

空间结构系列图书

DAKUADU YUYINGLI

GANGJIEGOU GANMEIPENG SHEJI YU SHIGONG

# 大跨度预应力钢结构干煤棚 设计与施工

曹正罡 编著

范 峰 主审



中国建筑工业出版社

空间结构系列图书

# 大跨度预应力钢结构干煤棚 设计与施工

曹正罡 编著  
范 峰 主审



中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

大跨度预应力钢结构干煤棚设计与施工/曹正罡编著. —北京:  
中国建筑工业出版社, 2019. 1  
空间结构系列图书  
ISBN 978-7-112-22981-9

I. ①大… II. ①曹… III. ①大跨度结构-预应力结构-钢结构-  
干煤棚-建筑设计②大跨度结构-预应力结构-钢结构-干煤棚-建筑  
施工 IV. ①TU271.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 263252 号

本书结合储煤结构的发展现状和存在的主要问题, 重点针对大跨预应力钢结构干煤棚体系, 围绕以下几个方面: 结构体系选型, 主体结构抗震、抗风、抗雪、稳定性等关键问题的分析理论和设计方法, 围护结构的设计, 防火、防腐技术措施, 以及干煤棚采光、除尘、通风、挡煤等设施的主要形式与应用特点, 进行了全面系统的阐述。同时还针对超大跨预应力钢结构干煤棚的施工全过程, 包括节点焊接、桁架拼装、吊装方法和张拉技术进行了介绍; 最后提供了拱形预应力钢结构干煤棚的工程实例和主要图纸, 并在附录中列出了常用的预应力拉索、钢拉杆等构件、锚具的规格和型号, 供设计者选用。

本书可作为技术人员进行大跨度预应力钢结构干煤棚设计、施工的指导性资料, 也可供相关科研人员及高等院校师生参考。

责任编辑: 刘瑞霞 武晓涛

责任设计: 李志立

责任校对: 王 瑞

## 空间结构系列图书

# 大跨度预应力钢结构干煤棚设计与施工

曹正罡 编著

范 峰 主审

\*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京建筑工业出版社印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17 $\frac{3}{4}$  字数: 446 千字

2019年4月第一版 2019年6月第二次印刷

定价: 50.00 元

ISBN 978-7-112-22981-9  
(33071)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

## 编审委员会

- 顾 问：蓝天 董石麟 沈世钊 马克俭 刘锡良 严 慧 曹 资  
姚念亮 刘善维 张毅刚
- 主 任：薛素铎
- 副主任：李亚明 周观根 陈国栋 高继领 王小瑞 黄达达 陈志华  
吴金志
- 委 员：白宝萍 蔡小平 陈文明 高博青 耿笑冰 韩庆华 郝成新  
李存良 李 凯 李明荣 李中立 罗兴隆 唐泽靖子 王 丰  
王海明 王 杰 王 平 王双军 王秀丽 王元清 向 阳  
薛海滨 张其林 赵伯友 支旭东 钟宪华 朱忠义 冯 远  
罗尧治 武 岳 刘 枫 罗 斌 宁艳池 任俊超 王泽强  
许立准 李雄彦 孙国军 胡 洁

## 序 言

中国钢结构协会空间结构分会自 1993 年成立至今已有二十多年，发展规模不断壮大，从最初成立时的 33 家会员单位，发展到遍布全国各个省市的 500 余家会员单位。不仅拥有从事空间网格结构、索结构、膜结构和幕墙的大中型制作与安装企业，而且拥有与空间结构配套的板材、膜材、索具、配件和支座等相关生产企业，同时还拥有从事空间结构设计与研究的设计院、科研单位和高等院校等，集聚了众多空间结构领域的专家、学者以及企业高级管理人员和技术人员，使分会成为本行业的权威性社会团体，是国内外具有重要影响力的空间结构行业组织。

