

膜结构

工程技术与应用

Technology and Application of
Membrane Structure Engineering

高新京 吴明超 ◎ 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

膜结构工程技术与应用

主 编	高新京	吴明超
副主编	袁中阁	黄达达
主 审	张玉平	陈禄如

TU33

G192

机械工业出版社

本书主要从膜结构发展、建筑膜材料的特性、膜结构建筑的设计、膜结构的制作和安装,以及膜结构工程的施工验收和监督管理等方面入手,全面系统地介绍了膜结构的知识,并辅以大量的图片和表格,力求使膜结构知识直观形象、通俗易懂。

本书不仅为政府质量监督、监理等人员进行膜结构工程的质量监督和检测提供参考,同时也适合设计人员和施工人员进行查阅,指导设计和施工。

图书在版编目(CIP)数据

膜结构工程技术与应用/高新京,吴明超主编. —北京:机械工业出版社, 2010. 2

ISBN 978-7-111-29754-3

I. ①膜… II. ①高…②吴… III. ①薄膜结构—工程技术 IV. ①TU33

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第025484号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:范秋涛 责任编辑:范秋涛 版式设计:霍永明

封面设计:王伟光 责任校对:陈延翔 责任印制:乔宇

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)

2010年4月第1版第1次印刷

184mm×260mm·15.75印张·385千字

标准书号:ISBN 978-7-111-29754-3

定价:48.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

封面防伪标均为盗版

读者服务部:(010)68993821

本书编写成员名单

主 编 高新京 吴明超
副主编 袁中阁 黄达达
主 审 张玉平 陈禄如

参 编 (按章节排列)
吴明超 王跃文 朱奕锋 黄达达
高新京 袁中阁 于 东

前 言

目前,膜结构工程在我国广泛应用,特别是在奥运工程(国家体育场、国家游泳中心等工程)中也得到了大面积的采用,但其相关设计、工程管理、技术管理等方面的相应质量技术标准还较欠缺。为结合工程质量监督管理工作需要,以及为今后进一步规范和加强膜结构工程项目质量监督管理,我们组织编写了本书。

全书共分为八章:第1章概述;第2章建筑膜材料的特性;第3章膜结构建筑的设计;第4章膜结构的制作和安装;第5章膜结构工程的管理;第6章膜结构工程的验收;第7章膜结构工程的事故防治与维护;第8章膜结构工程实例。

本书主要从膜结构发展、建筑膜材料的特性、膜结构建筑的设计、膜结构的制作和安装,以及膜结构工程的施工验收和监督管理等方面入手,全面系统地介绍了膜结构的知识,并辅以大量的图片和表格,力求使膜结构知识直观形象、通俗易懂。

本书不仅为政府质量监督、监理等人员进行膜结构工程的质量监督和检测提供参考,同时也适合设计人员和施工人员进行查阅,指导设计和施工。

由于本书涉及面较广,加之作者学识和经验所限,书中不尽之处在所难免,敬请广大读者予以指正。

最后感谢北京城建集团国家体育场工程总承包部、中建一局建设发展公司、沈阳远大铝业工程有限公司等单位提供的相关资料和帮助。

编 者

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 膜结构的发展概况	1
1.1.1 膜结构的原型	1
1.1.2 膜材的发展概况	3
1.1.3 膜结构体系的发展概况	4
1.2 膜结构建筑的特点	9
1.3 膜结构在我国的发展概况	13
1.3.1 膜结构在我国的兴起	13
1.3.2 膜结构在我国的发展	17
1.3.3 我国膜结构行业的现状	18
参考文献	19
第 2 章 建筑膜材料的特性	20
2.1 建筑用膜材料概述	20
2.1.1 织物膜材	20
2.1.2 热塑性化合物薄膜	30
2.2 织物膜材的材料特性及主要 技术参数	30
2.2.1 织物膜材构成及类型	30
2.2.2 织物膜材的基本特性	33
2.2.3 织物膜材的主要技术参数	42
2.2.4 新技术新产品在膜材料上 的应用	47
2.3 热塑性化合物薄膜	51
2.3.1 ETFE 薄膜	51
2.3.2 ETFE 膜材的基本性能	53
2.3.3 ETFE 膜材的应用形式	55
2.3.4 ETFE 气垫的工作原理	55
2.3.5 ETFE 膜材的裁剪	56
2.3.6 ETFE 膜材的加工制作	56
2.4 THV/FEP 薄膜	57
2.5 PVC 薄膜	57
2.6 国内外常用的热塑性化合物薄膜产品 及标准	57
参考文献	59
第 3 章 膜结构建筑的设计	60
3.1 概述	60
3.2 膜结构建筑设计使用年限和结构重要性 系数	60
3.3 膜结构的选型	61
3.3.1 膜结构的构成	61
3.3.2 膜面的形状	62
3.3.3 膜结构的支承体系	66
3.4 膜结构的建筑设计	70
3.4.1 防火设计	70
3.4.2 膜结构建筑声学设计	71
3.4.3 膜结构建筑的采光和照明 设计	72
3.4.4 膜结构的保温和隔热	75
3.4.5 膜结构的通风设计	76
3.4.6 结露的预防	77
3.4.7 排水设计	78
3.4.8 避雷设计	79
3.4.9 其他注意事项	79
3.4.10 充气膜结构的建筑设计	79
3.5 膜结构的结构设计	81
3.5.1 一般规定	81
3.5.2 膜结构的非线性	81
3.5.3 膜结构的计算方法	82
3.5.4 膜结构的荷载	83
3.5.5 荷载效应组合	87
3.5.6 初始形态分析	88
3.5.7 荷载效应分析	89
3.5.8 裁剪分析	90
3.5.9 空气支承膜结构计算要点	92
3.5.10 膜结构找形分析算例	93
3.6 膜结构的连接构造	97
3.6.1 连接构造的原则	97
3.6.2 膜材的连接	99
3.6.3 膜材与刚性边界的连接	100
3.6.4 膜材与柔性边界(索)的 连接	102
3.6.5 膜材的导水构造	103
3.6.6 膜材的防水构造	104

