

# 航空工程建设

AERO-INDUSTRY ENGINEERING CONSTRUCTION

2020年第2期 总第148期



主管单位 中国航空工业集团公司  
业务指导 中国航空工业建设协会  
编印单位 中国航空规划设计研究总院有限公司

内部资料 免费交流  
准印证号：京内资准字9919-L0337号

## 北京安定循环经济园区

**项目名称：**北京安定循环经济园区

**建设单位：**北京安定生物质能源有限公司

**设计单位：**航空工业规划市政工程设计研究院

项目位于北京市大兴区安定生活垃圾填埋场南侧，设计日处理生活垃圾5100吨、日处理渗滤液规模2000m<sup>3</sup>以及80吨/日的医疗废物处理量等，包含生活垃圾焚烧、渗沥液处理、炉渣综合利用、残渣飞灰填埋、医疗废物处理等多种处理工艺的垃圾，是医废无害化的循环经济园区。园区内各子项之间会实现资源共享、设施共建、物质循环、能量循环，从而形成一个相互联系、科学有效的循环经济模式。项目的模式为工业化以来的传统经济转向可持续发展的经济提供了理论及实践支持，是建设环境友好型社会和资源循环型社会的有效途径。

同时，该项目也是华北地区规模最大的生活垃圾焚烧处理项目。项目主要服务于北京市大兴区、大兴国际机场、亦庄经济开发区等北京市南部地区，建成后将成为北京市南部生活垃圾处理中心，对完善北京市垃圾处理和管理体系，提高北京市生活垃圾资源化处理能力起到重要作用。

多年以来，航空工业规划市政工程设计研究院在市政环境领域深耕多年，其高质量的设计项目不仅为客户创造了极大价值，更为环保工程领域的快速、健康、有序的发展提供了助力。安定循环经济园区项目是目前市政院负责设计的日处理规模最大的生活垃圾焚烧发电项目，是市政院在固废产业领域的最新斩获，将极大提升市政院的技术实力，为绿色北京、无废城市建设市树立又一个标杆项目。



## 解码“新基建”！

新冠肺炎疫情发生以来，5G、大数据、物联网、人工智能等新技术、新应用为代表的新型基础设施建设，在推进疫情防控和复工复产上发挥了巨大作用。

3月31日下午，人民网组织召开了以“数字经济时代的‘新基建’实施路径”为主题的金台圆桌线上研讨会。中国工程院院士邬贺铨，十三届全国人民代表大会代表、中国信息通信研究院院长刘多，十三届全国政协委员、中国致公党中央常委、中国工业互联网研究院院长徐晓兰，以及联想集团、阿里巴巴集团、华为、戴尔科技集团、京东数科、上海诺基亚贝尔、华夏幸福研究院等企业代表共同参会，围绕“新基建”对中国和世界的意义、“新基建”推进过程中所面临的政策需求、机遇风险等问题进行了深入讨论。

与会嘉宾一致认为，数字经济是经济高质量发展的核心，“新基建”是数字经济的基础保障。“新基建”对国民经济发展将起到巨大的推动作用，不仅能在短期内助力稳投资、扩内需和增就业，从长远发展来看，更是提升全要素生产率，实现经济高质量发展的重要支撑。

疫情倒逼需求风口，“新基建”支撑产业升级

新冠肺炎疫情改变了人们的思维方式和生活消费习惯，在线教育、远程办公、在线医疗、云游戏等新消费需求和创新因素的破土而出，正在展示数字经济时代信息消费的优势及巨大潜力。

5G网络作为数字时代不可或缺的支撑，在本次讨论中数次被提起。

“‘新基建’不仅是基建，还是新产业增长支柱、创新投资渠道与新的消费。”中国工程院院士邬贺铨说，在“新基建”中，最主要的就是新一代信息技术中的重要代表——5G。如今，5G的应用已经扩展到产业互联网和智慧城市，拥有增强移动宽带、超可靠低延时、广覆盖大连接等特点。疫情期间，云办公、云课堂、云视频、云商贸、云签约需求高涨。对此，邬贺铨认为，云赋予终端更强的能力，基于云的一些服务，云经济也将随之发展起来。

时间窗口收窄，风险与机遇并存

“‘新基建’的时间窗口非常紧迫的，在全球加

紧部署的窗口期，5G网络建设与应用、工业互联网、人工智能等更需要发力。”刘多如是说。京东集团副总裁、京东数字科技首席经济学家沈建光表示，近些年我国在传统基础设施建设上的投入非常大。目前，如果完全再依靠传统基建，特别是房地产拉动经济，隐患是很大的。

阿里巴巴集团副总裁刘松认为新基建面临的挑战主要体现在四个方面：一是疫情之后，全球供应链的风险增大；二是基建“重硬轻软”的习惯，会容易忽略应用场景和运营方面的价值；三是疫情可能会导致投资主体债务压力增大，投资不足；四是要关注全球产业链的风险。

绿色发展、开放合作成共识

作为先手棋，新基建对国民经济的未来至关重要，如何以开放合作、绿色环保促进相关产业及经济社会的可持续发展成为回应时代之问的必答题。戴尔科技集团全球副总裁吴海亮认为，人才是坚持绿色可持续发展的重要抓手。另外，他还着重强调了新基建应遵循绿色发展理念，从产品设计到供应链、生产、包装、回收，整个环节都要考虑环保与绿色。

“在这个时间点，中国提出加速新基建的号召，非常及时地给整个产业界打了加速剂。作为产业一员来讲，我们觉得给我们带来了巨大机会。”吴海亮表示，戴尔公司对中国经济，尤其现在中国提出新基建，信心非常足，也将积极担当，共同推动新基建更好更快地发展。

常疆解释，开放合作是说全球企业在中国市场的高度参与，是沟通中国和全球市场的桥梁。“同时，在技术标准演进、技术创新方面，也有很多重要的话题和目标，比如要继续全力推动全球开放标准，开源技术以及开放社区的发展，贡献中国强大力量。”

“在新基建过程当中，一方面要加强我们自己的建设，同时整个网络是全球互联互通的，在这个过程中我们要不断加大开放合作。”刘多认为，无论是技术，还是网络，都要通过加大开放合作，才能够在全球产业和网络的建设过程当中，为全球的社会经济发展作出更多贡献。

（信息来源：人民网）

## 成都市天府新区直管区 大林环保发电厂

建设地点：四川省成都市

设计单位：航空工业规划市政工程设计研究院

建设情况：施工中

用地面积：143405m<sup>2</sup>

总建筑面积：63760m<sup>2</sup>

成都天府新区直管区大林环保发电厂项目，建设规模为处理生活垃圾2400吨/日，同时配套污泥协同处置规模300吨/日和餐厨垃圾处理规模200吨/日。处理工艺采用4台600t/d机械炉排炉，配置2台25MW汽轮发电机组。项目总建筑面积63760m<sup>2</sup>。本项目设计理念为“山水林田、茂林修竹”，设计从“山、水、林、田”的设计理念出发，围绕与场地息息相关的龙泉山、蝴蝶湖、竹林、田野4个

角度，构建了以人为本，与自然和谐共生的山林建筑。山——贴合场地周边的山体走势，建筑通过体量的连接及屋盖的处理构成了基本的山势，与龙泉山步行系统对接。石——以建筑体块的堆叠组合，化解大体量对环境压迫感，探索一种建筑消隐方式。水——厂前区结合现有水塘做一个蝴蝶湖，面向参观出入口，有水则灵。屋——参考四川特色的吊脚楼建筑形式，景观、建筑通过斜向支撑实现了灰空间的复合设计。阁——屋面景观空间有多处现代简洁阁台，增加景观的丰富性。径——与龙泉山脉的玻璃栈道、立面上下玻璃楼梯形成横纵步行参观系统，也是山水画中自在的空间语言，也进一步构成了串联以上所有图景的核心线索。借用周边的山、营造内部的水、融合周边的林，打造花园式立体景观。设计通过多样的展示功能平台和灰空间，塑造了不同的建筑立面和屋顶平面多体块组合方式，消除大厂房的巨大尺度，不仅将建筑荫蔽在龙泉山林，同时吸引人群聚集参观游览，达到网红效应，激活场地，实现园区的良性循环发展。





## 泸州市危险废物综合处置及资源化利用项目

建设地点：四川省泸州市

设计单位：航空工业规划市政工程设计研究院

建设情况：施工中

用地面积：51452.06m<sup>2</sup>

总建筑面积：16926.3m<sup>2</sup>

泸州市危险废物综合处置及资源化利用项目拟在泸州市合江县榕山镇点灯山村4、7、8社建设，建设总规模为51800吨/年，包括焚烧系统（设计处理规模16500t/a，对外接收危险废物处理量为15000t/a，本项目自产危险废物约850吨/年）、物化系统（设计处理规模10300t/a，对外接收危险废物处理量为10000t/a）、稳定化/固化系统

（设计处理规模25000吨/年，对外接收危险废物处理量为17000t/a，本项目自产危险废物约5000吨/年），其对外接收危险废物处理量为42000吨/年。项目共处置危险废物种类30类，以主要满足泸州市危废处置，同时建设与之配套的公用辅助和环保设施。

本工程是以“循环经济、绿色工业”设计理念的环保建设项目，其主要功能是处理城市工业产生的多种危险废弃物，利用焚烧、物化、稳定化/固化等工艺对各种危险品进行无害化处理。在“吞噬消灭”大量城市废物的同时，也实现了能量之间良性循环经济，实现了绿色环保的目的。这是市政府设计的第二个大中型危废处理项目，也是在西南地区的第一个危废项目，使市政府的固废领域又有了新的扩展，极大地加深了市政府的技术储备，标志着在环保领域，市政府正向多样化、专业化、高附加值方向发展，奠定了市政府在环保领域领头羊的地位。

## 彭州市龙门山镇危旧房改造及公共服务配套基础设施建设项目

建设地点：四川省彭州市

设计单位：航空工业规划市政工程设计研究院

建设情况：施工中

用地面积：91335.25m<sup>2</sup>

总建筑面积：80715m<sup>2</sup>

项目位于四川省彭州市龙门山镇，设计内容为该地区危旧房改造返建及公共服务配套设施建设，借助龙门山优美自然环境的同时，打造4A级景区，将对龙门山镇的整体风貌与特色起到至关重要的作用。项目总用地面积128240m<sup>2</sup>（192.36亩），分别规划为智慧展馆区，统规

统建/待建区，商业区，公共配套区4大功能板块；总规划面积96269m<sup>2</sup>，其中地上建筑面积69759m<sup>2</sup>，地下建筑面积26501m<sup>2</sup>。

龙门山镇是成都市民夏季的重要避暑胜地之一，每年旅游旺季，停留镇上居住数10万人，旅游资源丰富。项目设计理念以“人性化度假居住商业空间”为理念，在满足平面功能的合理分区布局的前提下，注重建筑的形式美，强调绿色宜人，以清晰的流线设计来合理协调布置各功能分区，从而达到舒适、宜居宜商宜游的最大化效果。同时，辅以大手笔景观穿插，营造出舒适的交通和步行空间。设计中还强调入口广场的景观设计，注重各个大小广场以及景观步道的生态自然设计，着重把握文化物质，空间尺寸等诸多因素对情感的丰富变化，通过色彩的搭配，线与面的穿插，创造出质朴而典雅的气质，提升了镇区的旅游吸引力。





## 西安市灞桥区生活垃圾无害化处理热电PPP项目

建设地点：陕西省西安市

设计单位：航空工业规划市政工程设计研究院

建设情况：施工中

用地面积：116508m<sup>2</sup>

总建筑面积：62620m<sup>2</sup>

本项目为西安市灞桥区生活垃圾无害化处理热电PPP项目，规模为3000t/d，采用4×750t/d的机械炉排炉，2套30MW的凝气式汽轮机及发电机组。

项目为西安市重要的固废资源再生工程，项目的建设运行将极大缓解城市发展造成的“城市病”，保证城市

的正常运行，更合理地配置各种资源，在实现工艺流程稳定安全、实现创造商业价值的同时，真正成为惠及每一位普通西安市民的民生工程，向着生态西安、绿色西安的可持续化宜居型城市迈进重要一步。

针对本项目的特点——周边自然山体丘陵地势、垃圾焚烧发电环保类工程的环保以及西安市文化氛围浓厚的历史因素，提出了“古韵新品”这个新颖且合理性的建筑设计理念。主厂房采用褐铜色的金属板幕墙，结合工艺条件，外立面进行了多处折板变化，体现了整体稳重大气具有汉唐传统建筑的总体风韵。幕墙结合各结构层设计了褐铜色金属板材上的深灰色横线线条，使建筑与功能有机结合。折板幕墙上的折线玻璃幕墙和点窗又在方正大气的工艺体量增加了凝透、善良的现代工业建筑特点，使建筑成为坐落在文化底蕴深厚的关中大地上的又一契合之作。

## 住房和城乡建设部关于发布行业标准《建筑木结构用阻燃涂料》的公告

现批准《建筑木结构用阻燃涂料》为建筑工业行业产品标准，编号为JG/T572-2019，自2019年12月1日起实施。

本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国标准出版社出版发行。

## 住房和城乡建设部关于发布行业标准《玻纤增强聚氨酯节能门窗》的公告

现批准《玻纤增强聚氨酯节能门窗》为建筑工业行业产品标准，编号为JG/T571-2019，自2019年12月1日起实施。

本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国标准出版社出版发行。

## 住房和城乡建设部关于发布行业标准《结构加固修复用玻璃纤维布》的公告

现批准《结构加固修复用玻璃纤维布》为建筑工业行业产品标准，编号为JG/T284-2019，自2019年12月1日起实施。原《结构加固修复用玻璃纤维布》（JG/T284-2010）同时废止。

本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国标准出版社出版发行。

## 住房和城乡建设部关于发布国家标准《建筑给水排水设计标准》的公告

现批准《建筑给水排水设计标准》为国家标准，编号为GB50015-2019，自2020年3月1日起实施。其中，第3.1.2、3.1.3、3.1.4、3.3.4、3.3.6、3.3.7、3.3.8、3.3.9、3.3.10、3.3.13、3.3.16、3.3.20、3.3.21、3.6.3、3.10.10、3.10.13、3.10.15、3.10.22、3.10.25、3.13.11、4.3.10、4.3.11、4.4.2、4.4.3、4.4.12、4.4.17、4.10.13、6.3.9、6.5.6、6.5.20条为强制性条文，必须严格执行。原《建筑给水排水设计规范》（GB50015-2003）同时废止。

本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国计划出版社出版发行。

## 住房和城乡建设部关于发布行业标准《建筑施工门式钢管脚手架安全技术标准》的公告

现批准《建筑施工门式钢管脚手架安全技术标准》为行业标准，编号为JGJ/T128-2019，自2020年1月1日起实施。

原行业标准《建筑施工门式钢管脚手架安全技术规范》（JGJ128-2010）同时废止。

本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国建筑工业出版社出版发行。

## 住房和城乡建设部关于发布行业标准《轻骨料混凝土应用技术标准》的公告

现批准《轻骨料混凝土应用技术标准》为行业标准，编号为JGJ/T12-2019，自2020年1月1日起实施。原行业标准《轻骨料混凝土结构技术规程》（JGJ12-2006）和《轻骨料混凝土技术规程》（JGJ51-2002）同时废止。

本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国建筑工业出版社出版发行。

## 住房和城乡建设部关于发布行业标准《科研建筑设计标准》的公告

现批准《科研建筑设计标准》为行业标准，编号为JGJ91-2019，自2020年1月1日起实施。其中，第5.2.2、5.2.4、5.2.5、5.2.6、5.3.3、5.3.8、7.1.2、7.3.4、8.3.6条为强制性条文，必须严格执行。原《科学实验建筑设计规范》（JGJ91-93）同时废止。

本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国建筑工业出版社出版发行。

## 住房和城乡建设部关于发布行业标准《建筑楼盖振动舒适度技术标准》的公告

现批准《建筑楼盖振动舒适度技术标准》为行业标准，编号为JGJ/T441-2019，自2020年1月1日起实施。

本标准在住房和城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国建筑工业出版社出版发行。

（来源“国家工程建设标准化信息网”）



主管单位 中国航空工业集团公司  
 业务指导 中国航空工业建设协会  
 编印单位 中国航空规划设计研究总院有限公司

#### 顾问委员会

主任 李平  
 副主任 廉大为  
 委员 (按姓氏笔画排序)  
 王伟 刘晋忠 李世民  
 陈远明 张忠良 杨锐  
 周训文 周凯 贺沂  
 张继超 常洪亮 梁相文

#### 编辑委员会

主任 沈金龙  
 副主任 米敬明 刘国新  
 委员 (按姓氏笔画排序)  
 丁杰 卜国磊 王玉平  
 王锋 王笃礼 刘景灏  
 李纲 李中强 肖武  
 张卫才 张立峰 陈阳  
 陈丹璐 金来建 黄春晖  
 贺宏斌 傅绍辉 葛家琪

总编 沈金龙  
 主编 陈海风  
 执行主编 王蕊  
 责任编辑 范蕊  
 出版 《航空工程建设》编辑部  
 地址 北京德外大街12号  
 邮编 100120  
 E-mail hkgejs@avic-apc.com  
 印刷单位 北京奇麒麟印刷有限责任公司分公司  
 发送对象 公司内部及本系统内部  
 印刷日期 2020年04月  
 印数 1500册  
 电话 (010)62038235  
 传真 (010)62038297  
 封面 北京安定循环经济园区

# CONTENTS

## 目录 2020年第2期 总第148期

### 航空能力建设

- 02 焊接仿真技术的应用 李雪罡 田恺  
 05 航空工业某厂表面处理车间智能化建设 李昭 庄宏波  
 12 喷丸对航空用低合金钢渗铬处理的影响研究  
 李翔 姜煜霞 李雪罡

### 研究与探讨

- 17 内蒙古美术馆大承载力空间相贯铸钢节点试验研究及数值分析  
 郭亚楠 樊钦鑫 付锦龙 谢军 王伟 郭小农  
 26 兰州奥体中心体育场超长混凝土结构温度应力分析  
 黄超 景辉  
 29 贵州某综合保障楼地基基础设计 郭鹭 杨会杰  
 33 “四型机场”理念在航空配餐楼中的应用  
 宋晓东 刘烁 张竞竞  
 38 通用机场规划设计要点分析与思考 王锋刚  
 41 江西某50年历史工业厂区给水及消防管网优化改造  
 赵洁 王锋 刘芳  
 45 一种基于LabVIEW与PLC的风洞测控系统设计与流场校测  
 李洋 刘睿 赵云洋  
 50 表面处理车间火灾自动报警系统设计思考  
 邓志远 刘静 陆瑶  
 54 Infoworks ICM在机场雨水排放系统设计中的应用  
 杨擎柱 贾文 施曼

### 工程设计

- 61 某疫苗车间项目净化空调设计 宋猜 董秀芳

# 焊接仿真技术的应用

■ 李雪罡 田恺 [工艺]

**摘要:** 本文基于SYSWELD对某飞机的加强壁板结构进行激光焊接的数值模拟,对其焊接过程进行仿真,并对温度场、应力场以及变形趋势进行预测,根据所得的仿真结果对实际焊接过程中的焊接工艺参数选择以及焊接路径及顺序规划进行指导。

**关键词:** 钛合金;飞机加强壁板;激光焊接;SYSWELD;数值模拟

壁板就是飞机的外壁构件,主要由蒙皮、长桁和隔框经一定的加工工序组合而成。在壁板结构中,桁条的主要功能是支撑、固定蒙皮形状,避免蒙皮局部在经受空气动力时产生过大的形变。钛合金、高强铝合金常用来制造飞机薄壁结构件,在传统飞机薄壁构件制造中,多采用铆接的形式进行连接。相比铆接,焊接具有减轻结构重量,提高效率,降低制造成本,提高结构性能等优点,其激光焊接能量密度较高,焊接效率高、热输入量较小,所以其焊缝性能良好,焊接结构的变形量小,正逐步广泛应用于航空制造业<sup>[1]</sup>。

## 1 概况描述

本次所选模型为某型号飞机整体加强壁板中的一部分,其整体壁板尺寸为560\*560\*2mm,如图1所示。由于此模型具有一定的对称性,所以先选取一组筋条进行焊接仿真。此飞机加强壁板的材料为TC4钛合金。

## 2 有限元仿真

有限元仿真流程如图2所示。

### 2.1 模型描述

此模型为从整体模型中提取出的具有一组加强筋的局部模型,如图3所示。

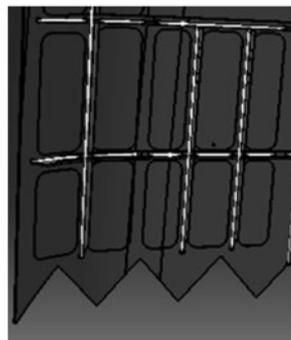


图1 飞机加强壁板的典型特征

### 基于SYSWELD的TC4钛合金飞机加强壁板的焊接仿真流程

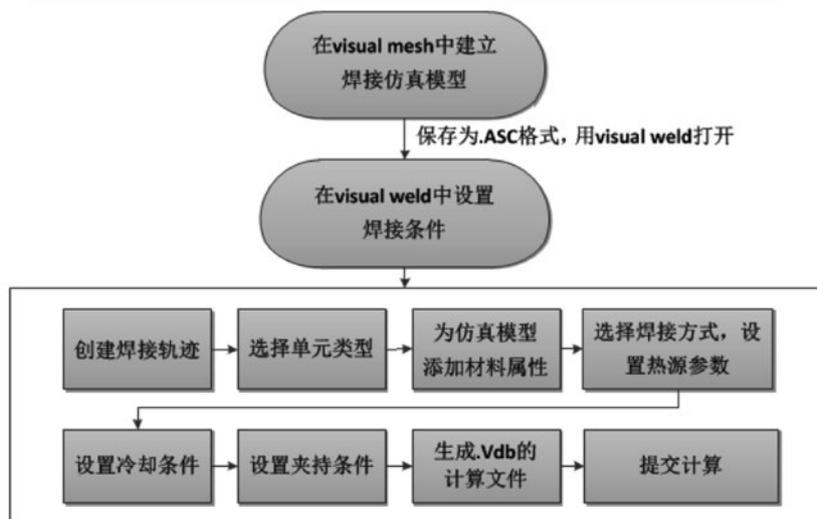


图2 有限元仿真流程

作者简介:李雪罡,男,助理工程师,2017年毕业于北京航空航天大学航空宇航制造工程专业,现就职于航空工业规划动力工程设计研究院。

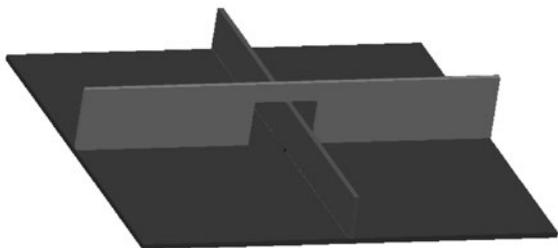


图3 局部模型示意图

## 2.2 有限元模型

由于模型尺寸较大,所以网格划分时要采用由密到疏的过渡。对于腹板而言要求焊缝及其周围区域网格较密,这样才能保证计算的准确性。远离焊缝的区域要相对稀疏一些,这样以来保证模型网格不要太多,从而保证计算的时间不必过长;对于翼板而言,靠近焊接区域的网格要密,保证精度,远离焊缝的区域可以相对稀疏一些;对于焊缝而言,需使得网格尺寸较小且分布均匀。

加强壁板的焊接三维模型如图4所示。

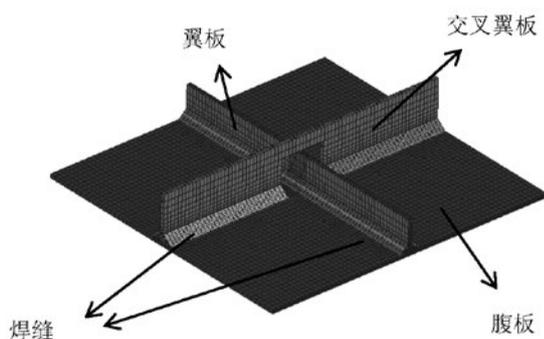


图4 整体三维模型

## 2.3 热源

热源模型的选择取决于熔池形态、传热区域、焊接模拟过程等。本文选取圆锥体热源模型,模型热作用半径沿深度方向线性减小,在热源的每个截面上热流成高斯分布,但热流峰值在厚度方向不变。圆锥热源模型是热流作用半径在深度方向呈一定规律衰减的旋转体热源,这更符合实际激光焊接过程的特点<sup>[2]</sup>。

在热源的设置中主要设置的参数:热源的尺

寸,移动速度,热源角度,能量,效率等等。针对两种焊缝设置不同的参数,两种不同的焊缝焊接速度均为20mm/s,单位长度的能量均为180J/mm。但是由于两证焊缝的截面尺寸不同,因此热源的尺寸有所不同。焊接翼焊接每条焊缝的时间间隔为10s。

## 2.4 冷却条件

采用空气冷却,室温设为20℃,冷却时间为1800s,将整体三维模型的外表面的2D单元提取出来作为热交换面。

## 2.5 夹持条件

采用刚性夹持,使腹板与翼板的法相固定。加持过程分为3个阶段,阶段一:0~30s,加持腹板与翼板;阶段二:30~600s,加持腹板,翼板与交叉翼板;阶段三:600~1800s,释放所有夹持,让模型在自由状态下冷却。

## 3 仿真结果

### 3.1 温度场分布

将温度场上限设置为材料的熔点1500℃,可以看出在焊接过程中母材达到熔化温度,说明材料已被焊透。

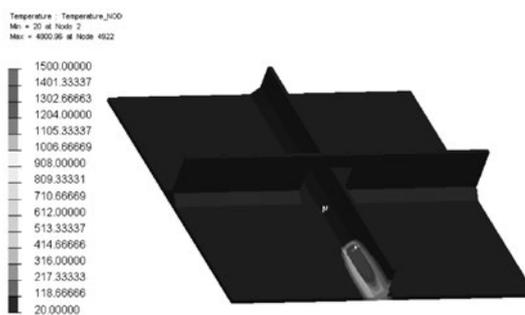


图5 温度场分布

### 3.2 位移分布

从位移分布图中可以看出,最大位移为1.066mm,发生在最后两条焊缝处。虽然结构是对称的,但由于焊接顺序的原因导致最终的位移分布并不对称。

表1 焊接模型概况

腹板尺寸	翼板尺寸	交叉翼板尺寸	焊缝	母材材料	填充材料	焊接方式
144*144*2mm	144*16*2mm	144*24*2mm	三角截面焊缝	TC4钛合金		激光焊接

Kinematics : Displacement, NORM  
Min = 1.62259e-028 at Node 36300  
Max = 1.06644 at Node 13725

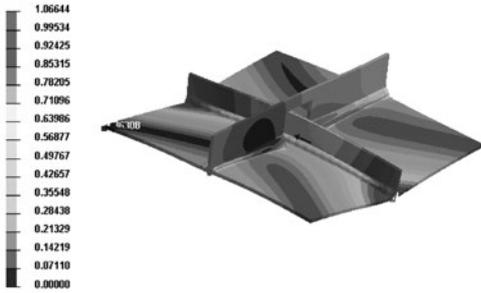


图6 位移分布

### 3.3 变形趋势

将变形量放大8倍进行观察,由图6可以看出翼板的会产生一个弧度,并且圆弧偏向第一条焊缝,腹板的中间部分会有所拱起。

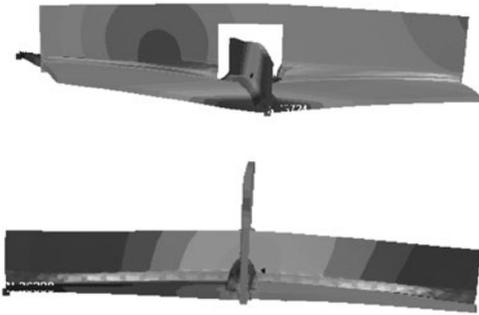


图7 变形趋势图

### 3.4 应力分布

从应力分布图中可以看出应力最大的地方都集中在焊缝处,最大可以达到1019MPa。

Stress : Stress, NOD, Von Mises  
Min = 0 at Node 18051  
Max = 679.759 at Node 13879

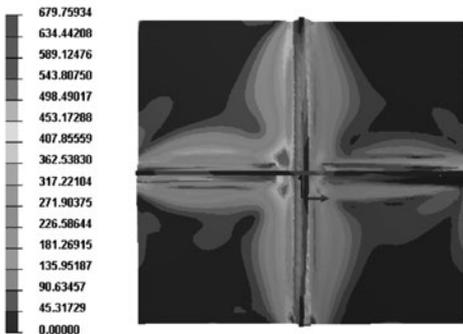


图8 焊接结束时的应力分布

Stress : Stress, NOD, Von Mises  
Min = 1.06548 at Node 36310  
Max = 946.179 at Node 21520

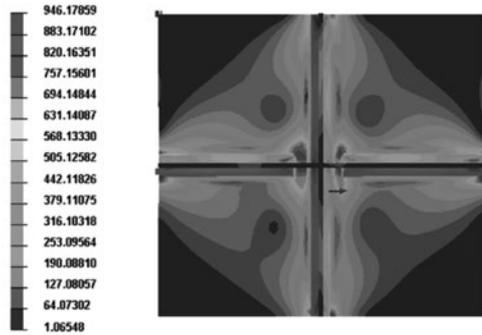


图9 冷却结束后的应力分布

焊接结束后的应力分布与冷却结束后的应力分布有所不同,对比图7与图8可以看出,腹板上的应力由中间部分向外增大。

## 4 结束语

(1) 基于SYSWELD软件建立了TC4钛合金加强壁板的激光焊接三维有限元仿真模型。

(2) 基于此三维有限元仿真模型可以对TC4钛合金加强壁板的激光焊接过程进行仿真,且可以对温度场,应力场以及变形趋势进行预测。

(3) 根据所得的仿真结果对实际焊接过程中的焊接工艺参数选择以及焊接路径及顺序规划进行指导。

## 参考文献

[1] 黄亮. TC4钛合金飞机壁板激光焊接工艺及残余应力研究. 武汉理工大学硕士论文, 2014.

[2] 卢宇峰, 陆皓. 激光焊接圆锥体热源模型及参数研究. 全国焊接学术会议, 2011: 41.

