

空间结构系列图书

CHONGQIMO JIEGOU SHEJI YU SHIGONG
JISHU ZHINAN

充气膜结构设计与施工 技术指南

薛素铎 等 编著



中国建筑工业出版社



空间结构系列图书

充气膜结构设计与施工 技术指南

薛素铎等 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

充气膜结构设计与施工技术指南/薛素铎等编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 4
(空间结构系列图书)
ISBN 978-7-112-23489-9

I. ①充… II. ①薛… III. ①充气结构-薄膜结构-结构设计-工程施工-施工技术-指南 IV. ①TU353-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 050684 号

近年来, 充气膜结构在我国得到快速发展, 无论是工程实践还是技术创新, 都积累了丰富的经验。充气膜结构在材料选用、建筑与结构设计、施工安装、使用维护等方面都有其特殊性, 需要专门的知识和技术。中国钢结构协会空间结构分会膜结构专业组编辑出版《充气膜结构设计与施工技术指南》, 以进一步推动充气膜结构的技术发展, 指导充气膜结构的工程实践。本指南编写汇集了国内从事充气膜结构的主要高校和企业, 内容涉及绪论、材料、建筑与设备设计、结构设计、施工、使用与维护、典型工程案例等部分, 可供从事膜结构研究、设计、制作和施工的工程技术人员及高等院校有关专业师生参考。

责任编辑: 刘瑞霞 武晓涛

责任校对: 姜小莲

空间结构系列图书

充气膜结构设计与施工技术指南

薛素铎等 编著

*

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

北京富诚彩色印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 10 $\frac{1}{4}$ 字数: 251 千字

2019年4月第一版 2019年4月第一次印刷

定价: 110.00 元

ISBN 978-7-112-23489-9

(33791)

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、制作与施工建造技术等进行研讨，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指南》《充气膜结构技术规程》等编制工作。（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

前 言

充气膜结构作为膜结构的重要类型之一，近些年在我国得到快速发展，据不完全统计，仅 2017、2018 两年间，气承式膜结构在我国的建造数量三百余座。以 2008 年奥运会国家游泳中心“水立方”建造为契机，采用 ETFE 膜材的气枕式膜结构逐步应用于诸多重要工程，其建造数量已逾八十余座。

充气膜结构的工程实践与技术创新，带动了我国充气膜结构行业的发展，除传统从事充气膜结构的公司外，一批新兴企业也开始进入充气膜结构领域。随着近两年全民健身运动的普及和国家对环境保护的要求，以及人民对文化娱乐的需求，充气膜结构有了更多用武之地，在体育场馆、料场封闭、文化娱乐场所等项目中得到大量应用。为满足功能需求，充气膜结构的跨度、单体规模也愈来愈大，这对充气膜结构技术提出了新要求。

与一般膜结构相比，充气膜结构在材料选用、建筑与结构设计、施工安装、使用维护等方面都有其特殊性，需要专门的知识和技术。然而，目前国内还没有针对充气膜结构的技术指南。鉴于此，中国钢结构协会空间结构分会膜结构专业组研究决定，编辑出版《充气膜结构设计施工技术指南》，以进一步推动充气膜结构的技术发展，指导充气膜结构的工程实践。

本指南编写汇集了国内从事充气膜结构的主要高校和企业，主要参加的高校单位有：北京工业大学、同济大学、上海交通大学、哈尔滨工业大学、北京交通大学；主要参加的企业单位有：北京中天久业膜建筑技术有限公司、北京约顿气膜建筑技术股份有限公司、深圳市博德维环境技术股份有限公司、北京法利膜结构技术有限公司、柯沃泰膜结构（上海）有限公司、北京泰克斯隆膜技术有限责任公司、北京光翌膜结构建筑有限公司、上海同磊土木工程技术有限公司、上海太阳膜结构有限公司、北京今腾盛膜结构技术有限公司、上海海勃膜结构有限公司、华诚博远工程技术集团有限公司、华东建筑设计研究院有限公司等。