3.6.7 钢索与钢索间的连接	104	4.9 钢构件、钢索及膜单元的安装	145
3.6.8 钢索的端部连接件	106	4.9.1 安装准备	145
3.6.9 钢索的锚固形式	107	4.9.2 安装过程防护和成品保护	146
3.6.10 拉索(桅杆)与基础的连接	109	4.9.3 钢结构、钢索(与钢结构共同完成的 部分)的安装	146
3.6.11 拉索的基础形式	110	4.9.4 膜单元、附件及钢索(与膜单元共同 完成的部分)的安装	147
3.6.12 空气支承膜结构的构造	111	4.9.5 结构体系施加预张力	149
参考文献	111	4.9.6 其他部件安装和工程收尾	150
第4章 膜结构的制作和安装	113	4.10 安装过程控制	151
4.1 膜结构的制作概述	113	4.10.1 安装过程控制概述	151
4.2 膜材的检验和膜单元的制作	113	4.10.2 “施工安装方案”的评审与 批准	151
4.2.1 购进膜材材料的检验	113	4.10.3 工程材料、工具设备的控制	151
4.2.2 膜单元的加工制作及过程控制	116	4.10.4 安装环境	152
4.2.3 膜单元的检验	119	4.10.5 人力资源配备	152
4.2.4 膜单元的清洁	122	4.10.6 建设单位提供产品的检验	152
4.2.5 膜单元的包装	122	4.10.7 安全培训	152
4.2.6 膜单元的储存	122	4.10.8 各道工序施工的过程检验	152
4.2.7 膜单元的防护	123	4.10.9 最终检验	153
4.2.8 膜单元的运输	123	4.11 竣工验收	153
4.3 索及锚具的制作、检验及包装	124	4.11.1 竣工资料	153
4.3.1 膜结构使用的钢索	124	4.11.2 验收程序	154
4.3.2 保护套索(塑料护套索体、铸钢 锚具、锌铜合金热铸锚连接钢 索)	125	4.11.3 现场查验内容	154
4.3.3 Z形封闭索	127	4.11.4 竣工交接	155
4.3.4 钢绞线或钢丝绳、压制锚具钢 索	128	第5章 膜结构工程的管理	156
4.3.5 不锈钢索	129	5.1 设计单位的资质管理	156
4.3.6 成品钢索包装	129	5.1.1 设计资质分类和分级	156
4.4 钢、铝附件的制作、防腐处理和 检验	129	5.1.2 膜结构工程设计专项资质	156
4.4.1 钢制附件	129	5.2 施工单位的资质管理	158
4.4.2 铝合金附件	131	5.2.1 资质序列、类别和等级	158
4.5 膜结构的安装概述	135	5.2.2 膜结构工程的专业承包企业 资质	158
4.6 施工安装方案	136	5.3 监理单位的资质管理	161
4.6.1 安装方案的编制	136	5.3.1 工程监理企业资质等级	161
4.6.2 安装方案的审批	136	5.3.2 工程监理企业资质等级相应的业务 范围	162
4.7 膜结构构件的现场交付和管理	137	参考文献	163
4.7.1 膜结构构件的现场交付	137	第6章 膜结构工程的验收	164
4.7.2 现场物资的管理	137	6.1 膜结构工程验收的基本规定	164
4.8 施工安装的常用工艺及设备	137	6.1.1 膜结构工程的验收程序	164
4.8.1 施工安装的关键工艺:合理施加预 张力	137	6.1.2 膜结构工程进行施工质量控制 的有关规定	164
4.8.2 施工安装的常用设备、仪器	143		