# 航空工业某厂 表面处理车间智能化建设

■ 李昭 庄宏波 [工艺]

**摘要:** 航空产业的表面处理业务受质量、成本、安全以及环境污染等影响,近年来发展受到限制。本文以航空工业某厂的表面处理车间智能化项目的需求梳理、设备物联集成方案以及智能化管控平台的功能实现为主要脉络,描述了表面处理车间智能化建设的路径,以期为后续类似工作的开展提供思路。

**关键词:** 表面处理;智能化;需求梳理;管控平台

## 1 前言

中国自2015年发布实施《中国制造2025》以来,航空航天装备就成为其中大力推动的十大重点领域之一。相对于波音和空客公司在智能制造装备、增强现实、智能穿戴等领域所取得的进步,我国航空工业在数字化、智能化和信息化方面还有较大差距,基本处于初级探索阶段。

对于航空产业中的智能制造,科研工作者和相关从业者已进行了深入的思考并提出了建设性的思考。刘忠<sup>[1]</sup>利用文献计量分析,检索了2000-2015年间航空工业领域的全部SCI期刊论文和会议论文,探究全球航空工业智能制造技术研究的时空分布揭示航空领域智能制造研究的热点。隋少春<sup>[2]</sup>等在现有数字化车间基础上,提出了涵盖基础物理层、中间管理层及顶端智能管控层的飞机结构件智能数字化车间架构,并对智能工艺、智能装备、智能管控等飞机结构件智能制造关键技术进行了研究。

学者们对表面处理车间的自动化和智能化也进行了相应的研究。王殿等<sup>[3]</sup>通过对智能系统在电镀生产线制造过程中的应用研究,构建了智能化生产过程中的标准化、模块化的设计、制造以及储存

固化流程,提出了适应发展的制造业解决方案,对传统的电镀生产线制造给出了一个指导性方案。丁金友等<sup>[4]</sup>介绍了基于模糊控制的智能行车调度系统,该控制系统具有行车行走路线可以任意设定、在生产过程中动态修改等优点,通过在生产线上的运用证明,大大提高了生产效率和生产灵活性。王思醇<sup>[5]</sup>等考察了工艺参数对镀层厚度和内应力的影响,确定了根据镀液中的镍离子质量浓度来调整阴极电流密度,继而改变电镀时间的方法,确保镀层质量稳定、一致。

目前,对于表面处理车间的智能制造,多停留在设备方案和工艺流程,较少涉及物联集成、设备管控、能源管理和三维监控等内容。因此本文在全面推行智能制造的背景下,以中航工业某表面处理车间智能化建设项目为依托,详细介绍了表面处理车间的前期需求梳理、智能化管控平台架构以及实施方案等内容,可为表面处理和其他车间智能制造项目建设提供思路。

## 2 项目介绍

### 2.1 项目概况

本项目为中航工业某厂进入航空产业园建设项目(一期)工程的子项,该厂热表处理车间共包

作者简介:李昭,男,助理工程师,2018年毕业于天津大学工艺专业,现就职于航空工业规划机载工程事业部。

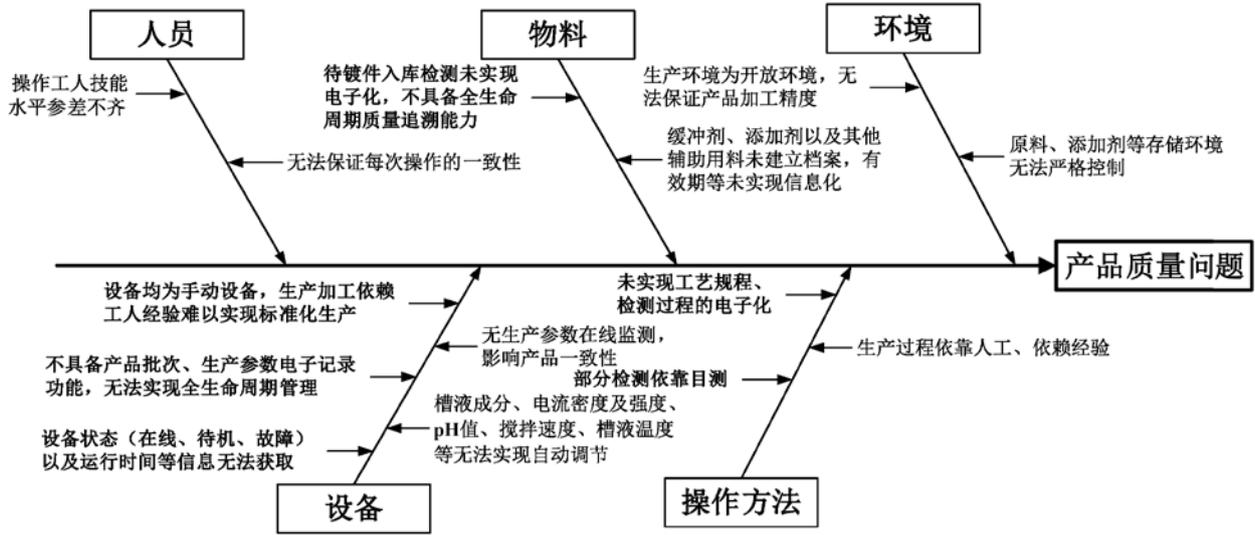


图1 表面处理产品质量问题分析

含3个子车间，分别是表面处理子车间、热处理子车间和喷涂生产车间。该项目中的热表处理属于典型的特殊工艺，基础相对薄弱，本次规划需要从热表处理车间整体角度做好规划，统筹考虑3个子车间，做到设备统一联网、生产管控一体化，其中，本文中介绍的方案重点针对表面处理子车间。

## 2.2 建设需求

对表面处理车间内所有业务流程的分析可知，以该厂为代表的传统表面处理行业工艺环节多，过程管控复杂。根据调研内容总结了车间在质量、成本、效率、安全、环保等方面具体问题，并针对这些问题提出了进行智能化建设的具体需求，主要问题可总结为如下4个方面：

一是影响质量的因素多，质量保障依赖人工。根据梳理结果整理如下图所示的质量问题鱼骨图，由图1可知，人员水平、设备自动化程度、槽液成分管理等对产品质量较大影响，需重点管理。除此之外，物料、生产环境等也会对产品质量产生影响。

二是运行成本高，生产效率重视程度不足。生产中常存在退镀等返工现象，造成成本、效率损失；设备耗能高、无有效管控系统，对于成本缺乏有效的分析及统计手段。

三是现场安全风险较高，人员安全保障面临挑战。例如，危险化学品运输和人员操作安全存在一定风险。

四是污染治理设施运行不稳定，环境保护的底线要求难以完全满足，且该项目所属地对环境要

求高，生产过程中存在地下水污染的风险。

从车间业务需求出发，根据实际情况针对性地提出了智能化建设方案，提升车间技术水平以及管控能力，以解决上述问题。

### (1) 质量

实现过程自动化，提升作业标准化水平，尽量采用自动化等手段减少人为操作；产品全生命周期质量追溯，建立质量数据采集及分析系统。

### (2) 效率成本

建立包含生产计划、工艺流程、物流配送在内的数字化业务管理系统；建设包括能耗管理系统、产品成本分析等项目的成本优化分析系统，实现能耗、成本精细化分析。

### (3) 安全生产

建设自动化表面处理生产线，现场加工过程尽可能减少人工参与，从根源上避免生产过程中工人的人身安全事故的发生；实现设备一体化安全协同控制，设备间互联互通，设备状态数据可在设备之间相互感知，并由控制系统实现系统控制，从根本上避免风险。

### (4) 环境保护

实现生产辅助配套设施状态和能耗等信息的实时监控及管理，避免非必要的生产资源浪费；废水、废气等排出物指标实时在线监控分析，及时发现并解决可能存在的环境问题。

## 2.3 项目建设内容概述

智能制造的特征在于实时感知、优化决策、动态执行等3个方面，其中数据是最重要的内容，

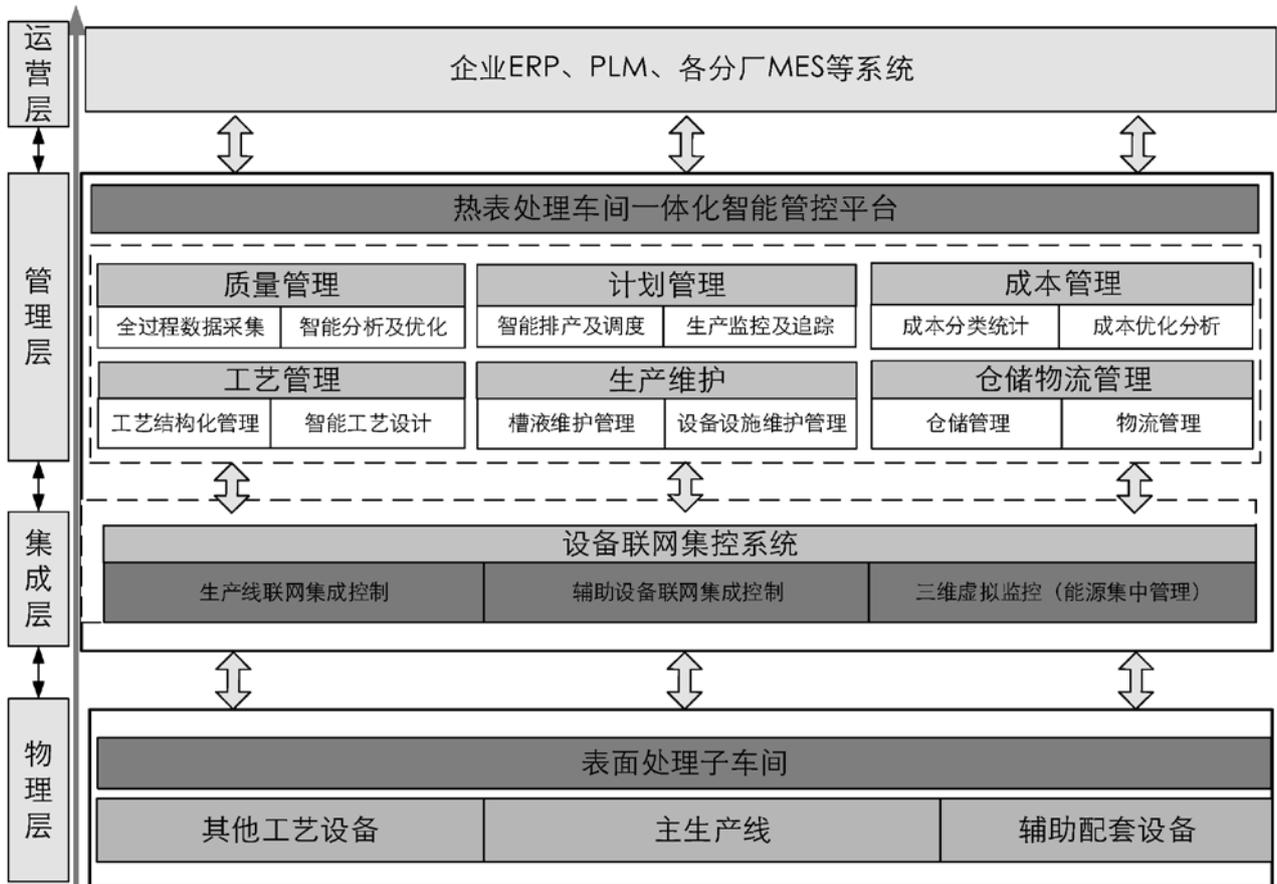


图2 表面处理车间智能化总体框架

因此本项目以数据收集、存储和处理为主要抓手，结合该厂情况，从物理层、集成层、管理层3个层面规划智能化表处车间建设内容并考虑与企业运营层各类系统的接口与集成工作。

物理层主要包括的所有具备联网条件的设备，包括工艺设备、仓储物流设备、辅助配套设备，是实现智能化生产的设备保障，也是数据采集的基础。

集成层目的是建立设备联网管控系统，目的是实现物理层所有设备的集成与数据采集、上传、存储等功能，并且可以实现生产控制指令的向下传递，集成层是数据整理收集的核心。

管理层则是为了实现质量全过程可追溯，提高一次合格率、降本增效、实现生产成本及效率精细化管控等目的，所需建设的覆盖表面处理车间所有管理业务的功能系统，包括质量管理系统、计划管理系统、成本管理系统、工艺管理系统、生产维护系统、仓储物流管理系统等，该部分是数据分析和利用的关键。

其中集成层和管理层的功能统一纳入表面处

理生产线智能化管控平台，通过建立该平台，能够对表面处理车间进行整体管控，实现质量全过程可追溯，提高一次合格率、降本增效、生产成本及效率精细化管控等目的。

## 2.4 智能化车间建设方案

依据图2的智能化总体框架，本项目分别考虑了物理层和集成层的实施方案，具体内容如下。

### 2.4.1 物理层

物理层的搭建（即设备的物联集成）包含设备设施建设和需采集的参数类型分析两部分内容。参数采集分析工作中，本项目将需要采集的参数划分为工艺参数、设备状态参数和能源环境参数，并开展了相应工作。

#### (1) 采集的参数种类分析

准确分析参数种类及数量是数据采集的基础，本项目将表面处理车间划分为生产线、辅助配套设备（主要为烘箱）以及水处理设备3个部分，并分别对3个部分需要采集的工艺参数、设备状态参数以及能源环境参数的类型进行分析，并针对性的提出了采集手段。



表2 表面处理车间参数采集汇总表

参数类型	参数名称	采集点位置	采集手段
工艺参数	电流	生产线设备	整流电源电流通过分流器转换为4-20mA电流信号,通过光电隔离手段引至整流电源内部CPU,通过屏蔽双绞线引至PLC通讯模块
	电压	生产线设备	电压直接采集并转换为4-20mA电流信号,通过光电隔离手段引至整流电源内部CPU,通过屏蔽双绞线引至PLC通讯模块
	温度	生产线设备	温度探头PT100(-20℃-200℃)接至智能温度表,屏蔽双绞线引至PLC通讯模块
		烘箱	烘箱自带智能仪表,通过屏蔽双绞线引至生产线PLC通讯模块
	液位	生产线设备	槽内高低中3个电极点,通过互套线引至中控室电控柜的液位继电器,与PLC的I/O输入模块直接电气连接。
		水处理	槽内电缆浮球,通过互套线引至中控室PLC的I/O输入模块。
	时间	生产线设备	槽边控制盒上的旋钮,通过互套线引至PLC的I/O点输入模块
	pH值	生产线设备、水处理设备	pH复合电极+智能仪表,通过屏蔽双绞线引至PLC通讯模块
ORP	水处理设备	传感器和智能仪表,通过屏蔽双绞线引至PLC通讯模块。传感器由ORP复合电极和毫伏计组成。	
状态参数	行车位置和升降状态	生产线设备	PLC通过内部存储器读取并传至生产线工控机,之后ICP平台从工控机采集
	行车故障检测	生产线设备	行车出现升降、前进或错位故障后,PLC判断故障点,将内部I/O变量传至生产线工控机,之后ICP平台从工控机采集
	开关机	生产线设备、辅助设备、水处理设备	手工开关机后,PLC相应通断电,对应开关机状态参数上传生产线工控机,之后ICP平台从工控机采集。
	整流器故障状态	生产线设备	整流器出现故障,PLC判断故障点,将内部I/O变量传至生产线工控机,之后ICP平台从工控机采集
	加工进度	生产线设备	各加工槽位均有条形码编号,PLC读取并传至生产线工控机,之后ICP平台从工控机采集
	变频	生产线设备	PLC通过判断生产线槽盖的开关状态后,直接控制风机变频器的快慢速度,相关状态同步传至生产线工控机,之后ICP平台从工控机采集
	控制加药	生产线设备	PLC通过判断pH值,启动和停止加药信号,相关状态同步传至生产线工控机,之后ICP平台从工控机采集
	故障状态	水处理设备	PLC通过采集的液位点和pH值、ORP值,综合判断并发出报警信号,同时传至生产线工控机,之后ICP平台从工控机采集
	运行状态	水处理设备	PLC通过采集的液位点和pH值、ORP值,综合判断向各类泵发出控制指令,同时传至生产线工控机,之后ICP平台从工控机采集
能源环境参数	用电量	生产线设备、辅助设备、水处理设备	数显多功能电力仪表,仪表带RS485通讯接口,随后利用PLC通过协议宏以MODBUS-RTU协议传输数据
	用气量	生产线设备、水处理设备	涡街流量计,仪表带RS485通讯接口,随后利用PLC通过协议宏以MODBUS-RTU协议传输数据
	用水量	生产线设备、水处理设备	水流量计,仪表带RS485通讯接口,随后利用PLC通过协议宏以MODBUS-RTU协议传输数据
	废水污染物排放浓度	水处理设备	采样水泵自动抽取水样,然后再由仪器内部的蠕动泵取样检测,利用智能仪表自动在线测量

确定采集参数后, 需要根据参数的性质和特点确定采集手段, 目前常用的采集通常有分流光电转换、传感器、智能仪表等多种手段, 经分析, 调研的参数对应的采集手段如表2所示。

分析获取参数类型和位置后, 便可以在项目中利用相应的手段解决采集的问题, 获取的数据也成为集成层、应用层和管理层数据分析的支撑。

#### 2.4.2 设备联网集控系统

设备联网集控系统包括生产线联网集成控制和辅助设备联网集成控制两部分, 主要建设内容包括设备的数据采集集成管理以及设备间的协同控制, 该系统具备以下功能:

##### 1) 生产线和辅助设备的数据采集集成管理

(1) 生产过程数据及设备状态的采集、监视, 具有各生产要素(温度、时间、电流、电压等)在线采集、监测功能;

(2) 对生产线实现自动控制。实现数据设定、电流及电压控制、温度及液位控制、等工业控制监控自动化, 通过对生产现场数据的采集处理。

(3) 现场数据的采集处理后, 以动画显示运行状况、报警、处理, 也可对生产线实现数据设定、电流及电压控制、温度及液位控制等工业控制监控自动化。

##### 2) 生产线和辅助生产线设备整体协同控制

系统中通过软件算法, 实现对车间内各种设备进行协同的控制, 以达到安全防护、节能降耗等目的。具体功能需求包括: 整个车间及各条生产线的一键启停; 在生产线一定时间内无生产任务的情况时, 统一进入待机或关机状态; 在辅助配套设备出现异常或达到满负荷状态时, 通过软件控制生产, 避免进一步增加负荷。

#### 2.4.3 设备运行三维虚拟监控(含能源集中管理)

##### 1) 三维监控系统

该厂表面处理车间采用了三维数字化交付的手段, 探索了实现车间级数字化交付的道路。本项目中, 三维数字化交付共分为两个阶段。第一, 探求建筑BIM与生产线设备的紧密结合, 用Revit、SolidWorks等软件完成了车间级数字化交付成果; 第二, 在第一阶段的基础上, 利用Unity 3D实现车间设备三维虚拟监控, 三维层面上实现设备的管理和监视。

第一阶段实施过程中, 项目首先分别利用Revit和SolidWorks等建模软件建立厂房建筑图形以及工艺设备模型, 并根据实际产线布置情况将二者融合, 在实施过程也中解决了设备管线与建筑的碰撞等问题, 实现了土建及设备在前期设计中的一体化, 体现了设备土建一体化的优势, 为后期设备三维管控平台提供了模型和技术支撑。图4所示为利用三维软件制作的漫游视频截图。

三维监控系统是在三维模型的基础上, 结合生产线设备和辅助配套设备的联网集成, 实时调用生产过程中的数据, 展示在三维模型中, 达到三维虚拟空间中各设备的状态及工作参数数据实时展示的目的, 即实现车间级的数字双胞胎。图5所示为厂房三维虚拟监控的模型画面。

##### 2) 能源集中管理

能源集中管理模块是针对车间效率成本统计不准确, 无法详细统计水、电、压缩空气等能源的消耗量等问题而提出的。此模块是在能源数据采集的基础上, 对能源的消耗进行多维度的统计分析, 可以实现在时间维度、设备维度和工艺维度上的分类统计和报表呈现。



(a) 厂房外部建筑模型



(a) 车间内部设备模型

图4 某表面处理车间设备土建一体化BIM

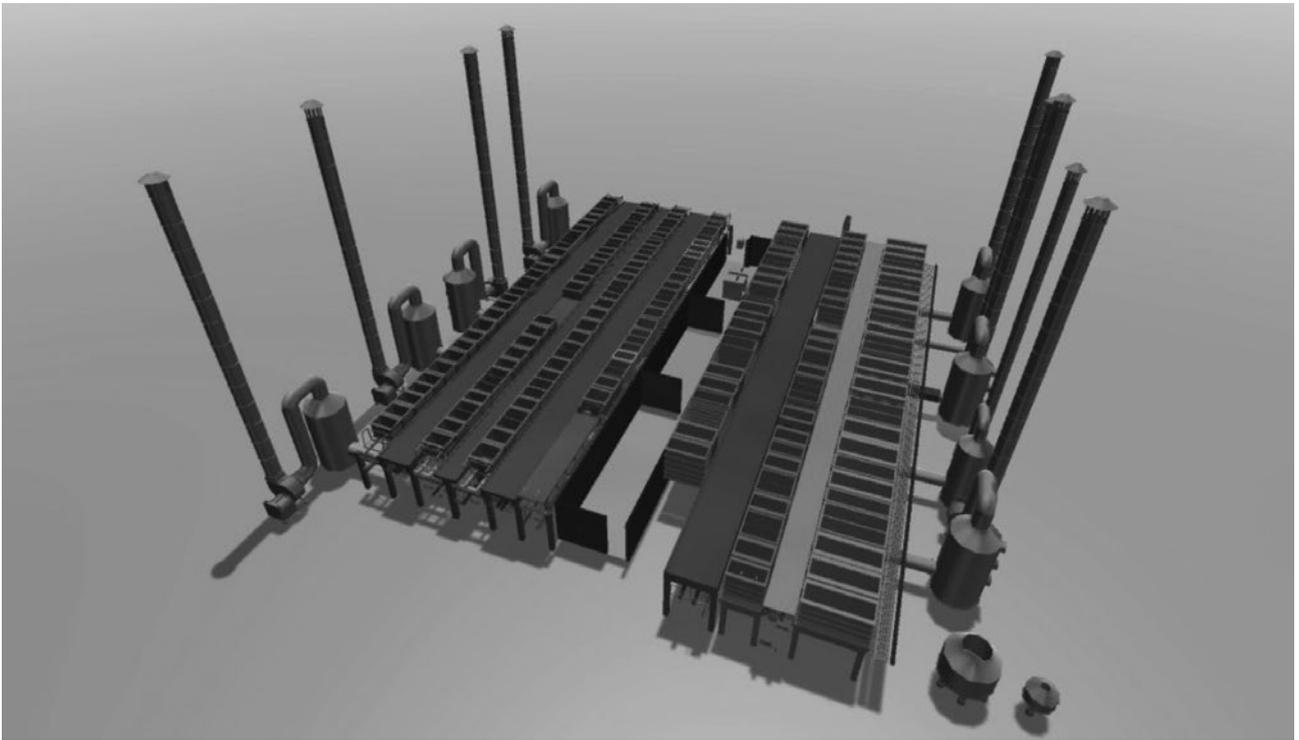


图5 表面处理车间三维监控系统界面图

### 3 结论

航空工业某厂的表面处理车间中因为质量、效率成本、安全和环保等原因而影响生产，本项目结合实际需求，引入智能化设计思想，探索了以物理层的需求分析、数据采集方案到集成层的管控平台的框架思路等为核心的智能化车间设计道路。本项目的实施可以实现该厂表面处理车间设备和生产的智能化管理、设备的三维监控，并且可以今后类似项目的智能化建设提供思路。

#### 参考文献

- [1] 刘忠. 航空工业智能制造研究状况和热点分析——基于 Web of Science 的文献计量分析[J]. 竞争情报, 2017, 13(2): 30-38.
- [2] 隋少春, 牟文平, 龚清洪, 等. 数字化车间及航空智能制造实践[J]. 航空制造技术, 2017, 60(7): 46-50.
- [3] 王殿, 郝鹏飞. 智能系统在电镀生产线制造的应用[J]. 电子工业专用设备, 2015 (9): 22-27.
- [4] 丁金友, 刘飞. 基于模糊智能的电镀生产线行车调度系统[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009 (11): 17.
- [5] 王思醇, 岑廷刺, 罗毅, 等. 电镀镍过程智能控制方法的探讨[J]. 电镀与涂饰, 2019 (1): 2.

# 喷丸对航空用低合金钢渗铬处理的影响研究

■ 李翔 姜煜霞 李雪罡 [工艺]

**摘要:** 本文研究了不同喷丸参数对渗铬层结构和厚度的影响,并对喷丸催渗的机理进行分析,表明喷丸处理使试样表面晶粒细化、晶格缺陷增多,对渗铬有明显的促进作用,渗铬层厚度随喷丸压力和时间增长而增加。

**关键词:** 渗铬; 喷丸; 扩散; 晶粒细化

## 0 引言

渗铬技术作为提升材料耐腐蚀性能的重要手段,在航空领域内被广泛应用。当前,航空产业各单位普遍使用传统的固体渗铬法,渗铬温度大多在1000℃以上,保温时间6h以上<sup>[1]</sup>,过高的保温温度和较长的保温时间一方面会使材料的机械性能下降,另一方面,会提高制造成本。表面喷丸处理技术是材料表面纳米化技术的一种,其原理是利用高速运动的钢丸不断撞击材料表面,使材料表面产生强烈的塑性变形,形成一定厚度的变形层<sup>[2]</sup>,对于制造渗铬工件而言,喷丸处理不但可以提升工件表面的机械性能,也可有效去除工件表面的锈层,减小锈层对铬原子扩散的阻碍作用;另一方面,可以使工件表面的晶粒产生畸变、破碎,从而使工件表面获得大量的位错等晶格缺陷,提供了更多的扩散通道,从而提升了铬原子向工件内部扩散的速率,可以实现中低温,短时间条件下获得一定厚度的渗铬层,降低制造成本。

## 1 试验材料与方法

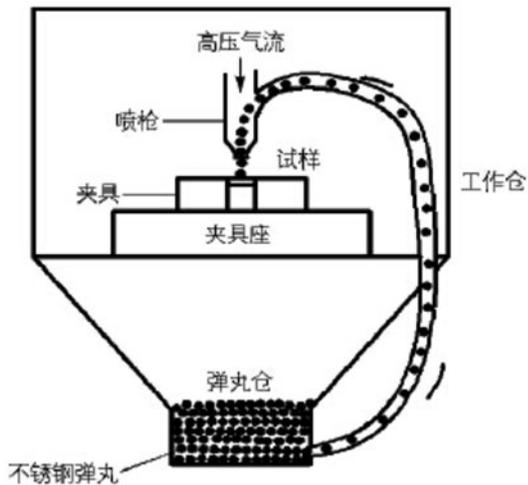
### 1.1 喷丸渗铬试验

喷丸渗铬实验使用的原材料为低合金钢,其化学成分见表1,利用线切割将试样处理成长10mm,宽10mm,厚6mm的试样,之后用60~1000号砂纸对试样表面逐级打磨,然后用去离子水、无水乙醇清洗,冷风干燥后备用。在进行渗铬处理前,首先对试样进行喷丸处理,如图1所示,实验选取直径0.6mm的不锈钢钢丸,喷嘴距试样表面距离50mm,喷丸压力0~0.6Mpa,喷丸时间0~3min。喷丸处理后,将试样依次放入丙酮、酒精中超声清洗,之后去离子水洗,冷风干燥后进行固体粉末渗铬处理,渗剂配方为:50%铬粉+46% $\alpha$ -氧化铝+3%氯化铵+1%氟化钠,保温温度900℃,保温时间2h。

表1 实验用试样的化学成分

Elements	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Cu	Ti	Fe
wt(%)	0.04	0.12	0.020	0.00005	0.20	0.13	5.06	0.28	0.017	Base

作者简介:李翔,男,助理工程师,2018年毕业于北京科技大学材料科学与工程专业,现就职于航空工业规划动力工程设计研究院。

图1 实验用喷丸处理示意图<sup>[3]</sup>

## 1.2 截面形貌及成分分析

采用FEI Quanta250环境扫描电子显微镜(SEM)观测试样截面形貌、表面形貌,并利用配备的能谱仪(EDS)对截面成分分布进行分析。

## 1.3 X射线衍射分析

采用日本理学表面Smartlab 9kW X射线衍射仪对渗铬层表面进行物相分析,使用Cu靶材,工作电压40kV,工作电流150mA,扫描范围 $20^{\circ}\sim 100^{\circ}$ 。

## 1.4 显微组织形貌

采用基恩士VK-X250激光3D共聚焦显微镜对喷丸后试样横截面显微组织形貌进行观察。

# 2 试验结果及分析

## 2.1 不同喷丸压力对渗铬层厚度的影响

图2分别为试样经过不同喷丸压力处理,喷丸时间1min保持不变,经保温温度 $900^{\circ}\text{C}$ ,保温时间2h渗铬处理后,试样表面渗铬层中碳、氧、铬、铁4种元素质量分数随渗层深度的变化曲线。

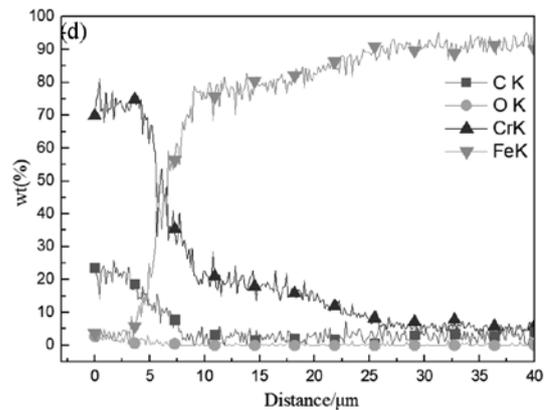
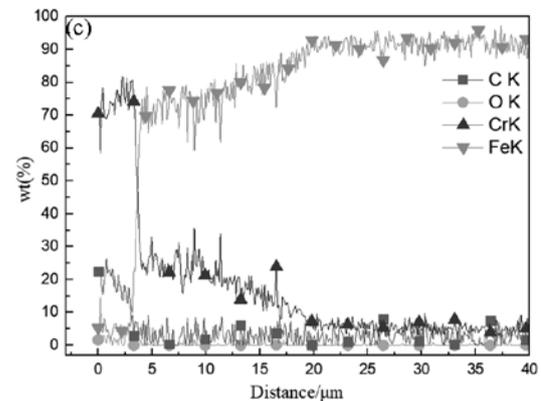
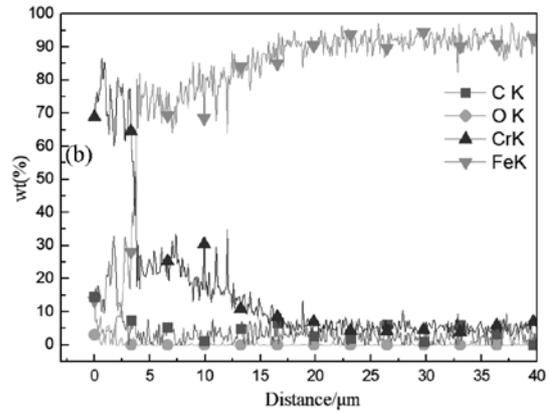
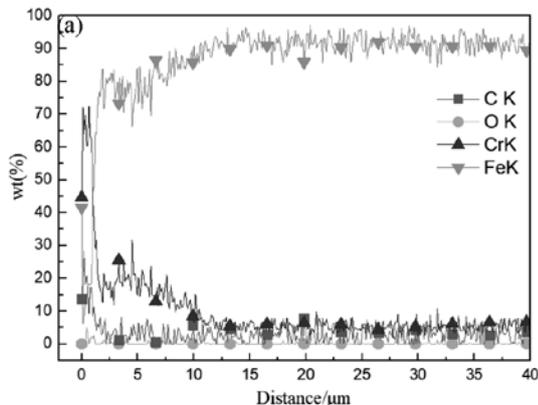


图2 不同喷丸压力(a)0Mpa、(b)0.2Mpa、(c)0.4Mpa、(d)0.6Mpa条件下,经渗铬处理后,渗铬层中各元素含量随渗层深度的变化曲线

从图2中可以看出,在喷丸压力为0Mpa的条件下,试样经渗铬处理后铬含量大于5%的渗铬层厚度 $11\mu\text{m}$ ,在喷丸压力为0.2Mpa的条件下,试样渗铬层厚 $15\mu\text{m}$ ,在喷丸压力为0.4Mpa的条件下,试样渗铬层厚 $20\mu\text{m}$ ,在喷丸压力为0.6Mpa的条件下,试样渗铬层厚 $26\mu\text{m}$ 。随着喷丸压力的增大,渗铬层的厚度逐渐增加,这是因为随着喷丸

压力的增大, 试样表面的晶粒产生了更严重的变形、破碎, 从而使试样表面获得更多的空位、位错等晶格缺陷, 为铬原子提供了更多的扩散通道, 从而提升了铬原子向试样内部扩散的速率, 增加了表面渗铬层的厚度。

## 2.2 不同喷丸时间对渗铬层厚度的影响

图3分别为试样经不同喷丸时间处理, 喷丸压力保持0.6Mpa不变, 在保温温度900℃, 保温时间2h渗铬处理后, 试样表面渗铬层中碳、氧、铬、铁4种元素质量分数随渗层深度的变化曲线。

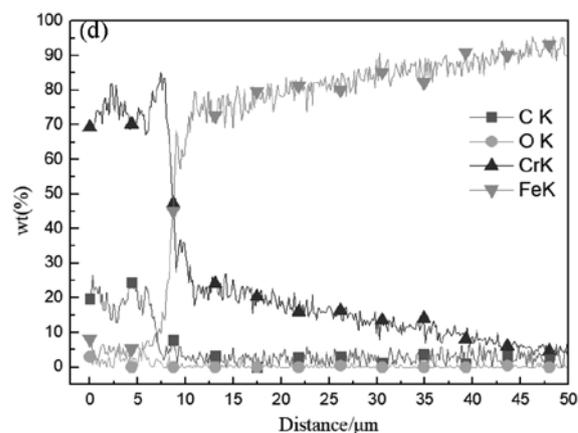
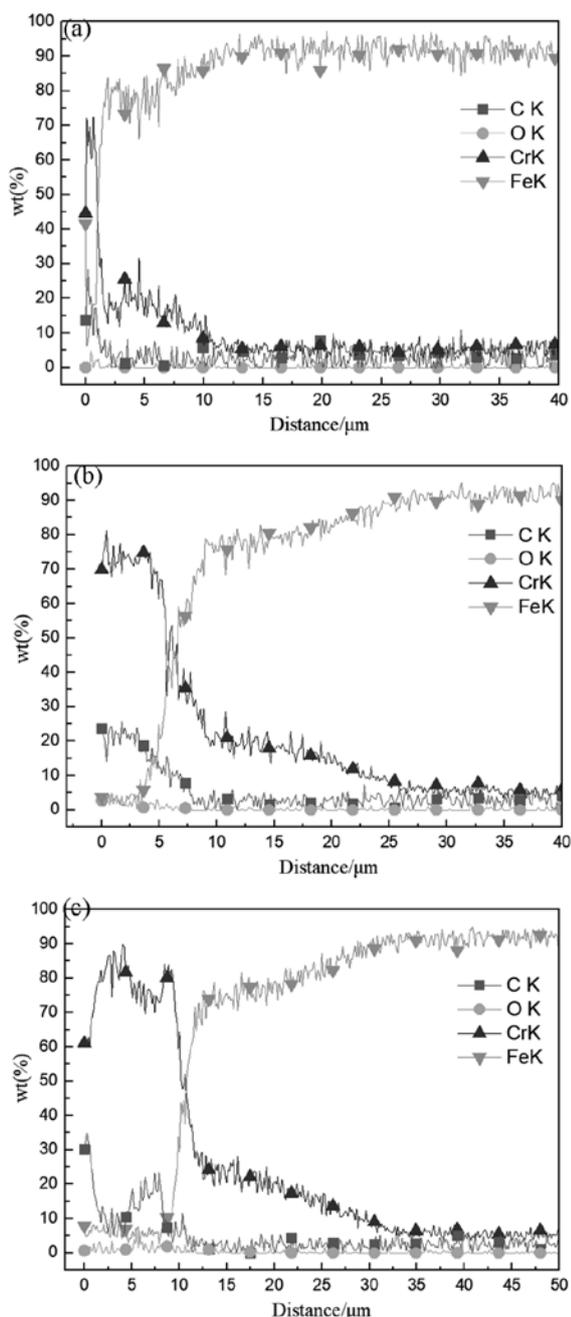


图3 不同喷丸时间(a)0min、(b)1min、(c)2min、(d)3min条件下, 经渗铬处理后, 渗铬层中各元素含量随渗铬层深度的变化曲线

从图3中可以看出, 在喷丸时间为0min的条件下, 试样经渗铬处理后渗铬层厚度11 μm, 在喷丸时间为1min的条件下, 试样渗铬层厚26 μm, 在喷丸时间为2min的条件下, 试样渗铬层厚33 μm, 在喷丸时间为3min的条件下, 试样渗铬层厚45 μm。随着喷丸时间的增长, 渗铬层的厚度逐渐增加, 这是因为随着喷丸时间的增加, 试样表面产生了更严重的塑性变形, 引入了更多的位错等晶格缺陷, 晶粒变形区厚度增加, 所以更有利于渗剂当中的铬原子向试样内部扩散, 形成较厚的渗铬层。

## 2.3 喷丸处理对渗铬层表面形貌的影响

图4分别为电镜下未经喷丸和经喷丸3min、喷丸压力0.6Mpa处理后试样在保温温度900℃、保温时间2h条件下得到的渗铬层表面的微观形貌。

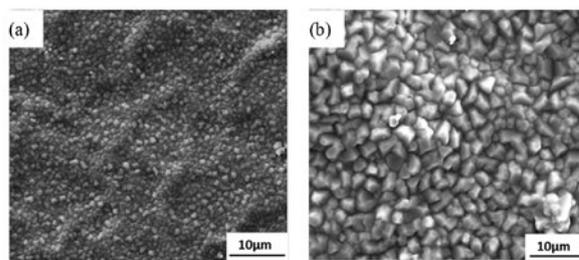


图4 (a)未经喷丸处理和 (b)喷丸处理后试样表面渗铬层形貌

由图4可见, 渗铬层表面由许多细小的颗粒组成, 颗粒呈多边形凸起状, 紧密的排布于试样的表面, 从图5中渗铬层和基体的XRD图谱对比分析可知, 这些致密的颗粒主要是 $C_{r_{23}}C_6$ 和 $C_{r_{12}}N$ 等铬和碳、氮等原子形成的碳化物和氮化物<sup>[4]</sup>。通过对比