本指南内容涉及绪论、材料、建筑与设备设计、结构设计、施工、使用与维护、典型工程案例等部分，各部分撰写分工如下：第 1 章，薛素铎、蓝天和李雄彦；第 2 章，吴明儿、陈务军、王秦、王晓峰、孙国军、罗晓群；第 3 章，王秦、王海明、韩更赞、赵宇、谭宁、胡博天、崔家春；第 4 章，龚景海、陈务军、武岳、向阳、王海明、胡博天、谭宁、韩更赞；第 5 章，李中立、瞿鑫、胡博天、谭宁、周文刚、刘东、任思杰；第 6 章，胡博天、王海明、谭宁、王秦、李中立；第 7 章，武岳、陈务军、龚景海、韩更赞、崔家春、王海明、胡博天、王秦、谭宁；全书由薛素铎、李雄彦统稿。

本指南自 2016 年 12 月启动撰写，历时 2 年有余，多次召开会议研讨章节具体内容，对我国充气膜结构的发展和技术进行全面梳理和总结，并对一些技术问题开展深入研究，

在此基础上形成了指南的最终稿。本指南汇集了我国充气膜结构的最新成果，具有技术先进性，对充气膜结构的设计和施工具有较好的指导作用。但由于作者知识水平有限，书中肯定存在不当或不足之处，敬请读者批评指正。

本指南出版得到以下公司的赞助支持：浙江锦达膜材科技有限公司、浙江汇锋新材料股份有限公司、浙江宏泰新材料有限公司、法国法拉利技术织物工业集团中国公司（森翡瑞（上海）复合材料有限公司）、上海西幔贸易有限公司（美国西幔公司）、日本旭硝子（AGC）株式会社（上海壹凌实业有限公司）、上海氟洛瑞高分子材料有限公司（德国NOWOFOL有限公司）。附录中列出了上述公司生产膜材的主要参数表，供大家在膜材选用和设计时参考。在此，对上述公司的大力支持表示衷心感谢。

薛素铎

2019年1月于北京工业大学

本书主要章节内容和人员分工

章节内容	负责人	参加人员
前言	薛素铎	
第1章 绪论	薛素铎	蓝 天 李雄彦
第2章 材料	吴明儿	陈务军 王 秦 王晓峰 孙国军 罗晓群
第3章 建筑与设备设计	王 秦	王海明 韩更赞 赵 宇 谭 宁 胡博天 崔家春
第4章 结构设计	龚景海	陈务军 武 岳 向 阳 王海明 胡博天 谭 宁 韩更赞
第5章 施工	李中立	瞿 鑫 胡博天 谭 宁 周文刚 刘 东 任思杰
第6章 使用与维护	胡博天	王海明 谭 宁 王 秦 李中立
第7章 典型工程案例	武 岳	陈务军 龚景海 韩更赞 崔家春 王海明 胡博天 王 秦 谭 宁
附录	李雄彦	
全书编辑和统稿	薛素铎 李雄彦	

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 充气膜结构的分类	1
1.2 充气膜结构的发展	2
1.3 充气膜结构在我国的应用与发展	6
1.4 充气膜结构的应用领域	9
1.5 充气膜结构的特点	11
第 2 章 材料	14
2.1 膜材	14
2.1.1 膜材的种类	14
2.1.2 膜材的力学性能	15
2.1.3 膜材的其他物理性能	19
2.2 拉索	20
2.2.1 拉索的种类及其构成	20
2.2.2 拉索的力学性能	22
2.3 保温材料	23
2.4 连接辅件材料	25
第 3 章 建筑与设备设计	26
3.1 建筑设计	26
3.1.1 总体布局设计	26
3.1.2 建筑功能设计	27
3.1.3 建筑形体设计	29
3.2 建筑物理环境设计	31
3.2.1 光环境设计	32
3.2.2 热环境设计	34
3.2.3 声环境设计	36
3.3 建筑防火、疏散设计	36
3.4 门窗设计	37
3.5 设备设计	38
3.5.1 充气系统	38
3.5.2 气承式膜结构控制系统	39