6.1.3 分项工程检验批合格质量标准应符合的有关规定	164	7.1.4 由于施工等原因引起的事故	188
6.1.4 分项工程合格质量标准应符合的有关规定	165	7.1.5 使用中缺少维护	190
6.1.5 膜结构工程施工质量不符合相应的标准或设计要求的处理规定	165	7.2 提高膜结构工程质量的措施	190
6.2 材料的验收	165	7.2.1 建筑结构协作, 共创精品膜结构	190
6.2.1 一般规定	165	7.2.2 充分重视新一代膜材的研究与开发	191
6.2.2 膜材	165	7.2.3 正确处理膜结构设计中的关键技术	191
6.2.3 钢索	166	7.3 膜结构建筑的维护	193
6.2.4 铝型材	166	7.3.1 维护与保养	193
6.2.5 钢材、焊材及防腐材料	167	7.3.2 修补与替换	194
6.2.6 橡胶	168	参考文献	195
6.3 膜及膜附件制作、包装、储存、运输及成品保护	168	第8章 膜结构工程实例	196
6.3.1 一般规定	168	8.1 国家体育场膜结构工程	196
6.3.2 膜加工及热合	169	8.1.1 工程概况	196
6.3.3 膜单元包装、储存	170	8.1.2 屋面 ETFE 膜	196
6.3.4 膜保护和运输	170	8.1.3 PTFE 膜	204
6.3.5 铝型材的加工制作	170	8.2 国家游泳中心膜结构工程	216
6.3.6 钢构件加工制作	171	8.2.1 工程概况	216
6.3.7 钢索加工制作	173	8.2.2 工程设计、施工依据	217
6.4 膜结构安装	173	8.2.3 膜结构主要特征数据	217
6.4.1 一般规定	173	8.2.4 系统介绍和工作原理	217
6.4.2 膜附属钢结构安装及涂装	173	8.2.5 建筑设计	219
6.4.3 膜片及膜附件安装	174	8.2.6 结构设计	221
6.5 膜结构子分部工程竣工验收	175	8.2.7 加工制作	223
6.5.1 一般规定	175	8.2.8 现场安装	223
6.5.2 膜结构工程质量验收记录	176	8.2.9 充气系统	229
参考文献	184	8.3 青岛颐中体育场索膜结构工程	230
第7章 膜结构工程的事故防治与维护	185	8.3.1 工程概况	230
7.1 膜结构工程常见的事故类型	185	8.3.2 索膜挑篷的受力分析	230
7.1.1 由于气候、火灾原因引起的事故	185	8.3.3 荷载分析	233
7.1.2 材料质量引起的事故	186	8.3.4 结构构件的确定	234
7.1.3 由于设计引起的事故	187	8.3.5 膜片的剪裁分析	238
		8.3.6 施工安装	238
		参考文献	241

第1章 概述

1.1 膜结构的发展概况

所谓膜结构，是指由膜材及其支承构件组成的建筑物或构筑物。

膜结构的发展受两个方面的影响和制约：膜材的发展和膜结构体系的发展。两者相互依存、互为促进。膜材的发展推动膜结构的发展与广泛应用，并促进膜结构体系的诞生；反之，新的结构体系的发展，必将促进新型膜材的发展和应用^[4]。

1.1.1 膜结构的原型

从某种意义上来说，帐篷、阳光篷和伞都可以看作膜结构的原型。

作为最原始的建筑模型之一，帐篷曾经活跃于各个历史阶段，并随着历史的发展而不断地发展。远古时期的帐篷，人类只能完全用天然材料来搭建，如用兽皮、树皮等作帷幕，用石材、树干等作支承（如图 1-1 所示）；后来逐渐发展为天然合成材料，如棉纱、毛纺、帆布等。

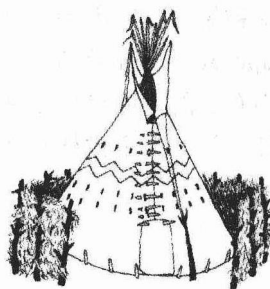
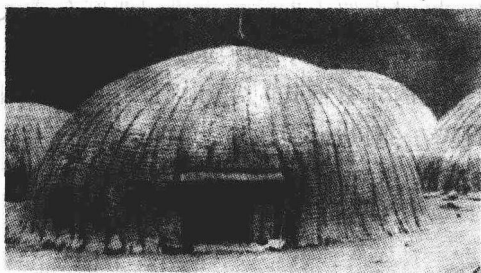


图 1-1 古代帐篷

图 1-2 所示的圆顶帐篷是一种基本的帐篷形式，从蒙古到安纳托利亚西部长达 8500km、乌拉尔到阿富汗宽约 2400km 的广阔土地上随处可见。

此类帐篷的基本建筑框架由以下几部分构成：垂直的圆柱形格子框架，框架顶部的圆盖形结构（状似车轮辐）以及羊毛制成的毛毡覆层。帐篷的整体框架可折叠，但在入口处多加一层门框以巩固其稳定性。制造帐篷时首先用纺织成缕的羊毛稳定基座，而后将圆盖形结构安置在框架上面，最后再用羊毛或者带子绕帐篷缠绕几周以维持框架原型。帐篷边缘处高度约为 2m，中央则可达 3m，顶

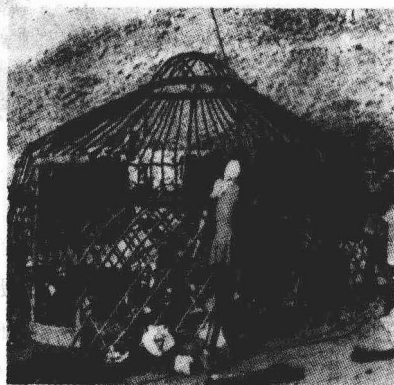


图 1-2 圆顶帐篷

部留有小口以使阳光射入同时也方便室内烟气散出。另外,帐篷的毛毡覆层通常都是边缝搭接的,以防止漏水或者渗水。至于外覆层,则有多种不同的处理方式以适应不同季节的需要^[5]。

图 1-3 所示的黑帐篷至今仍在伊朗、阿富汗等地使用,这种帐篷是最适合沙漠生活方式和当地可用资源的。这种帐篷由立柱、短桩、绳索及软毛毡构成,全部材料用一头牲畜便可搬运,搭建十分便捷。将穿有绳索的毯子在地上展开,并用锚具将两端固定在插入地面的短桩上,再将毯子中间用柱子撑起使毯子绷紧即可。这种帐篷具有良好的稳定性,能抵御沙漠中的风暴,并将风荷载通过短桩直接传至地面^[3]。