可以发现, 经过喷丸处理并渗铬后, 试样表面的颗粒更为致密且粗大, 这是因为喷丸处理后, 试样表面晶格严重畸变, 不仅使渗剂中的铬原子在试样表面的扩散速率增加, 同时基体内部的碳原子向试样表面扩散速率增加, 使得铬原子和碳原子在试样表面形成了更厚的碳化铬层。碳与铬的化合物具有硬度高的自身特性, 其维氏硬度可以达到 $1372\text{HV}^{[5]}$ , 可以有效保护渗铬层的内部。因此通过渗铬处理后获得的工件具有良好的硬度及耐磨性能, 可以有效防止工件表面发生破损。另一方面, 表面致密的碳化铬层作为保护层, 可以有效阻挡环境对工件表面的腐蚀, 提升耐腐蚀性能。

图5分别为未经喷丸处理和经喷丸3min、喷丸压力 $0.6\text{Mpa}$ 处理后试样在保温温度 $900^\circ\text{C}$ 、保温时间 $2\text{h}$ 条件下得到的两组试样表面XRD图谱。

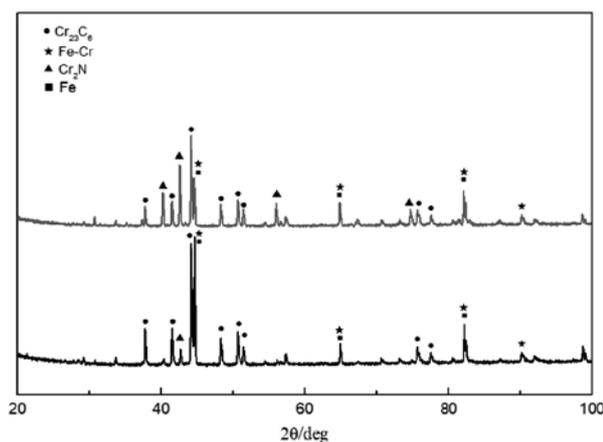


图5 未经喷丸处理试样和  
喷丸处理试样渗铬后表面XRD图谱

从图5中可知, 未经喷丸的试样在渗铬处理后, 试样表层由 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 、 $\text{Cr}_2\text{N}$ 、Fe及Fe-Cr组成, 经喷丸处理后的试样在渗铬后, 试样表层由 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 、 $\text{Cr}_2\text{N}$ 、Fe及Fe-Cr组成。相比于未经喷丸处理的试样, 经喷丸处理后, 渗铬层表面 $\text{Cr}_2\text{N}$ 对应的衍射峰增多,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 、 $\text{Cr}_2\text{N}$ 衍射峰强度明显增大, 这是因为, 喷丸处理使试样表面产生了严重的塑性变形, 表面形成变形区, 变形区内晶格畸变, 晶粒细化, 缺陷增多, 因此在渗剂气氛下的活性铬、氮原子(氮原子由渗剂中氯化铵受热分解产生)向试样内部扩散的速度和基体内碳原子向表面扩散的速度都将加快, 在试样表面形成了更厚的高铬层( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 、 $\text{Cr}_2\text{N}$ )和扩散层(Fe-Cr)。XRD分析结果与上述表面微观形貌结果一致。

## 2.4 喷丸催渗机理分析

图6为试样经表面喷丸处理后横截面的显微组织形貌, 图6(a)为整体形貌, 根据表面晶粒变形程度的不同, 可以分为变形区、过渡区和基体3个部分, 其中图(b)为图(a)近表面处变形区和过渡区放大后的显微组织形貌, 图(c)为图(a)远表面处基体显微组织放大形貌。从图中可以看出, 由于试样上表面受到不锈钢钢丸的冲击, 变形区组织呈现出流线型分布, 试样经表面喷丸处理, 变形区表面晶粒产生严重变形, 晶粒的变形程度随着距表面距离的增加而逐渐减小, 进入过渡区, 过渡区由于在喷丸过程中受力较小, 只产生了轻微的畸变, 晶粒呈扁平状。基体晶粒无变形发生, 呈多边形结构, 基体显微组织由铁素体和粒状贝氏体组成。因此, 喷丸处理使试样表面的晶粒发生了严重的变形, 试样表面晶界增多, 晶粒尺寸减小, 由于力的作用晶粒内部出现缺陷, 将有利于铬原子在试样表面的扩散。

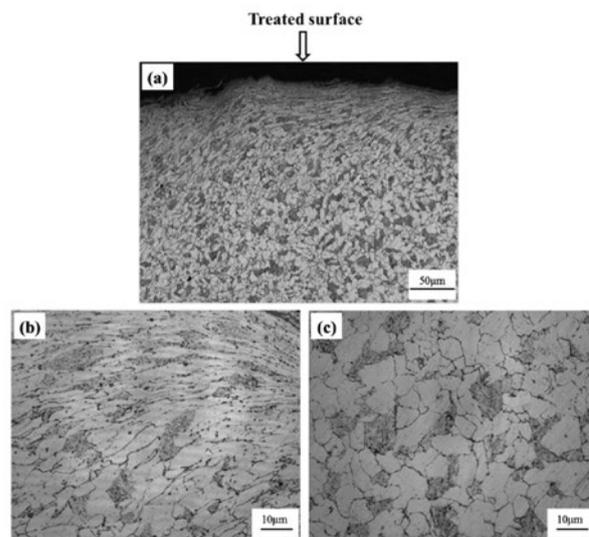


图6 喷丸处理后试样横截面显微组织形貌(a)整体形貌,  
(b)变形区和过渡区放大形貌, (c)基体放大形貌

图7为未经喷丸处理和喷丸处理后试样表面XRD图谱, 从图中可以看出, 未经喷丸处理和喷丸处理后试样表面均由Fe-Cr和Fe两相构成, 喷丸处理后, Fe和Fe-Cr对应的衍射峰均发生了宽化和矮化, 衍射峰的宽化和矮化说明了试样在喷丸处理后试样表面晶粒由于受到了不锈钢钢丸的冲击, 发生了严重的畸变, 晶粒得到了细化, 晶粒尺寸减小<sup>[6]</sup>。因此XRD分析结果与上述显微组织形貌分析结果一致。

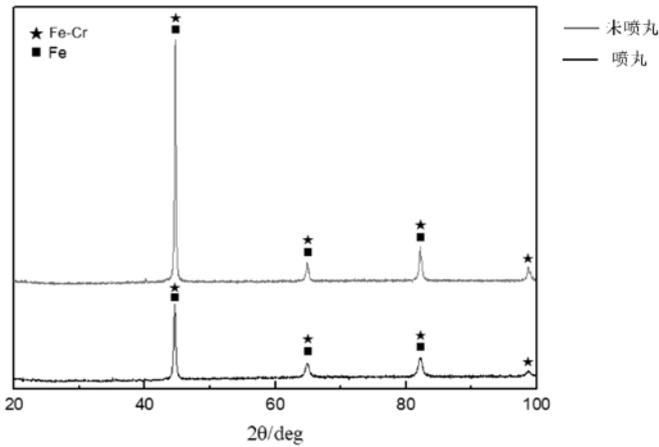


图7 未经喷丸处理和喷丸处理后试样表面XRD图谱

根据菲克第一定律，见公式（1）：

$$J_x = -D \frac{dc}{dx} \quad (1)^{[7]}$$

扩散通量 $J_x$ 与扩散系数 $D$ 与沿扩散方向上的浓度梯度 $dc/dx$ 有关，喷丸处理与未喷丸处理渗铬两者沿着扩散方向铬原子的浓度梯度没有变化，因此根据菲克第一定律喷丸主要影响铬原子扩散的主要因素是扩散系数。此外，铬原子向试样内部扩散属于空位扩散，空位扩散要想发生，首先原子必须从原先位置克服扩散壁垒，即扩散激活能，才能从原先位置扩散至另一位置。因此，扩散激活能也是影响铬原子向试样内部扩散快慢的重要因素。

喷丸渗铬实验中，铬原子从渗剂中扩散至试样表面，由于喷丸处理，试样表面由原来的粗晶结构转变为细晶结构，晶粒尺寸减小，晶界增多，晶粒内部空位、位错、层错等缺陷增多。铬原子沿着晶界等晶体缺陷扩散系数比在晶粒内大，因此铬原子更容易从表面缺陷处进入试样内部。进入到表面缺陷处的铬原子，在表面缺陷处处于高能量状态，扩散激活能小，因此不需要高温提供更多的扩散推动力，在中低温下就可以跨越扩散壁垒，从试样表面被激活从而向试样内部进行扩散。因此单位时间单位面积内有更多的铬原子扩散进入到试样内部，形成更厚的渗铬层。

### 3 结论

(1) 喷丸处理有利于低合金钢表面形成渗铬层，渗铬层厚度随着喷丸压力与喷丸时间的增加而

增厚，渗铬层表面由 $Cr_{23}C_6$ 、 $Cr_2N$ 、Fe及Fe-Cr组成，喷丸试样在渗铬处理后表面碳化铬颗粒更为致密，尺寸更大，对基体起到了良好的保护作用，有利于提升工件表面的耐磨性和耐蚀性能。

(2) 喷丸处理使试样表面晶粒细化、晶格缺陷增多，根据菲克第一定律，铬原子在喷丸试样表面扩散系数大，扩散激活能低，因此喷丸处理有利于形成更厚的渗铬层。

### 参考文献

- [1] Osintsev V D. Effect of elevated temperature on the composition, structure, and mechanical properties of diffusion chromized steel[J]. *Metal Science & Heat Treatment*, 1985, 27(11):833-837.
- [2] Wang C, Jiang C, Cai F, et al. Effect of shot peening on the residual stresses and microstructure of tungsten cemented carbide[J]. *Materials & Design*, 2016, 95:159-164.
- [3] 韩靖, 盛光敏, 胡国雄. 高能喷丸0Cr18Ni9Ti不锈钢自纳米化机理[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2009, 40(3):644-649.
- [4] 李翔, 程学群, 李晓刚. 新型热扩散法制备耐海洋环境腐蚀钢筋及其耐蚀性. [J/OL]. *中国表面工程*: 1-8. (2017-11-14). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20171114.1605.006.html>.
- [5] 林化春, 丁润刚. 镍基合金-碳化铬复合涂层耐磨特性的研究[J]. *摩擦学学报*, 1996(07):277-281.
- [6] 王越田. 工业纯铁表面自纳米化改性研究[D]. 重庆大学, 2011.
- [7] 刘菲, 苏运星, 王仲民, 等. 菲克定律在氢扩散系数研究中的应用[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2010, 35(5):841-846.

# 内蒙古美术馆大承载力空间相贯铸钢节点试验研究及数值分析

■ 郭亚楠 樊钦鑫 付锦龙 谢军 王伟 郭小农 [结构]

**摘要:** 为研究大承载力空间相贯铸钢节点, 本文对内蒙古美术馆中受力复杂的大型铸钢节点进行数值分析及试验研究。有限元模型采用soild works三维建模, 利用ANSYS软件模拟最不利工况, 计算节点应力分布和节点位移。铸钢节点试验为足尺试验, 参考有限元计算结果布置应变片和位移计。有限元和试验结果表明节点可以在1.3倍荷载设计值下安全承载, 有足够安全储备, 满足规范要求。

**关键词:** 空间相贯节点; 铸钢节点; 足尺试验; 有限元分析

## 1 引言

铸钢节点是最近几年兴起的一种新的节点形式, 独特的性能使它在空间结构中的应用日益广泛。相较于传统节点形式, 如螺栓球连接、焊接球节点和钢管的相关节点, 铸钢节点的特点和优势在于: 可塑性强, 不受节点位置的限制, 有效减少应力集中现象, 抗弯性能好, 承载力高, 因此可以很好地满足结构受力、构造、施工的需要<sup>[1~3]</sup>。与工程应用相比, 对铸钢节点的承载力研究还比较少。由于结构足尺实验存在应变测点有限、加载吨位受限等缺点, 而有限元分析无法准确考虑材料的不均匀性、几何尺寸偏差, 难以检验铸钢节点材料性能、制作工艺质量和节点的安全性。所以在实际工程设计中, 大型铸钢节点的承载安全性需通过足尺试验和有限元分析来判断。

内蒙古自治区美术馆位于呼和浩特市如意总部基地原TCL电视机厂地块内, 总建筑面积35893m<sup>2</sup>, 地上4层(局部夹层), 局部地下1层; 建筑高度为30~44m, 属于大型博物馆, 是一类高层建筑。主体结构采用框剪结构, 内部主要楼、

电梯井处设置混凝土剪力墙。本工程22m至屋面整层展厅向外悬挑30m, 为满足重荷载悬挑结构在静力荷载、水平及竖向地震下安全可靠, 在层间设置了防屈曲支撑斜杆。支撑的最大压力达到800t(拉力500t), 为满足强节点弱构件的结构概念设计, 对相连接复杂多杆连接节点提出了满足大震不屈服的要求。本文通过大吨位球形反力架对节点进行试验研究和有限元分析判断节点的承载力是否满足要求。本文选取该工程中有代表性的两个铸钢节点ZG11(单杆压力最大约800t, 如图2所示)和ZG22(单杆拉力最大约500t, 如图3所示)进行分析, 相应位置如图4和图5所示。

限于篇幅, 本文主要介绍ZG11节点。

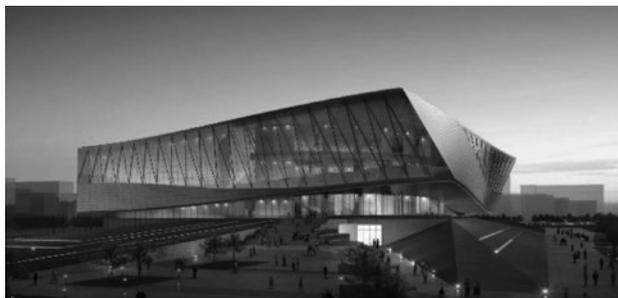


图1 建筑立面效果图

作者简介: 郭亚楠, 男, 助理工程师, 2018年毕业于同济大学结构工程专业, 现就职于中航建设综合规划研究院。

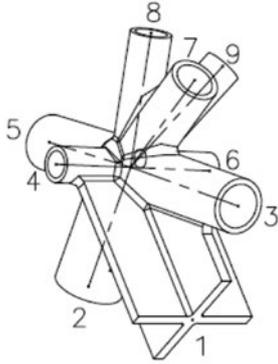


图2 铸钢节点ZG11详图

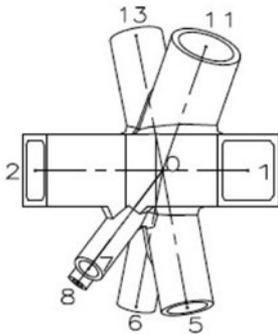


图3 铸钢节点ZG22详图

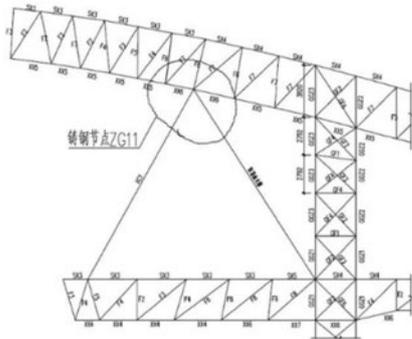


图4 铸钢节点ZG11位置示意图

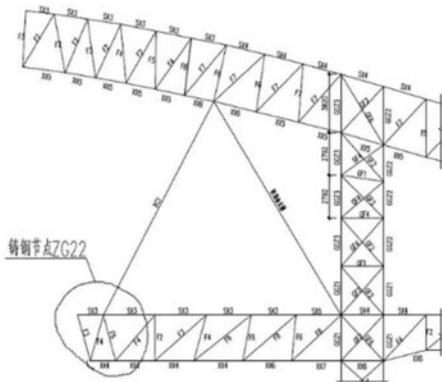


图5 铸钢节点ZG22位置示意图

## 2 铸钢节点理论数值分析

### 2.1 计算软件及模型选取

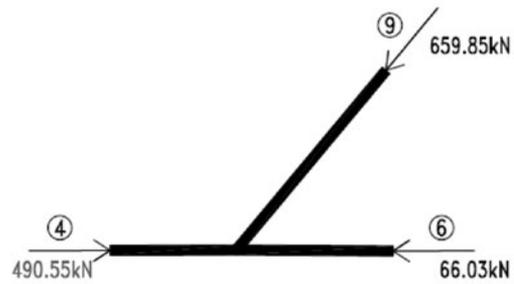
为了验证铸钢节点在设计荷载下的安全性，并为试验设计提供依据，本文首先进行了节点的数值分析。

本工程铸钢节点较为复杂，采用soildworks三维建模，有限元分析采用ANSYS软件，采用8节点实体单元Solid185，单元网格采用自由划分。有限元模型采用多线性随动强化和von Mises屈服准则。铸钢材性参照《铸钢节点应用技术规程》<sup>[4]</sup>，取 $f_y=300\text{MPa}$ ， $f_u=500\text{MPa}$ ，弹性模量 $E$ 取 $2.05 \times 10^5\text{MPa}$ ，泊松比取0.3。数值分析的内力均取自midas模型，有限元模型的固定端与试验固定端一致。

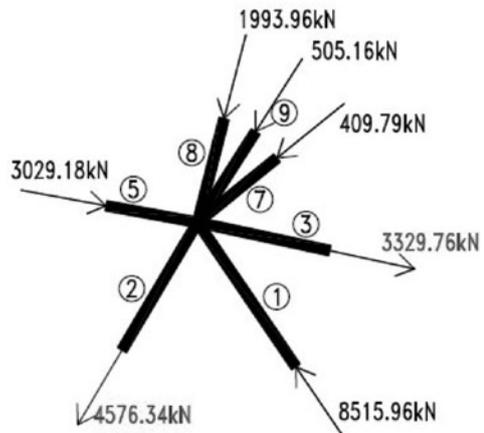
### 2.2 铸钢节点ZG11

#### 2.2.1 节点荷载信息

铸钢节点ZG11杆件内力如图6所示。



(a) 节点平衡校核后内力 (平面内)



(b) 节点平衡校核后内力 (平面外)

图6 节点各杆端轴力

#### 2.2.2 数值模型

网格划分后，对5号杆杆端施加固定约束，其余杆件端部施加等效压强，施加约束和荷载的有限元模型如图7所示。

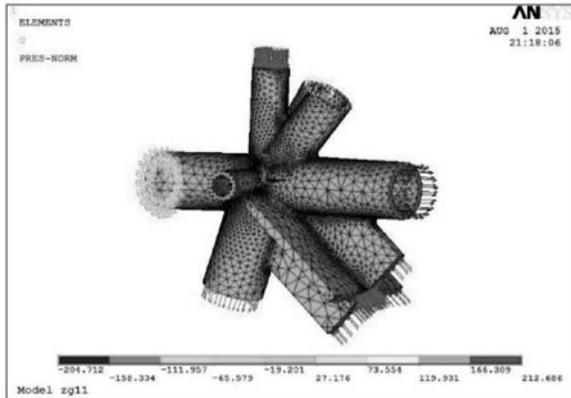


图7 铸钢节点ZG11有限元模型

### 2.2.3 分析结果——1.0倍设计荷载

有限元模型的计算结果如图8和图9所示。

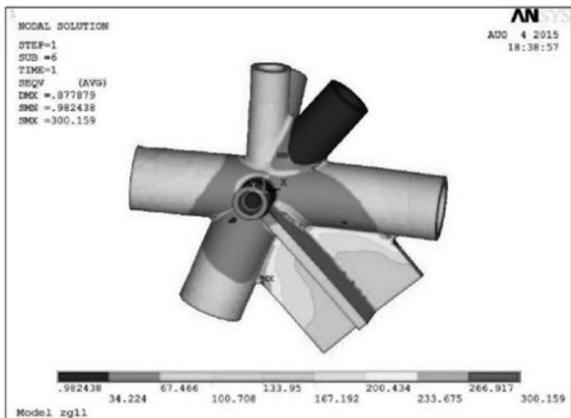


图8 1.0倍设计荷载下节点应力云图

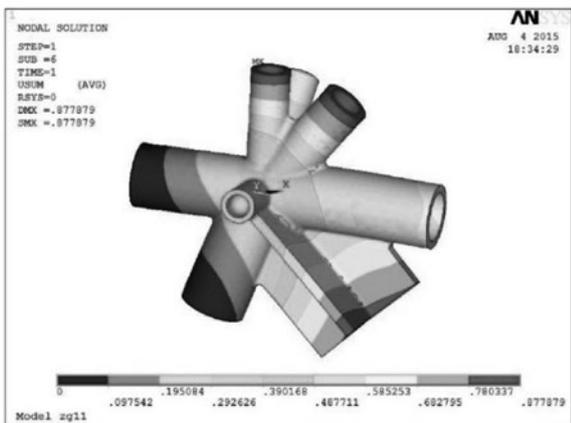


图9 1.0倍设计荷载下节点位移云图

由图8可以看出，节点ZG11绝大部分处于弹性阶段，仅1号杆与2、3号杆焊接处小部分到达钢材的弹性极限。图9表明，节点的空间位移很小，节点刚度很大。

### 2.2.4 分析结果——1.3倍设计荷载

有限元模型的计算结果如图10和图11所示：

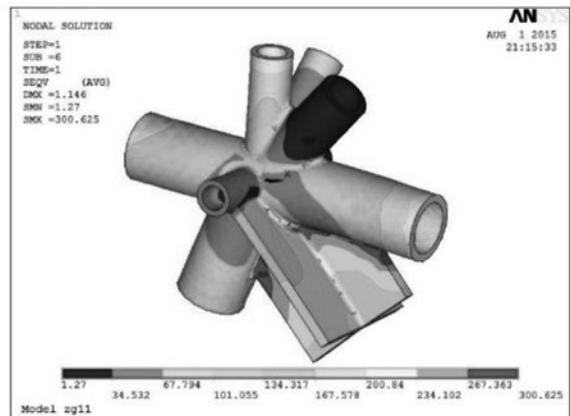


图10 1.3倍设计荷载下节点应力云图

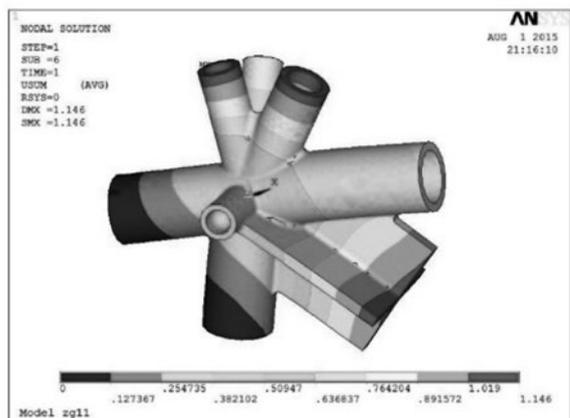


图11 1.3倍设计荷载下节点位移云图

由图10可以看出，节点ZG11绝大部分处于弹性阶段，仅1号杆与2、3号杆焊接处部分到达钢材的弹性极限。图11表明，节点的空间位移很小，节点刚度很大。

### 2.2.5 分析结果——极限承载力

在ANSYS有限元模型中施加7倍的设计荷载，当Time=0.25时，节点到达极限状态。极限状态的节点von Mises应力云图如图12所示，位移如图13所示。节点的极限荷载为设计荷载的 $7 \times 0.25 = 1.75$ 倍。极限状态下，受力最大的1号杆完全进入塑性，截面相对较小的7、8号杆大部分进入塑性；节点位移变大，从位移云图中可以看出节点此时已经呈现出整体偏转的趋势，部分受力较大或截面较小的相对不利的杆件端部位移较大，达到了无法继续承载的变形。

### 2.3 铸钢节点ZG22

在1.0倍设计荷载和1.3倍设计荷载作用下，节点ZG22除了11号杆件外大部分处于弹性阶段。节点的刚度很大，空间位移很小。在1.77倍设计

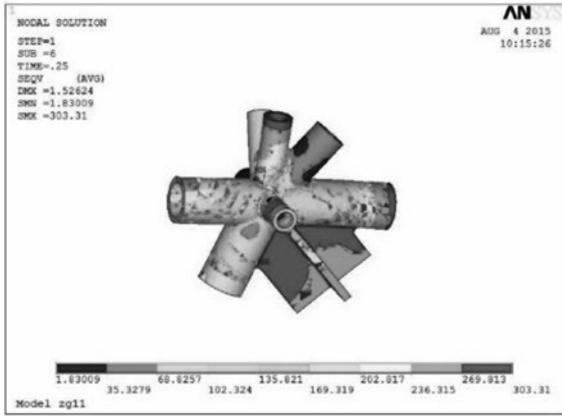


图12 von Mises 应力云图

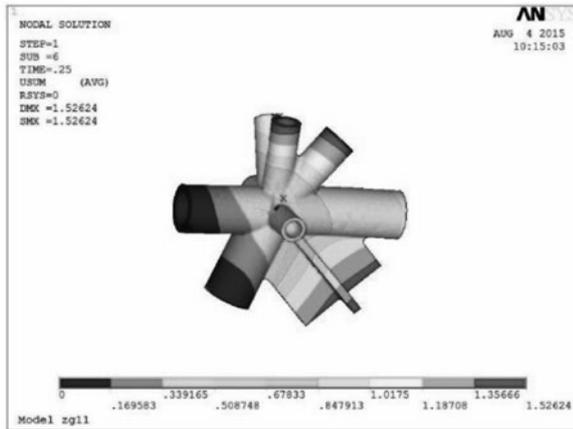


图13 von Mises位移云图

荷载作用下，节点11号杆件进入塑性，为本节点的控制杆件，杆端相对位移较大，不适合再继续承载，节点破坏。

### 3 铸钢节点试验研究

因铸钢节点承载力太高，仅做检验性试验，不做破坏性试验，同一类型试件不少于2件，铸钢节点的浇铸质量、连接构造、细部构造均与铸钢节点尺寸密切相关，为保证结构试验安全、不失真，故本试验为足尺试验。

#### 3.1 材性试验

本项目中，铸钢的牌号为G20Mn5（调质QT），杆件的材料牌号为Q345C。本文分别从杆件和铸钢节点区域取样，进行材性试验。

铸钢节点杆件的拉伸试样均从铸钢节点区域取样，并加工成圆棒试样，各3个试件。测试方法依据国家标准《金属材料室温拉伸试验方法》（GB/T 228-2016）的有关规定进行，测得伸长率，断面收缩率，屈服强度、抗拉强度和弹性模

量，试验结果见表1和表2，节点试样和杆件试样的应力应变曲线如图14和图15。

表1 铸钢材性数据

试件编号	伸长率 $\delta_5$	断面收缩率 $\Psi$	E(MPa)	屈服强度 $f_y$ (MPa)	抗拉强度 $f_u$ (MPa)	屈强比
ZG1	29.80%	44.23%	206140	312.85	470.21	0.665
ZG2	28.48%	50.84%	207091	322.54	470.69	0.685
ZG3	26.76%	47.92%	204123	304.95	460.73	0.662
平均值	28.35%	47.66%	205784	313.45	467.21	0.671

表2 杆件材料试验数据

试件编号	伸长率 $\delta_5$	断面收缩率 $\Psi$	E(MPa)	屈服强度 $f_y$ (MPa)	抗拉强度 $f_u$ (MPa)	屈强比
GJ1	43.00%	65.62%	211140	378.80	505.90	0.749
GJ2	42.88%	63.15%	209091	371.26	511.66	0.726
GJ2	44.28%	67.08%	210123	360.58	500.80	0.720
平均值	43.39%	65.28%	210118	370.21	506.12	0.732

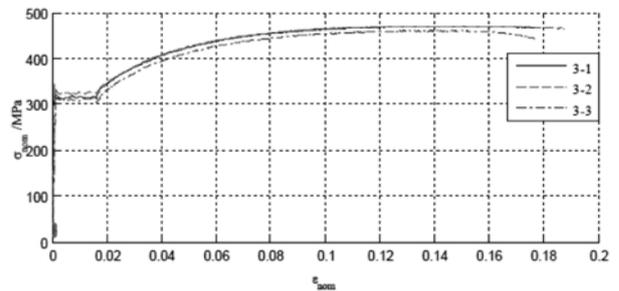


图14 铸钢材性试验的应力应变曲线

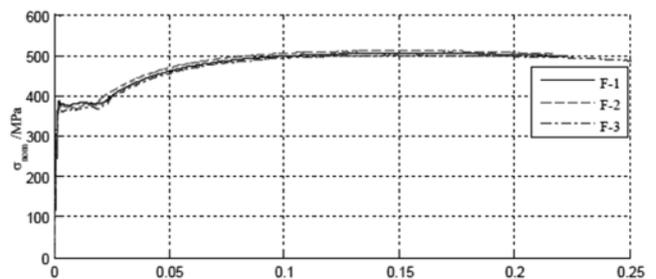


图15 杆件材性试验的应力应变

#### 3.2 加载装置

试验加载装置应确保铸钢节点与实际情况相一致的约束条件及荷载作用。试验设备需要满足至少3个主方向空间加载要求。本试验反力架采用上海宝冶钢构有限公司和同济大学共建的大吨位

球形反力架；其内部净空直径为6m，最大承载力为3000t，反力架的三维模型图和现场照片如图16所示。

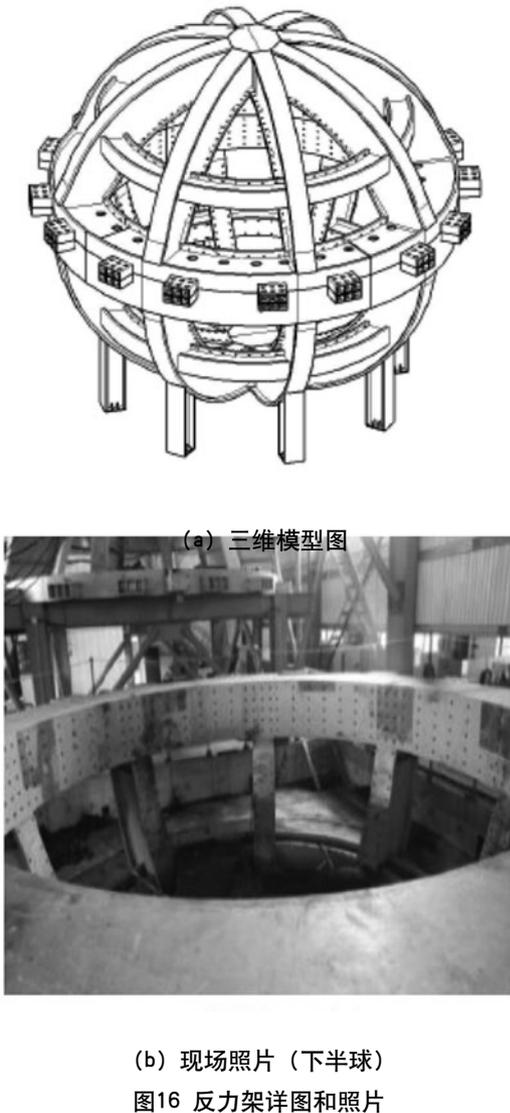


图16 反力架详图和照片

### 3.3 铸钢节点ZG11

#### 3.3.1 试验设计

铸钢节点ZG11节点如图2所示，共有9根杆件，其中1号杆为防屈曲支撑。1号杆件为固定端；4号杆、5号杆、7号杆、8号杆、9号杆为受压杆，压力通过千斤顶直接加载；2号杆、3号杆为受拉杆，拉力通过张拉工装系统进行施加；6号杆由于受力很小，故未施加荷载，处理为自由端。

#### 3.3.2 加载制度

试验荷载值应不低于荷载设计值的1.3倍，因此根据最不利工况将杆件内力设计值进行1.3倍放大后进行检验性试验，荷载值如表3所示。采用分

级加载的方法施加荷载，荷载总共分为26级。每级荷载稳定2min后读取应变片、位移计的读数，等待5min再次记录该级荷载下的应变片、位移计的读数。加载至破坏或最大加载力（1.3倍内力设计值），并稳定3min后卸载。

#### 3.3.3 测点布置

##### 3.3.3.1 应变片布置

为了校核各加载杆和固定端的轴力，在所有加载杆和固定杆的杆件截面均匀处设置了纵向应变片。应变片位于杆件长度中点附近截面，对于圆管截面，沿圆周均匀布置了4个应变片；对于十字型截面，在截面边缘布置了8个应变片。为了测试节点域应力较大区域的应变，在试验前采用ANSYS进行了有限元数值分析，并根据数值模拟结果在应力集中区域布置了多个三向应变花。应变布置的总体三维图如图17所示。

##### 3.3.3.2 位移计布置

为了检测各杆件及关键位置的位移，在所有加载杆和固定杆上设置了位移计，以测量实验过程中的杆件轴向变形；1号杆固定端设置了3个位移计，分别测量该固定端的水平绝对位移、竖直绝对位移和沿杆件方向的绝对位移；节点各杆件交汇的中心点设置了3个位移计，一个位移计竖直放置，以测量中心点的竖向绝对位移；由两个方向互相垂直的位移计来监控水平绝对位移，在1号杆、2号杆间设置了一个位移计，两端分别连接在两根杆件上，以测量两根杆件之间的相对转角变形；在5号杆、8号杆间设置了一个位移计，两端分别连接在两根杆件上，以测量两根杆件之间的相对转角变形。位移计布置的总体三维图如图18所示。

表3 节点荷载 (kN)

杆件号	设计值	1.3倍设计值	试验荷载
1	-8549.4	-11114.22	-10950
2	-1460.2	-1898.26	4000
3	-1277.3	-1660.49	4100
4	-291.3	378.69	550
5	-3029.2	-3937.96	5610
6	-66.1	-85.93	0
7	-409.8	-532.74	550
8	-1994.0	-2592.2	2850
9	-659.8	-857.74	880

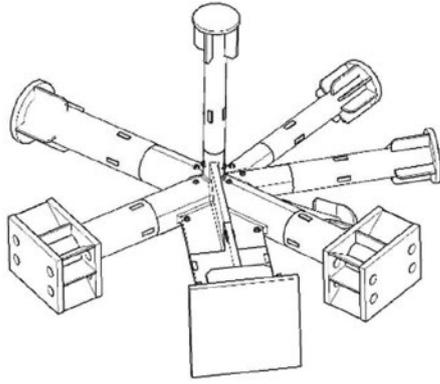


图17 应变片布置图

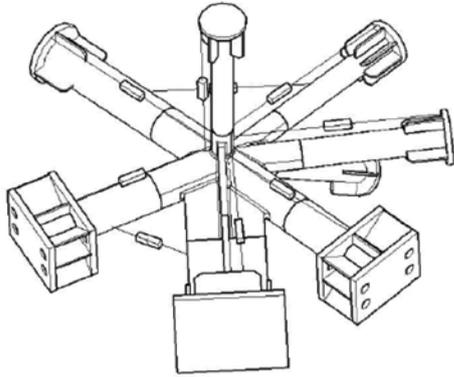


图18 位移计布置图

(图中: ■ 为单向应变片 ● 为三向应变花)

