1-14 的速度云图及矢量图能更加直观地反映出这些区域流动速度的极不均匀性, 同时还具有涡与回流区。涡与回流区的存在, 使得实际有效流道面积减小, 因此支管 2、5 流量最小, 压阻最大; 支管 1、6 尽管最长却流量最大, 压阻最小。改善方法是在支管 2、3、4、5 与分配管连接的 B、C、D、E 处增设导流板和导流叶片。

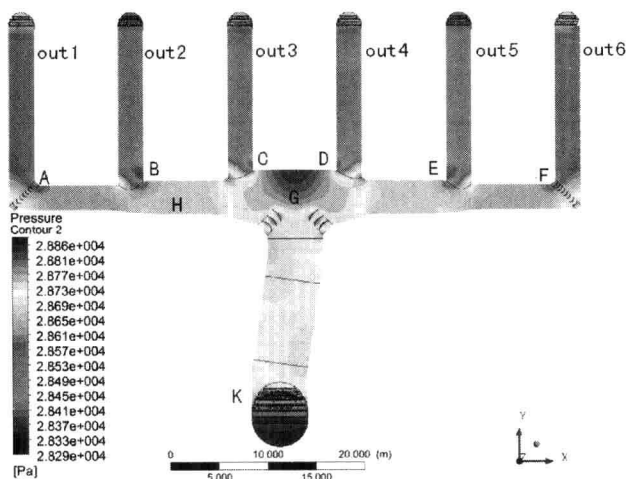


图 1-11 管道中心面的压力分布云图

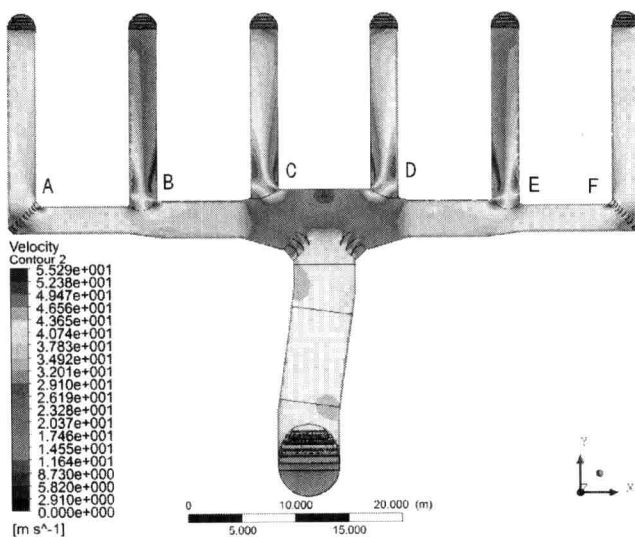


图 1-12 管道中心面速度云图

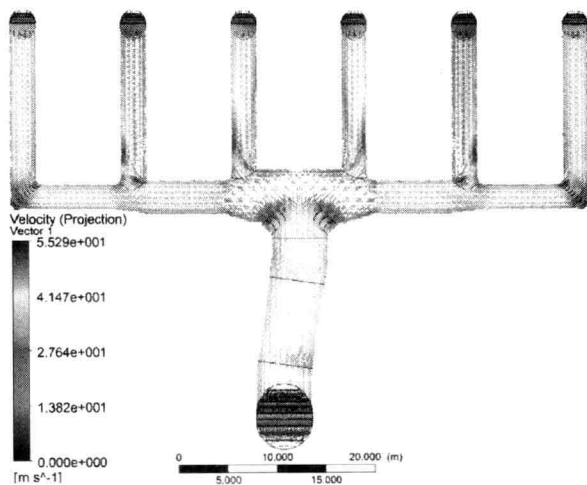


图 1-13 管道中心面速度矢量图

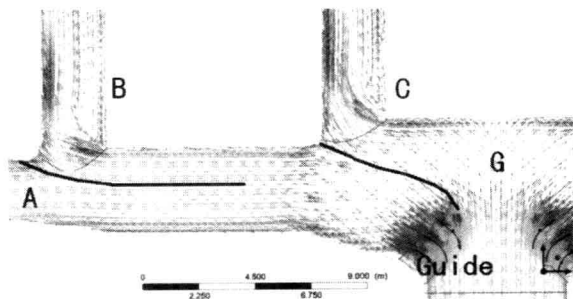


图 1-14 速度矢量图的局部放大

图 1-14 中还能看出 T 形分叉处导流叶片的作用相当明显，流动达到了预期的效果，没有复杂涡结构的存在，注意图中标示的粗线，流体分配比较均匀。如果没有导流叶片，可以断定 G 区将出现复杂的涡结构，阻力加大，而且支管 3 的流量分配将更占优。图 1-15 及图 1-16 给出了整体流线及大弯头处的流线分布，比较整齐，但支管与分配管连接处的 B、C 区域出现较大涡结构，特别是 B 区域。