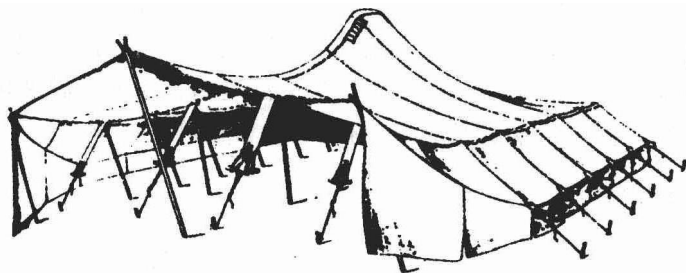


图 1-3 黑帐篷

19 世纪,开始出现一些现代意义上的膜结构技术,如机械化纺纱和膜材编织技术等。这些技术在马戏团帐篷,即后来通常被称为“Chapiteau”(如图 1-4 所示)的特殊帐篷中开始应用。这种帐篷面积庞大,可以迅速建起,同时也便于拆除。由机织亚麻布或大麻帆布制成的“Chapiteau”等帐篷直径可达 50m。“Chapiteau”由杂技场周边靠近中心位置的四根主桅杆及外围布置的一圈桅杆支承。由锚固在地上的绳索将其固定,帆布就悬挂在四根主桅杆和外圈桅杆之间。在主桅杆和外圈桅杆之间还有一圈与地面成 60° 角的副桅杆^[6]。

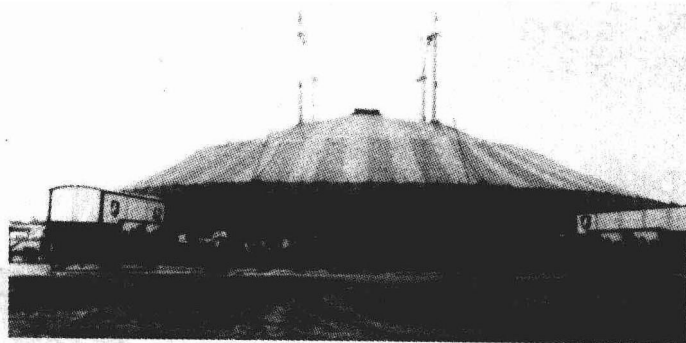


图 1-4 杂技场帐篷 (Chapiteau)

在很早以前,在气候炎热的南部地区,人们使用遮阳篷遮挡强烈的太阳光(如图 1-5 所示)。阳伞或者雨伞,很久以前便被用来遮阳或挡雨^[5]。图 1-6 所示画中一位骑士正打着一把伞,见证了雨伞这一巧妙发明的悠久历史。

帐篷、遮阳篷和雨伞的共同点有以下几个方面:

1) 从功能上它们都起到了保护人类免受自然天气之害的作用。

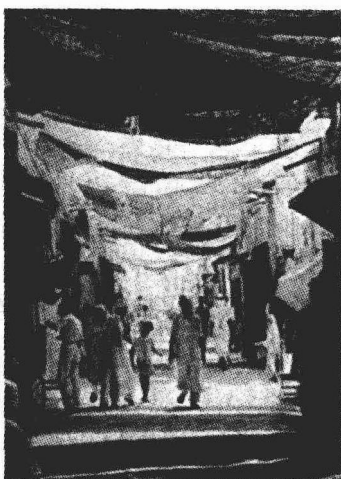


图 1-5 遮阳篷



图 1-6 16 世纪骑士

2) 从制作方法上来讲, 它们都是稳定的直线或网状结构与大面积织物布料的结合体。也就是说, 如果跨度足够小, 只需将布料覆于各点之上再将布料拉直即可制成。

3) 从所用的材料来讲, 这些材料的强度和耐久性都比较差, 只能作为临时性建筑。

1.1.2 膜材的发展概况

膜材随着现代精细化工科技的进步而不断发展, 其中膜材本身的张拉力和弹性都是重要的选择标准。作为一种建筑材料, 膜材首先必须具有较高的承载力和较好的耐久性。所以最初的膜材主要由中间的纤维纺织布基层和外涂的树脂涂层组成。其基层主要起到承受和传递荷载的作用, 而树脂涂层除起到密实、保护基层的作用, 还具备防火、防潮、透光、隔热等性能。所以建筑膜材的发展与纤维基层和表面涂层的发展分不开。

从 20 世纪 50 年代起, PVC (聚氯乙烯) 涂层聚酯纤维就应用于膜结构建筑领域。基层聚酯纤维随日照容易老化, 弹性与强度等力学性能随之降低; 而涂层聚氯乙烯 (PVC) 具有多种颜色可供选用, 柔韧性能较好, 可卷折, 使用方便, 易与其他构件连接的特点; 但其抗紫外线能力较差, 在太阳光的长期照射下, 易发生化学变化, 造成灰尘、油渍的附着, 且不易清洗、自洁性差, 进而降低透光率。因此, PVC 的建筑和结构受力都不理想, 一般只能应用于临时性建筑。

随着新型聚酯类纤维的不断被研制开发, 以及在 PVC 涂层外涂敷化学稳定性更好的附加面层如聚二氟乙烯 (PVDF)、聚偏氟乙烯 (PVF) 等, 使膜材的自洁性得到较大提高。目前, 涂覆了 PVDF 的 PVC 膜材已经应用于半永久性及永久性结构^[3,7]。