多年来，空间结构分会本着积极引领行业发展、推动空间结构技术进步和努力服务会员单位的宗旨，卓有成效地开展了多项工作，主要有：（1）通过每年开展的技术交流会、专题研讨会、工程现场观摩交流会等，对空间结构的分析理论、设计方法、制作与施工技术等进行研讨，分享新成果，推广新技术，加强安全生产，提高工程质量，推动技术进步。（2）通过标准、指南的编制，形成指导性文件，保障行业健康发展。结合我国膜结构行业发展状况，组织编制的《膜结构技术规程》为推动我国膜结构行业的发展发挥了重要作用。在此基础上，分会陆续开展了《膜结构工程施工质量验收规程》《建筑索结构节点设计技术指南》《充气膜结构设计施工技术指南》《充气膜结构技术规程》等的编制工作。（3）通过专题技术培训，提升空间结构行业管理人员和技术人员的整体技术水平。相继开展了膜结构项目经理培训、膜结构工程管理高级研修班等活动。（4）搭建产学研合作平台，开展空间结构新产品、新技术的开发、研究、推广和应用工作，积极开展技术咨询，为会员单位提供服务并帮助解决实际问题。（5）发挥分会平台作用，加强会员单位的组织管理和规范化建设。通过会员等级评审、资质评定等工作，加强行业管理。（6）通过举办或组织参与各类国际空间结构学术交流，助力会员单位“走出去”，扩大空间结构分会的国际影响。

空间结构体系多样、形式复杂、技术创新性高，设计、制作与施工等技术难度大。近年来，随着我国经济的快速发展以及奥运会、世博会、大运会、全运会等各类大型活动的举办，对体育场馆、交通枢纽、会展中心、文化场所的建设需求极大地推动了我国空间结构的研究与工程实践，并取得了丰硕的成果。鉴于此，中国钢结构协会空间结构分会常务理事研究会研究决定出版“空间结构系列图书”，展现我国在空间结构领域的研究、设计、制

作与施工建造等方面的最新成果。本系列图书拟包括空间结构相关的专著、技术指南、技术手册、规程解读、优秀工程设计与施工实例以及软件应用等方面的成果。希望通过该系列图书的出版，为从事空间结构行业的人员提供借鉴和参考，并为推广空间结构技术、推动空间结构行业发展做出贡献。

中国钢结构协会空间结构分会 理事长  
空间结构系列图书编审委员会 主任  
薛素铎

2018年12月30日

# 序

封闭式干煤棚作为一种防止煤料场扬尘污染环境的技术设施，近几年在我国蓬勃发展起来，且建设体量不断刷新。目前单体煤料场储量已经超过 30~50 万吨。要想封闭遮挡这样体量的煤料场，并进行经济高效的运营，需要建造超大跨度的干煤棚来满足存储和作业空间。

传统的干煤棚大多采用螺栓球网壳的结构形式，跨度一般在 90~120m 之间。双层柱面或者球面螺栓球网壳结构比较适用于这一跨度范围，它们具有装配化高、现场焊接量小、不用搭设满堂红脚手架且造价经济等特点。但对于更大跨度的干煤棚，由于现有加工工艺无法保证大直径螺栓的力学性能，结构的整体经济性也将迅速下降，螺栓球网壳不再是适用的结构形式。

近几年来，随着我国在高强钢、高强拉索等新材料的自主研发方面不断取得突破，以及钢结构的加工、吊装、三维测量等施工技术水平的不断提升，使得建造适用的超大跨度干煤棚成为可能。例如，大跨度拱形预应力钢结构是由传统张弦桁架演化而来的一种结构形式，目前已成功应用于巨大体量的干煤棚（跨度达到 200m 以上），由于其受力性能优良，且经济性也较好，采用这种结构体系的超大体量干煤棚具有良好的发展势头。

但是需要指出的是，大跨度预应力钢结构的设计和施工具有其特殊性。首先，这种结构体系在荷载作用下产生较大的变形，因而在受力分析中，小变形假定不成立，而必须考虑几何非线性影响，计算过程比较复杂；其次，超大跨结构对风雪荷载取值和分布较为敏感，现行规范难以参照，需要开展各种专项研究作为设计依据；再次，预应力钢结构的受力性能与施工过程密切相关，其设计计算必须与施工单位紧密配合。此外，在施工方面，预应力张拉有一定难度，技术要求较高。由于上述这些特点，大跨度预应力钢结构干煤棚的设计与施工有一定的难度，目前只有少数技术团队掌握，还没有全面推广开来。这也说明这一领域尚存在许多体系创新和理论创新的空间。