3.5.3	气枕式膜结构控制系统	40
3.5.4	空气调节系统、防雷设计	41
第4章	结构设计	43
4.1	形态设计	43
4.2	索网设计	46
4.2.1	索网功能	46
4.2.2	索网形状	47
4.2.3	常用索网的特点及适用范围	48
4.2.4	索网设计的技术要求	49
4.3	内压设计	50
4.4	荷载及荷载组合	52
4.5	荷载效应分析	55
4.5.1	荷载效应分析的特点	55
4.5.2	内压的模拟	56
4.5.3	气承式膜结构的强度与刚度	56
4.6	裁剪设计	68
4.6.1	裁剪设计的内容和步骤	68
4.6.2	裁剪线布置	69
4.6.3	裁剪的应变补偿	71
4.6.4	裁剪设计的方法	71
4.7	空气泄漏	73
4.7.1	空气泄漏的位置	73
4.7.2	空气泄漏的理论分析	74
4.7.3	空气泄漏的估算	74
4.8	结构塌落与逃生	75
4.8.1	气承式膜结构	75
4.8.2	气枕的塌陷	79
4.9	连接构造	80
4.9.1	膜片间的连接构造	80
4.9.2	膜单元的连接构造	81
4.9.3	膜单元与支承面的连接构造	83
4.9.4	拉索节点的连接构造	85
第5章	施工	89
5.1	加工	89
5.1.1	加工前的准备	89
5.1.2	膜材加工	90
5.1.3	膜单元的包装与运输	91
5.2	安装	91

5.3 充气与调试	97
第6章 使用与维护	101
6.1 概述	101
6.2 维护内容	101
6.3 检查和记录	103
第7章 典型工程案例	106
7.1 气承式膜结构	106
7.1.1 中央电视塔职工健身中心气膜馆	106
7.1.2 北京某国际学校气膜运动馆	111
7.1.3 天津响螺湾体育休闲广场气膜工程	114
7.1.4 神华巴彦淖尔能源有限责任公司选煤厂气膜工程	116
7.1.5 招商港务(深圳)外场充气膜仓库	119
7.2 气枕式膜结构	122
7.2.1 大连体育中心体育场罩棚 ETFE 气枕结构	122
7.2.2 万科东莞植物园 ETFE 气枕膜结构	125
7.2.3 上海迪士尼明日世界创极光轮 ETFE 天幕工程	129
7.2.4 石狮世茂国际广场一期天幕	132
7.3 气囊式膜结构——滨海污水处理厂污水池充气膜加盖工程	135
7.4 气肋式膜结构——某气承与气肋组合式充气膜结构工程	138
附录 充气膜结构材料选用表	144
参考文献	151

第1章 绪论

1.1 充气膜结构的分类

充气膜结构是一种采用高性能膜材作为建筑“外壳”，通过膜内外的气压差使膜面产生张力，以此形成一定稳定形态和承载能力的结构或构件。充气膜结构应具有密闭的充气空间，并应设置维持内压的充气装置，以保证膜结构体系的刚度，维持所设计的形状。根据膜内密闭空间形成方式不同可将充气膜结构分为四类：气承式膜结构、气肋式膜结构、气枕式膜结构和气囊式膜结构。

1. 气承式膜结构

膜面本身不形成封闭曲面，其周边固定于刚性边界或基础，密闭空间由膜面、四周封闭边界与室内地面形成。气承式膜结构通过建筑内部气压支撑膜面，形成建筑物主体，室内无需任何框架和梁柱支撑，但必须保持密闭性以维持室内气压。气承式膜结构常用的外形有球面和柱面（图 1.1.1）。