### 3.3.4 试验结果

#### 3.3.4.1 试验现象

当荷载从第1级增加至第20级,即达到1.0倍荷载设计值时,试件未出现明显的变形,也未发出任何明显响声。节点域的应力集中区域的应变值达到了约 $1047\mu\epsilon$ 。当荷载达到26级时,即达到1.3倍荷载设计值时,试件仍然未出现明显的变形,也未发出任何明显响声。此时5号杆上一侧的应变已经加速增长,达到了 $1730\mu\epsilon$ 。当荷载达到28级时,即达到1.4倍荷载设计值时,试件仍然未出现明显的变形,也未发出任何明显响声。5号杆上一侧的应变加速增长,达到了 $2018\mu\epsilon$ 。此时1号杆上荷载已经超过内力设计值的1.3倍,于是接下来开始卸载,在大约5min内,荷载缓慢卸至零。卸载后观察试件发现,节点域未发生明显变形,各根杆件也均未发生明显变形。

#### 3.3.4.2 荷载应变曲线

图19给出了1号杆的荷载级数-应变曲线,图中横轴为1号杆上的4个应变片,纵轴为荷载级数。1号杆总共贴了8个应变片,因对称位置的应

变片的读数基本一样;故图中仅给出4个应变片读数。从图19可以看出,从第1级荷载步开始,4个应变片的数值就以不同速度开始增长,表明1号杆存在初始偏心。在第26级荷载时,1号杆的最大应变达到了 $-1408\mu\epsilon$ ;在第28级荷载时,1号杆的最大应变达到了 $-1470\mu\epsilon$ 。图20给出了1号杆的荷载级数-轴力曲线,图中横轴为1号杆的轴力N,纵轴为荷载级数。1号杆由于没有设置千斤顶,其轴力只能根据应变计算,轴力的计算公式为: $N=EA\epsilon$ ,其中E为钢材的弹性模量,取 $2.10 \times 10^5 \text{MPa}$ ;A为1号杆的名义截面面积, $A=56500 \text{mm}^2$ ;  $\epsilon$ 为平均应变。从图20可以看出,1号杆的轴力随着荷载级数的增加基本呈线性增长,轴力在第26级达到最大值 $10607.49 \text{kN}$ ;相当于设计荷载的1.24倍;轴力在第28级达到最大 $11440.93 \text{kN}$ ;相当于设计荷载的1.34倍。

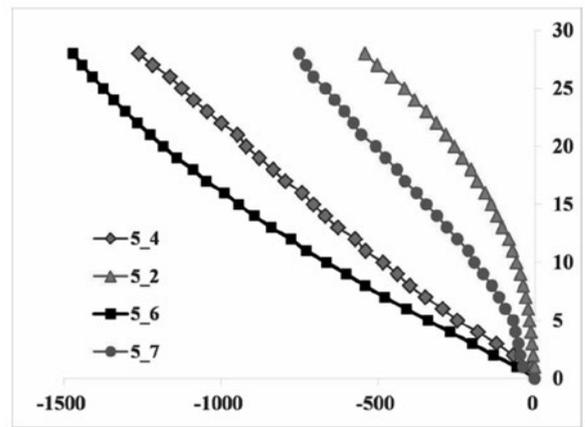


图19 1号杆荷载级数-应变曲线

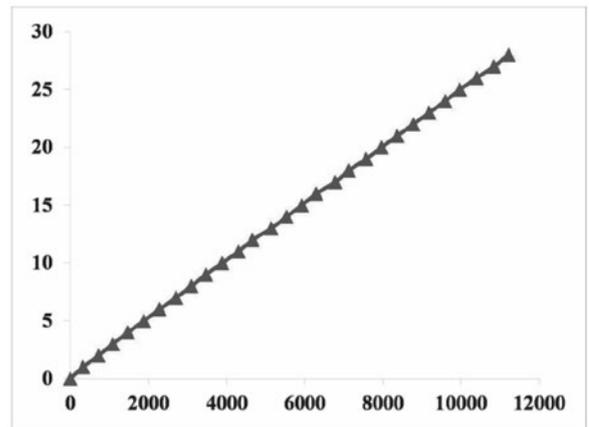


图20 1号杆荷载级数-轴力曲线

图21~图34给出了其余各杆件的荷载级数-应变曲线和荷载级数-轴力曲线;图15~图34中,两

条曲线N应变和N油压分别代表根据应变片和根据千斤顶油压得到的轴力数值大小，图中数值为绝对值。

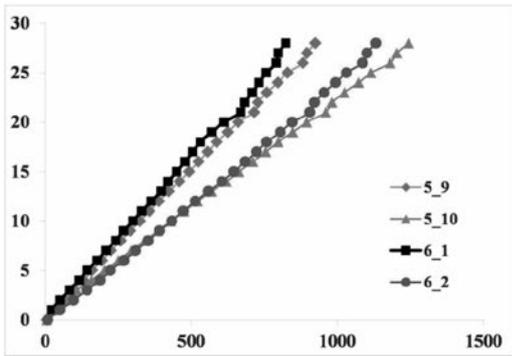


图21 2号杆荷载级数-应变曲线

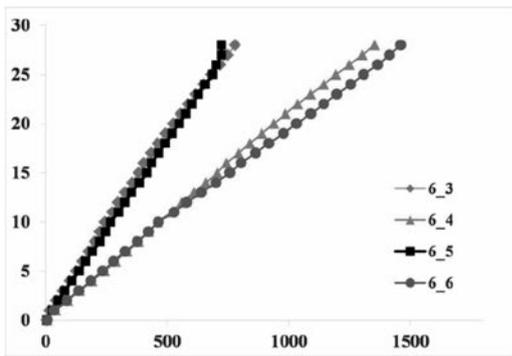


图22 3号杆荷载级数-应变曲线

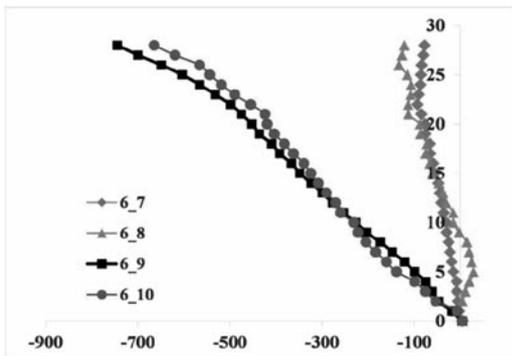


图23 4号杆荷载级数-应变曲线

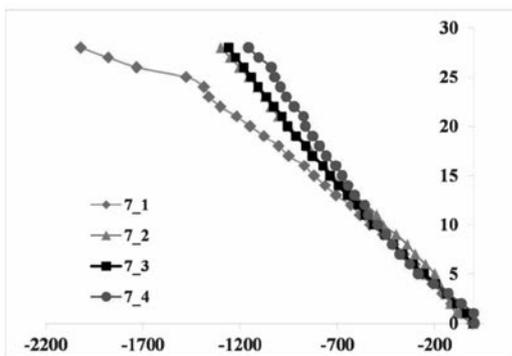


图24 5号杆荷载级数-应变曲线

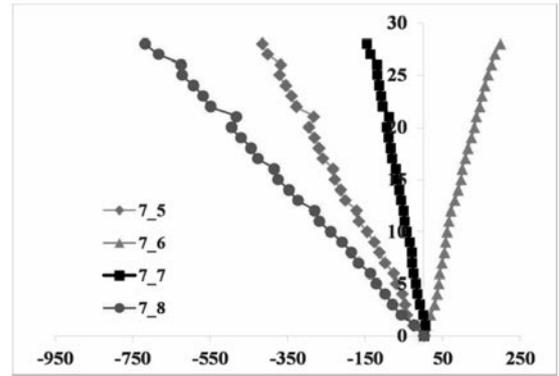


图25 7号杆荷载级数-应变曲线

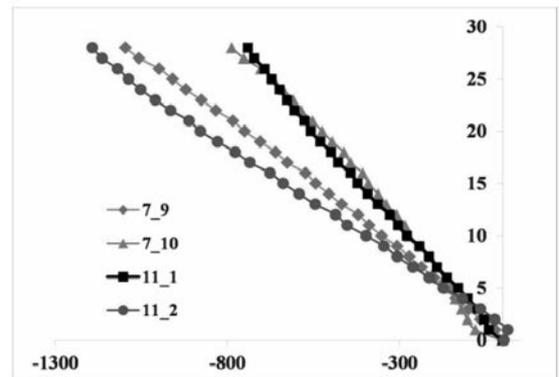


图26 8号杆荷载级数-应变曲线

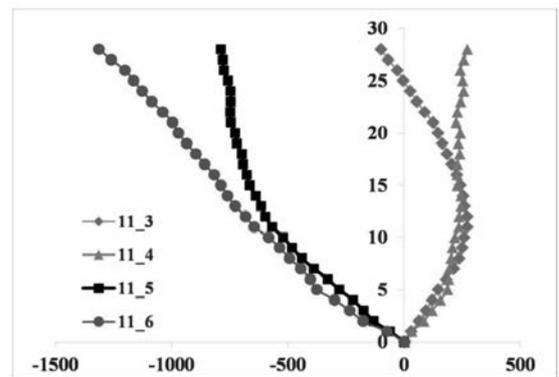


图27 9号杆荷载级数-应变曲线

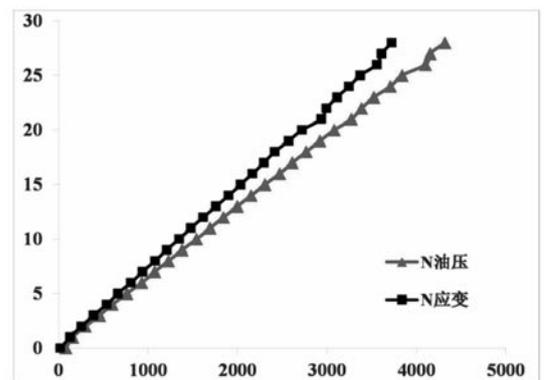


图28 2号杆荷载级数-轴力曲线

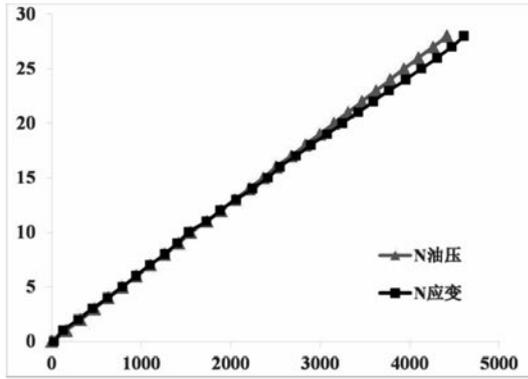


图29 3号杆荷载级数-轴力曲线

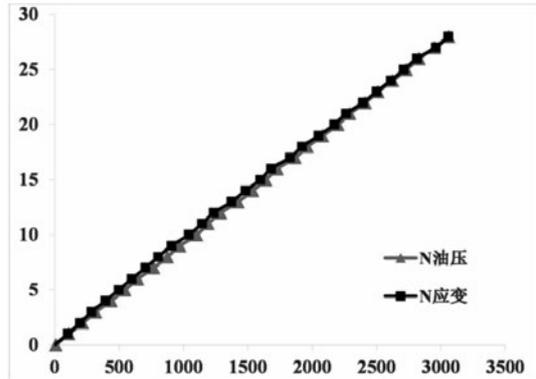


图33 8号杆荷载级数-轴力曲线

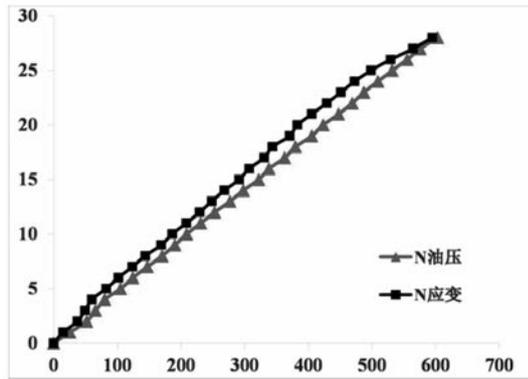


图30 4号杆荷载级数-轴力曲线

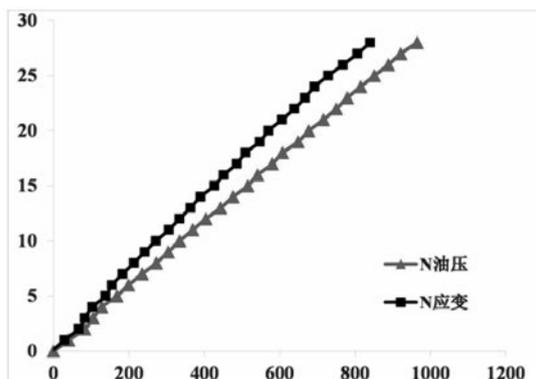


图34 9号杆荷载级数-轴力曲线

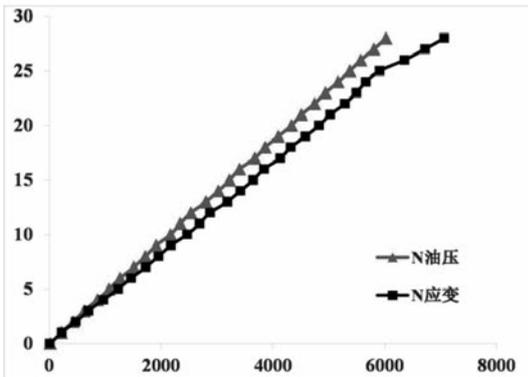


图31 5号杆荷载级数-轴力曲线

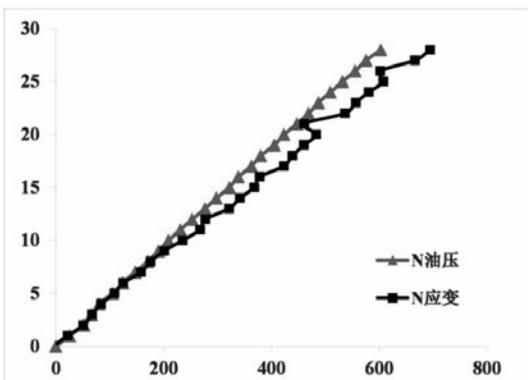


图32 7号杆荷载级数-轴力曲线

图36给出了节点域应力集中部位的应变随着荷载级数的变化曲线，应变花的位置如图35所示，图36中，横轴为应变花的3个应变读数，纵轴为荷载级数。从图36可以看出，在第1级~第27级荷载时，应变基本呈线性增长；当荷载达到第28级时，1号杆与2号杆连接的边缘处应变11~7刚好接近屈服应变，此时应变最大为 $-1503\mu\epsilon$ ；1号杆与2号杆连接的3分点处仍处于弹性范围内。

### 3.3.4.3 荷载位移曲线

图37给出了节点中心的位移随着荷载级数的变化曲线，图中2~3和2~5分别代表节点中心两个相互垂直的水平方向绝对位移，2~6代表节点中心的竖直方向绝对位移，横轴为位移计的读数，纵轴为荷载级数。从图37可以看出，在第1级~第26级荷载时，水平方向位移基本呈线性增长，最大位移达到4.1mm；在第1级~第5级荷载时，竖直方向位移基本呈线性增长，荷载达到11级以后位移不再增加，且逐渐呈现反向减小，这是由于加载后期的不平衡弯矩引起的。

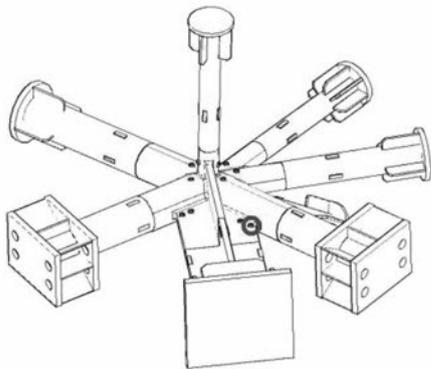


图35 节点域应变花位置

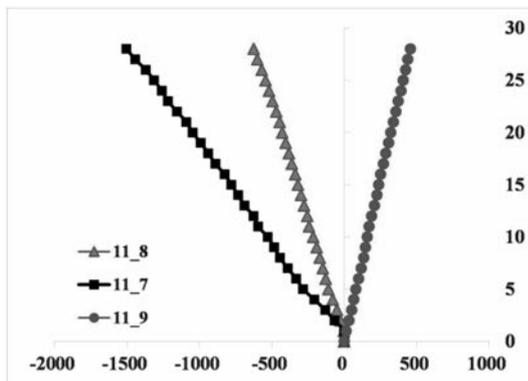


图36 应变花荷载级数-应变曲线

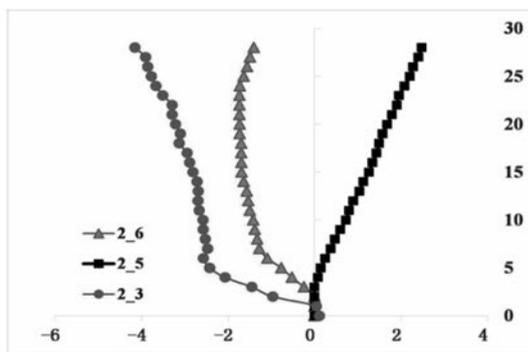


图37 节点中心荷载级数-位移曲线

### 3.4 铸钢节点ZG22

根据已经完成的ZG22节点试验，可以得出如下基本结论：

(1) 在第20级，即荷载达到1.0倍设计荷载时，节点无明显变形，节点未达到极限承载力，仍可安全的继续承载；节点域应力集中区的最大应变为 $592\mu\epsilon$ ；11号杆的最大应变为 $1016\mu\epsilon$ ，11号杆处于弹性状态，根据应变反推得到的11号杆的最大轴力为 $4518.05\text{kN}$ 。

(2) 在第26级，11号杆达到1.3倍设计荷载，节点无明显变形，节点未达到极限承载力，仍可安全的继续承载；节点域应力集中区边缘的最大应变为 $771\mu\epsilon$ ；11号杆的最大应变为 $2575\mu\epsilon$ ，仍处于弹性状态，根据应变反推得到的11号杆的最大轴力为 $7624.33\text{kN}$ 。

(3) 卸载完成后，试件没有明显的变形，节点域完好无损。

## 4 结论

(1) 有限元分析结果表明节点在1.0倍设计荷载和1.3倍设计荷载作用下，节点杆件均处于弹性阶段，仅在每个节点中心区域的杆件交汇处存在应力集中，塑性区域很小；节点的极限荷载均达到了荷载设计值的1.5倍以上。因此节点可以在1.3倍荷载设计值下安全承载，满足规范要求。

(2) 节点试验结果表明节点在荷载达到1.3倍设计荷载时，节点无明显变形，节点未达到极限承载力，仍可安全的继续承载，卸载完成后，试件没有明显的变形，节点域完好无损。

(3) 数值分析和试验结果表明，铸钢节点满足大震不屈服的性能设计要求，在内蒙古美术馆项目可以应用。

致谢：衷心感谢同济大学建筑工程系王伟教授和郭小农教授对本项目提供的试验支持。

### 参考文献

- [1] 王毅, 朱忠义, 范强, 等. 北京卢城体校自行车训练馆铸钢节点设计与分析 [J]. 建筑结构, 2006, 36(6): 58-60.
- [2] 陈海洲, 王洪军, 张其林. 杭州湾观光塔铸钢节点试验研究 [J]. 建筑结构, 2009, 39(8): 88-90.
- [3] 赵宪忠, 田亚峰, 陆维艳. 广西体育中心二期项目游泳跳水馆铸钢节点试验研究 [R]. 上海: 同济大学土木工程学院建筑工程系, 2011.
- [4] CECS 235: 2008铸钢节点应用技术规程 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.

# 兰州奥体中心体育场 超长混凝土结构温度应力分析

■ 黄超 景辉 [结构]

**摘要:** 为研究温度作用对超长混凝土结构的影响, 本文对兰州奥体中心体育场混凝土结构在温度作用下的应力进行分析。根据规范提供的公式分析混凝土收缩徐变, 并计算出等效温差, 利用Midas有限元软件分析各层主拉应力, 论证了对于超长混凝土结构, 结构温度变化和混凝土收缩徐变等非直接荷载作用产生的结构变形及约束内力效应显著。结构设计应在承载力极限状态和正常使用极限状态设计时考虑等效温差作用下的结构内力, 并以控制超长混凝土结构的裂缝为重点, 采取相应设计和施工措施。

**关键词:** 超长混凝土结构; 温度应力; 收缩徐变; 有限元分析

## 1 引言

近年来, 由于建筑物功能和工艺流程的要求越来越高, 在建筑设计中, 建筑师不设或者少设伸缩缝, 使得结构伸缩缝远超《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010) (简称混凝土规范) 的要求, 此类结构即超长混凝土结构。

文章<sup>[1][2]</sup>主要研究了结构布置对于超长混凝土结构的重要性, 文章<sup>[3]</sup>从材料、施工、设计等不同方面分别采取了不同的措施, 其中在设计方面, 采用计算温度应力+设置后浇带的方法。本文主要考虑温度变化和收缩徐变共同作用影响, 拟合等效当量温差, 从而计算相应温度应力。

## 2 工程概况

### 2.1 温度作用概况

已有工程调查和试验研究表明, 对于超长混凝土结构, 结构温度变化和混凝土收缩徐变等非直接荷载作用产生的结构变形及因变形协调而

产生的约束内力效应显著, 其影响不容忽视, 应对其进行效应分析, 并在此基础上采取相应的设计、构造和施工措施。

### 2.2 温差取值

计算温差标准值为当地的历年冬季或夏季最冷或最热的日平均气温与室内设计温度之差值正负温差, 具体要求如下:

1) 兰州当地月平均最高温度34℃, 月平均最低温度-15℃, 要求施工合拢温度在10℃~20℃;

2) 使用状态: 施工合拢温度与使用状态温差 $T_a$ , 单体混凝土环向温度内力计算时, 假定混凝土后浇带浇筑时间为10℃~15℃, 升温考虑+20℃, 降温考虑-30℃。

表1 温度取值/℃

荷载工况	温度影响状态	混凝土温差
$T_{a+}/ T_{a-}$	平均最高气温与安装状态	+20℃/-30℃ (混凝土)

注: 温度组合采用分项系数1.5

(1) 混凝土收缩徐变分析  
根据《混凝土结构设计规范》(GB50010-

作者简介: 黄超, 男, 助理工程师, 2017年毕业于哈尔滨工业大学结构工程专业, 现就职于中航建设建筑设计研究院。

2010)附录K中提供的欧洲规范EN 1992-2混凝土收缩应变和徐变系数公式,计算出混凝土不同龄期的收缩应变值如表2所示,不同后浇带封闭时间的混凝土收缩和温度变化徐变系数如表3所示。

表2 混凝土不同龄期的收缩应变值 ( $\times 10^{-4}$ )

混凝土龄期 ( $t$ )	2月 (60天)		3月 (90天)		1年		10年 ( $\infty$ )	
	150	200	150	200	150	200	150	200
理论厚度 ( $2A/\mu$ )	150	200	150	200	150	200	150	200
混凝土收缩应变值 $\varepsilon_{cs}(t)$	2.28	1.77	2.76	2.21	4.06	3.59	4.70	4.43
占总收缩应变比例 $\varepsilon_{cs}(t)/\varepsilon_{cs}(\infty)$	49%	40%	59%	50%	86%	81%	100%	100%

注:理论厚度 $2A/\mu$ 中的 $A$ 为构件截面面积, $\mu$ 为截面与大气接触的周边长度。对板为150mm,梁板综合理论厚度平均取值为200mm,对板为120mm,梁板综合理论厚度平均取值为150mm。

根据表中数据,考虑实测混凝土收缩应变值往往比按规范公式计算值偏大,本工程取混凝土的最终收缩应变值:

$$\varepsilon_{cs}(\infty) = 5.0 \times 10^{-4}$$

为减低施工阶段混凝土收缩和温度作用的影响,混凝土结构设置多条后浇带。后浇带未封闭之前的混凝土,其部分收缩受到后浇带之间结构单元竖向构件的约束作用,但考虑到各后浇带之间的间距不大(约45m左右),框架剪力墙结构中框架柱的柱距较大(9~18m),因此对混凝土收缩变形的约束作用较小。后浇带在两侧混凝土浇筑完成2~3个月后浇筑,混凝土收缩可认为完成了40%的最终收缩量,即 $\varepsilon_{cs}(60) = 40\% \times \varepsilon_{cs}(\infty) = 2 \times 10^{-4}$ ,而剩下的60%才在结构中产生拉应力。

表3 后浇带不同封闭时间混凝土徐变系数

后浇带浇筑时间 ( $t_0$ )		2月 (60天)	3月 (90天)
混凝土收缩徐变系数 $\varphi(t_0, \infty)$	理论厚度 $2A/\mu = 150\text{mm}$	1.96	1.81
	理论厚度 $2A/\mu = 200\text{mm}$	1.87	1.73
混凝土温度变化徐变系数 $\varphi(t_0, \infty + 180)$	理论厚度 $2A/\mu = 150\text{mm}$	1.38	1.28
	理论厚度 $2A/\mu = 200\text{mm}$	1.33	1.23

混凝土在收缩过程中必然伴随着徐变变形,这种变形相当于混凝土弹性模量的折减,从而引起混凝土内应力的下降。根据表3取后浇带在浇筑完成2~3个月后封闭的收缩徐变系数 $\varphi(t_0, \infty) = 1.7$ ,由于徐变引起的应力折减系数为 $\psi = 1/(1+1.7) \approx 0.370$ 。

楼盖采用C40混凝土,弹性模量:

$$E_c = 3.25 \times 10^4 \text{ MPa}$$

故混凝土中由于收缩产生的拉应力为:

$$\sigma_{cs} = \psi \times \varepsilon_{cs}(60 \sim \infty) \times E_c = 3.61 \text{ MPa}$$

## (2) 等效温差计算

在后浇带浇筑之前,温度下降使混凝土向分块结构单元中心区域收缩,由于后浇带间结构单元长度较小,且竖向构件对楼盖的约束较弱。这样混凝土中温度拉应力的大小取决于后浇带后筑时的温度和以后楼板降低的温度差值。

由于混凝土具有徐变的特性,造成温度应力松弛。考虑最大温度变化周期为半年(180天),根据温差取值,取后浇带在浇筑完成2~3个月后封闭的温度变化系数:

$$\varphi(t_0, \infty + 180) = 1.2$$

室内、室外、室内外混合等效当量温差计算见表4。

表4 等效当量温差 $\Delta T_{上}$ 计算表

	$\Delta T_{降}/\text{C}$	$\sigma_t$	$\sigma_{综}/\text{MPa}$	$\Delta T_{上}/\text{C}$
室内	-20	2.955	4.956	-15
室外	-30	4.432	5.630	-18
混合	-25	3.694	5.114	-16

注:  $\sigma_t = \Delta T_{降} \alpha_c E_c / (1 + \varphi)$ ;  $\sigma_{综} = 0.7(\sigma_{cs} + \sigma_t)$ ;  $\Delta T_{上} = \sigma_{综} / E_c \alpha_c$ ;  $\Delta T_{降}$ —构件降温温度;  $\alpha_c$ —混凝土线膨胀系数。

以上降温温差主要用于防止混凝土楼板及梁开裂,在升温情况下,混凝土楼板及梁为压应力,一般不会造成不良影响,但应充分考虑对柱的不利影响。

## 3 混凝土结构单元温度应力分析

利用Midas软件输入1.2节计算所得等效温

差, 计算相应楼层温度应力, 计算结果如表5所示。

表5 温度应力计算结果

楼层	楼板温度主拉应力 $S_{max}$ (MPa)
L1层	南北两侧楼板应力在4~6MPa之间, 东西两侧楼板应力在3~4 MPa之间
L2层	东西两侧楼板应力在1~3MPa之间
L3层	东西两侧楼板应力在1~2 MPa之间
L4层	<1 MPa
L5层	<1 MPa
L6层	<1 MPa

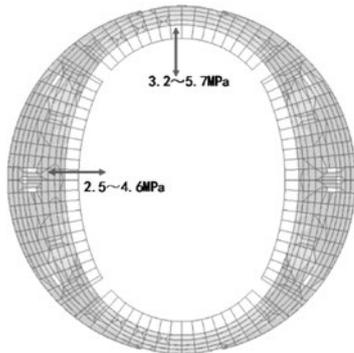


图1 L1层楼板温度应力/MPa

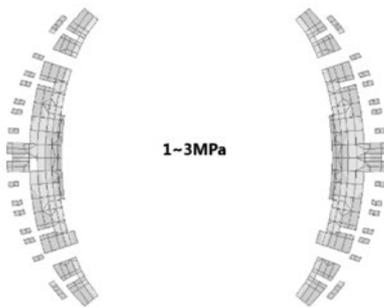


图2 L2层楼板温度应力/MPa

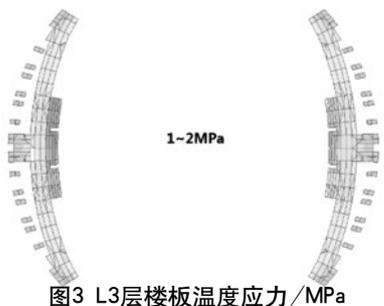


图3 L3层楼板温度应力/MPa

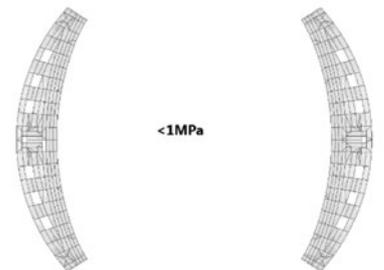


图4 L4层楼板温度应力/MPa

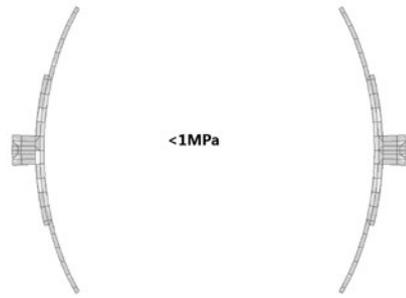


图5 L5层楼板温度应力/MPa

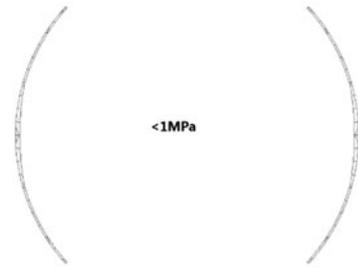


图6 L6层楼板温度应力/MPa

## 4 结论

(1) 结构温度应力较大值集中于L1层, 原因在于L1层为大平台层, 结构连为整体, 结构长度超长, 平面尺寸环向超大, 且在刚度较大的核心筒附近存在应力集中现象, 所以拟在东西看台靠近核心筒处及南北侧看台温度应力较大位置, 在梁和板中施加预应力。

(2) 在2层及以上层, 由于结构长度减小, 柱网尺寸、伸缩缝间距均较小, 楼盖内温度应力值除局部应力集中区域外, 均小于混凝土抗拉强度标准值( $f_{tk}=2.01\text{MPa}$ ), 相对开裂风险较小, 结构设计考虑采用在梁板内增大普通纵向钢筋的方式以抵抗温度作用的拉力。

## 参考文献

- [1] 张玉明. 超长混凝土框架结构裂缝控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [2] 冯健, 吕志涛, 吴志彬. 超长混凝土结构的研究与应用[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(6): 14-19.
- [3] 王伯钧, 王政, 李卫, 等. 超长现浇钢筋混凝土框架结构的设计实践[J]. 建筑结构, 2004, 34(12): 45-47.
- [4] Midas Gen Structural Engineering System: 02. Analysis & Design [M]. Midas IT Co. Ltd., 2006.