《大跨度预应力钢结构干煤棚设计与施工》一书结合储煤结构的发展现状和存在的主要问题，重点针对大跨预应力钢结构干煤棚体系，围绕以下几个方面：（1）结构体系选型，（2）主体结构抗震、抗风、抗雪、稳定性等关键问题的分析理论和设计方法，（3）围护结构的设计，（4）防火、防腐技术措施，以及（5）干煤棚采光、除尘、通风、挡煤等设施的主要形式与应用特点，进行了全面系统的阐述；同时还针对超大跨预应力钢结构干煤棚的施工全过程，包括节点焊接、桁架拼装、吊装方法和张拉技术等方面进行了介绍。可以看出，作者曹正罡博士正是根据近几年从事大跨度预应力钢结构干煤棚设计和施工的成功经验，并针对这一结构体系存在的许多技术难题，围绕基本分析理论、设计方法和施工技术进行了系统的研究和总结，并整理成册出版，为有关设计人员提供较为系统的技术

指导，以促进超大跨干煤棚的健康快速发展。创新驱动发展，这一工作鲜明地体现了具有明确目标的科技创新实践，我觉得很有意义。

自然，科技创新没有止境，关于超大跨度干煤棚的结构体系、设计构想和分析理论，还有许多问题可供探索，这本书为这一过程提供了一个良好的起点。

本书内容全面、详实，除了供设计人员应用外，还可作为高等学校相关专业师生的参考教材。

爰为之序。

中国工程院院士 于文世 创

于哈尔滨工业大学

2018年11月

# 前 言

从 1979 年到 2016 年，我国火电发电量增长了 17.5 倍，建设大型电站机组已经成为解决燃煤发电率和保证环保排放指标的重要措施，而干煤棚是大型火力电站中存储燃煤的一种大型库房，其长度、宽度是根据装机容量的需要来确定的，大型电站的建设必须要有跨度大、净空高且覆盖空间大的干煤棚来配套满足其原煤的存储和作业空间。而最近 5 年，由于环保要求和建设用地的严格控制，国家要求煤炭散堆必须由封闭的干煤棚覆盖，所以封闭式干煤棚的建设数量、规模和体量不断刷新。同时，我国在高强钢、高强钢索等新材料研发方面也不断取得突破，大量轻质、高强的材料可以应用在大跨干煤棚的设计中，使得干煤棚的设计更为轻巧、美观；钢结构的加工、焊接、吊装、铸造、三维测量等施工技术水平也不断提升，使得建造高难度、高精度、超大跨的干煤棚结构成为可能。总而言之，随着我国经济的高速发展，对于产能的需求和建筑技术的发展为建设超大型干煤棚带来了机遇，同时也为其设计和建造带来了前所未有的挑战。

大跨度预应力钢结构干煤棚是最近几年迅速发展起来的一类新型储煤棚形式，通过初始预应力的引入与曲面形态的优化，可以很好地解决超大跨网壳类干煤棚整体刚度弱、承载能力低、抗连续性倒塌能力弱等一系列问题；但预应力钢结构设计和张拉、施工技术的掌握还仅仅局限在一些大型设计机构和施工单位，设计技术相对复杂、基本理论较深，未能全面推广应用；而且近些年极端气候不断出现，每年都造成一定的震灾、风灾、雪灾，特别是对于超大跨干煤棚所特有的风、雪荷载分布尚无准确依据可查，往往需要引入风洞试验和数值模拟（CFD）技术来确定，分析过程难度较大；可以说复杂的荷载条件和结构自身的非线性特征也对预应力钢结构干煤棚结构的分析、设计与施工提出了新的挑战。