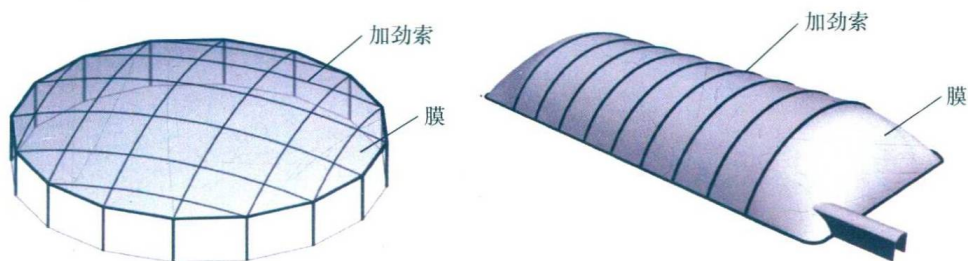


图 1.1.1 气承式膜结构

2. 气肋式膜结构

膜面本身形成封闭曲面及密闭空间，外形通常为管状，加压气体作用于膜面且可形成自平衡体系。气肋式膜结构的室内空间无需密闭，人员进出比较自由（图 1.1.2）。

3. 气枕式膜结构

一般指由多个气枕单元集合而成的结构体系。每个气枕单元的膜面形成封闭曲面及密闭空间，其周边固定于刚性骨架上（图 1.1.3）。

4. 气囊式膜结构

膜面本身形成封闭曲面及密闭空间，外形为囊体状，囊体尺度较大，整个结构可由一个囊体构成，内部加压气体作用于膜面，结构本身可形成自平衡体系，亦可在周边固定或支撑于刚性边界上（图 1.1.4）。

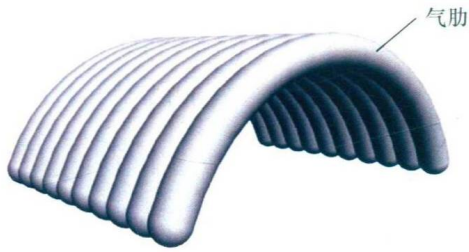


图 1.1.2 气肋式膜结构

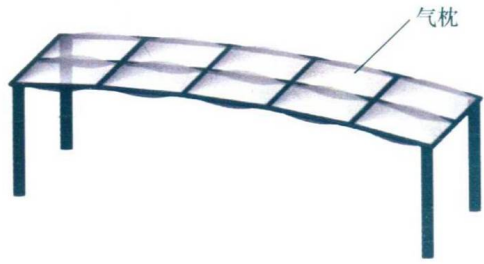


图 1.1.3 气枕式膜结构

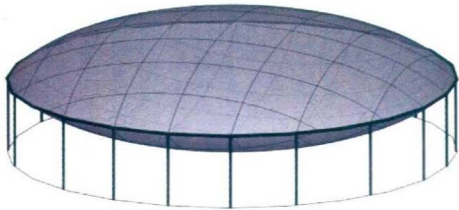


图 1.1.4 气囊式膜结构

上述四种充气膜结构类型是目前工程中常见到的形式。当然，随着科技发展和技术进步，在工程实践中可能还会创造出更多、更加新颖高效的充气膜结构形式。此外，通过上述膜结构类型的组合，也可以形成混合充气式。比如，可以采用气肋和气承组合的形式，或采用气肋和气囊组合等形式。

1.2 充气膜结构的发展

充气膜结构起步于气承式膜结构，其发展可追溯到 20 世纪初。1917 年英国人 William Lanchester 提出用鼓风机吹胀膜布作为野战医院的设想，并申请了专利，但当时由于技术条件的限制，这种设想并没能够实现。

1946 年，美国的 Walter Bird 为保护雷达不受气候侵扰，建造了世界首座充气膜结构——多谱勒雷达穹顶（图 1.2.1）。该结构直径 15m、矢高 18.3m，为气承式球形雷达罩。多谱勒雷达罩采用的是以玻璃纤维为基布、氯丁二烯橡胶为涂层的膜材。后来，由 Walter Bird 创建的 Birdair 公司又设计建造了其他一些气承式充气膜结构，并在美国的杂志上进行介绍，使这种体系逐渐被人们认知。

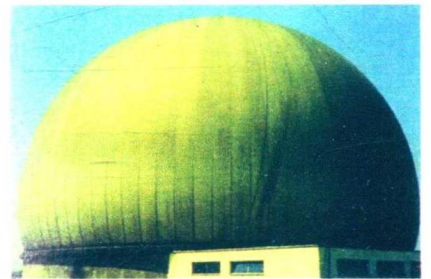


图 1.2.1 多谱勒雷达穹顶

1967 年，第一届国际充气结构会议在德国的斯图加特召开，极大地推动了充气膜结构的发展。到 20 世纪 60~70 年代，大量充气膜结构相继在美国、德国建造，最大跨度达到 60m。