20 世纪 60 年代, 玻璃纤维织物膜技术得到发展, 并在较大范围应用, 但表面涂层材料仍为聚乙烯基类。膜材强度较高、模量大、徐变小, 但建筑自洁性、耐久性仍不理想。

美国杜邦公司于 20 世纪 70 年代开发出具有优异建筑性能的涂层材料聚四氟乙烯, 同时 B 纱、DE 纱玻璃纤维织物膜技术日趋成熟, 使得以玻璃纤维为基布 PTFE 为涂层的现代织物膜材问世, 并开始工程应用。

聚四氟乙烯是惰性材料, 抗紫外线能力强, 透光性和自洁性好, 寿命长 (25 ~ 30 年),

具有可焊性,是永久性建筑的良好选材。但其刚度较大,运输及施工中的卷、折会使膜材强度降低,故施工方便性较差,而且在其变形过程中易产生微细裂缝,使水分侵蚀基层纤维,降低基层纤维的强度和使用寿命。因此一般在基层和聚四氟乙烯面层间加涂硅酮防水层^[3,7]。

ETFE(四氟乙烯聚合物)膜材从20世纪70年代初在美国开始研究,20世纪80年代开始应用,属于热塑性化合物薄膜,它由热塑成形,张拉各向同性,能够直接作为建筑物的外部建材,拥有良好的表面自清洁功能、耐腐蚀和与金属有较强黏着的特性。高性能的透明ETFE膜材经常应用于两层或三层充气式建筑结构,以其出色的性能表现赢得了它在这一领域的特殊地位。

1982年ETFE膜材首次被应用于建筑项目中,历史最长的ETFE建筑物位于荷兰Arnhem Burger's动物园中。此后在欧洲该项新技术被广泛应用于建筑的屋顶和立面,大量的工程实例和试验数据证明,ETFE与传统建筑围护结构相比具有多项优势。它重量小、寿命长、抗拉伸、延展性好,装配系统较同等透明装配体系更简单、轻盈,透光性好,抗紫外线和化学物质侵袭能力强,自洁性好,属阻燃性材料。其建筑外表晶莹美观,轻质立面装配结构节省建筑成本,是利用太阳能的环保产品,日光被引入内部空间;同时ETFE膜上的新图案设计还创造出了动感的建筑特质。

目前用于荷兰Arnhem Burger's动物园中的红树林厅的ETFE膜材料,在经历了25年后各种材料特性未显现出明显的衰变^[15]。

20世纪80年代,由于航天科技发展与需求,精细化工技术发展,氟化物纤维(PTFE、FEP、PFA等)、碳纤维(CF)、聚酯纤维(PBO、PET等)等织物膜相继研制问世,这些膜材具有高强、高比强、高膜量、耐强辐射、耐原子氧化、性态稳定等特点,但目前主要应用于航空航天、半导体电子工业等特殊领域,很少应用在建筑工程领域^[4]。

全世界的90%的膜结构建筑使用以下三种材料:PTFE(聚四氟乙烯)涂层玻璃纤维、PVC(聚氯乙烯)涂层聚酯纤维和ETFE(四氟乙烯聚合物)膜材^[5]。

在现代膜结构发展的早期,人们建造这种结构的目的一般只是为了遮阳挡雨或者应付某些临时性事件,比如世博会。但逐渐地,使用多层膜材建造的膜结构建筑开始能够满足更为复杂的建筑要求,逐渐发展出长期性封闭性建筑所应具备的各种功能。随着人们在能源、声吸收、声传送等方面对建筑提出的要求越来越高,越来越多的新材料应用方案也应运而生并且逐渐得到发展。

现今材料领域所存在的巨大潜力是以材料以及生产技术方面的巨大飞跃为基础的,而导致新型标准材料产品产生的推动力往往就直接来源于建筑师、工程师、建筑公司三方平等协作的建筑施工过程中,正是这种协同合作有力地推动了膜材技术应用的动态发展。

1.1.3 膜结构体系的发展概况

膜结构体系包括气承式膜结构、气枕(囊)式膜结构和张拉膜结构。

从工程的角度来说,膜结构是由厚度不变的薄膜组成的,依靠其曲面形状和固有的大变形能力来承受荷载,并通过施加适当的预应力来保证其刚度。

不管仅充当维护功能的膜结构还是兼有承载力和维护双重作用的膜结构,膜材都必须施加预应力。因此,从这种意义上来说,膜结构的演变过程就是如何对膜材施加预应力的过

程。当然这个过程与膜材工艺的发展,以及建筑安装技术、计算机技术、设计数值分析理论与方法的发展分不开。

1. 气承式膜结构

气承式膜结构是由膜面内外压差来稳定形状的正高斯张力曲面的膜结构。内外压差可通过鼓风机向气密膜材覆盖的空间内送风而实现。气承结构不需要诸如墙、柱、拱等刚性构件作为支承,从而使其成为建筑史上最轻质、最简约的人工结构,其理论跨度可以到达几千米。

1917年,英国人 W. Lanchester 发明了一种充气膜作为野外医院建筑屋面,这是一种安装便捷、造价经济的屋面体系,但他本人并未建成^[7]。

1946年,美国人 Walter Bird 建成第一个现代充气膜结构,多普勒雷达穹顶 (Doppler Radome),直径 15m,矢高 18.3m,采用以玻璃纤维为基布氯丁二烯橡胶为涂层的膜材。1950~1970年间,相继在美国、德国等地建造大量类似穹顶,最大直径达到 60m^[4,7]。