# 贵航基地综合保障楼地基基础设计

■ 郭懿 杨会杰 赵伯友 [结构]

**摘要:** 为解决山区大厚度填筑场地桩基施工难度大、造价高且单桩承载力高但利用率低的矛盾,结合拟建工程柱网密、单柱反力小,抗震设防烈度低的特点,部分基础采用“地梁转换”方案设计,有效减少桩基数量,最大程度激发桩基承载力,降低了桩基施工难度及工程造价。“地梁转换”方案在山区大厚度填筑场地多层建筑地基基础设计中具有重大推广和应用价值。

**关键词:** 大厚度填筑场地; 桩基; 一柱一桩; 地梁转换

## 0 引言

地基基础设计应根据建筑用途、安全等级及建筑柱网和结构型式等因素,充分考虑场地和地质情况,施工条件以及工期、造价等各方面需求,合理选择地基基础方案。

山区大型机场建设用地基本上均通过削峰填谷的方式获得,选址在贵阳龙洞堡国际机场的贵航维修基地就位于大厚度堆填场地上,最大堆填厚度50m;人工填土地基堆填时间短,填料成分杂、均匀性差,地基承载力低、工后沉降大,不能满足建筑对承载力及变形的要求;地基处理难度大,周期长,成本高且处理效果难以把控;采用桩基可以穿透力学性能差的土层,选择力学性能好的土(岩)层作为桩端可靠持力层,从而满足建筑物对地基承载力和变形的要求。

山区大厚度人工填土场地嵌岩桩方案的特点是桩长超过50m,造价高;杂填土地基桩基施工成本高;基桩承载力高,对于多层建筑,单柱反力小,采用传统的一柱一桩方案设计,桩基承载力难以有效发挥,且工程造价高、施工周期长。考虑桩基方案的上述特点,本文提出了一种新型设计理念,上部结构方案考虑地基特点,部分基础采用“地梁转换”方案设计,有效减少桩基数

量,最大程度激发了桩基承载力,降低了桩基施工难度及工程造价,在低烈度山区大厚度填筑场地的多层建筑地基基础设计中具有重大推广和应用价值。

## 1 工程概况

贵航基地综合保障楼位于贵阳龙洞堡国际机场一跑道西南侧,总建筑面积8600m<sup>2</sup>。平面尺寸为72.8m×41m,柱网尺寸为7.2m×7.2m,地上4层,结构高度16.7m,结构型式采用钢筋混凝土框架结构,建筑效果图见图1。



图1 建筑效果图

工程设计使用年限为50年,结构安全等级为

作者简介:郭懿,男,助理工程师,2018年毕业于中国航空规划设计研究总院有限公司结构工程专业,现就职于航空工业规划动力工程设计研究院。

二级，结构重要性系数为1.0。抗震设防烈度为6度，场地类别为Ⅱ类，设计地震分组为第一组，多遇地震场地特征周期为0.35s，抗震设防类别为标准设防类（丙类）。

## 2 基础方案

建设场地原始地貌为一岩溶峰丛洼地（即为山谷），地势四周高、中间低。因机场三期工程建设需要，建设场地按设计标高填筑平整，总体填筑厚度在50m左右，属于大厚度填筑场地，填料以大粒径石块为主，且存在岩溶边坡等不良地质条件，成桩难度大、成本高。

据区域地质资料、工程地质测绘和钻探资料结果，场地上覆土层为第四系人工填土以及第四系残坡积红黏土，下伏基岩为三叠系下统安顺组中厚层灰色白云岩地层，土层参数见表1。

表1 土层参数表

岩土单元	承载力特征值 (kPa)	变形模量	极限侧阻力 (kPa)	极限端阻力 (kPa)
压实填土①	230	(15.0)		
红黏土②	160	(6.6)	(60)	
强风化白云岩③1	(400)		(250)	
中风化白云岩③2	4000		(1200)	(10000)

高填方地基上建（构）筑物的建造时间不得少于1个雨季的自然密实期<sup>[1]</sup>，因工期要求，填筑完成后立即进行建筑基础施工，考虑到人工填土地基后沉降大、均匀性差，地基处理难度大、周期长、成本高且处理效果难以把控等因素。本工程采用钻孔（冲击、旋挖）灌注桩+承台的基础形式，桩为嵌岩桩，桩端持力层为中风化白云岩。

如图2中典型地质剖面所示，③2层中风化白云岩中分布有较多溶洞，且溶洞大小不一。

根据地勘报告，现状地面标高距离持力层最大深度超过50m，桩长长，小直径桩无法成桩，需要采用大直径桩，现场的填筑材料以原场地抛填土和大块石材为主，基桩需要穿过填方的块石，施工难度较大，成桩只能采用旋挖工艺，其他方式无法成桩。

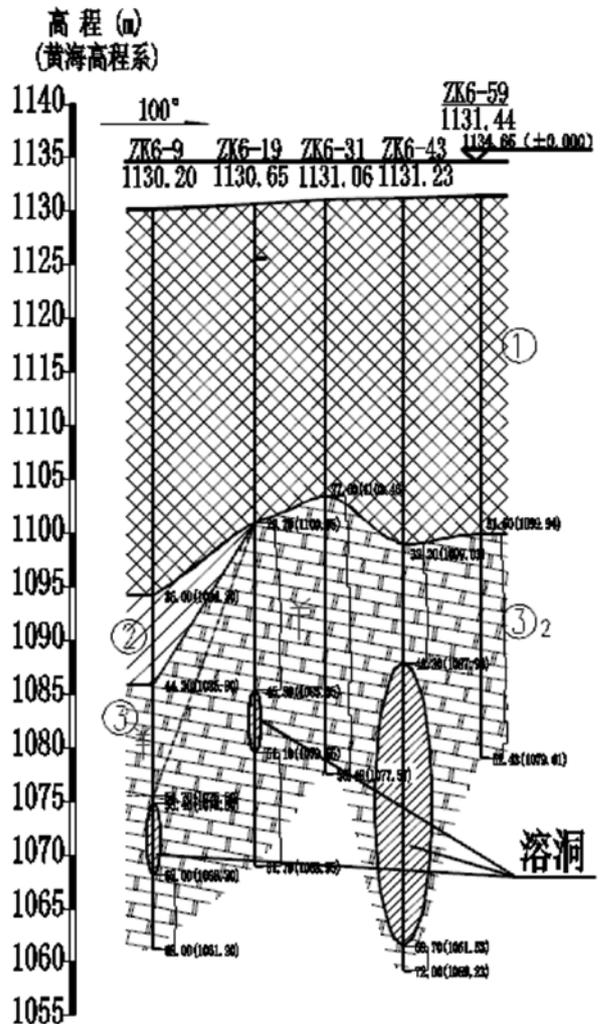


图2 典型地质剖面

贵阳地区属于低烈度区，上部结构又为多层建筑，最大柱底反力仅为4800kN。依据地勘报告选择1.2m、1.5m桩径的两种桩型，单桩抗压承载力特征值分别为11500kN和18000kN，如采用传统的一柱一桩方案设计，桩基承载力难以有效发挥。

根据当地经验，施工旋挖成孔灌注桩或全套管管内取土（岩）成孔灌注桩工艺，一根桩施工时间3~7天，对工期影响大，施工费用高。

综上，考虑到桩施工难度大、施工成本高、单桩承载力高的特点，并结合当地经验，经过多次专家论证，决定设计中保持上部结构建筑型式不变，采用“地梁转换”的方式减少基础桩数，最大程度激发桩基的承载力，从而降低桩基施工难度及工程造价。

### 3 基础方案对比

#### 3.1 常规基础方案

常规基础方案采用“一柱一桩”的设计原则，总桩数62根，桩径为1200mm，基础联系梁截面为400mm×700mm。

#### 3.2 “地梁转换”基础方案

“地梁转换”方案根据地勘报告提供的工程地质剖面图，增大桩距，减少桩数，总桩数由62跟减少到28跟，桩径采用1200mm和1500mm两种。基础联系梁采用转换梁的形式，主要截面为600mm×1200mm、850mm×2000mm、1200mm×2000mm，“地梁转换层”如图5所示。

#### 3.3 方案对比

由于采用“地梁转换法”时，上部结构布置

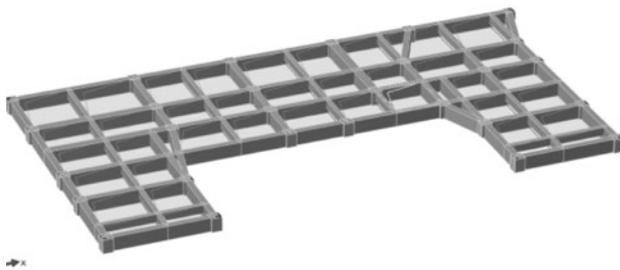


图5 “地梁转换层”示意图

与常规方案完全相同，不同之处仅在于“地梁转换法”增加了“地梁转换层”。故本文只针对两种基础方案的经济性做出比较。

##### 3.3.1 工程造价对比

由于不同时间不同供货商的钢筋、混凝土等材料价格均不相同，梁板柱基础等不同部位构件的钢筋含量也不相同，所以造价比较采用大致估算的方法。

考察当地材料价格后，按以下材料单价进行估算，混凝土按1300元/m<sup>3</sup>（含模板），钢筋按7000元/t（含加工），灌注桩按2500元/m<sup>3</sup>（根据当地经验综合单价，含钢筋、混凝土及施工费用）。两种方案的材料用量统计表如表2所示。

由表2可知，“地梁转换”方案上部结构造价与常规方案相同，虽然基础转换梁造价比常规方案增加较多，但灌注桩造价比常规方案减少约49%，总造价比常规方案减少约9%。

##### 3.3.2 施工周期对比

项目桩施工难度大，施工周期长，采用“地梁转换”方案可有效缩短施工周期，同时有效减少施工过程中可能遇到的溶洞处理等增加工期和增加成本的情况，降低大直径桩施工风险。

## 4 转换地梁的参数控制

本工程转换地梁跨度在15m~18m之间，跨度较大，梁截面也较大，有超过半数的柱子生根于转换地梁之上，因此转换梁的设计成为了决定工程安全的重要环节，其设计参数应从严控制：

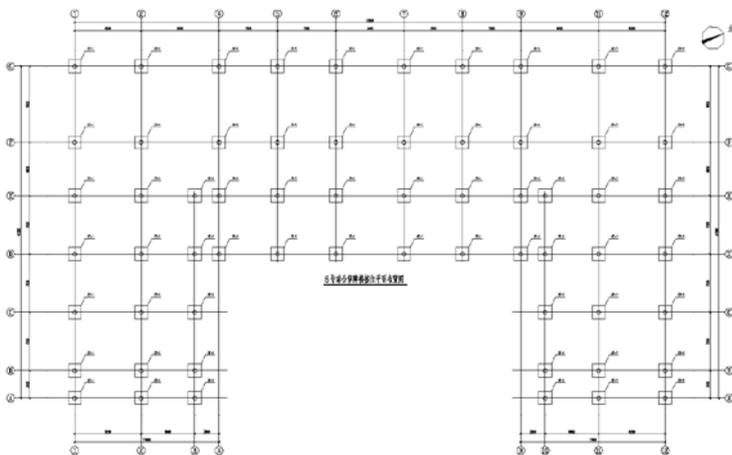


图3 常规方案布桩图

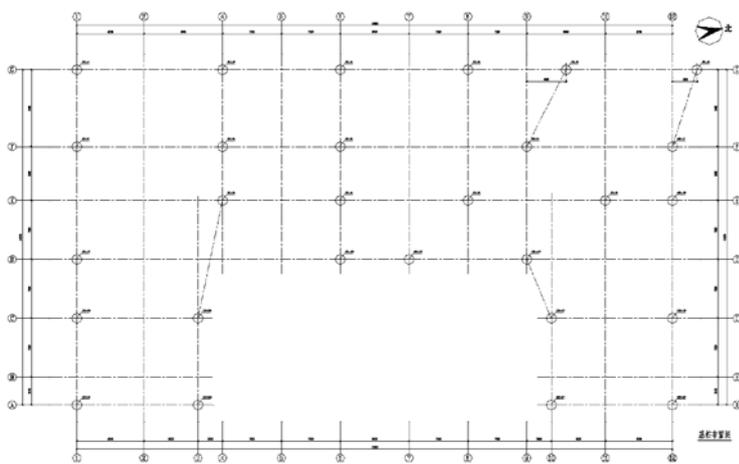


图4 “地梁转换”方案布桩图

表2 材料用量统计表

分项	常规方案				“地梁转换”方案			
	混凝土		钢筋		混凝土		钢筋	
	材料用量	分项价格	材料用量	分项价格	材料用量	分项价格	材料用量	分项价格
承台	161m <sup>3</sup>	21万元	73t	51万元	91m <sup>3</sup>	12万元	42t	30万元
基础拉梁	208m <sup>3</sup>	27万元	38t	27万元	1067m <sup>3</sup>	139万元	251t	176万元
灌注桩	2803m <sup>3</sup>	701万元	—	—	1419m <sup>3</sup>	355万元	—	—
基础合计	827万元				712万元			
上部结构	454万元				454万元			
总造价	1281万元				1166万元			

(1) 由于部分框架柱下为灌注桩，部分柱下为转换地梁，不同类型柱底沉降差异明显，故需要严格控制相邻柱竖向变形差，按《建筑地基基础设计规范》GB50007-2011<sup>[2]</sup>表5.3.4的规定控制。因转换梁刚度较大，其挠度与柱距的比值参考中低压缩性土按照0.002L从严控制。

(2) 转换地梁配筋按《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ3-2010<sup>[3]</sup>第10.2.7条中的要求控制。

(3) 控制转换梁裂缝宽度限值不大于0.2mm<sup>[4]</sup>。

## 5 结论

本文针对低烈度山区大厚度人工填土场地地基基础设计的主要矛盾，提出了“地梁转换”设计方案，得出的主要结论如下所述：

(1) 山区大厚度填筑场地桩基施工难度大、造价高且单桩承载力高但利用率低，采用“地梁转换”方案设计，可以有效减少桩基数量，最大程度激发桩基承载力，降低桩基施工难度及工程造价，在低烈度场地多层建筑地基基础设计中具有重大的推广和应用价值；

(2) “地梁转换法”虽然增加了基础转换梁的工程造价，但相比常规方案在桩身造价上有较大降低，另外该方法在节约工期方面也具有较明显的优势，有利于工程的总体经济性；

(3) 转换地梁跨度长，截面大，是决定工程安全的重要环节，故其设计参数应引起设计人员的

重视，建议从严控制。

## 参考文献

- [1] GB51254-2017高填方地基技术规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社, 2017.
- [2] GB50007-2011建筑地基基础设计规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社, 2011.
- [3] JGJ3-2010高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京：中国建筑工业出版社, 2010.
- [4] GB50010-2010混凝土结构设计规(2015年版)[S]. 北京：中国建筑工业出版社, 2015.

# “四型机场”理念 在航空配餐楼中的应用

■ 宋晓东 刘烁 张竞竞 [民航工艺]

**摘要:** 本文探讨了如何切实可行地将“平安、绿色、智慧、人文”为核心的四型机场指导思想应用到航空配餐楼中,通过实行严格安全控制,重视能源综合利用,采用高新技术和精细化管理和以人为本的工作环境,建设符合四型机场理念的航空配餐楼。

**关键词:** 关键词: 四型机场; 绿色建筑; 人文建筑; 智慧建筑; 航空配餐楼

## 0 引言

2019年9月25日,习近平总书记亲自出席北京大兴国际机场投运仪式,对民航工作作出重要指示,要求建设以“平安、绿色、智慧、人文”为核心的四型机场,为中国机场未来发展指明了方向。

航空配餐楼是民用枢纽及大型机场后勤保障和服务系统的重要组成部分。航空配餐楼遵循功能决定形式的原则,为保证配餐楼功能需求和生产能力,实现合理、顺畅的组织和清晰、明确的功能分区,以满足航空食品加工、储存、收发以及客舱服务内容的各项要求,在航空公司的服务品牌建设中起到非常重要的作用。在“四型机场”理念在机场建设的应用中,航空配餐楼将扮演着重要的角色。

## 1 “四型机场”理念

四型机场是以“平安、绿色、智慧、人文”为核心,依靠科技进步、改革创新和协同共享,

通过全过程、全要素、全方位优化,实现安全运行保障有力、生产管理精细智能、旅客出行便捷高效、环境生态绿色和谐,充分体现新时代高质量发展要求的机场<sup>[1]</sup>。

## 2 航空配餐简介

航空配餐是为飞机上旅客和机组成员提供餐食和机供品的行为。机供品是指民航飞机上提供的除食品以外的物品。其中,酒水饮料的配备为航空配餐中机供品的主要配备内容;餐食是指民航航班上面所提供的冷餐、热餐、糕点小食等,属于狭义的航空配餐生产范畴。广义的航空配餐生产还包括为部分航班提供的鲜花、报纸、香水、免税品以及毛毯等机供品的生产活动。航空配餐楼即为航空食品加工、储存、收发以及客舱服务的厂房<sup>[2]</sup>。

## 3 航空配餐楼在“四型机场”理念中的角色

四型机场建设不是机场一家主体的“单打独斗”,它涉及空管、航空公司等各民航运行单位,以及各单位主体的生产运行、旅客服务、航

作者简介:宋晓东,男,助理工程师,2018年毕业于中国农业大学工艺专业,现就职于中航建投民航工程设计研究院。

空安全和节能减排等业务工作。航食公司作为保障机场运转的重要组成部分，承担着四型机场理念在实际应用中不可或缺的重要角色。因此，要加强对航空配餐重要角色的认识，重视航空配餐楼建设的设计、施工、验收、运行全过程中对四型机场理念的落实，实现航空配餐行业与机场内部其他部门之间的体系化协同，统筹资源供给，优化资源配置，全面提升机场系统效能。

## 4 “四型机场”理念在航空配餐楼中的应用实施措施

### 4.1 平安机场

#### 4.1.1 总体目标和要求

(1) “四型机场”理念中的第一条首先要求平安机场。平安机场的首要目标是确保机场运行安全，正确处理安全与发展、安全与效益、安全与正常、安全与服务的关系。

(2) 以主动防御和智慧防御相结合；采用人防、物防、技防等全方位防范措施，构建“多层次，多防线”的机场安全防范体系。

(3) 充分研究先进机场建设理念，对航空配餐生产区域设置防范重点，在防范区域和对象建立主动、智能的防范手段和应急响应措施。

#### 4.1.2 具体措施

(1) 健全安全生产责任体系，强化企业安全生产主体责任

航空配餐楼作为生产乘客在航行旅程中入口食品的厂房，从管理上需严格实行安全生产“一票否决”制度，严格落实岗位职责，切实将安全责任落实到岗位、落实到人，持续推进机场安全管理体系（SMS）建设，全面实施安全绩效管理，加强队伍作风和能力建设，筑牢安全生产底线<sup>[1]</sup>。

(2) 入侵报警系统

在配餐区围界上，设置红外光束入侵报警探测器，在配餐楼安防监控室设置入侵报警系统工作站、报警主机等。入侵报警系统集成到监控系统中，当接收到入侵报警信号后，通过设定的联动输出点可自动将现场图像切换至监视屏显示，了解报警现场的异常情况。

#### (3) 视频监控

在围界四周设置星光级高清固定式及球型红外彩色网络摄像机。围界配套视频监控系统是当报警信号发生后，对报警防区区域内进行视频捕获和追踪，每个报警防区有相对应的摄像机进行图像视频监控，相邻的摄像机通过预置位控制对报警区域进行交叉覆盖，同时进行视频录像以及抓拍图片。在监控中心统一的软件平台上进行网络控制、传输、存储。系统实现数字化、智能化管理，视频信号采用光纤传输、数字存储、数字检索和控制。图像存储时间为90天。

#### (4) 生产安全

将航空食品的生产过程与航空食品制作的原料、半成品、成品对温度及卫生相应的要求进行设计。保障冷链控制条件，满足航空食品的原料进货、存储、加工、半成品、成品的暂存、装摆、发货等各个环节环境的温度。生产区域的边界分别设置各类冷库，便于工人按照生产规范进行温度控制管理。生产区的工艺区划以满足生产卫生标准为重点和主线，按照污染区、非控制区、准清洁区、清洁区进行设计<sup>[3]</sup>。

为保证餐食产品的质量，提升餐食的口感，航食楼的生产用水采用净水，即去除自来水中的余氯、残留悬浮物及细菌的洁净水。净水制备流程如图1所示。

## 4.2 绿色机场

### 4.2.1 总体目标和要求

以所在机场的绿色机场框架指标体系为基

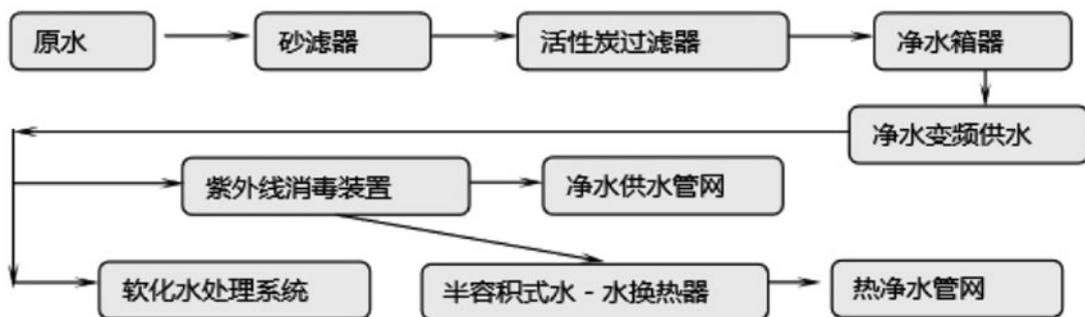


图1 净水制备流程图

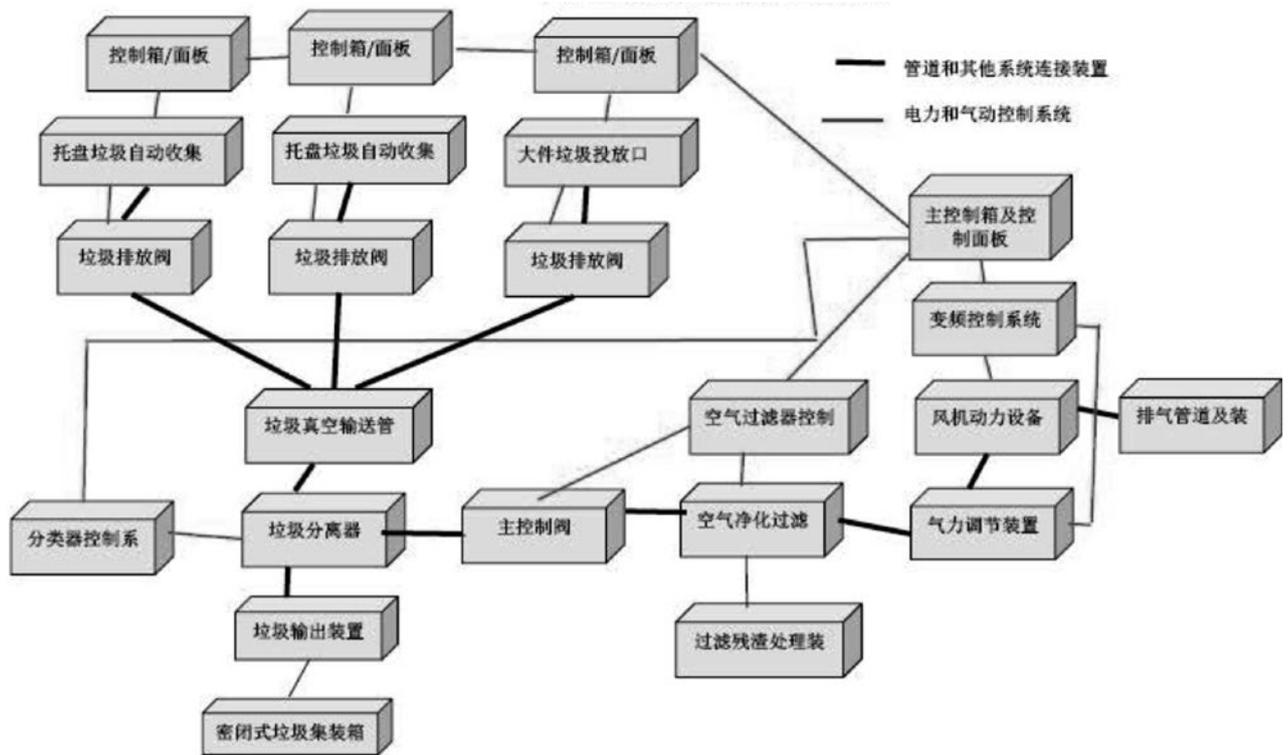


图2 真空垃圾收集系统流程图

础，指导配套设施建设的全过程；按照所在机场对于建筑的绿色设计要求进行工程设计，充分利用新能源设施，达到能源综合利用相应的要求。

#### 4.4.2 具体措施

##### (1) 节地与室外环境

节约用地。项目用地应结合地势设计排水方案，在有条件的区域采用透水率大的硬质铺装地面；办公、生活建筑的屋面尽量采用绿化屋顶，提升室外环境质量。参照海绵城市的建设要求，在地块室外竖向设计中根据实际条件考虑建立下凹式绿地，设计营造微地形，减少低洼地，防止内涝。广场露天车位采用透水铺装，提高绿化率减少用地内雨水径流量。在保证绿化率的前提下，增大透水铺装面积，设置雨水渗透井、植草沟等措施，尽量减小径流系数，从而减少径流雨水量及污染物。下凹式绿地下凹深度达到15cm，可作为雨水调蓄措施，调蓄雨水深度为5cm。

##### (2) 节能与能源利用

1) 尽量采用体型系数小的方整的建筑形体，尽量减少外围护结构的热损失；  
2) 外墙、外窗材料均选用保温隔热性能好的材料型号；

3) 卫生器具均选用节水型洁具；给水龙头及阀门采用陶瓷芯密闭产品，管材及接口采用优质产品，防止渗漏。

##### (3) 空调节能技术

1) 办公区的风系统设计能量回收装置，排风经与新风换热后，再排至室外；  
2) 通风设备采用高效设备，所有空调系统均选用环保冷媒；  
3) 空调循环水泵采用变频水泵，水泵负载可根据末端需求进行调节；  
4) 全空气系统的送、排风风机采用变频风机，过渡季实现全新风的同时，可实现按需变风量运行；  
5) 水管支路设置动态平衡阀，利于变负荷情况下的水力平衡；  
6) 对整个园区设计多温度冷源形式，实现能源的梯级利用；  
7) 冷机及输配的优化配置：水冷机组配置常规机组+磁悬浮机组，前者兼做夜间蓄冷，后者兼做小负荷调节和基载冷机，设计水温采用7℃大温差输配，水泵采用一级泵变频系统。  
8) 针对低温空调区域，采用轻质纤维布袋送

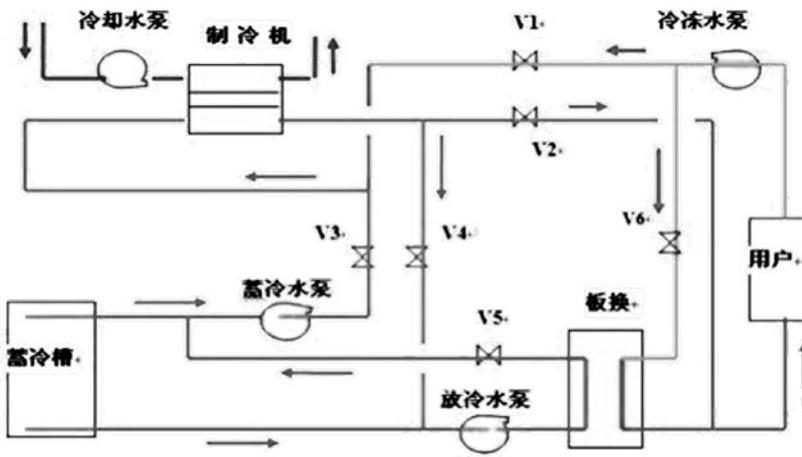


图3 回收热量再利用原理图

风系统，既实现送风的均匀性，又避免了大风温差下的冷感问题。

(4) 污水处理

生产车间设备的排水均采用间接排水的方式，在生产区地面设排水明沟，用以收集设备的排水及冲洗地面废水，明沟收集的废水经排水管路收集后，统一排至室外厂区隔油装置。不能避免的在有洁净要求的生产车间和库房内穿过的生产排水管外包吸水性较强的防结露保温层，并在其下设置带坡度和泄水口的管槽，用于防止污水管道渗漏或结露产生的凝结水造成对安全、卫生、环保和财物产生影响。

(5) 垃圾处理

设置垃圾房/站，对垃圾进行分类处理。其中，厨余垃圾通过厨余垃圾处理系统，经粉碎脱水后送至垃圾房/站。真空垃圾收集系统全密闭化运行，清洁卫生，可消除食品与垃圾之间的交叉污染，可有效消除垃圾异味，节省空间，释放更多人力，减少垃圾运输成本。

(6) 热回收技术

对冷库系统、空调系统以及工艺设备的余热进行热回收用于生产。根据余热的品质，按照温度高低顺序不同按阶梯利用。根据配餐楼的规模和厂房性质，一般来说，

回收的热量主要用于补充生产热水需求，主要原理如图3所示。

(7) 其他

利用消防水池设计水蓄冷，实现在夜间低湿球温度、低电价工况下蓄冷，进而在日间高湿球温度、高电价下放冷，既节能又节费。放冷采用间接式，原理图如图4所示。

4.3 智慧机场

4.3.1 总体目标和要求

结合机场的智能监控管理平台，高度集成新一代信息技术包括信息感知、传输、处理各个环节，并运用近距离无线通讯、传感网、海量数据存储、数据挖掘、信息安全等关键技术，并将航食区的

智能化系统作为机场信息化系统的一个组成部分，实现与机场整体信息化系统的融合，互联互通、交换共享以及各系统之间的协作关联应用，最终形成一个智慧安全、智慧运营、智慧营销、智慧服务的安全、绿色、智慧的配餐运行基地。

4.3.2 具体措施

(1) 信息建设

通过云计算、大数据、物联网、移动互联等新兴信息技术，全面提升航空配餐生产运行的数据监测反馈，提高其生产管理水。

将航空配餐生产运行平台与机场生产平台进行协同，实时共享航班信息、资源分配等数据，实现运行调度与工作协同的同步化和生产的智慧化。

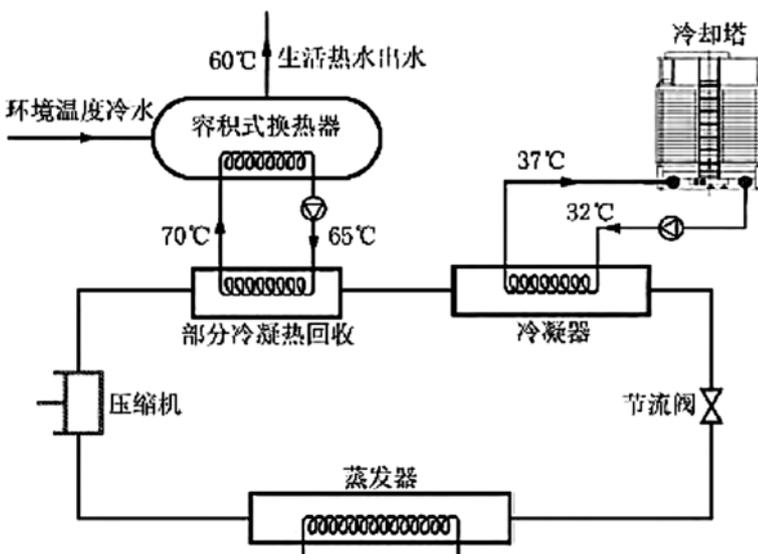


图4 放冷间接式原理图

配餐工程在市政给水入口处、各建筑物入口处设置水表计量，水表采用远传水表，数据信号纳入本项目能源管理系统。要求供水压力不小于0.3Mpa。若市政压力不足，压力不足之处考虑二次加压供水。在污水管网接至市政污水管网的总排口处设置在线监测装置，信号纳入本工程能源管理系统，并可上传至当地环保部门监测系统。

#### (2) 安全保卫

设置安全保卫综合管理平台，集成视频、门禁、安检、周界等功能，使各自独立的安防系统互联互通。

#### (3) 灭火系统

配餐楼内厨房热厨区灶台应设有专用灭火系统。在厨房排烟罩内设计厨房设备专用灶台灭火系统。灭火剂采用厨房专用灭火剂，通过喷嘴喷洒在厨房设备表面以上及抽烟罩、过油网和排烟管道的内部。喷洒灭火剂10s后自动喷水降温，降温用水由自喷给水系统接出，并设水流指示器。灶台灭火系统自带控制柜，并设有火警信号输出接口，可将动作信号传至消防控制室。

#### (4) 能耗监测系统

建立能源管理平台，实现对本工程用电、水、集中供冷、集中供热等能耗的统计分析，并针对能耗消耗情况给出针对性节能管理建议，同时，通过网络将相关数据上传至上一级管理平台。

在配餐楼安防监控室设置能源监测管理工作站，能耗监测工作站、能耗监测服务器与网关之间通过智能化传输专网进行通讯，网关设置在各弱电间，与各智能表具之间采用RS485总线进行通讯。

### 4.4 人文机场

#### 4.4.1 总体目标和要求

- (1) 以人为本，充分保障航空食品卫生安全；
- (2) 方便航空配餐生产人员的办公、生活，提高航空配餐工作、生活场所的舒适度。

#### 4.4.2 具体措施

##### (1) 安检设置

通过人员安检、物品安检设施、流程的设计，实现进出航空配餐场所的人、物安全；

##### (2) 生活辅助设施设置

在航空配餐用地内设置厨房、餐厅，人员休息室、倒班宿舍等设施，充分保证生产人员的生活需要。

充分考虑以人为本，从建筑内部空间人性化设计，景观绿化采用令人身心愉悦的植物品种，

立足于城市文化和企业文化，充分考虑员工感受和需求，通过设置景观广场、趣味空间、步行系统，为员工提供一个舒适的工作环境。例如，大开间办公区域应采用现场面板控制、定时控制、人体感应控制及光线感应控制相结合的方式进行灯光控制，可在上班期间自动开启灯光，人走自动关闭灯光，自然光线足够时，自动关闭灯光，同时也可在现场手动进行控制，达到自动控制，管理方便及节能的效果。

### 参考文献

- [1] 《中国民航四型机场建设行动纲要（2020—2035年）》
- [2] 张竞竞，郑应平，刘烁. 危害分析和关键控制在航空配餐楼设计中的应用[J]. 工业建筑，2015，000(003):188—191.
- [3] 李箐，刘烁. 航空配餐楼的物流特点及设计要点[J]. 物流技术与应用，2014，019(007):128—130,132—133.