面对这些问题和难点，本书重点针对大跨度预应力钢结构干煤棚设计、施工中的关键理论问题、设计方法和施工技术，并结合近些年科研转化成果而精心编著，面向广大工程设计人员，可作为初学者的基础性科技读物，也可以作为有经验者提高设计理论水平的专业性资料，希望本书的出版能对广大电建行业、空间钢结构领域的工程人员起到引领性作用，并帮助其全面掌握大跨度预应力钢结构干煤棚设计、施工领域的基本理论与应用方法。近 5 年，作者主持设计了多项跨度超过 200m 的大跨预应力钢结构干煤棚，积累了丰富的设计经验，也希望能与广大空间钢结构领域的专家与学者分享。

在本书即将出版之际，感谢我的博士生导师沈世钊院士为本书提序，感谢我的硕士生、博士后合作导师范峰教授对书稿撰写提出的宝贵意见并审定全文，感谢我的研究生赵林、汪天旻、王佳龙、王志成、万宗帅为书稿配图付出的辛勤工作，也感谢哈尔滨工业大学建筑设计研究院、北京市建筑设计研究院、哈尔滨建创钢结构有限公司、东南网架股份

有限公司等设计、施工单位的专家和朋友提供的宝贵技术资料。感谢国家自然科学基金面上项目 51378147 和 52878218 以及国家杰出青年科学基金项目 51525802 的资助。

限于作者水平和资料收集不一定全面，书中难免有不妥之处，敬请各位读者批评指正。

联系方式：哈尔滨市南岗区黄河路 73 号哈尔滨工业大学土木工程学院 516 室，电子邮箱：caozg75@163.com

曹正罡  
2018.11

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 概述 .....	1
1.2 现状与发展趋势 .....	2
1.3 存在的主要问题 .....	8
第 2 章 超大跨度储煤结构体系与配套设施 .....	19
2.1 预应力钢结构储煤结构形式 .....	20
2.1.1 拱形预应力张弦桁架结构 .....	20
2.1.2 拱形预应力张弦网壳结构 .....	23
2.1.3 拱形预应力索杆桁架结构 .....	24
2.1.4 门形预应力张弦桁架结构 .....	25
2.2 储煤结构的相关设备和工艺 .....	26
2.2.1 斗轮机 .....	26
2.2.2 通风系统 .....	27
2.2.3 排水系统 .....	28
2.2.4 消防、除尘系统 .....	28
2.2.5 采光系统 .....	30
第 3 章 预应力钢结构干煤棚分析理论与方法 .....	31
3.1 计算理论概述 .....	31
3.2 设计原则与依据 .....	32
3.2.1 设计原则 .....	32
3.2.2 设计依据 .....	33
3.2.3 安全等级 .....	33
3.3 设计指标 .....	34
3.3.1 设计强度 .....	35
3.3.2 结构位移 .....	38
3.3.3 长细比 .....	39
3.3.4 性能化指标 .....	40
3.4 计算假定与理论方法 .....	40
3.4.1 分析模型 .....	40
3.4.2 计算单元选取 .....	42
3.4.3 杆件计算长度 .....	42

3.4.4	支座约束假设	43
3.4.5	杆单元分析	45
3.4.6	梁单元分析	47
3.4.7	索单元分析	48
3.4.8	总刚度方程	50
3.4.9	边界条件处理	51
3.4.10	单元内力求解	52
3.4.11	非线性过程求解	52
3.5	预应力钢结构分析方法	53
3.5.1	初始预张力确定	54
3.5.2	初始预张力施加	55
3.5.3	初始态分析	56
3.5.4	模态分析	56
3.5.5	荷载态分析	58
3.6	荷载作用	59
3.6.1	荷载分类	59
3.6.2	荷载组合	61
3.7	非地震组合分析	64
3.8	地震作用分析	64
3.8.1	抗震设防类别	65
3.8.2	自振特性分析	66
3.8.3	反应谱方法	66
3.8.4	时程分析法	69
3.8.5	多点激励法	70
3.9	风荷载作用分析	73
3.9.1	风荷载作用	73
3.9.2	风洞试验方法	76
3.9.3	CFD 数值模拟	79
3.9.4	风振响应分析	82
3.9.5	等效静风荷载	89
3.10	积雪荷载作用分析	91
3.10.1	雪荷载作用	91
3.10.2	积雪迁移分析	93
3.11	温度作用分析	95
3.11.1	温度场作用	95
3.11.2	温度应力控制	96
3.12	整体稳定性分析	97
3.12.1	稳定性概念	98
3.12.2	非线性分析方法	99