1970年,日本大阪世博会 (EXPO'70) 为膜结构发展提供了契机。因日本多地震,且展馆多位于软土地基,因此,展馆宜采用轻结构体系。由 David Geiger 设计, Birdair 公司在美国建成银色穹顶 (Silver Dome, 220m × 159m) 等 7 座大型气承式膜结构,如图 1-7 所示的美国馆,是一个椭圆形充气膜结构,139m × 78m 无柱大厅的屋面由 32 根沿对角线交叉布置的钢索和膜布索覆盖。整个工程只用不到 10 个月时间就完成了,该设计不仅表现了膜结构非凡的跨越能力,而且表现了其优良的经济性。

但多数膜穹顶被证明难以有效抵抗恶劣气候条件而维持正常使用。1985年,银色穹顶因强风和暴雪几乎完全毁坏。

1988年,日本在东京后乐园棒球馆 (如图 1-8 所示) 中采用了充气膜结构,其平面为椭圆形,对角线跨度为 204m,屋顶高度达 61m,其结构设计与以前的充气膜结构没有太大区别,只是采用了双层膜构造并应用了先进的自动控制技术。但运行费用昂贵,经营者几乎不堪重负,之后世界各地再也没建造大型气承式公共膜建筑。

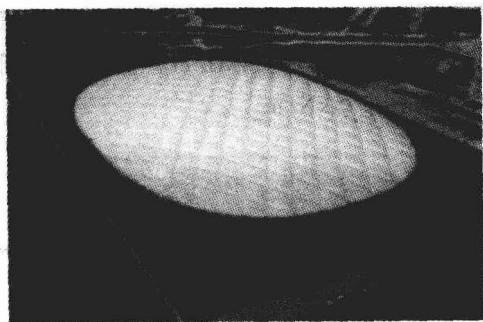


图 1-7 美国馆



图 1-8 东京后乐园棒球馆

2. 气囊 (枕) 式膜结构

气枕式膜结构是靠膜面内外压差来承载的,气枕式膜结构需要双层膜,在双层膜之间充气,达到一定气压才具有稳定的形状,并承受外部荷载与作用。气枕及其组合主要用做屋面或立面等维护结构。为了使气枕屋顶具有良好的透光性和保温效果,一般采用 ETFE 膜。可

在气枕内部增加内膜以减少气体的对流，从而提高其保温效果。

在日本大阪世博会（EXPO'70）上具有代表性的气枕式膜结构是日本富士馆（如图 1-9 所示），该馆平面为圆形，直径 50m，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，端部气肋向圆形平面外突出，最高点向外突出 7m。

1992 年建成的日本熊本公园穹顶（如图 1-10 所示），在屋盖中央部分采用了悬挂式充气膜结构，该部分是一直径 107m 的整体性气肋屋盖，并在内部增加了车辐式双层索系。这种组合保证了充气膜一旦漏气，屋盖还有钢索支承不至于塌落^[3]。

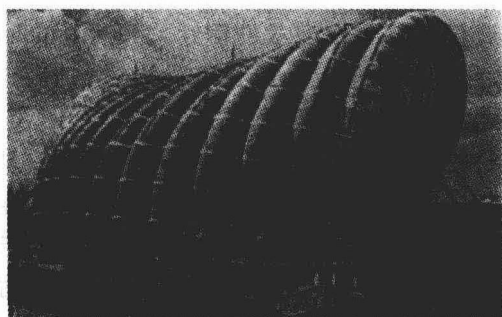


图 1-9 日本富士馆



图 1-10 日本熊本公园穹顶

1992 年巴塞罗那世界博览会（EXPO'92），德国馆屋顶为气枕式膜结构，是一个屋顶咖啡厅，具备遮阳与建筑标识造型。2000 年以前，单纯气枕式膜在大跨建筑体系较少应用。

图 1-11 所示为瑞士 Aigle（2002 年）自行车竞技场，屋面为椭圆形气枕膜，平面为 $90.8\text{m} \times 66.83\text{m}$ ，面积 5000m^2 ，柱高 17.4m，共 28 根。上下 28 根径向索连接中心直径 5m 的圆与周围支承柱，对气枕膜加劲和稳定，整体形似自行车轱辘。在周边三角形桁架内为两环正放宝石形整体张拉单元，下部径向索与垂直压杆端连接，上端连接稳定索，并为气枕膜下层支点。内层膜为法拉利 1002T，环向为经向，经纬向预应力为 4kN/m 。上层膜内部 1002T，外部 1302T，经向均为径向，预应力分别为 4kN/m 、 2.5kN/m ^[9]。

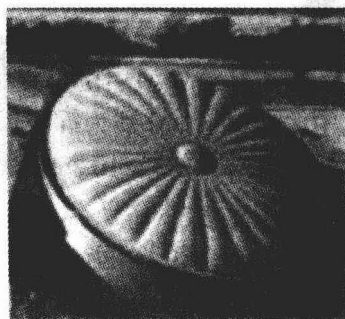
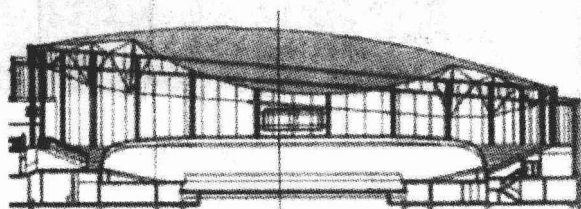