# 通用机场规划设计 要点分析与思考

■ 王锋刚 [总图]

**摘要:** 本文分析了通用机场的选址要点,提出在机场规划设计过程中需要重点关注和解决的问题,并针对定翼通用机场设计进行论述,为今后通用机场规划设计提供借鉴参考。

**关键词:** 通用机场;定翼通用机场;机场设计

## 1 引言

随着低空产业的逐步发展,通用航空在人们的生活中发挥出越来越重要的作用,已成为与航空运输并列的民航两翼之一。通航产业逐步成为地方经济发展中新的产业类型和增长点,而通用机场也是地方各级政府日益重视和大力投入的重要基础设施。

笔者有幸经历并参与了我国通航产业大发展和通用机场大力兴建的重要时期。参与了众多通用机场的选址、立项、可研、规划设计及相关专题研究等工作,对通用机场的咨询设计、建设、运营过程较为熟悉,掌握项目各阶段流程,对各阶段重点难点问题有较为深刻的认识。

本文将针对通用机场前期规划咨询各阶段阐述本人的一些见解及观点。

## 2 通用机场选址

机场选址是新建机场最重要的工作之一,是空中和地面相互配合、相互协调的工作。机场在

选择场址时必须首先满足其使用功能,如机场净空条件、机场空域、机场使用率等。在满足其使用功能的基础上,还必须满足经济和环境保护方面的要求。机场选址需要兼顾近远期发展,为远期留有发展余地。

与其他交通设施建设不同的是,通用机场的选址除了涉及地面条件和交通接驳等方面外,还要从空域与净空条件、航线设置、天气情况、环境影响、产业与园区发展、城市规划等若干角度进行综合考量。通用机场选址阶段应对上述内容进行综合考虑、充分预见,这些对机场建设、运营乃至对产业的发展都具有十分重要的意义。

通用机场场址选择的要点分析如下:

### (1) 场址的净空、空域及气象条件

通用机场场址的净空、空域及气象条件,能够满足机场安全运行要求,所用空域与邻近机场使用空域无矛盾或能够协调解决,空域规划与机场容量相协调。

### (2) 场址与城市的关系

场址与城市距离适中,机场与外界联系交通便利,机场运营和发展与城市中长期发展规划相协调,跑道轴线尽量避免穿过城市及其规划发展区。

作者简介:王锋刚,男,高级工程师,2007年毕业于中国民航大学机场规划专业,现就职于中航建设建筑设计研究院。

### (3) 场地条件

场区的场地条件能够满足机场本期建设和远期发展需要,工程地质、水文地质和电磁环境相对较好,地形、地貌相对简单,土石方工程量相对较少,满足机场工程建设和安全运行的要求。

### (4) 外部配套设施引入条件

场址具备航油、供电、供水、供气、通信、道路、排水等设施及系统的建设条件,能够满足机场运营要求。

### (5) 用地性质及要求

场址应符合土地使用规划,尽量不占或少占用良田、耕地、林地、湿地或草地,居民拆迁量较少。

### (6) 环境、文物及资源保护要求

场址满足生态、环境保护及文物保护要求,场区地下无重要矿藏。

### (7) 工程投资经济合理。

工程建设需遵循经济合理的原则,在充分论证比选的基础上,尽可能达到建设方案最优、工程投资最经济、运营成本最低、经济社会效益最佳的目标。

### (8) 其他方面

除了技术方面对机场场址进行可行性及合理性论证以外,还需充分并广泛征求军方、民航、地方政府等各方的意见,力求机场场址能够满足机场安全、经济、可持续发展的要求。

## 3 通用机场规划

为了适应通航产业及通用机场的长远发展,需对各项资源进行优化配置,以指导机场各阶段建设,促进机场的全面均衡发展,需对机场进行合理规划,确定机场的性质、规模、布局和发展方向,实现通用航空、社会、经济、资源和环境的可持续发展,同时,融入城市发展规划,确保与城市及工业园区规划相一致,保证机场与城市发展不冲突,并对当地经济和社会发展起到很好的推动作用。

在规划过程中,需要重点关注和解决以下四个方面的问题:

#### (1) 确定近、远期规划目标

近期规划立足于指导近期建设,注重建设内容的重要性及可实施性。远期规划立足于对远期建设的引导,注重发展的前瞻性及开创性。

(2) 遵循统筹规划、分期实施、滚动发展的原则

机场是一个复杂的空中和地面运行的综合体,总平面规划必须从全局出发,统筹安排各种设施的规模和布局,促进机场的均衡协调发展。总体规划在确定各种设施的布局时,应坚持以功能分区为主的原则,避免出现功能散乱、重复建设的不合理格局。

#### (3) 保障飞行安全

飞行安全是通用航空运营的生命,总平面规划应为保障飞行安全创造良好的条件。飞行区规划必须符合国家 and 民航行业相关标准,机场净空和空域条件要得到切实保护,通信、导航、航管、气象、目视助航设施配置完备,安全保卫、应急处理设施应与机场性质和规模相匹配。

#### (4) 提高机场运营效率和人性化服务

总平面规划应有利于提高机场的运行效率和服务水平。空侧规划应考虑跑道、滑行道系统构型和数量应满足预测及飞行程序要求,飞机滑行顺畅便捷。陆侧规划应考虑地面交通高效,路线清晰,尽量避免人流和车流交叉,功能设施选址科学,布局合理。

(5) 规划应注重经济效益,为机场创造良好的盈利条件

机场是人流、物流和信息流交汇的中心,蕴藏着很多商业机会,具有独特的开发条件,结合通用航空产业发展规划,合理布局相关设施,促进机场开展多种服务,提高盈利水平。

(6) 合理使用土地,减少对周围地区环境的不利影响

遵守国家的土地政策,提高机场土地的利用效率,尽量节约、集约用地。

机场的运行将对周围地区的环境造成一定影响,例如飞机噪声、空气和水体污染、自然和生态环境的改变,规划中需要研究分析机场的环境问题,并采取或建议采取相应措施予以改善。

(7) 规划应与城市规划统一,促进机场和邻近地区的协调发展

机场与城市是息息相关的。机场规划与城市规划必须相互协调、统一,妥善处理机场和城市的关 系,合理规划机场周围土地的使用,促进机场和邻近地区的协调发展。

(8) 规划应着眼于未来发展,具有充分的灵活性

机场未来的发展受多种因素制约,无法准确预计,因而机场规划也是一个长期的动态过程,不可能一蹴而就。总平面规划应着眼于未来发展,留有适当余地。无论对于机场整体、某个功能区或单个项目,规划都应具有充分的灵活性,根据可能出现的不同情况,保留尽量多的发展模式可供选择,以适应未来情况的变化。近期实施的项目规划中,要保持良好的弹性,以适应未来需求变化时的功能改变和布局调整。

## 4 通用机场设计

通用机场在完成前期选址、可行性研究等主要阶段后,就进入设计阶段,一般分为初步设计和施工图设计两个阶段。根据民航行业管理规定,初步设计需通过民航行业审查。本文主要对固定翼通用机场的设计进行论述。

通用机场的工程设计,应“满足机场飞行安全和运营的基本功能”,项目及规模应严格按照有关批复要求,并认真贯彻国家、行业及地方的有关法规、规范、标准和规程;同时,机场平面设计要充分体现机场的性质和作用,体现工艺协调、布局合理、技术先进、规模适度、容量均衡、设施齐全、经济适用,在满足规范规定的原则下,优化设计方案,结合当地的地理环境特点,根据建筑的不同用途,达到经济性、适用性目的。

在设计过程中,重点解决以下几个方面的问题。

### (1) 总平面布置

根据机场总平面规划方案及地形、地质条件,合理布置各项设施使其满足功能要求;各功能区布置需考虑近、远期结合,发展用地预留等要求;场区路网规划、交通流线组织、停车场分布等满足运行要求。

### (2) 地势设计

机场地势设计要满足有关标准规定,符合使用要求,保证飞行安全;确保飞行区不受洪涝影响,飞行区地表雨水能够自流排放;保障道面下土基稳定,不受地下水的侵害;新建设施和规划设施便于衔接,飞行区和机场其他区域能够顺利衔接;统一考虑机场全场地势,飞行区地势设计和航站区地势设计统一协调考虑。在满足上述要求的条件下,尽量做到场区填挖方数量平衡,尽量减少土石方工程量,节省工程投资。

### (3) 道面设计

道面设计的主要任务是提供经济的道面结构,使其在预定的使用年限内承受使用荷载和环境的作用,而具有符合上述使用要求的性能。同时,设计出的道面结构应符合当地所能提供的资金、材料、施工技术和维护条件。

### (4) 飞行区排水工程

飞行区排水工程需确定飞行区排水范围,确定排水方案,确定排水系统的平面布置,确定排水口的位置、高程及历年最高洪水位等;确定采用的暴雨强度公式、设计重现期;确定排水系统组成部分的主要结构形式、设计荷载;场区排水与机场附近水利的关系;确定排水系统各类沟种总长、主要单体构筑物数量、主要工程量等。

### (5) 航站楼综合楼工程

一般情况下,由于机场业务用房规模较小,为节约用地并减少造价,航站楼综合楼与塔台一般采用合建的模式,形成航站楼综合楼。

### (6) 机场消防和救援设施

通用机场必须建设消防和救援设施。消防及应急救援保障等级应根据该机场起降的最高类别航空器机身长度、宽度和起降频率(一年内最繁忙的3个月的起降次数)确定。通常情况下,机场可与当地的消防、救援部门签订消防及应急救援保障协议,依托地方已有设施,机场不配备消防及应急救援设施,在有航班的时候可以保证消防设施的满足应急救援时间的规定。如果当地的消防和救援设施不能保障,则通用机场应在本场配置必要的消防和救援设施。

## 5 小结

通用机场的选址、规划、设计是通用机场建设项目前期的主要环节,前期成果的好坏直接影响整个项目的建设、运营和发展。因此,做好前期规划设计工作是机场建设各项工作的重中之重,需要进行科学的研究论证及严谨的规划咨询和设计,通过国家、行业、地方及军方等各方面的审查与审批,为地方的经济社会发展创造新的动力。

# 江西某50年历史工业厂区给水及消防管网优化改造

■ 赵洁 王锋 刘芳 [给排水]

**摘要:** 本文介绍了一座具有50年历史的工业厂区给水及消防管网的改造方案。由于历史久远,厂区分期建设,导致各个历史时期的给水和消防系统同时存在,影响供水水质和消防安全。如果在现有厂区中新建建筑,将无法满足最新规范的要求。本文通过分析现有厂区给水、消防系统现状,结合最新相关规范要求采取各种可行措施,在满足使用要求的同时节省了建设投资和运行维护费用。

**关键词:** 给水管网; 消防管网; 优化改造; 工业厂区

## 1 给水管网现状

江西某厂区始建于20世纪60年代末、70年代初,至今已50年。在这50年里,除厂区第一次选址建设外,还分别于2000年和2010年进行了2次大规模扩建。现在的厂区由老区(20实际70年代建成,以下简称“A区”)、新区(2000年左右建成,以下简称“B区”)、扩建厂区(2010年建成,以下简称“C区”)3个相互贯通又相对独立的区域组成,详见图1。

厂区供水系统在2000年B区建设初步形成时,按照当时的规范在B区独立建设了给水、消防管网,与A区相互独立。本次建设还更新了A区所有供水管线,但未对其给水系统进行改造。2010年C区建设时,仍沿用B区的供水系统在C区扩建了给水和消防管网。



图1 厂区各区域示意图

厂区现有供水管网主要分为3个部分:

一是A区生活和消防合用供水管网,主干管管径DN150~DN300,供给A区及厂区附近居民住宅区各建筑生活用水和室内外消防用水。该合用供水管网平时由A区给水泵房内生活供水泵组(根据压力逐台启停)和高位水池(有效容积800m<sup>3</sup>,

作者简介: 赵洁,男,高级工程师,2006年毕业于天津大学市政工程专业,现就职于航空工业规划技术发展中心。

池底标高87m)联合供水,维持供水压力不低于0.35MPa。A区给水泵房内设有3台消防泵(2用1备),单泵供水能力为 $Q=50\text{L/s}$ , $H=0.80\text{MPa}$ ;还设有2台生活给水泵(2用1备),单泵供水能力为 $Q=50\text{m}^3/\text{h}$ , $H=0.60\text{MPa}$ 。A区给水泵房贮水池为生活和消防共用水池,有效容积 $2000\text{m}^3$ (分为2座,每座 $1000\text{m}^3$ )。

二是B、C区生活专用供水管网,主干管管径 $\text{DN}150\sim\text{DN}200$ ,供给B区和C区各建筑生活用水,个别给水压力要求较高的建筑(如B01号建筑)自行设置给水加压装置。该专用供水管网由B区给水泵房内生活给水泵组(变频工作)供水,维持供水压力不低于0.35MPa。B区给水泵房内现有3台生活给水泵(2用1备),单泵供水能力为 $Q=100\text{m}^3/\text{h}$ , $H=0.6\text{MPa}$ ,该泵组平时只开启1台,且变频工作,维持管网供水压力;泵房内还设有补水泵2台(1用1备, $Q=50\text{m}^3/\text{h}$ , $H=0.8\text{MPa}$ ),用于向高位水池补水。B区给水泵房内生活水箱有效容积 $100\text{m}^3$ 。

三是B、C区室内外消火栓合用供水管网,供给B区和C区各建筑室内外消火栓系统用水。该合用供水管网由B区给水泵房内消火栓给水泵组供水,最不利点供水压力不小于0.6MPa。B区给水泵房内现有3台消防给水泵(2用1备),单泵供水能力为 $Q=60\text{L/s}$ , $H=1.1\text{MPa}$ 。B区给水泵房内消防水池有效容积 $700\text{m}^3$ 。室内外消火栓系统火灾初期消防用水及合用供水管网平时稳压,由B区B01号建筑(B区、C区最高建筑)屋顶高位水箱(有效容积 $18\text{m}^3$ )及消火栓稳压装置供给。

另外,C区各建筑内均无自动喷水灭火系统,A区和B区内仅有A01号建筑和B01号建筑内设有自动喷水灭火系统。A01号建筑内设有自喷给水泵,从A区生活和消防合用供水管网直接吸水,供给建筑内自动喷水灭火系统用水,系统稳压及火灾初期消防用水由该建筑内气压水罐供给。B01号建筑自动喷水灭火系统用水由B区给水泵房内消防给水泵供水,系统稳压及火灾初期消防用水由该建筑屋顶高位水箱和自喷稳压装置供给。

各泵房内消火栓给水泵均由各自服务区域内着火建筑消火栓启泵按钮启动;自喷给水泵由其服务建筑内报警阀压力开关启动;所有消防泵均可由消防控制室直接启动。另外,A01号建筑内自喷给水泵启动前,须连锁启动A区消防泵房内消防给水泵。

## 2 改造原因

国家要求国有企业将职工家属区供水、供电、供暖(供气)和物业管理(统称“三供一业”)职能从国有企业剥离,转由社会专业化企业或机构实行社会化管理,该工作于2018年年底前基本完成。2019年起国有企业不再以任何方式为职工家属区“三供一业”承担相关费用。根据《通知》要求,该厂A区给水泵房将不再承担厂区附近居民住宅区生活供水功能,仅供给A区(生产区)生活用水。由于A区生活日用水量较少,导致A区给水泵房内贮水池和高位水池内存水长时间得不到更换,导致水质恶化,影响A区生活用水安全。

该厂规划在A区新建A10号建筑,A区现有给水系统无法满足《消防给水及消火栓系统技术规范》GB50974-2014中关于高位水箱出水管处流量开关和消防水泵出水管处压力开关均可自动启动消防给水泵的要求。A区供水管网现为生活和消防合用供水管网,由A区给水泵房和高位水池联合供水。由于该高位水池需供给生活用水,无法确定消防时流量开关的动作值,也无法连锁启动A区给水泵房内消防给水泵。另一方面,A区供水管网平时供水(即生活供水)压力大于水泵出水总管压力开关动作压力(即消防泵自动启泵压力)。当生活用水量很小时发生火灾,生活给水泵能够满足此时生活用水量和消防用水量,消防水泵无法启动,只有当水池内生活贮水容积用完,生活水泵吸入空气损坏无法供水时,压力开关才会动作启动消防水泵,造成不必要财产损失。只有沿用现有消防控制系统,消防水泵由消火栓处启泵开关启泵,才可保证生活水泵不被破坏。但没有自动启动模式,不但符合《消防给水及消火栓系统技术规范》的要求,消防供水安全也受到一定影响。

另外,该厂拟在C区新建多座建筑,其中消防用水量最大的建筑是C01号建筑,其室外消火栓总用水量为 $60\text{L/s}$ ,要求引入口供水压力为0.6MPa,自动喷水灭火系统用水量为 $100\text{L/s}$ ,要求引入口供水压力为0.9MPa。该建筑消防时总用水量为 $1008\text{m}^3$ 。A区给水泵房和B区给水泵房内消防给水泵均无法满足该供水能力要求。厂区已经建有2座消防泵房,再建设1座消防泵房不但占用厂区有限的建设面积,还要增加平时运行维护费用。

消防管网方面,C区消防供水管网仅为2根

DN200消防给水管,沿C区主干道两侧敷设,主干道长度约为300m。如果C01号建筑发生火灾,并且1根消防供水管道发生故障或检修时,仅300m长输水管道水力损失约为0.9MPa。同时,C01号建筑消防系统要求入库压力不小于0.9MPa,再加上B区消防管网损失,消防泵出口压力至少应为2MPa才可满足C01号建筑消防供水要求。但B、C区现有室内外消火栓合用供水管网建设时压力等级仅为1.6MPa,无法满足该消防泵供水压力要求。

因此,需要对厂区生活给水和消防供水管网进行改造,使其满足现有及新建各建筑生活给水及消防给水要求。

### 3 改造原则

厂区生活供水管网和消防供水管网改造后,需满足厂区10年内规划建筑和现有建筑生活给水及消防给水要求。

改造后的生活供水管网和消防供水管网须满足最新规范(截止2019年12月)要求,同时要保证用水安全,包括卫生安全和消防安全。

要尽量减少管网改造范围,降低改造费用;要尽量减少泵房设置,降低改造后的运行维护费用。

### 4 改造方案

#### 4.1 总体改造方案

厂区所有生活给水供水管网和消防供水管网分开设置,保证生活给水水质安全;消火栓供水管网和自喷供水管网合用,节省管网建设费用。

A区给水泵房贮水池原为生活和消防合用水池,如果将其作为生活水池,也无法保证水池内存水在24h内更新一遍,影响供水水质安全,但该给水泵房贮水池容积能够满足厂区所有建筑消防供水要求。B区给水泵房内消防水池容积无法满足厂区几个消防用水量较大的建筑消防供水要求,但该泵房内生活水箱独立建设,可保证生活用水水质。因此,B区给水泵房仅保留生活供水功能,A区给水泵房仅保留消防供水功能,除统一供水水源、减少后期运行维护费用外,还可以防止消防用水和生活用水合用水池,影响生活供水水质。

#### 4.2 生活给水系统改造

本次改造项目在A区新建生活供水管网,供

给A区各建筑生活用水,B、C区生活供水管网维持现状。A区现有生活和消防合用供水管网作为消防专用供水管网继续使用。A区新建生活供水管网改由B区给水泵房供水。但是,B区消防泵房与规划建设的A10号建筑及周围各建筑之间高差约为25m~35m,而B区给水泵房内生活供水泵组平时工作压力维持0.35MPa,无法满足这些建筑生活供水压力要求。如果提高B区给水泵房内生活供水泵出口压力,可改善A区这些建筑生产生活供水压力不足的问题,但B区和C区各建筑生活供水管网压力也相应提高,超过各建筑内卫生洁具额定压力要求,导致洁具超压损坏。虽然可以通过为每座建筑增加减压阀来解决超压问题,但造价较高,并且浪费能源。

考虑到厂区3个部分的地势差,本项目将厂区供水管网改造为分区供水管网。B区和C区地势相对平缓,其供水系统维持现状,均由B区给水泵房内现有生活供水装置供水。A区地势较高,独立设置供水管网,由B区给水泵房内现有高位水池加压泵供水。高位水池加压泵现为工频工作,由高位水池液位控制启停。本项目为其配套变频控制器和气压水罐,将其改造为变频气压供水泵组,实现恒压变流量工作,满足A区生产用水量实时变化的要求,实现节能供水。

#### 4.3 消防系统改造

厂区3个部分总占地面积小于100ha,故同一时间发生火灾次数按1次计算,其用水量按消防用水量最大建筑(即C区待建C01号建筑)计算。A区和B区消防用水量最大建筑分别为现有A01号和B01号建筑,同时A01号和B01号建筑的消防供水压力也是所在区域最不利建筑。

##### (1) 消防管网改造

虽然厂区3个部分地势高差最大处为35m,但厂区绝对高度最高的建筑屋顶和绝对高度最低的建筑最低处高差仅为70m,无需设置分区供水。本次改造将A区、B区和C区消防供水管网相互连接形成统一供水管网。

厂区3个部分消防供水管网均为现有管网,可以满足现有各建筑消防系统供水要求,但现有各消防供水管网干管管径均为DN200,无法满足待建C01号建筑消防供水要求。改建方案有如下3个:一是维持现有供水管径不变,将所有供水管道更换为压力等级为2.4MPa的管道;二是将A区消防

泵房至C01号厂房的供水管道更换为DN300的给水管,降低管道水头损失;三是A区消防供水管网引2根给水管接至B区消防供水管网,引2根给水管接至C区消防供水管网,形成4路DN200消防供水管道,同样可降低管网压力损失。其中方案3造价最低,约为方案2的1/7,方案1的1/25,可作为优先方案。

这里利用水力计算软件WATER CAD对方案3进行管网平差计算,从计算结果可知,正常情况下,A区给水泵房至C01号建筑的水力损失仅为0.15MPa;在事故状态(管网中最不利管道断水或检修)时,该水力损失为0.28MPa。A区消防泵房水池最低液位比C01号建筑消防系统入口管道标高为15m,因此,消防水泵出口压力为1.1MPa时,即可满足C01号建筑消防系统入口压力不小于0.9MPa的要求,并留有一定富裕。同时,厂区供水管网最低处供水压力也不超1.6MPa。所以,该改造方案满足C01号建筑消防供水要求,且造价最低。

#### (2) 消防水源改造

根据前文所述,A区消防泵房内消防供水泵组总供水能力应满足 $Q=100\text{L/s}$ , $H=1.1\text{MPa}$ 的要求,无法满足厂区供水要求。这里拆除A区消防泵房内现有消防供水泵和生活供水泵,为节省造价,将原B区给水泵房内3台消防供水泵(单台供水能力为 $Q=60\text{L/s}$ , $H=1.1\text{MPa}$ )移至A区消防泵房内,并新增1台供水能力为 $Q=60\text{L/s}$ , $H=1.1\text{MPa}$ 的消防供水泵,实现3用1备供水泵组,满足厂区消防系统供水要求。本次改造在该消防水泵出水口设置压力开关,可自动启动消防泵组。另外,厂区各建筑均在A区消防泵房1200m服务半径内,满足规范要求。

由于B01号建筑屋顶的绝对标高(高于A区高位水池池顶)是厂区最高的,所以,该建筑屋顶现有消防水箱和消防稳压装置用于提供消防系统火灾初期消防用水和平时稳压使用。本次改造在水箱出水总管设流量开关,可自动启动A区给水泵房内消防泵组。

由于厂区现有高位水池与B区和C区部分建筑的高差大于50m,能够满足其常高压消防供水要求,并能满足A区所有建筑消防稳压要求,故保留该高位水池,用以提高厂区消防系统供水安全。

## 5 总结

现有厂区或建筑给水系统改造,尤其是消防给水系统改造一直是给排水设计中比较困难的项目,需要设计者根据现行消防和给排水相关规范要求,结合项目的实际情况,采取各种可行措施,力争即满足使用需求,又节省建设投资和运行维护费用。

# 一种基于LabVIEW与PLC的风洞测控系统设计与流场校测

■ 李洋 刘睿 赵云洋 [动力]

**摘要:** 本文针对某大学1.9m×0.55m×0.6m回流式气动学低速风洞,为实现稳风速控制过程中对风洞方向场、动压场系数、动压稳定性、轴向静压梯度、湍流度等流场品质指标的校测,详细设计一种基于LabVIEW与西门子PLC的稳风速测控系统,并验证了该风洞流场指标的合格性,为今后气动学风洞的测控系统研究提供参考。

**关键词:** 低速风洞; LabVIEW; PLC; 测控系统

风洞作为航空航天领域重要的地面管道试验设施,为飞行器研制和参数测试创造优良的气动布局条件,在探索和确认流动规律的研究中发挥关键作用<sup>[1]</sup>。

为校测风洞的流场特性,本文设计一种基于Labview和PLC的测控系统<sup>[2]</sup>,并校测风洞的流场特性,为今后气动学风洞的测控系统研究提供参考。

## 1 风洞设备与主要技术指标

### 1.1 风洞描述

本次研究的风洞是低速、低压、常温、回流式、开闭两用的研究型气动学风洞,试验段长为1.9m,宽为0.55m,高为0.6m。该风洞能够为气动学试验提供测试条件。

### 1.2 风洞涉及设备

驱动电机带增量编码器的风机:为风洞吹风;

差压传感器:测量稳定段末端和收缩段出口的差压;

皮托管:测量试验段总压和静压;

五孔探针:风洞流场方向角;

9216系列PSI压力扫描阀:读取皮托管与五孔探针所测压力;

温湿度传感器:风洞内大气温度和湿度;

压力传感器:风洞内大气压力。

### 1.3 风洞主要技术指标

本风洞风速范围:开口试验段0~70m/s,闭口试验段0~80m/s。

本风洞试验段模型区范围:闭口试验段为1.425m×0.412m×0.45m(长×宽×高),开口试验段为1.33m×0.375m×0.42m(长×宽×高),详细设计指标见表1。

表1 气动声学风洞流场品质指标

编号	项目	设计指标
1	动压场系数	开/闭口试验段: $\Delta \mu \leq 0.3\%$
2	局部气流偏角	$\alpha \leq 0.3^\circ, \beta \leq 0.3^\circ$
3	轴向静压梯度	$C_p(x)/dx \leq 0.005/m$
4	湍流度	模型区,闭口试验段 $\varepsilon \leq 0.08\%$ , 模型区,开口试验段 $\varepsilon \leq 0.2\%$
5	闭口实验段 动压稳定性	常用风速范围内,模型区中心 $\eta \leq 0.3\%$

## 2 测控系统设计

该风洞测控系统控制器为S7-1200 PLC,输出主要用于控制风机频率,调节风洞风速;输入主

作者简介:李洋,男,工程师,?年毕业于?大学?专业,现就职于中航工程集成设备有限公司。

要为采集主要传感器数据：风洞内温度、稳定段末端和收缩段出口的差压、风洞内大气压<sup>[3-4]</sup>。利用LabVIEW编写上位机程序，通过组态OPC Servers来读写S7-1200变量数据，完成风速控制、电机转速控制、传感器数据采集、温度曲线监控、报表生成等功能<sup>[5]</sup>，控制系统框图如图1所示：

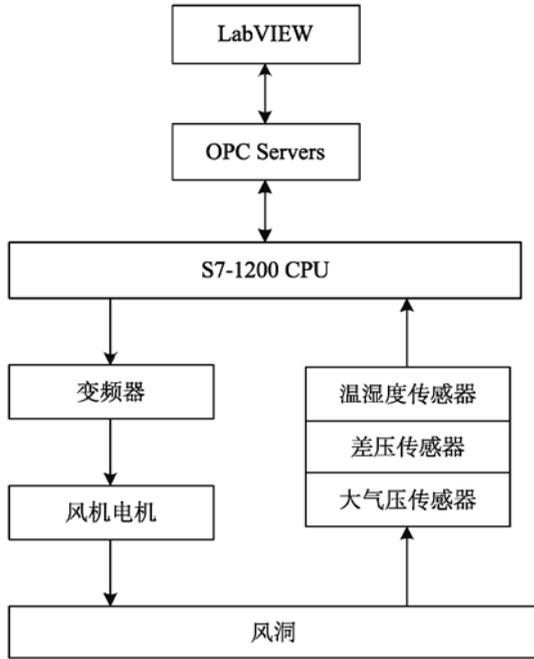


图1 控制系统框图

### 3 控制方案

本文采用稳风速 $v$ 闭环控制系统，当风洞内大气密度 $\rho$ 、试验段动压 $\Delta p$ 变化时，系统通过风速控制器自动稳定风速，使风洞按照设定风速运行。风速、动压、大气密度的关系如下：

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1)$$

本风洞采用落差系数法测量风洞风速，由于差压传感器所测稳定段末端和收缩段出口的差压 $\Delta p$ 与试验段实际差压存在一定偏差，因此不能直接将 $\Delta p$ 代入计算，进行风速控制时需要引入落差系数 $\delta$ ，试验段动压、差压、落差系数关系为：

$$\Delta P = \Delta p \cdot \delta \quad (2)$$

因此，风速、差压、密度、落差系数的关系为：

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P \cdot \delta}{\rho}} \quad (3)$$

由以上公式可知，要求取风洞风速，首先需要要求取不同差压对应的落差系数。

#### 3.1 落差系数的拟合

首先估算10~80m/s风速对应的风机转速，在最小转速到最大转速之间等距选取15个不同的风机转速，然后将皮托管安装至模型中心处，依次输入15个转速运行风机，同时记录皮托管所测动压和差压传感器所测差压，计算每个转速下的落差系数<sup>[6]</sup>。落差系数计算方法如图2所示。

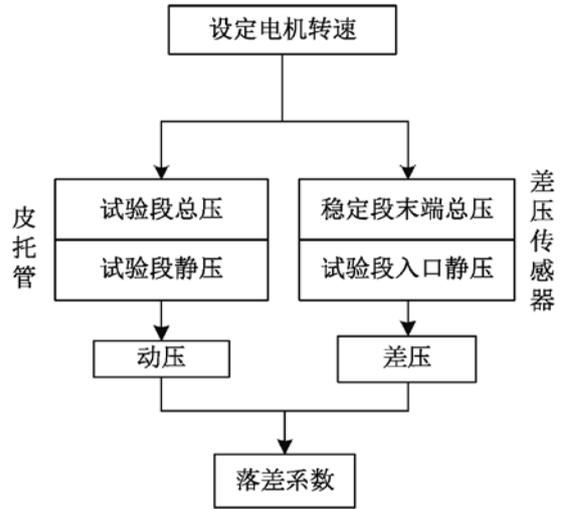


图2 落差系数计算方法

重复上述过程6次，求平均，得到落差系数与差压的对应分布图，用matlab作拟合曲线，如图3所示。

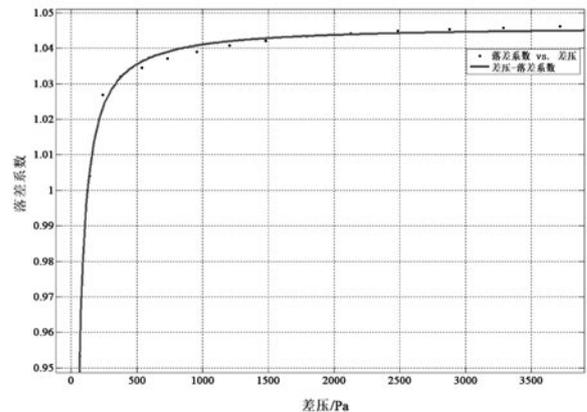


图3 落差系数-差压拟合曲线

最终得到差压-落差系数关系式为：

$$\delta = -7.432 \cdot \Delta P^{-1.054} + 1.046 \quad (4)$$

### 3.2 稳风速控制

用户设定风速，系统实时读取当前的差压、大气密度，并根据实时计算的落差系数得到实际风速，作为风速调节器的反馈端。根据与设定值的偏差，实时调节电机转速，控制试验段风速在精度范围之内<sup>[7-9]</sup>。风速控制流程图如图4所示。

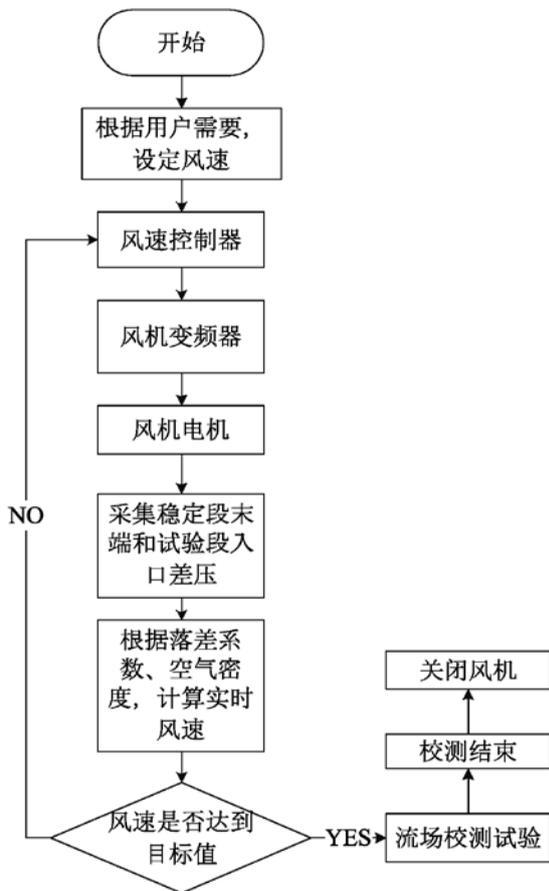


图4 稳风速控制流程图

### 3.3 PLC下位机程序设计

PLC下位机程序由若干组织块OB、函数FC、数据块DB组成。其中在OB1块编写主程序，可以调用风速控制功能FC2、风机变频器控制功能FC6、报警控制功能FC5。中断程序包括OB35循环中断（PID控制风机转速）和诊断错误中断。程序结构图如图5所示。

### 3.4 LabVIEW上位机程序设计

上位机主体由风速主控页面、数据查询组成，实现与PLC通讯和SQL server数据库数据存储/读取功能。

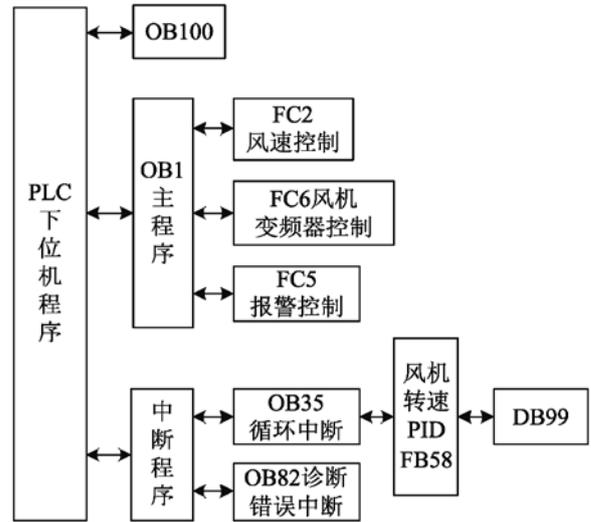


图5 PLC下位机程序框图

风速主控页面实现风速设定、风速和风洞温度曲线显示、风机温度轴承温度监控功能。用户设定风速，点击“启动风机”按钮，系统自动访问SQL Server数据库，并以当前试验日期为名建立数据表，实时（间隔1s）将电机转速、风洞大气压力、风洞大气温度等试验参数存至数据表中。待试验结束，点击“停止风机”按钮，则系统停止存储数据。风速主控页面如图6所示。

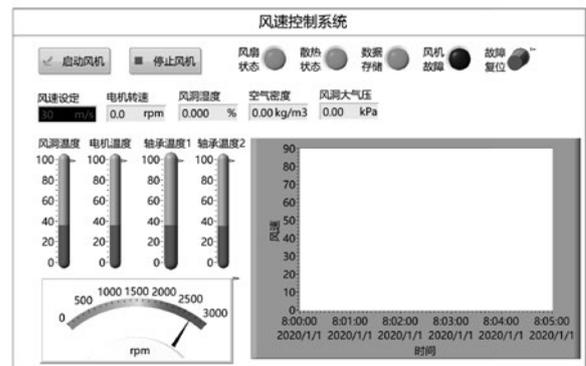


图6 风速主控页面

数据查询页面用来查询、导出、删除以往实验的关键数据：风速、风机转速、风洞大气温度、风洞大气压力、风洞大气密度。数据会以用户名+实验日期形式存储，显示在“实验树”控件上，用户可通过垂直滚动条，看到所有历史实验。点击某个日期，实验信息会显示在输出框中，点击“点击查询”按钮，则数据将会显示在实验树下方的表格中，用户可通过滚动条查询。点击数据导出，此次试验结果将导出至Excel；点击数据删除，将删除

本次试验数据。数据查询页面如图7所示。



图7 数据查询界面

## 4 流场校测<sup>[10]</sup>

### 4.1 动压场分布

在常用风速30m/s、50m/s下测量距试验段入口截面0.6m截面的动压场。测量区域取试验段高度、宽度和长度的70%，测点间距175mm，共143个测点<sup>[9]</sup>。闭口、开口试验段的动压系数 $\Delta\mu \leq 0.3\%$ 达标比例如表2所示。

表2 风洞动压场分布

风速 试验段	30m/s	50m/s
闭口段	93%	97.20%
开口段	98%	95%

### 4.2 方向场

取模型区中心截面，测点间距、动压范围均与动压场测点相同。通过五孔探针统计局部气流迎角及侧滑角在技术指标 $0.3^\circ$ 以内的点。达标比例如表3所示。

表3 局部气流方向角

风速 试验段	30m/s	50m/s
闭口段	96%	96%
开口段	100%	99.3%

### 4.3 轴向静压梯度

在试验段长度方向，取距入口0m~1.452m，

共18点，在常用风速（30m/s和50m/s）下测出沿试验段中心线的静压分布，计算得到各点的压强系数，求得闭口试验段模型区长度内30m/s的轴向静压梯度为 $-0.0043/m$ ，50m/s的轴向静压梯度为 $-0.0021/m$ ，满足技术指标要求 $0.005/m$ 。

取长度方向距试验段入口0.28m~0.85m，共20点，在常用风速（30m/s和50m/s）下测出沿试验段中心线的静压分布，计算得到各点的压强系数。求得闭口试验段模型区长度内30m/s的轴向静压梯度为 $-0.00008/m$ ，50m/s的轴向静压梯度为 $-0.00088/m$ ，满足技术指标要求 $0.005/m$ 。

### 4.4 湍流度

取距闭口试验段入口0.6m的模型中心截面进行测量，按照闭口试验段动压场测量截面进行测量，测量得到30m/s模型区中心湍流度值为0.12%，50m/s模型区中心湍流度值为0.069%，当风速更高时其湍流度会进一步下降，故满足湍流度指标要求0.08%。

取距开口试验段入口0m~0.6m的截面中心处进行湍流度的测量，测量得到30m/s模型区中心湍流度值约为1.2%，50m/s模型区中心湍流度值为0.18%，沿轴向湍流度的变化趋势如图8所示。

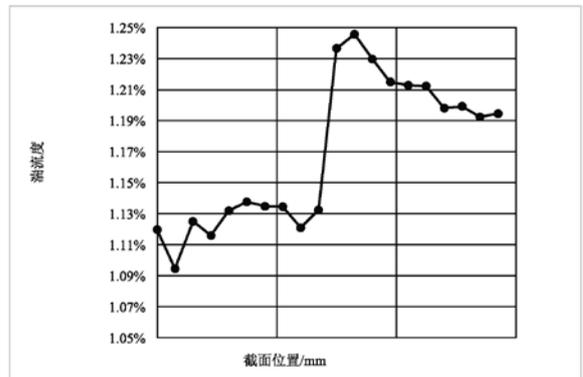


图8 30m/s开口段湍流度

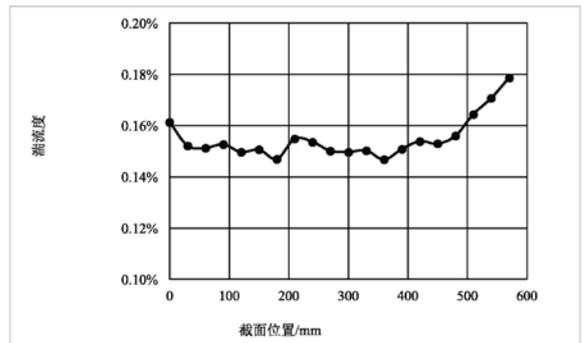


图9 50m/s开口段湍流度

根据图8和图9可得, 开口段湍流度满足指标要求。

#### 4.5 闭口实验段动压稳定性

在闭口实验段模型区中心处安装皮托管, 在常用动压下, 在1min内连续测量动压值, 测量次数不少于120次, 得到不同风速下闭口实验段动压稳定性系数 $\eta$ 结果。各常用风速下测得在模型区中心处的动压稳定性系数, 大于30m/s后动压稳定性小于0.003, 满足技术指标要求0.003, 如表4所示。

表4 闭口试验段动压稳定性值

序号	风速m/s	动压稳定性系数
1	20	0.0049
2	30	0.0036
3	40	0.0024
4	50	0.0028
5	60	0.0023
6	70	0.0019
7	80	0.0021

## 5 结论

本文为校测风洞流场特性, 详细介绍了一套基于PLC与LabVIEW的风洞测控系统, 并经过校测试验, 得出结论: 本风洞动压场、方向场、轴向静压梯度、湍流度、动压稳定性均满足技术指标要求, 从而验证了本测控系统的可行性。

#### 参考文献

- [1] 黄福幸. 低速风洞数据采集与控制系统研制[D]. 大连: 大连理工大学动力工程专业, 2003.
- [2] 杨艳男, 黄浩. 某民用低速风洞控制系统研究[J]. 中航工程集成设备有限公司, 北京, 102206.
- [3] 褚卫忠. 环形低速风洞自动控制系统设计及其测量不确定度评定[J]. 中煤科工集团常州研究院有限公司, 江苏 常州 213015.
- [4] 王晓英, 罗惕乾, 沙溢, 等. 低速风洞测控系统的改进与提高[J]. 农机化改造, 2006(7): 57-59.
- [5] 党幼云, 杨艳霞, 李建英. PLC与人机界面在低速风洞调速系统上的应用[J]. 西安工程科

技学院学报, 2006, 20(6): 787-790.