3.12.3	《空间网格结构技术规程》验算方法	100
3.12.4	典型工程分析	102
3.13	连续性倒塌分析	104
3.13.1	瞬态分析方法	104
3.13.2	断索失效	106
3.13.3	支座失效	107
3.14	节点有限元分析	108
3.14.1	建模技术	108
3.14.2	荷载施加	110
3.14.3	结果评估	111
3.14.4	软件开发	111
<b>第4章</b>	<b>预应力钢结构干燥棚设计与构造</b>	<b>113</b>
4.1	材料选用	113
4.1.1	钢管	113
4.1.2	预应力拉索	114
4.1.3	高强钢拉杆	118
4.1.4	铸钢节点	120
4.1.5	螺栓球	123
4.1.6	焊接球	124
4.1.7	销轴	124
4.1.8	檩条	125
4.1.9	屋面板	126
4.2	体系选型与布置	127
4.2.1	主桁架	127
4.2.2	次桁架	129
4.2.3	山墙桁架	129
4.2.4	支撑	131
4.3	主体结构设计方法	131
4.3.1	杆件设计	132
4.3.2	拉索设计	135
4.3.3	节点设计	135
4.3.4	支座设计	157
4.3.5	支撑设计	158
4.4	围护结构设计方法	160
4.4.1	檩条设计	160
4.4.2	屋面板设计	165
4.5	马道设计	169
4.6	防煤压设计	171
4.7	挡煤墙设计	173

4.8	挡雪设计与构造 .....	174
4.8.1	挡雪装置 .....	174
4.8.2	挡雪夹计算 .....	175
4.8.3	优化布置分析 .....	176
4.9	结构防护设计 .....	177
4.9.1	防锈蚀设计 .....	177
4.9.2	防火设计 .....	183
4.10	隔震、减振设计 .....	185
<b>第5章</b>	<b>预应力钢结构干煤棚施工技术 .....</b>	<b>188</b>
5.1	拼装方法 .....	188
5.1.1	节点焊接 .....	188
5.1.2	桁架拼装 .....	190
5.1.3	支撑架拼装 .....	191
5.2	桁架安装方法 .....	192
5.2.1	高空拼装法 .....	193
5.2.2	滑移施工法 .....	196
5.2.3	整体吊装法 .....	198
5.2.4	整体提升法 .....	200
5.2.5	整体顶升法 .....	203
5.2.6	折叠展开法 .....	204
5.3	拉索安装方法 .....	205
5.4	张拉工艺 .....	206
5.4.1	张拉方法 .....	207
5.4.2	张拉工装 .....	208
5.4.3	张拉控制 .....	208
5.4.4	注意事项 .....	209
5.5	张拉仿真分析 .....	209
<b>第6章</b>	<b>预应力钢结构干煤棚健康监测技术 .....</b>	<b>212</b>
6.1	变形监测 .....	212
6.2	应力监测 .....	213
6.3	索力监测 .....	213
6.4	腐蚀检测 .....	215
<b>第7章</b>	<b>某预应力钢结构干煤棚设计实例 .....</b>	<b>217</b>
7.1	工程概况 .....	217
7.1.1	基本条件 .....	217
7.1.2	结构形式 .....	218
7.1.3	荷载作用 .....	219
7.1.4	材料选用 .....	220
7.2	结构分析 .....	220

7.2.1	控制参数 .....	220
7.2.2	自振特性 .....	221
7.2.3	静力及小震分析 .....	222
7.2.4	支座沉降分析 .....	224
7.2.5	整体稳定分析 .....	225
7.2.6	断索分析 .....	227
7.2.7	节点分析 .....	228
7.3	施工仿真 .....	230
7.4	施工参考图 .....	232
<b>附录 A</b>	<b>常规拉索性能参数 .....</b>	<b>245</b>
<b>附录 B</b>	<b>不锈钢拉索锚具尺寸参数 .....</b>	<b>254</b>
<b>附录 C</b>	<b>常规高强度钢拉杆型号及其尺寸参数 .....</b>	<b>257</b>
<b>附录 D</b>	<b>常规锚具型号及其尺寸参数 .....</b>	<b>261</b>
<b>附录 E</b>	<b>钢绞线挤压拉索锚具尺寸参数 .....</b>	<b>267</b>
参考文献	.....	269