1970 年，日本大阪博览会成为膜结构发展史上的里程碑。最具代表性的美国馆为 139m×78m 的椭圆形气承式膜结构（图 1.2.2），膜材为聚氯乙烯（PVC）涂层的玻璃纤维织物，屋面系统由 32 根沿对角线交叉布置的钢索和膜布构成。大阪博览会上另一个代表性建筑是由日本川口卫（Mamoru Kawaguchi）设计的富士馆（图 1.2.3），采用气肋式膜结构，结构跨度 50m，该馆由 16 根直径 4m、长 78m 的拱形气肋围成，气肋间每隔 4m 用宽 500mm 的水平系带把它们环箍在一起。中间气肋呈半圆拱形，端部气肋向平面外凸出，最高点向外凸出 7m。日本大阪博览会上充气膜结构的成功应用体现了该类结构优良

的跨越能力和经济性，由此掀起了充气膜结构的建造热潮。



图 1.2.2 美国馆



图 1.2.3 日本富士馆

20 世纪 70~80 年代，在北美、日本相继建成了十几座大中型的充气膜结构建筑。1975 年，美国密歇根州庞蒂亚克“银色穹顶”建成（图 1.2.4），椭圆形平面达到 $220\text{m} \times 159\text{m}$ 。1976 年，美国加利福尼亚州圣克拉勒大学建成平面尺寸为 $90.5\text{m} \times 59.4\text{m}$ 的椭圆形活动中心。1983 年，加拿大建成当时世界上跨度最大的充气膜结构室内运动场——加拿大 B.C. 馆（图 1.2.5），其平面尺寸达到 $232\text{m} \times 190\text{m}$ ，结构高度 60m ，采用了双层厚度为 0.85mm 的特氟隆材料，膜材覆盖面积达 4万 m^2 。



图 1.2.4 庞蒂亚克“银色穹顶”



图 1.2.5 加拿大 B.C. 馆

1988 年，日本建成东京穹顶（Tokyo Dome），又名东京后乐园棒球馆（图 1.2.6）。穹顶的平面为边长 180m 的正方形，四角为半径 60m 的内切圆弧，最大对角线长 201m ，膜屋面采用了双层膜，周边嵌固在钢筋混凝土圈梁上，室内净面积约 46000m^2 ，屋顶高度 61m 。与之前建成的结构相比，其最大改进是应用了先进的自动控制技术，中央计算机还能自动监测风速、雪压、室内气压以及膜和索的变形和内力等，并自动选择最佳方法来控制内压和消除积雪，确保了膜结构的安全与正常使用。该结构目前仍为日本的一座标志性建筑物，已正常使用 30 年，成为充气膜结构的成功典范。



图 1.2.6 东京穹顶

20世纪80年代前,建成的气承式膜结构场馆大部分为周边嵌固在围护结构上,屋面为小矢高的扁平状屋盖。但这种扁平屋盖不利于屋面排雪,在大雪作用下,存在着安全隐患。1985年冬,密歇根州的庞蒂亚克“银色穹顶”在暴风雪作用下几乎全部倒塌。这次事故的发生引起人们对这类结构体系的再思考。



图 1.2.7 美国内华达州绿谷体育中心

为解决扁平气膜屋盖在使用过程中出现的问题,20世纪80年代后期,对气承式膜结构进行了技术创新,采用了加大矢高的改进方案。1988年,美国在内华达州建造了大矢高的气承式膜结构(图1.2.7),通过调整矢高改善屋面在极端天气条件下的性能,提升了结构的安全性。此后,该类气承式膜结构在美国、加拿大等国逐步得到采用,如1999年建成的美国田纳西泰坦橄榄球室内训练馆(图1.2.8)、2007年建成的具有400m跑道标准田径场的美国阿拉斯加某体育俱乐部(图1.2.9)。