图 1-11 瑞士 Aigle 自行车竞技场

这些气枕膜仍应用传统气枕膜设计思想，并采用经典气枕膜形式。

ETFE 膜用于建筑,拓展了气枕膜的设计思想、形式与应用领域,已经成功用于屋面、体育场罩棚等。气枕小型化、网格化、独立或局部并列、低轮廓(浅矢高),与其他结构体系有机结合,如刚性(骨架)、柔性(索网)、半刚性(悬挂)体系等,这是气枕膜发展应用趋势。

如 2001 年建成的英国莱切斯特空间科技中心(NS-SC)(如图 1-12 所示),41m 高的火箭发射塔外面采用 ETFE 膜材覆盖,共 2000m^2 ,部分膜结构表面可以开启以便把火箭和卫星运入展览区。

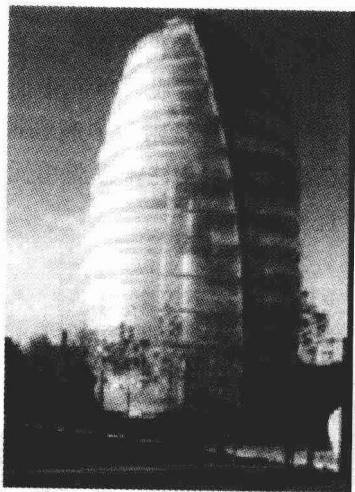


图 1-12 英国莱切斯特空间科技中心

3. 张拉膜结构

张拉膜结构是通过机械方式在膜面内沿着其边界张拉而产生预应力的负高斯曲面的膜结构。

现代张拉膜始于 Frei Otto 在德国(1955 年)园艺展设计建成的帐篷(如图 1-13 所示),经典马鞍形双曲抛物面,采用棉纱纤维膜,由 $\phi 10$ 平行钢丝嵌套膜加劲,边索 $\phi 16$,桅杆 5m。

1957 年在 Cologne 建成一个较复杂张拉膜,展览场舞厅,高低点相间隔,对称各 6 个点,高点桅杆 10.4m,低点拉索锚固,跨度约 33m,膜张力 1.2kN/m ,膜材选用 1mm 厚棉纱纤维膜^[1,7,20]。

按现在的技术来看,这是两个十分简单的膜结构,但它标志着张拉膜的开始。

随后, Otto 将张拉索膜结构技术又向前推进一步,把索网引入张拉膜结构中,1967 年设计完成的加拿大 Montreal 博览会的德国馆(如图 1-14 所示)就是其中一例。该建筑的平面沿着湖边自由蜿蜒伸展,建筑物和景观之间的严格分界近乎消失——建筑本身就是一道风景。由于平面不规则,索网挂在不同高度和斜度的桅杆上,桅杆端部的集中力通过索网平面内的环形索巧妙的予以截断和承担,索网的维护结构是 1万 m^2 的张拉 PVC 涂层聚酯纤维膜材。



图 1-13 德国联邦园艺博览会音乐台

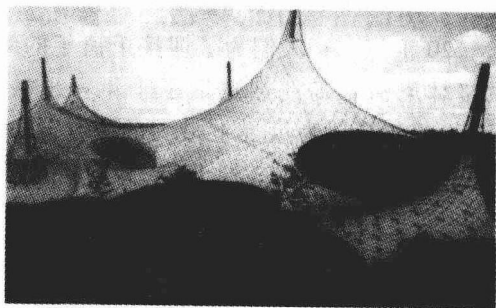


图 1-14 加拿大 Montreal 博览会德国馆

Frei Otto 代表作有: EXPO'67 德国帐篷,斯图加特大学轻结构所(ILK, 1968 年),曼

海姆园艺展馆 (1970 年), 慕尼黑奥林匹克公园 (1972 年)。Frei Otto 无疑是对世界张拉膜结构影响最深远的先驱^[1,7,20]。

加州 La Verne 学院学生活动中心是首次采用 PTFE/GF 的膜结构。随着 PTFE/GF 膜、高性能 PVC/PES 膜的应用, 在随后近 40 年发展中, 高点张拉锥形膜、脊谷形膜应用于各领域, 包括大中型体育场馆、机场、文化娱乐设施、展览馆、交通枢纽和小型景观作品等。

1981 年建成的世界最大膜建筑沙特 Haj 机场 (如图 1-15 所示), 它由 2 组各 5 排共 210 个锥形膜篷单元组成, 单元平面尺寸为 $45\text{m} \times 45\text{m}$, PTFE 膜覆盖总面积约 42.5万 m^2 。

1985 年的沙特阿拉伯利雅得皇家体育场看台挑篷 (如图 1-16 所示) 由 24 个连在一起的形状相同的单支柱帐篷膜单元组成, 外径达 288m 。每个膜篷体量巨大, 其约 60m 高, 支柱的直径达 2m 。