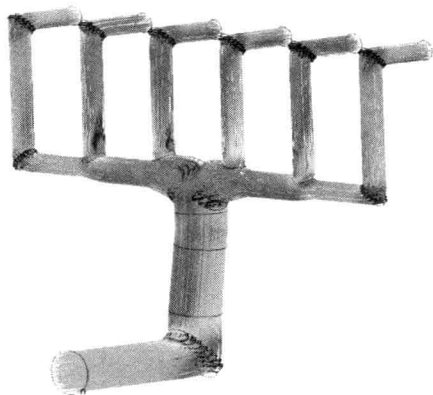


图 1-15 总体流线图

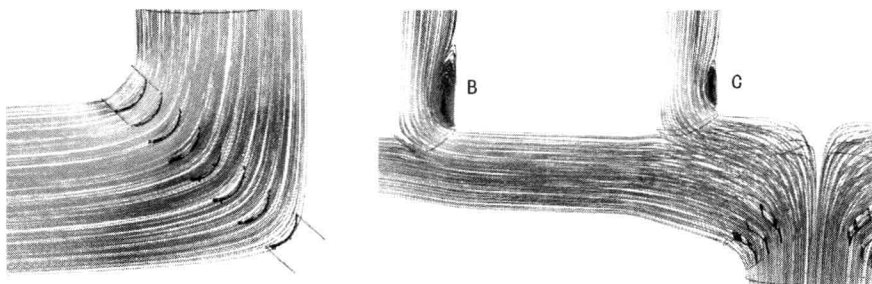


图 1-16 局部区域的流线图

图 1-17 中同时还给出了工况五对应的中心面压力云图, 对比图 1-11, 除数值大小外, 分布特性相似。表明了改变工况对基本流场特性影响不大, 因此不再对另外两个工况进行详细分析与说明。

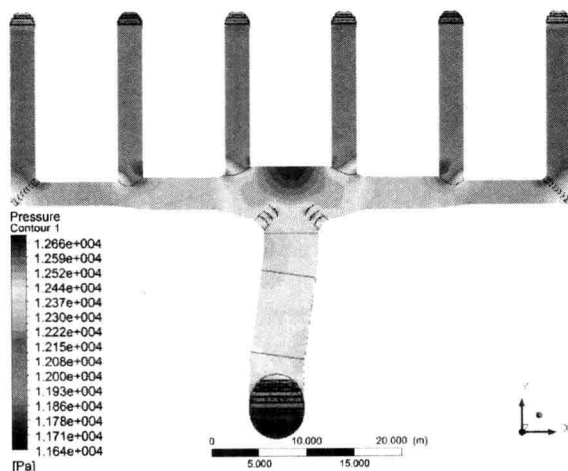


图 1-17 工况五时中心面压力云图

1.4.2 直径 6.2 m 大管道计算结果

图 1-18 为工况一时对应的静压元图表 1-4 ~ 表 1-6 列出了 3 种工况对应的性能参数, 同表 1-1 ~ 表 1-3 对比能看出每种工况下支管流量分配更均匀, 压阻更小, 冷凝水量减少。图 1-19、图 1-20 也反映了同样的情况, 而且压降更均匀。

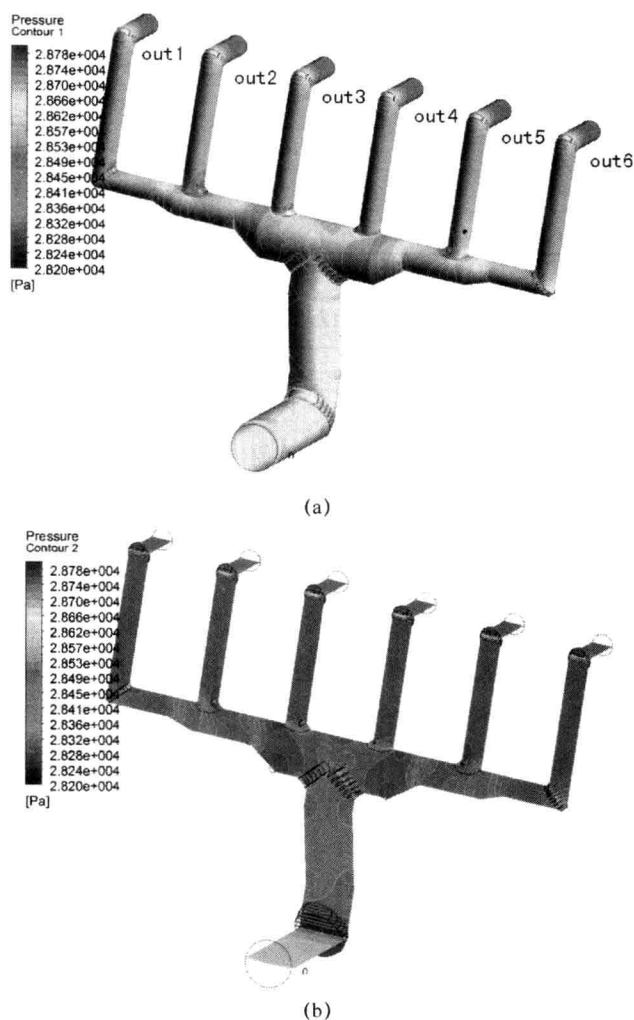


图 1-18 直径 6.2 m 管道工况一时对应静压云图

(a) 壁面静压云图; (b) 中心面切片静压云图

表 1-4 工况一（主要考核点）性能参数

项目	Out1	Out2	Out3	Out4	Out5	Out6
流量 / ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	35.36	34.20	34.69	34.72	34.55	35.72
流量 / %	16.89	16.34	16.57	16.59	16.51	17.07
(总压) 压降 / Pa	189.8	197	193.8	193.6	194.7	187.4
冷凝水 / ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.00	1.88	1.88	1.88	1.90	2.02