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 概述

随着我国经济的高速发展及居民生活水平的提高,电力能源的消耗量不断攀升,据不完全统计,从 1979 年到 2016 年,我国火电发电量增长了 17.5 倍,2017 年的火力发电量为 4.66 亿千瓦时,比上年增长 5.1%;2017 年,我国能源消费总量为 44.9 亿吨标准煤,其中煤炭消费占能源消费总量的 60.4%,约占全球一半。为解决煤电的需求,近十年电力行业通过不断建设新的大型发电厂以满足煤电需求的增长,这势必导致很多燃煤电厂对于煤炭储备量要求的不断提升。以一个  $2 \times 1000\text{MW}$  的发电机组为例,一天的耗煤量约在 1.5~2 万吨,全年耗煤量在 500~600 万吨,对于燃煤储存量的要求是非常巨大的,而这样大的燃煤储量,在装载、倒运、运输过程中都会产生大量的煤尘污染,据不完全统计,每装卸 1 吨煤炭可产生煤粉尘 3.5~6.4kg,每堆存 1 吨煤每年可产生煤粉尘 1.48~2.02kg,这不仅给煤炭转运站周边的大气环境和铁路沿线两侧的建筑、农作物等造成不同程度的污染,也给周边居民的身体健康和生产生活带来较大影响;特别是电厂的开敞煤场在常年刮风时会产生扬尘,不仅起尘量多,而且扬尘颗粒粒径大,污染范围广,造成的污染最为严重,同时也会造成原料煤的浪费,使储料成本提高。

对扬尘源进行全封闭作业,消除扬尘污染隐患,是国家政策的明确要求,也是目前最有效的解决办法之一;同时,我国对燃煤发电产业的环保也提出了新的要求,已建和新建的发电散放的储煤料厂都需要进行封闭式遮挡,传统的开敞式煤棚和防风抑尘网构造已经不能满足日益严格的环保需求,而封闭式干煤棚做为一种抑制煤尘的主要工业设施,具有良好的抑尘效果,免维护时间久,所以大跨度封闭式干煤棚近年来在我国蓬勃发展起来(图 1-1)。

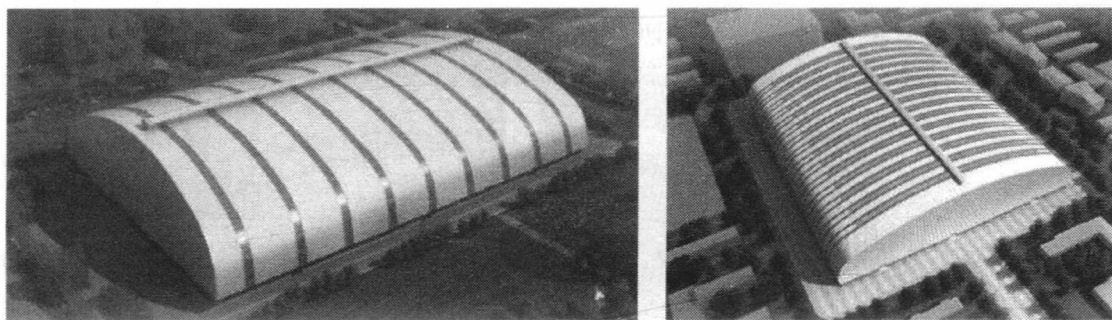


图 1-1 干煤棚外景

干煤棚的功能主要属于大型的储存库房,实现煤炭的存储,所以它必须具有一定的储存和作业空间,即结构必须能满足一定的净空要求;同时防止下雨时煤炭受淋和刮风时污

染环境，属于一项节能和环保工程，如图 1-2 所示。干燥棚的长度和宽度是根据装机容量的需要来确定的，其结构的高度则由堆煤和斗轮机的作业要求来确定，因此，封闭式干燥棚结构的特点是跨度大、高度高且覆盖建筑面积大。目前随着储煤量需求的增加，我国单体储煤料场储量已经超过 30~50 万吨，要想一次性封闭遮挡这样体量的煤场，需要建造更大跨度、高度的大型全封闭干燥棚来满足存储和作业空间。