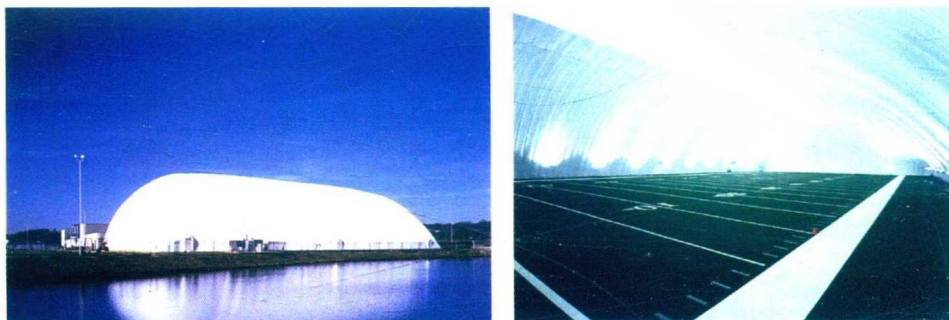


图 1.2.8 美国田纳西泰坦橄榄球室内训练馆



图 1.2.9 美国阿拉斯加某体育俱乐部

气枕式膜结构的发展是伴随着 ETFE 膜材料出现而诞生的。20世纪80年代,欧洲开始将 ETFE 薄膜用作建筑屋面材料。因其高透光性、耐腐蚀性、轻质高强、良好的耐久性等特有的品质,ETFE 薄膜得到人们的喜爱并被应用于各类建筑中。世界上首个 ETFE 气枕工程于1983年在荷兰阿纳姆伯格动物园建成(图1.2.10)。

2001年建成的英国“伊甸园”温室项目(图1.2.11)是世界上第一个大型 ETFE 气枕式膜结构建筑,结构主承重体系由8个半径为18~65m的六角形钢管穹顶构成,覆盖三层 ETFE 气枕膜结构,气枕形状有六边形、五边形,其中六边形单元的直径为5~11m,总用膜面积达到29200m²。该项目的成功建设,为 ETFE 膜结构在世界范围内的推广应用

起到了示范和促进作用。



图 1.2.10 荷兰阿纳姆伯格动物园 ETFE 气枕

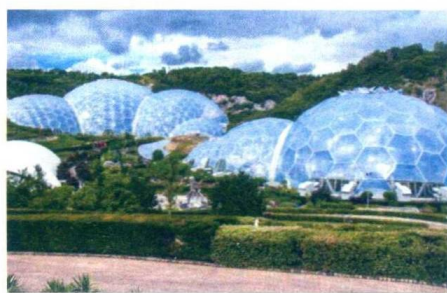


图 1.2.11 英国“伊甸园”温室

瑞士苏黎世 Masoala 雨林展馆 (图 1.2.12) 于 2002 年建成, 长 120m, 跨度 90m, 主体承重结构采用 10 榀平行的桁架拱, 屋顶和墙面采用 54 个长条形三层 ETFE 膜结构气枕作为覆盖体系, 气枕宽度 4m, 长度约 52m, ETFE 气枕总面积达到 14600m²。

德国慕尼黑安联体育场 (图 1.2.13) 建成于 2005 年, 是一座可容纳 67000 人的足球场, 也是世界上最著名的 ETFE 膜结构运动场之一。项目平面尺寸 258m×227m, 结构高度 50m, 下部支承结构采用钢筋混凝土框架体系, 屋面采用大跨度悬挑平面桁架体系。采用 2874 块菱形 ETFE 双层气枕作为屋面和墙面的外围护体系, 膜材厚度为 200 μ m, ETFE 总展开面积达到 26000m²。



图 1.2.12 瑞士苏黎世 Masoala 雨林展馆



图 1.2.13 德国慕尼黑安联体育场

随着建筑技术的日益进步, 气囊式膜结构开始被建筑师和工程师重视并加以应用。2002 年瑞士博览会, 在苏黎世建造了名为艺术海滩的展馆 (图 1.2.14), 采用 3 个直径约 100m 的圆形蝶状气囊式膜结构。此外, 瑞士于 2002 年建成的 Agile 自行车竞技场 (图 1.2.15), 屋面为椭圆形气囊膜, 平面尺寸为 90.8m×66.8m, 整体形似自行车轮毂。



图 1.2.14 苏黎世艺术海滩



图 1.2.15 Agile 自行车竞技场