- [6] 易晖, 熊健军, 汤永, 袁明川. 多点静压落差法在风洞稳速压控制系统中的分析与应用[J]. 中航工业直升机设计研究所, 江西 景德镇 333001.
- [7] 熊建军, 倪章松, 李昱, 等. 防冰总压/静压探针结构及控制系统设计与应用[J]. 中国空气动力研究与发展中心, 四川, 绵阳, 621000.
- [8] 李国文, 赵勇建. 基于LabVIEW的低速风洞风速量化PID控制系统设计[J]. 沈阳航空动力与能源工程学院, 沈阳, 110034.
- [9] 田建川, 童淑敏, 齐志伟. 基于PLC模糊算法的风洞风速调控系统的研究[J]. 内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018.
- [10] 陈德华, 王瑞波, 刘光远, 师建元, 尹路平. 2.4m跨声速风洞槽壁试验段调试及流场校测[J]. 中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000.

# 表面处理车间 火灾自动报警系统设计思考

■ 邓志远 刘静 陆瑶 [电气]

**摘要:** 近些年,航空工厂发生了多起表面处理车间火灾事故。本文对其产生的原因进行分析,重点讨论表面处理生产厂房设计火灾自动报警及消防联动控制系统设置前提条件,并针对表面处理车间生产过程中的特殊性和火灾报警系统设备应考虑酸碱腐蚀性、水蒸气,以及振动的影响,归纳总结对表面处理车间的火灾报警系统设计方法。

**关键词:** 表面处理工艺设备;起火源;耐腐蚀性

## 0 引言

表面处理车间是一种满足特种工艺流程,工艺设备密度大,管线繁多,对环保及防腐措施有严格要求的特殊性工业生产场所,广泛存在于各主要航空工业场所内,是航空制造工艺的重要组成部分。因此,表面处理车间的设计也是工程设计中常见的一类设计任务。

表面处理厂房通常包括电镀、阳极化、喷漆、金属喷镀等工段,以及配套库房、管理办公用房、电源间、冷冻机间、水泵间、通风机房、废水处理站、纯水站等部分组成。近年来,表面处理车间因多发火灾而备受关注。

传统设计中表面处理厂房因用水量大,遍布水溶液槽子及管线,被归类为无可燃物的戊类生产场所。依据《建筑设计防火规范》未设计火灾自动报警系统,随着防腐材料多样化,玻璃钢等可燃固体材料及电加热器的普遍使用,表面处理车间已偏向丙类生产场所。若设计时未从具体情况出发,表面处理厂房一概而论定为戊类场所,不设置火灾自动报警系统,发生火情难以及时发现并采取处置措施。为保障表面处理车间内人身、财产安全,本文重点针对表面处理厂房中的电镀、阳极化车间,探

讨设置火灾自动报警系统的必要性和具体方法,为同类项目设计提供参考。

## 1 表面处理车间起火的相关因素

**加热方式:** 表面处理车间目前基本采用以下两种加热方式之一,蒸汽加热及电加热,而电加热依靠自身响应快、易于控制、管线简单等优点,已经成为表面处理加热方式主流。

**处理槽:** 目前处理槽材质除去一直使用的不锈钢材质,还新增了碳素结构钢板、塑料、玻璃钢及耐腐(耐碱)水泥,而玻璃钢由于其自身的高防腐性及更经济的造价已经开始逐渐替代不锈钢成为首选。

**槽液:** 根据表面处理工艺不同,槽液也大不相同,但其中部分工艺会使用一些有机溶液,属于易燃液体。

**通风系统:** 表面处理生产产生大量酸性及有毒废气,均依赖通风系统处理和排出室外,大功率风扇电机在总用电负荷中占了很大比例。酸性废气具有强烈的腐蚀性,通风设备及管道通常采用玻璃钢材料制成。

**电气线路:** 大功率电加热器、风机以及直流配电采用了密集的电缆或汇流排,这些大电流配电导体在生产过程中会向周围环境释放大量的热量。

作者简介:邓志远,男,助理工程师,2015年毕业于北京建筑大学?专业,现就职于航空工业规划飞机工程事业部。

## 2 表面处理车间火灾分析

根据收集到的近几年表面处理厂房起火案例，对起火原因分析如下：

由于表面处理工艺设备是由表面处理工艺设备厂家提供和安装调试，表面处理工艺设备的汇流排、电缆截面和断路器整定值不匹配，电气控制箱或电缆发热造成火灾占70%；由于表面处理工艺设备没有低液位连锁断电和超温报警断电功能，工人下班没有关断电源，夜间玻璃钢槽液体烧干引发火灾占10%；由于表面处理工艺设备的施工过程不规范，导致电焊焊渣引燃可燃包装物及玻璃钢槽体引发火灾占10%；由于送风机故障失火导致火焰沿风管蔓延至玻璃钢镀槽产生火灾占10%。

表1 火灾事故统计分析表

火灾发生场所及范围	起火原因	事故占比
表面处理车管及镀槽	线路过载发热	70%
表面处理车间镀槽	槽液电加热器干烧	10%
表面处理车间	施工电火花引燃可燃物	10%
表面处理车间设备管线及镀槽	送风机失火沿风管蔓延	10%

表面处理工艺设备为业主方另行委托表面处理工艺设备厂家设计施工安装调试验收，不在电气设计范围内。成套设备的设计缺陷、生产管理、施工管理问题等存在潜在的风险点。

《航空工业电镀及阳极氧化车间设计规程》HBJ/T 2-2016第1.0.4条规定：“根据《建筑设计防火规范》GB50016，电镀及阳极化车间的生产火灾危险性属于戊类”。而《建筑设计防火规范》GB50016第8.4条未要求戊类厂房设置火灾自动报警系统，所以从规范角度电镀及阳极氧化车间定性戊类厂房不需要设置火灾自动报警系统，仅对部分含有甲醇、乙醇及汽油等可燃气体场所设置可燃气体报警系统。

实际上电镀及阳极氧化车间的表面处理工艺设备由中标厂家进行设计实施，在厂房内表面处理生产线工艺设备使用电加热方式作为加热源，表面处理设备槽体使用玻璃钢槽体居多，同时厂房内存在耐腐蚀的玻璃钢风管和玻璃钢风机。

电加热方式相对于蒸汽加热方式管线简单、成本低、控制方便，越来越多的镀槽加热保温使用电加热器，而电加热器一旦存在控制缺陷及设备、

线路老化等情况，比传统蒸汽加热更易诱发火灾。槽体、风管、风机因为造价、防腐等因素更多的使用玻璃钢等非金属材料。对已知的多个表面处理车间着火原因的分析，使用电加热方式、大量采用非金属材料的表面处理车间为火灾频发区，而设置火灾自动报警及消防控制系统，对表面处理工段进行火灾保护，可及时发现火情并降低火灾损失。

分析火灾发生的共同点，不论是电加热器干烧、风机过载故障，还是电气线路过载短路，均引燃了可燃材质的槽体或通风管道。大量采用玻璃钢等可燃材料的表面处理车间的防火设计成为一个不可忽视的问题。是否设置火灾自动报警系统，宜参考《建筑设计防火规范》8.4.1条规定，根据可燃物多少因地制宜地做出判断。

## 3 火灾自动报警系统设计

### (1) 烟雾探测

表面处理车间占地面积较大，室内净高较大，有时甚至净高超过12m。根据《火灾自动报警设计规范》，可选择在镀槽上方设置红外对射型感烟探测器，或车间两端设置图像型感烟探测器。

需要注意的是，若有吊车、工艺零部件运输等设备存在，可能会对红外对射型感烟探测器产生干扰造成误报，采用图像型感烟探测时，要求其可直接拍摄到表面处理车间内镀槽区域状态画面。同时，探测器需满足在相对湿度 $\leq 95\%$ 、温度在 $-10^{\circ}\text{C} \sim +55^{\circ}\text{C}$ 内不结露；表面处理车间为腐蚀性环境，需有耐腐蚀性外壳保护，使用年限需达到10年以上。

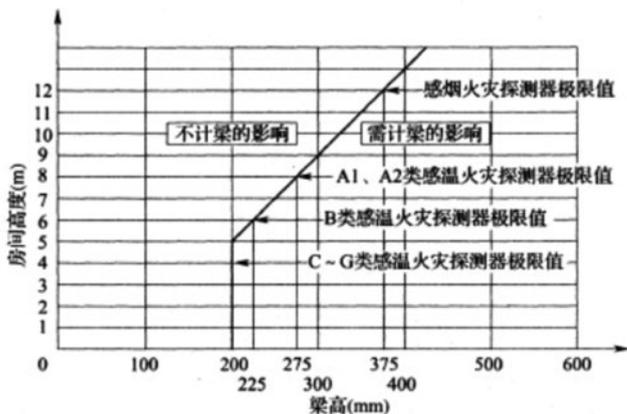


图1

### (2) 电加热器的保护

镀槽采用电加热器方式时,工艺设计应设置完善的液位连锁保护,当槽液液面达到安全高度时电加热器才能通电工作,否则应连锁断电。同时,电加热器供电回路宜设置剩余电流保护,当电加热器及其配电线路发生漏电时切断电源,避免发生电气火灾。必要时槽液液面可设置安全液位传感器,信号接入火灾自动报警系统,当槽液低于安全液位时发出报警并连锁切断电源。

### (3) 预防电气火灾

根据对表面处理车间的火灾案例分析,笔者对于电气火灾因素主要归纳为:线路绝缘老化发生漏电、短路引起火灾,及设备承包商采用的汇流排截面较小、电缆截面和断路器保护整定值不匹配,导致导体持续发热引起火灾。

针对这些情况,若设计时有统一的线路管廊、管线夹层,可以在顶部结构上均布感烟型火警探测器。若无法布置感烟型火警探测器,还可以选择沿配电线路布置感温电缆或感温光缆。无论采用感温电缆、感温光缆还是感烟探测器,都需保证探测器在该湿度、温度、腐蚀性环境下长期可靠工作。

对于汇流排、电缆截面和断路器保护整定值不匹配的情况,应在设计时应依据允许的电压降和发热量合理选择汇流排的导体截面及安装间距,校核电缆线路过载保护及短路保护灵敏度,且安装时远离可燃物。

### (4) 抑制送风机故障引发火灾

表面处理生产过程中产生的废气需要大量的送风、排风机设备进行净化和排出,通过风管与生产线连接。风机故障产生的高温或火焰很容易沿风管蔓延酿成火灾。电气设计中应在送风机出口处设置温度监测,超温报警并连锁停风机。必要时,亦可将超温报警接入火灾自动报警系统,与风管穿越防火分区处的防火阀动作信号一起作为联动停风机

控制信号。

## 4 设计实例

在某厂表面处理车间设计中,在与中标的表面处理设备厂家沟通后,了解到3条表面处理生产线,表面处理设备槽体为玻璃钢槽体,厂房内A区域2条的表面处理生产线的表面处理设备为蒸汽加热方式,厂房内B区域1条的表面处理生产线的表面处理设备为电加热方式,且确定厂房内表面处理生产线内有低液位报警断电和超温低液位报警断电功能后,根据上述火灾发生原因分析,确定B区域设置火灾探测探测器前端设备,以预报火灾的产生;A区域不设置火灾报警前端设备。

### (1) 火警前端设备的要求

由于表面处理生产线产生酸碱等腐蚀性气体及水蒸气,要求火灾探测探测器前端设备必须为抗腐蚀型,可订制或选用不锈钢金属外壳。

### (2) 表面处理生产线火灾探测器设置方案1

由于表面处理生产线有吊车运行和水蒸汽产生,要求火灾探测探测器前端设备具有抗遮蔽功能和水蒸汽不引起报警及正常使用功能。

火灾探测器可以选用图像型火焰探测器或红外对射式感烟火灾探测器。图像型火焰探测器的特点是利用图像识别方法实现火灾探测,无接触、响应速度快;可通过不同焦距镜头的选择避免探测距离的影响;内嵌的识别算法具有抗干扰、高智能化等特性;多通路同时并行探测,可实现实时的、大范围的火灾保护;提供被保护现场的实时彩色视频图像,方便进行可视化验证;完善的系统日志方便系统信息和状态的查询、验证和管理;探测区域的自定义灵活设置及灵敏度设置使得探测器可以适应不同应用场所的保护需求;设备外壳采用不锈钢材质抗腐蚀。

根据图像型火焰探测器有关技术指标进行保护区域的垂直和水平方向角度计算及分析图像型火焰探测器保护覆盖范围,这样解决了吊车运行引起的振动产生故障报警和生产过程中水蒸气产生的误报警。

### (3) 表面处理生产线火灾探测器设置方案2

表面处理车间亦可采用红

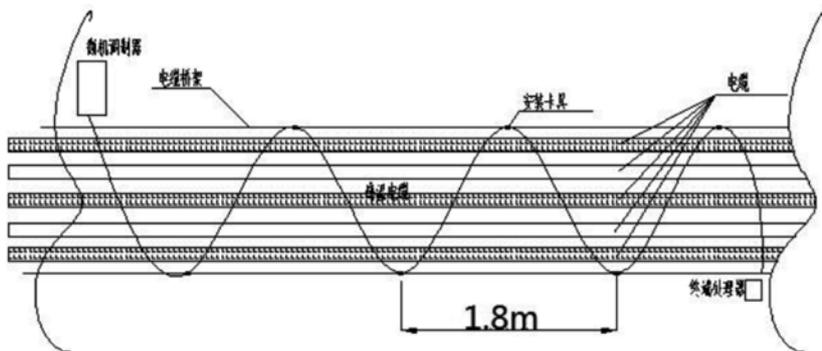


图2 感温电缆敷设示意图

表2 图像型火灾探测器规格参数

规格	参数
焦距	8mm
环境温度	-20℃ ~ 60℃
防护等级	IP65
外壳材质	不锈钢
视角	W32o × H24o
最大工作距离	80m
输出	火警/故障继电器、标准模拟视频、RS485
电压	DC24V

外对射式感烟火灾探测器。红外对射式感烟火灾探测器的特点是：器件功耗小，隐蔽性较好；相对于图像式火灾探测器而言价格低廉；在高大空间等场所普遍适用；红外对射式感烟火灾探测器设置于顶板下方，不会因吊车遮挡而影响火灾报警的灵敏度和精准度。

## 5 消防联动

表面处理车间除上述报警方案以外，尚应按照规范要求设置手动报警按钮、消火栓按钮、防火

阀动作等信号灯，并显示报警部位及发出声光报警，自动或手动控制各种相应的消防设备，如空调通风设备、防排烟设备、事故排风设备、消防泵、应急照明、非消防电源、消防紧急广播、出入口控制系统等。

## 6 小结

为了抑制表面处理车间火灾的发生，可有针对性地采取以下火灾报警及消防联动措施：

(1) 表面处理车间可设置图像式火灾探测器或红外对射式感烟火灾探测器；

(2) 电气汇流排及电缆集中之处可设置感温光缆或感温电缆探测器；

(3) 送风系统可设置超温报警及联动停风机控制；

(4) 电加热器镀槽液低于安全液位时发出报警并连锁切断电源；

(5) 采用的火灾报警设备应采用耐酸碱气体腐蚀的产品。鉴于现阶段很多相关火警设备并无防腐型号，需专门订制或选用不锈钢金属外壳，或采用防腐材料、涂防腐涂料，或者缩短检测周期及时更换有关区域的设备。

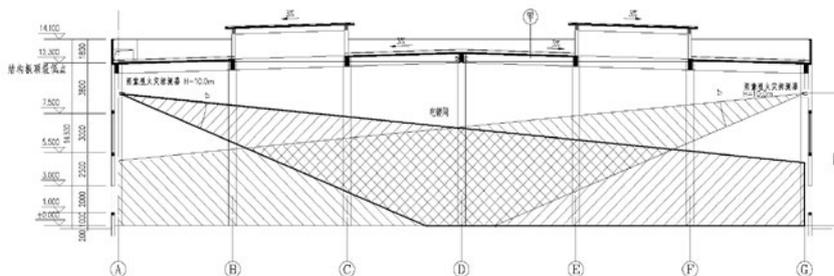


图4 图像型火灾探测器探测范围剖面图

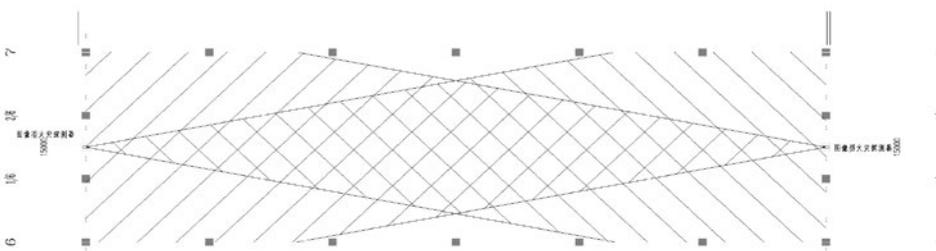


图4 图像型火灾探测器探测范围平面图

## 参考文献

- [1] 《火灾自动报警系统设计规范》 GB50116—2013.
- [2] 《建筑设计防火规范》 GB50016—2014(2018年版).
- [3] 《公共广播系统工程技术规范》 GB50526—2010.
- [4] 《电镀及阳极化车间设计规定》 HBJ/T2—2016.
- [5] 《火灾自动报警系统施工及验收规范》 GB50166—2007.
- [6] 《电力工程电缆设计标准》 (GB50217—2018) .

# Infoworks ICM 在机场雨水排放系统设计中的应用

■ 杨擎柱 贾文 施曼 (机场场道岩土)

**摘要:** 以国外某机场设计工程为例, 利用Infoworks ICM城市流域综合模型对机场排水系统的设计成果进行校核, 通过模拟不同设计重现期下排水系统的负荷情况以及场区内的内涝风险情况, 对设计成果进行优化。模拟结果显示, 在机场航站楼区域西侧及北侧存在少量积水点, 其主要成因是由于穿越联络道的暗管排水能力不足, 因此需对该管段进行提标设计。同时, 模型模拟结果可为项目后期调蓄池和泵站的设计提供数据支撑。

**关键词:** 模型模拟; 推理公式法; Infoworks ICM; 机场设计; 排水系统设计

## 0 前言

准确计算不同降雨情景下的地面径流流量过程线或流量峰值, 是设计排水设施的关键。为解决场地内涝、防洪问题, 避免设施尺寸不合理, 须针对不同雨水设施、不同设计标准以及不同汇水区本底条件选择合理设计方法, 以适应不同降雨情景下的排水设施设计。

我国规范中雨水管渠的设计流量计算方法是传统推理公式法, 规范规定当汇水区面积超过 $2\text{km}^2$ 时, 宜考虑用数学模型法计算雨水设计流量<sup>[1, 2]</sup>。已有研究表明, 推理公式将汇区内所有降雨损失概化成不同下垫面对应的径流系数, 不能准确反映汇区内雨水径流的产汇流过程, 计算精度难以保证<sup>[3]</sup>。在机场飞行区排水设施的设计过程中, 由于汇水区面积较大, 使用推理公式进行设计计算时其结果较为保守。因此, 本文将介绍Infowork ICM模型在机场飞行区排水设施设计中的应用, 其可应对不同条件下的设计要求<sup>[4]</sup>, 弥补规范计算方法的不足。

## 1 项目概况

国外某机场飞行区指标为4F, 机场区域总面积 $18.56\text{km}^2$ 。本期机场将建设一条长 $4000\text{m}$ , 宽 $60\text{m}$ 的跑道, 道肩宽度 $7.5\text{m}$ , 满足F类飞机起降要求。该机场位于洪泛区内, 为保护机场的安全运行, 在场区周边设置了一圈堤坝, 其内径流雨水无法通过重力自流出场区, 因此需在场区内设置调蓄设施, 并通过泵站强排至场外。本期机场飞行区的排水系统共设置6条主排水沟, 其目的是将飞行区内雨水有组织排放至场区两端调蓄池内。由于该机场地理位置的特殊性, 飞行区排水系统的合理设计对机场的安全运行尤为重要<sup>[5]</sup>, 因此本次设计过程将应用Infowork ICM模型对飞行区排水沟尺寸进行设计复核, 以保障机场的安全运行。

### 1.1 气候水文条件

机场区域天气为热带气候, 受印度洋高气压影响, 十分湿热。气候分成两大季节, 3月~10月为“雨季”, 温度湿度均偏高, 极端热天时温度偶然也可以升到 $38\text{℃} \sim 39\text{℃}$ ; 11月~次年4月属“旱季”, 低温约为 $22\text{℃}$ 。年平均温度介于 $28\text{℃} \sim 34\text{℃}$ 之间。

在地机场的总体规划编制过程中, 应用气候

作者简介: 杨擎柱, 男, 助理工程师, 2018年毕业于北京建筑大学环境工程专业, 现就职于中航建设机场规划设计研究院。

表1 不同重现期下不同降雨历时的设计降雨强度（考虑气候变化）

序号	重现期	24h [mm]	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min	240 min	480 min	720 min	1080 min	1440 min
1	2	94	171	108	82	52	33	21	13	8	6	5	4
2	5	134	244	154	117	74	47	29	18	12	9	7	6
3	10	159	289	182	139	87	55	35	22	14	11	8	7
4	25	187	340	214	164	103	65	41	26	16	12	9	8
5	50	207	375	237	181	114	72	45	28	18	14	10	9
6	100	225	408	257	196	124	78	49	31	19	15	11	9
7	200	242	439	277	211	133	84	53	33	21	16	12	10
8	500	263	478	301	230	145	91	57	36	23	17	13	11

模型对降雨数据进行分析，同时对未来降雨量变化进行模拟。虽然现有的降水数据显示1960年至今的平均降雨量没有显著变化，但气候模型预测未来几十年的年降雨量会增加，而且结果显示当地的降雨量将呈季节性变化。

模型模拟结果显示，2030年日降雨量的增加幅度约为6~8%，2050年日降雨量的增加幅度约为9~10%，增幅不大；但到2070年，当地日降雨量增幅高达28~34%。在2030年的模拟中，5天降雨量从9%增加至14%，在2050年预测中从16%增加至20%，在2090年预测中从29%增加至38%。表1显示了考虑未来降雨量增加后，不同重现期下不同降雨历时对应的设计降雨强度（mm/h）。

## 1.2 设计标准及设计理念

预防和减少洪水对飞机运行的影响是机场规划设计的重要组成部分。机场排水系统不仅要保证机场在强降雨期间的安全运行，还要防止重要基础设施被淹。因为雨水径流对机场基础设施，如灯光、雷达和导航设备以及通信网络的破坏，也会阻碍飞机的正常运行。机场航站楼、应急电力设施和人行道的积水也会扰乱机场运营，导致机场关闭。

合理的设计准则是机场排水系统设计的关键。适当的洪水设计标准应能够将雨水损害（包括对关键资产的直接和间接影响）控制在可接受的水平，同时将工程成本降到最低。

FAA (Federal Aviation Administration) 在机场排水设计 (150/5320\_5d) 中对机场不同区域排水设施的设计标准有如下规定：

(1) 国防部机场和直升机场。对于机场和直升机场，除非获得豁免，否则设计重现期至少为2年。该重现期下的降雨径流不得侵入滑行道和跑道路面（包括道肩）。在通常情况下，机坪区域雨水口周围的积水不得超过4英寸。

(2) 联邦航空管理局。对于机场，建议使用

5年一降雨重现期进行设计，该重现期下的降雨径流不得侵入滑行道和跑道路面（包括道肩）。重现期大于5年一遇的降雨事件造成的损失可能要小于高标准下（大于5年一遇）排水系统所增加的建设成本。在通常情况下，机坪区域雨水口周围的积水不得超过4英寸。

(3) 超标雨水的地表径流。仅依靠设计暴雨重现期并不是衡量雨水排放设施是否充足的可靠标准。建议在最终确定排水设施的合理尺寸之前，考虑更大重现期降雨可能造成的后果，应采取措施使超标雨水径流对机场或直升机场的损害应降到最低。跑道中心50%区域内，以及为跑道服务的滑行道中心50%的区域内，在10年一遇降雨情景下不应有积水产生。

由于世界各地对于机场基础设施可接受的故障风险水平不尽相同，这些风险在本质上是主观的，难以量化。因此，本次机场排水设施的设计标准应结合国际标准和机场当地总体规划中的相关内容来确定。在机场总体规划中，跑道与滑行道之间、滑行道与滑行道之间、滑行道与停机坪之间的主沟渠设计重现期为100年。

由于机场地处洪泛区，其内雨水径流需要通过调蓄池和泵站向外排，内涝风险相对较高。因此，本次机场飞行区排水设施的设计标准延续了总体规划中的相关内容，主沟设计降雨重现期为100年；停机坪区设计标准为：10年一遇无洪水，50年一遇洪水的积水深度不大于100mm。

## 2 模型构建

机场排水设施的平面布局设计应结合机场区域内的地势设计成果，本机场排水设施的平面布置见图1。在构建机场模型之前，首先结合前文所述设计降雨及不同区域的设计标准，采用传统合理化

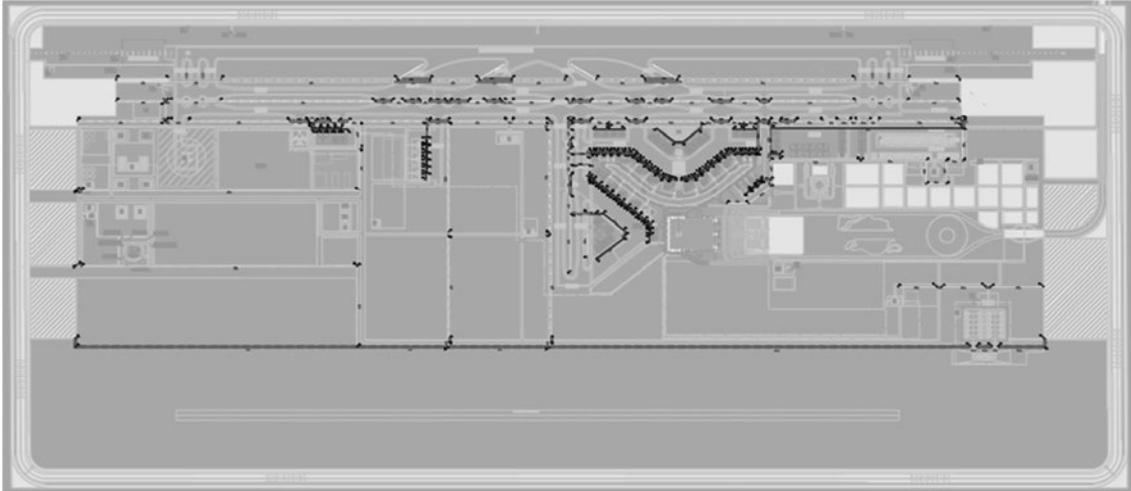


图1 排水系统平面布置图

公式法对排水设施尺寸进行初步计算，然后利用Infoworks ICM模型进行校核，并优化管渠的平面布置和断面尺寸。

### 2.1 建模方法与技术路线

分析该机场区域土地利用特征、气候地理条件、地形地貌、下垫面性质、水文特征等基本信息；收集处理气象数据等基本资料；依据场区地势设计、排水系统设计和总平面设计成果，分析下垫面和汇水区特征并构建雨水洪涝模型，对机场区域排水能力和内涝风险进行评估，通过模型验证其合理性，对于未达到标准的设计方案，结合模拟结果提出优化方案。

### 2.2 模型输入条件分析

机场区域模型的输入信息包括基础管渠信息

(长度、起始位置、坡度、管材、管型、管径、管底标高等)；检查井(类型、直径、地表标高、管底标高等)；汇水分区、规划区土地利用类型、降雨数据、汇水分区下渗参数、排水口处接纳水体的水位信息等基础资料。

#### 2.2.1 设计降雨分析

由于本机场所在地区没有制作设计降雨事件的时程分配方法，因此本次设计降雨的时程分配方法采用K.C法。根据表1中不同重现期下不同降雨历时的设计降雨强度计算对应设计降雨总量，然后利用K.C法将降雨总量分配至0.5/1h内。

本次模拟过程采用的设计降雨重现期有10年和100年两种，雨峰系数 $r=0.4$ ，降雨历时1h，模拟步长1min。设计降雨过程线见图3。

#### 2.2.2 排水管渠系统构建

根据机场区域排水系统设计的初步成果，利用Arcgis软件对雨水管渠进行梳理，并转化为管网拓扑数据文件，进行模型导入。通过对节点和管段的筛选及整理，提取管渠设计节点和排口的数量以及

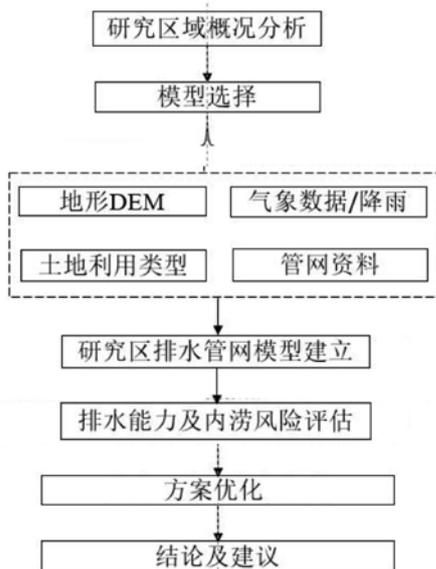


图2 模型模拟的技术路线

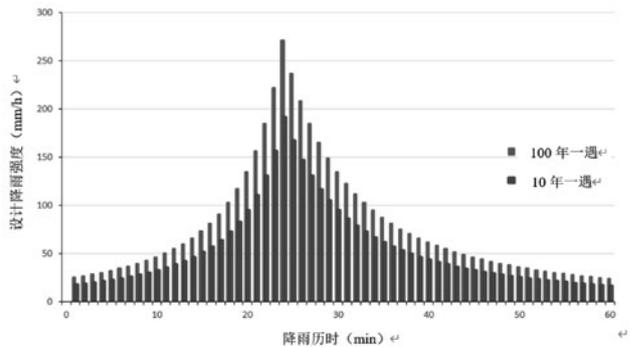


图3 设计降雨过程线(10年一遇和100年一遇)