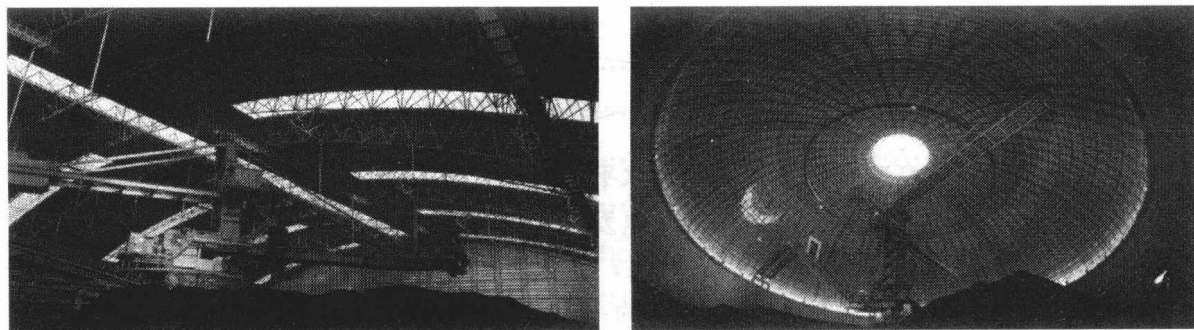


图 1-2 干燥棚内部工作空间

## 1.2 现状与发展趋势

干燥棚经过多年的发展，除了早期的桁架、门架形式形式外，现代超大体量煤场遮挡主要应用的是防风抑尘网形式，见图 1-3。防风抑尘网是利用空气动力学原理，按照实施现场环境加工成一定几何形状、开孔率和不同孔形组合的挡风抑尘墙，使流通的空气（强风）从外通过墙体时，在墙体内侧形成上、下干扰的气流以达到外侧强风、内侧弱风，外侧小风、内侧无风的效果，从而防止粉尘的飞扬，被广泛应用于港口码头、火力发电、煤矿、焦化、钢铁、洗煤、水泥等企业的煤场和料场扬尘污染治理，防风抑尘网的周边长度可以达到几公里，工程造价低，综合挡风抑尘率可达 80% 以上，国内一些典型防风抑尘网工程情况见表 1-1。抑尘网的主要形式和材料有镀铝锌网板、喷塑钢板、玻璃树脂板、纤维针织网（图 1-4）。

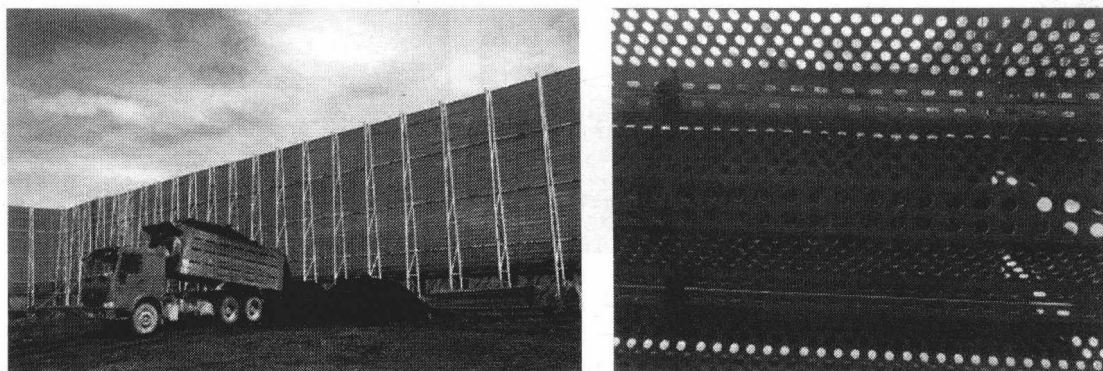


图 1-3 防风抑尘网