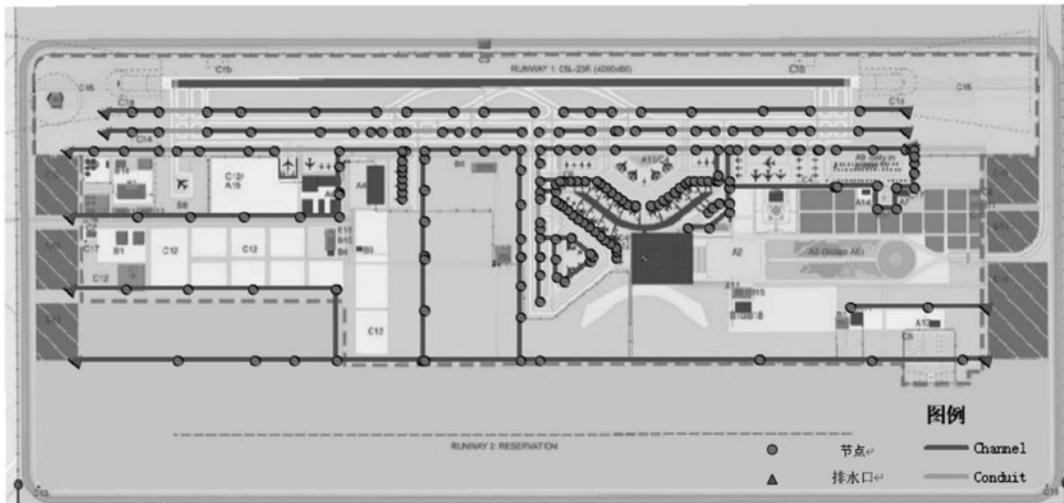


图4 机场区域雨水排放系统概化图

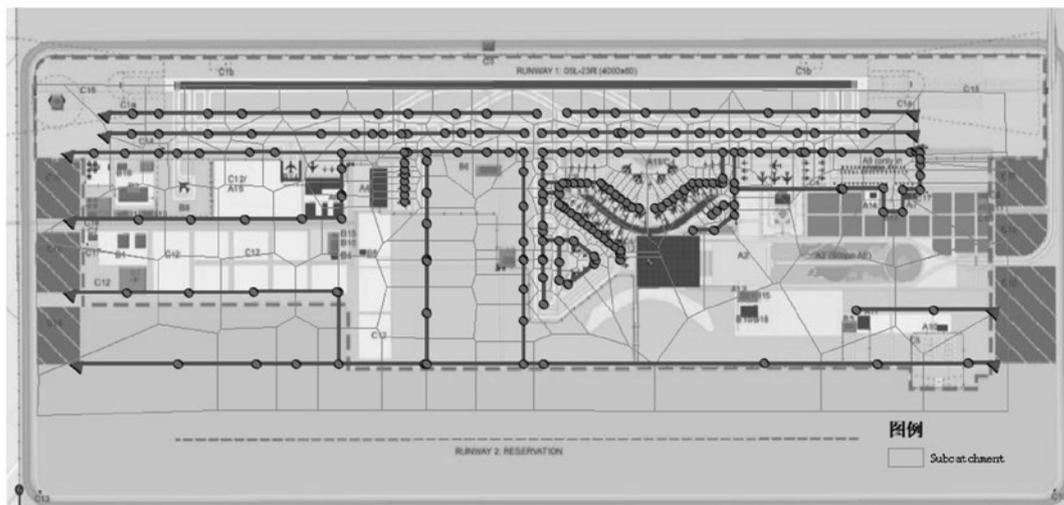


图5 机场区域汇水区划分结果

管段数量级和管网长度，具体设计方案情况如下：

经概化，得管渠设计节点共221个，排口共11个，节点、排口和管渠情况如图4所示。

### 2.2.3 汇水区划分

机场区域总面积 $18.56\text{km}^2$ 。根据地势设计和排水方案设计成果，以主沟为界划分一级排水分区，在一级排水分区基础上根据各分区内雨水口分布特征、管渠分布特征及下垫面分布划分分子集水区，一级排水分区及子集水区，根据规划分布如图5所示。

### 2.2.4 地面DEM构建

Inforwork ICM中的地面二维漫流模型能够较好的模拟二维表面流，其原理是利用二维圣维南方程的离散求解。二维的地表漫流模型通过建立二维网格—建立地表高程模型—设置模型边界条件和初始条件等。为了获得比较精确的地表漫流模型，

一般需要将模拟区的路网、水系等下垫面图层进行矢量化解析，然后叠加到DEM地形图上。根据设计地形资料，机场区域的地形如图6所示。

### 2.2.5 模型参数选取

根据城市水文计算原理，不同的用地类型分为两类：不透水地面和透水地面。根据机场内下垫面类型可分为3类，分别为屋面、道路及土面区。汇水面径流系数及径流表面参数设置如表2、表3所示。

## 3 模型评估结果分析

### 3.1 评估标准

#### (1) 管渠能力评估标准

管渠模拟结果可用管渠超负荷状态 (Max surcharge) 来评估，根据模拟结果，管渠状态可

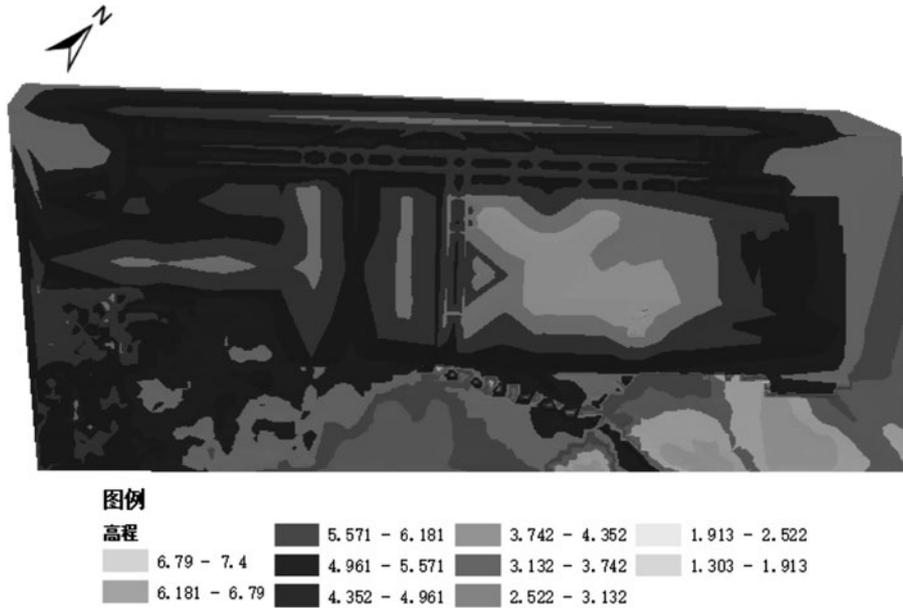


图6 机场区域地形图

分为如下3种:

1) 管渠小于设计负荷状态, 管渠未满流, 其状态值可根据管渠充满度确定, 管渠状态值 $Max\_surcharge < 1$ ;

2) 管渠处于超载状态, 但管渠运行的水力坡度小于设计管道坡度, 说明管渠实际过水量未达到

设计过水能力, 管渠符合设计要求, 引起超载原因主要是下边界水位过高引起, 该种管渠状态值为 $Max\_surcharge = 1$ ;

3) 管渠处于超载状态, 且管渠运行的水力坡度大于设计管渠坡度, 说明管渠实际过水量超过了设计过水能力, 管渠超出了设计负荷要求, 水力坡

表2 不同下垫面径流系数

下垫面种类	雨量径流系数	流量径流系数
绿化屋面 (绿色屋顶, 基质层厚度 $\geq 300$ mm)	0.30-0.40	0.40
硬屋面、未铺石子的平屋面、沥青屋面	0.80-0.90	0.85-0.95
铺石子的平屋面	0.60-0.70	0.80
混凝土或沥青路面及广场	0.80-0.90	0.85-0.95
大块石等铺砌路面及广场	0.50-0.60	0.55-0.65
沥青表面处理的碎石路面及广场	0.45-0.55	0.55-0.65
级配碎石路面及广场	0.40	0.40-0.50
干砌砖石或碎石路面及广场	0.40	0.35-0.40
非铺砌的土路面	0.30	0.25-0.35
绿地	0.15	0.10-0.20
水面	1.00	1.00
地下建筑覆土绿地 (覆土厚度 $\geq 500$ mm)	0.15	0.25
地下建筑覆土绿地 (覆土厚度 $< 500$ mm)	0.30-0.40	0.40
透水铺装地面	0.08-0.45	0.08-0.45
下沉广场 (50年及以上一遇)	—	0.85-1.00

表3 不同下垫面的参数设置

下垫面		固定径流系数	曼宁系数	初损	霍顿入渗公式参数		
					初渗值 (mm/h)	稳渗率 (mm/h)	衰减率 (1/h)
产流表面1	屋面	0.9	0.011	0.002	—	—	—
产流表面2	土面区	—	0.2	0.007	100	15	5
产流表面3	道路	0.8	0.011	0.002	—	—	—

降较大，导致上游管渠壅水，该种管渠状态值为 $Max\_surcharge > 1$ 。此类型的管渠是造成管网整体过水能力下降，上游产生漫溢的主要原因，也是后期改造和优化中的重点。

### (2) 内涝风险评估标准

本机场区域主沟的防涝标准为100年一遇，机坪区域的排水设施为10年一遇，且重要区域在100年一遇的设计降雨条件下不得有积水。因此，本次洪水风险评估采用情景模拟法。根据Infoworks ICM雨洪模型软件的一维-二维耦合模型计算结果，评价100年一遇1小时设计暴雨对机场区的洪涝灾害情形。

### 3.2 管渠负荷评估

依据排水系统设计和地势设计成果，在10年一遇及100年一遇这两种设计情形下（1h短历时降雨），模拟场区洪水内涝风险，其中最不利时刻的管渠系统负荷如图7、图8所示。由图分析可知，在不同降雨情形条件下，沟渠末端及沟渠与

管道连接处的排水过程不是很顺畅，存在超负荷运行的情况。

### 3.3 内涝风险评估

模型模拟的最不利时刻的内涝发生场景和积水区域如图9、图10所示。由图可知，在100年一遇的降雨事件下，场区内存在少量积水点。

### 3.4 排口峰值流量统计

由于机场区域内所有的径流雨水均通过排水系统排至场区两侧的调蓄池内，再经由泵站强排至场外。因此，各排口峰值流量以及排放总量等数据对调蓄池调蓄容积和泵站的设计非常重要，各出水口峰值流量和排放总量统计如表4所示。

## 4 结论及建议

### 4.1 结论

该机场区域排水管渠的设计满足设计重现期10年的标准，场地整体排水通畅，无严重积水点，排水系统运行状况良好，满足预设设计重现期标准。在100年一遇降雨情景下，航站楼西侧和北侧的图面区有少量积水点。经分析，其主要原因是穿越联络道位置的暗管过流能力不足，导致与暗管相连的主沟内有壅水情况发生。因此，针对过流能力不足的管段应进行提标设计，并重复运行模型直至管网负荷和积水点深度达到可接受水平。

### 4.2 建议

(1) 可通过模拟多种重现期、多种雨型和多种降雨历时情景下，排水系统的运行工况及内涝风险情形，来进一步优化机场排水系统的设计，在保证机场运行安全的前提下，尽



图7 10年一遇设计降雨情形下管网负荷情况

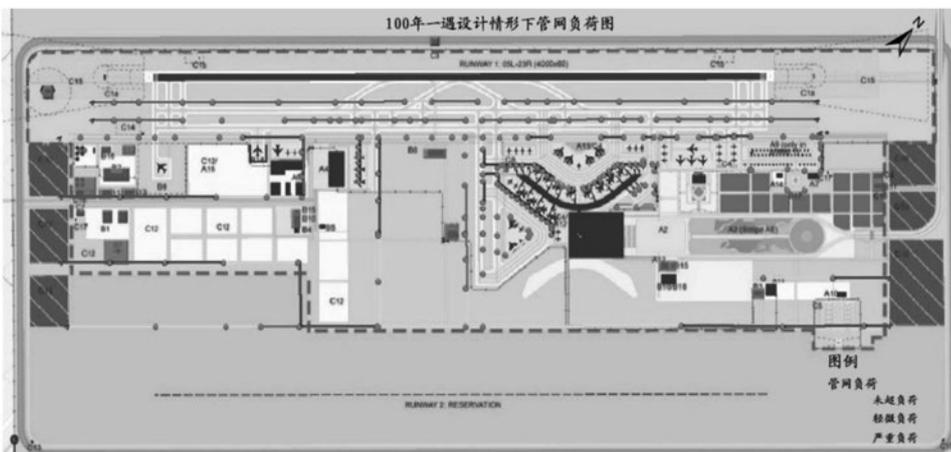


图8 100年一遇设计降雨情形下管网负荷情况

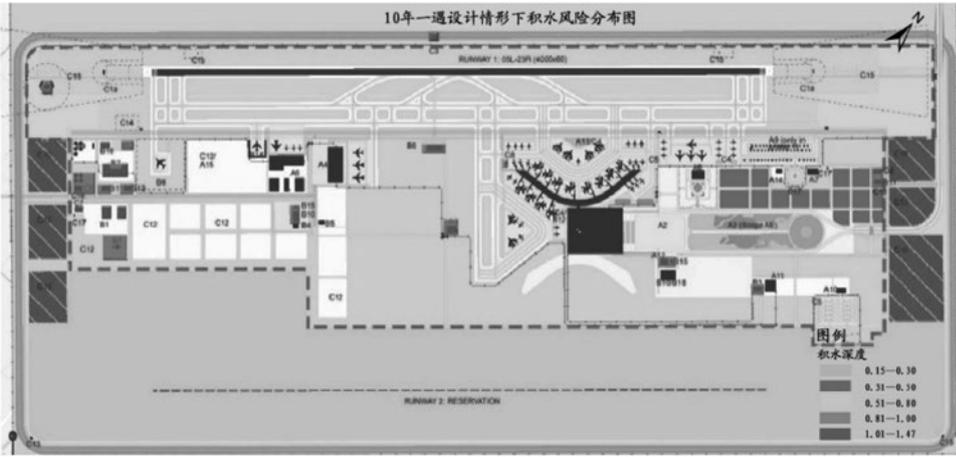


图9 10年一遇设计降雨情形下内涝风险情况

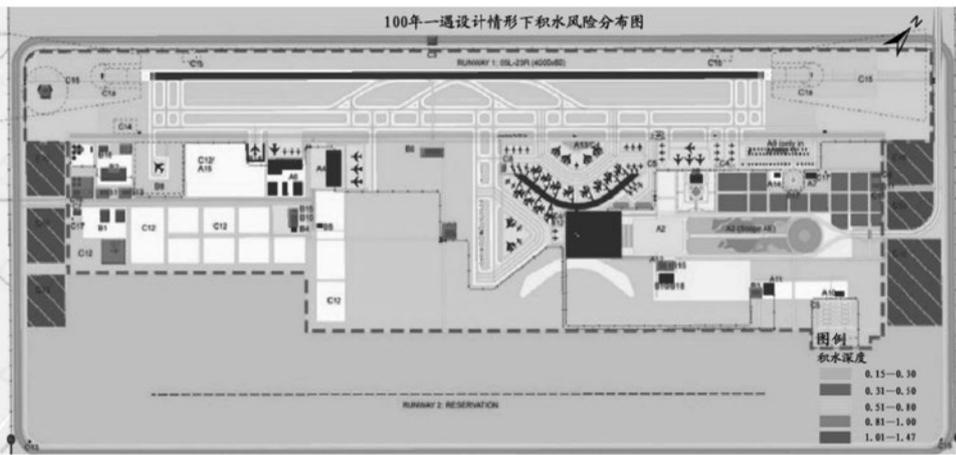


图10 100年一遇设计降雨情形下内涝风险情况

表4 排口流量统计

排口编号	10年一遇	100年一遇
A	5.17m <sup>3</sup> /s	8.38m <sup>3</sup> /s
B	3.85m <sup>3</sup> /s	6.21m <sup>3</sup> /s
C	3.47m <sup>3</sup> /s	5.42m <sup>3</sup> /s
D	3.17m <sup>3</sup> /s	5.06m <sup>3</sup> /s
E	8.66m <sup>3</sup> /s	14.39m <sup>3</sup> /s
F	17.44m <sup>3</sup> /s	23.80m <sup>3</sup> /s
G	5.60m <sup>3</sup> /s	9.26m <sup>3</sup> /s
H	5.11m <sup>3</sup> /s	8.57m <sup>3</sup> /s
I	7.25m <sup>3</sup> /s	12.02m <sup>3</sup> /s
J	10.02m <sup>3</sup> /s	18.30m <sup>3</sup> /s
K	3.53m <sup>3</sup> /s	5.94m <sup>3</sup> /s
排放总量	262713m <sup>3</sup>	313658m <sup>3</sup>

可能地节省工程造价。

(2) 在现阶段模型设置的基础上,增加调蓄池和泵站的运行情景,综合模拟不同降雨情景下,机场全区域的运行状况,为调蓄池和泵站的设计提供数据支撑。

(3) 在机场飞行区排水设施设计过程中,由于汇水区面积较大,使用推理公式进行设计计算时其结果较为保守。因此,建议机场类大型场地的排水系统设计应使用水文水力模型进行校核和优化,弥补规范计算方法的不足。

参考文献

[1] 季民等. 城市雨水控制工程与资源化利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.  
 [2] 上海市建设和交通委员会. 室外排

水设计规范(2016版)[M]. 中国计划出版社, 2016.

[3] 王国安, 贺顺德, 李荣容, 等. 论推理公式的基本原理和适用条件[J]. 人民黄河, 2010, 32(12): 1-4.

[4] 曾娇娇, 朱玉玺, 李佳佩, 杨国洪. Infoworks ICM在珠海金湾机场内涝提标改造中的应用[J]. 给水排水, 2019, 55(08): 46-49.

[5] 施曼, 杨擎柱, 贾文. 国外某海岛机场飞行区排水方案研究[J]. 给水排水, 2019, 55(03): 89-94.

[6] 任伯帜. 城市设计暴雨及雨水径流计算模型研究[D]. 重庆大学, 2004.

# 某疫苗车间项目 净化空调设计

■ 宋猜 董秀芳 [暖通]

**摘要:** 制药车间对洁净空调有着特殊的要求,同时净化空调系统是保证药品质量的关键系统之一,本文将结合北京某疫苗项目对医药厂房的空调设计要点进行阐述分析,对洁净空调系统的设计方案进行选择,希望能对疫苗生产车间的空调设计提供借鉴。

**关键词:** 空调分区; 空调方案; 气流组织

## 1 工程概况

本疫苗项目为改造项目,建筑类别为丙类高层厂房,耐火等级一级,每自然层为一个防火分区。改造区域总建筑面积约10000m<sup>2</sup>,包括地上3层,一、二、三层均为6.5m。

一层包括消防安防控制中心、纯化水间、注射水间、空压机动力机房、制冷机房、外包装区、消毒剂配制区(防爆)等;二层为7D水痘原液车间;三层为普通水痘原液车间。

## 2 室内设计参数的选择

根据《药品生产质量管理规范》(2010年修订)要求,室内设计参数应当根据药品品种、生产操作要求及外部环境状况等配置空调净化系统,使生产区有效通风,并有温度、湿度控制和空气净化过滤,保证药品的生产环境符合要求。根据《医药工业洁净厂房设计标准》(GB50457-2019)规定,生产工艺对温度和湿度有特殊要求时,应根据

工艺要求确定,无特殊要求时,按照国家相关规范及标准确定。

本工程根据工艺专业对生产区净化级别的划分,根据相关规范要求,设计参数如表所示。

表 室外设计参数

洁净级别	温度/℃		相对湿度%RH		换气次数 次/时
	冬季	夏季	冬季	夏季	
B	20±2	22±2	40%~60%	45%~55%	60
C	20±2	22±2	40%~60%	50%~60%	30
D	20±2	24±2	45%~65%	55%~65%	20
CNC	20±2	26±2	>30	<70	12

## 3 空调系统划分

空调系统的划分主要根据工艺生产流程及洁净度、温湿度等要求,主要遵循以下原则:

(1) 净化空气调节系统与一般空气调节系统应分开设置;

(2) 无菌与非无菌生产区的净化空气调节系统应分开设置;

(3) 洁净度、温、湿度及其精度相同或相近

作者简介:宋猜,男,助理工程师,2012年毕业于河南工业大学建筑环境与设备工程专业,现就职于航空工业规划医药工程设计研究院。

的洁净房间宜划为一个净化空调系统，便于洁净度和温、湿度的控制；

(4) 含有可燃、易爆或有害物质的生产区应独立设置；

(5) 运行班次或使用时间不同时宜分开设置；

(6) 净化空调系统划分时还应考虑到送风管、回风管、排风管以及水、电、气等管线的布置，尽量作到合理、短捷、使用管理方便，尽量减少交叉和重叠。

本工程根据工艺生产的具体要求，结合空调分区的原则，生产区空调系统设计分为舒适性空调系统、常温洁净空调系统、恒温空调系统，2~8℃低温洁净空调系统、干燥空调系统，防爆直流空调系统，均采用全空气空调系统。一层设计了5个空调系统，二、三层分别设计了16个空调系统。

## 4 空调系统设计计算

### 4.1 空调负荷计算

室内负荷计算主要包括以下内容：

(1) 围护结构负荷，计算方法同一般空调计算方法相同，不同在于洁净室一般位于建筑内区，计算时可按稳态传热计算；

- (2) 室内作业人员的散热、散湿负荷；
- (3) 室内照明灯具的散热负荷；
- (4) 生产设备和生产过程的散热、散湿负荷；
- (5) 层流设备散热；
- (6) 工艺罐体灭菌消毒时散热。

### 4.2 风量计算

#### (1) 送风量计算

洁净室的送风量不仅需要能消除洁净室的总的余热、余湿以保证洁净室的温度和相对湿度；而且洁净室的送风量还应能消除室内产生的灰尘等粒子的污染，以保证洁净室的洁净度等级。因此，洁净室的送风量应为消除余热、余湿的送风量，洁净室所需新风量和消除粒子污染的净化送风量三者之间最大的送风量为该洁净室的送风量。

#### (2) 新风量计算

洁净室的新风量不仅仅要补充洁净室的排风量和维持洁净室正压的泄漏风量，同时还要保证洁净室内工作人员每人每小时不小于40m<sup>3</sup>的新鲜空气量的要求。

新风量计算公式如下：

$$L_{\text{新}} = L_{\text{排}} + L_{\text{正}}, \text{ 且应} \geq n \cdot 40 \text{ (m}^3/\text{h)}$$

式中：L<sub>排</sub>——洁净室总的排风量 (m<sup>3</sup>/h)

L<sub>正</sub>——维持洁净室正压的总泄漏风量 (m<sup>3</sup>/h)

n——洁净室内人数

## 5 空调处理方案的选择

空调处理方案直接影响空调系统的能耗，设计时须对空气处理方案进行技术经济比较和优化，选择简单、实用、节能、维护管理方便，节省投资的空气处理方案。

本厂房通过各种空气处理方案的对比分析，根据各功能区的使用特点，主要采用全新风空气处

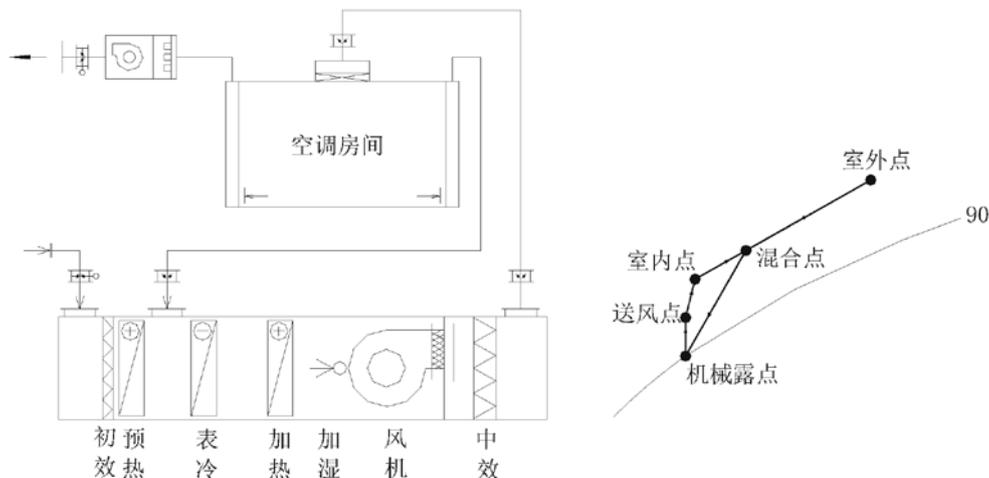


图1 一次回风系统原理图及焓湿图

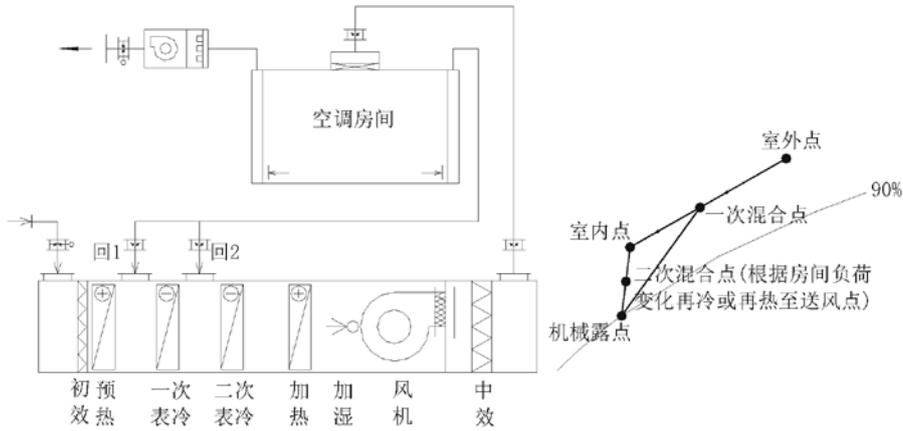


图2 固定比例的一、二次回风空调系统原理图及焓湿图

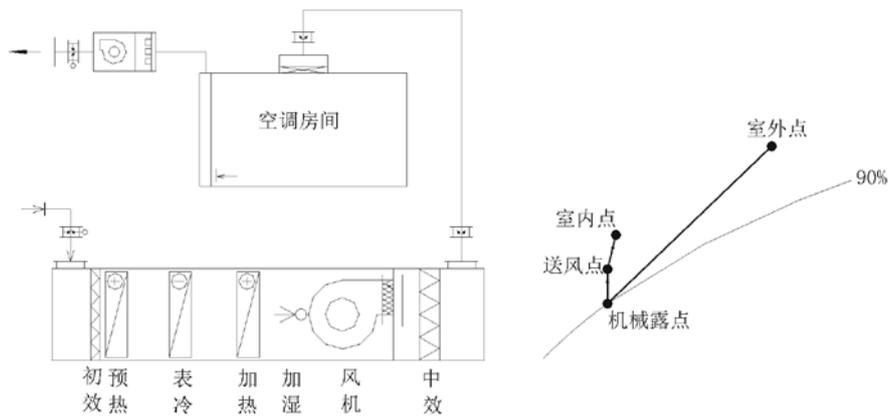


图3 全新风直流系统原理图及焓湿图

理系统、一次回风空调系统、固定比例的一、二次回风空调系统。

当空气调节区送风温差较大或室内散湿量较大时，采用一次回风系统，一次回风系统原理图及焓湿图见图1。

当空调送风温差较小、室内散湿量较小时，为避免采用一次回风系统出现冷热抵消现象，设计采用二次回风系统，因典型二次回风系统控制较复

杂，调节难度大，结合一次回风和二次回风的特点，采用固定比例的一、二次回风空调系统。新风预冷负担新风及室内的湿负荷，二次冷却负担室内的显热负荷，固定比例的一、二次回风空调系统原理图及焓湿图见图2。

对于防爆区，工艺及规范要求不允许采用回风的系统，采用全新风直流系统。全新风直流系统原理图及焓湿图见图3。

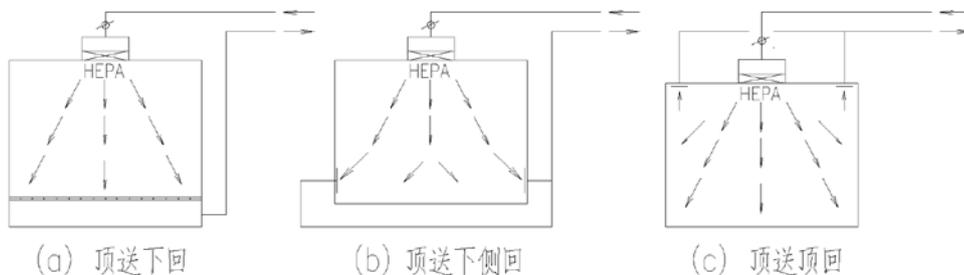


图4 空调气流组织形式

## 6 气流组织形式的选择

气流组织形式作为影响室内品质的主要因素,特别是洁净系统中,若气流组织形式的选择不当,将直接影响着洁净室洁净度。空调气流组织的主要形式有:上送下回、上送下侧回、上送上回、侧上送侧下回等形式。空调气流组织形式见图4。

结合本工程工艺环境的主要特点,非洁净区采用上送上回的形式,洁净区采用顶送下侧回的形式。

## 7 冷热源的选择

一般大型规模化的生产工厂集中设置冷冻站,但是对于一些温、湿要求差别比较大供冷参数不同;运行规律、运行时间不同的洁净车间来说,会在集中冷冻站基础上,就近设置分散、独立、专用的制冷机组,以起到节省、方便管理运行的作用。

对于大型的工厂由集中的冷冻站供给冷冻水作为净化空调系统的冷媒较为有利。因冷冻水输送方便,输送过程冷损失较小;而且,冷冻水作冷媒对净化空调系统参数的控制、调节和维护管理也都比较有利。

当以冷冻水作为净化空调系统的冷媒时,在一般的情况下,冷冻水的初温(表冷器冷冻水的进口温度)应比处理后空气的终温(设计计算中确定)至少要低 $3.5^{\circ}\text{C}$ ;如果是以冷冻方式去湿降温为目的的空气处理系统,冷冻水的终温(表冷器冷冻水的出口温度)应比处理后空气的终温低 $0.7^{\circ}\text{C}$ 。

空调机组内加热器的热媒可采用热水、蒸汽或电加热,其中电加热控制灵活方便,温度控制精确度高,但运行费昂贵,一般在没有热水和蒸汽供应的地方才用电加热;用热水作热媒时不仅调节和管理方便、而且控制精度也高是加热器最常用的热媒;当温度的精度要求不高(如 $\Delta t \geq \pm 2^{\circ}\text{C}$ )也可采用蒸汽作加热器的热媒。

净化空调系统的加湿比较方便、可行、经济、可靠的方法是用过热蒸汽( $\geq 0.2\text{MPa}$ )作热媒采用干蒸汽加湿器进行加湿。

本工程根据工程的规模特点及室内设计参数的要求,结合相关规范规定,冷源采用一层动力站提供的集中冷源( $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ )来满足夏季降温的要求,热源采用厂区提供的 $0.2\text{MPa}$ 的蒸汽满足空调

再热及加热要求。本工程最大冷负荷为 $3500\text{kW}$ ,冷指标为 $311\text{kW}/\text{m}^2$ ,最大热负荷为 $2100\text{kW}$ 。考虑到大部分生产区处于建筑的內区,同时部分房间发热量较大,故车间满足全年提供冷源。

对于温度的精度要求较高的房间(如 $\Delta t \leq \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ),在送入洁净室的支管上设温度精度微调节的电加热器。

## 8 结论

随着医药事业的迅速发展,对药厂环境的要求越来越高,空调系统是保证药品质量的关键系统之一,为了保证洁净空调能够以安全高效、节能的方式运行,就必须在其设计阶段将洁净空调各个设计要点进行反复推敲分析,同时,洁净空调的运行成本、维护成本也都是需要在设计方案中予以体现出来的,并在以下要点着重考虑。

(1) 空调系统的划分要结合相关规范及工艺分区要求,满足不同房间不同工作时间和不同净化要求,同时满足控制方便,运行节能。

(2) 空气处理方案必须进行技术经济比较和优化,选择简单、实用、节能、维护管理方便,节省投资的空气处理方案。

(3) 合理选择气流组织形式,合理的气流组织形式可以提高房间的温湿度场的均匀度,使室内空气的流动符合洁净室设计要求,满足房间的洁净等级要求。

### 参考文献

- [1] 许钟麟.药厂洁净室设计、运行与GMP认证(第二版)[M].上海:同济大学出版社,2011.
- [2] 陈琪.制药企业洁净空调系统设计的建议[J].机电信息,2013,14:18-21.
- [3] 陈奕.洁净空调系统设计探讨[J].医药工程设计,2013,34(3):57-60.

## 市政工程设计研究院

市政工程设计研究院（五院）是中航规划在市政环境领域的专业团队，长期专注于市政公用工程、城市基础设施、生态环保节能等方面的工程咨询、设计和总承包业务。以市场为导向，始终坚持打造企业核心竞争力，细化专业分工，优化资源配置，注重技术创新。承揽项目遍布全国，目前已延伸至海外。近年来，在城市固体废弃物处理、循环产业园区规划、能源供应、市政水务、环境治理和生态修复、地下综合管廊等领域完成了多项精品工程，获得了数10项国家和省部级奖项，为客户创造价值的同时，实现了经营规模的飞跃发展。

市政院近年来的业务以固废处理工程研究中心、能源工程研究中心、生态修复与环境治理工程研究中心、城市交通与地下空间工程研究中心等4个中心为核心展开，辅以热机、规划总图、建筑、结构、给排水、采暖通风、电气、自动控制、运输、造价、环境、岩土、咨询、工程管理等专业化的人才队伍，为客户提供从项目融资、高端咨询、规划立项、场地选址、可行性研究报告、方案设计、初步设计、施工图设计、工程与设备总承包和中后期评估、项目运营等工程投资、建设、运营全价值链的优质服务，主要代表作品包括北京鲁家山生物质能源项目、广州市第三资源热力电厂、郑州（东部）环保能源工程、陕西关中危险废弃物处置中心、海北州祁连山山水林田湖草生态保护与修复项目、贵阳市白云区城市地下综合管廊一期工程等，工程规模和投资均位于全国行业前列，具有广泛的影响力。



2020年第2期（总第148期）  
2020年4月出版



北京安定循环经济园区