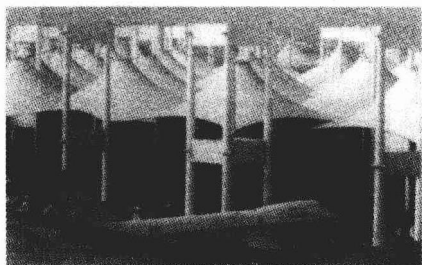


图 1-15 Haj 机场

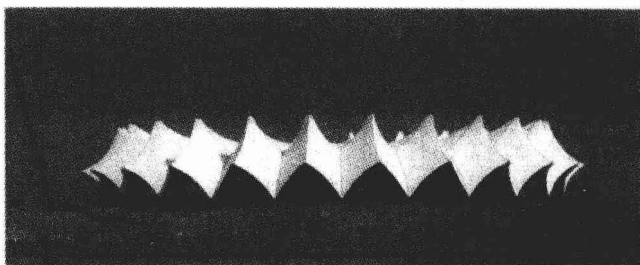


图 1-16 沙特阿拉伯利雅得皇家体育场

20 世纪 90 年代建成的德国罗滕堡市的网球馆 (如图 1-17 所示), 屋顶采用膜结构, 膜材由聚氯乙烯涂层聚酯织物制成, 具有自洁功能。屋顶的跨度为 102m 。它包括一个固定的外屋顶, 还有一个可收缩的直径约为 63m 的内屋顶。这个可收缩的屋顶完全展开时的面积大约为 3000m^2 。除了安装过程和最终状态外, 内屋顶的移动是全自动的, 并且由传感器控制^[5]。图 1-18 为网球馆闭合内屋顶的六个步骤。

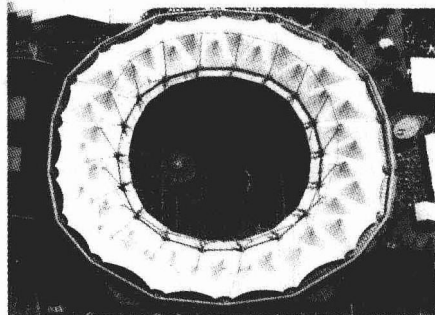


图 1-17 德国罗滕堡市网球馆

20 世纪末, 人们为了迎接千禧年的到来, 在伦敦的格林尼治半岛北端建造了千年穹顶 (如图 1-19 所示)。千年穹顶为世界上最大的膜建筑, 穹顶周长 1km , 直径 365m , 覆盖面积 100000m^2 , 中心高度 50m , 由 12 根 100m 高的钢桅杆将圆球形膜屋顶吊起。外膜采用 PTFE, 展开面积 91400m^2 。内膜 (Fabra sorb II[®]) 满足声学环境要求, 膜总面积 18.9万 m^2 ^[4]。

韩国釜山体育场^[16] (如图 1-20 所示) 为 2002 世界杯与亚运会设计的多功能综合性运动场, 7.1 万个座位。屋顶用环形索桁架组成的索膜体系, 呈圆形, 直径为 228m 。中间椭圆形洞口尺寸为 $180\text{m} \times 152\text{m}$ 。膜采用玻璃纤维基布涂覆 DyneonTM PTFE/FTP/GF, 高透光 $10\% \sim 12\%$ 、低反射 (NRC 降噪系数大)、耐磨、耐火性高, 满足强噪声环境下比赛和朝鲜半岛南部潮湿、强紫外线、强风的恶劣气候。膜面积 55000m^2 , 共 48 个膜单元, 单件膜约 600m^2 。

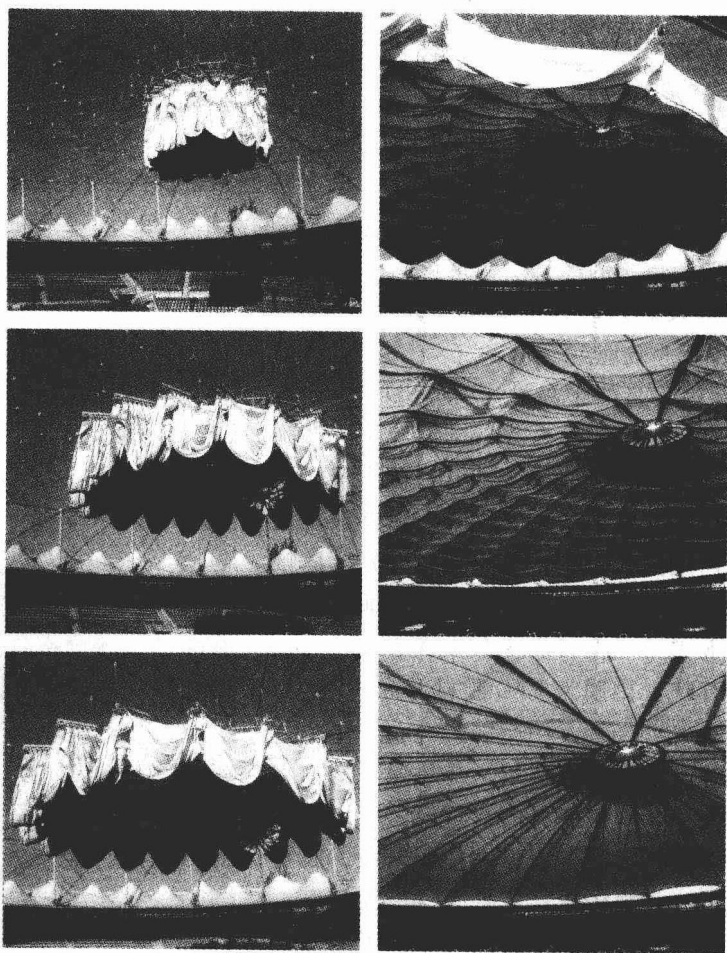


图 1-18 网球馆闭合内屋顶的六个步骤

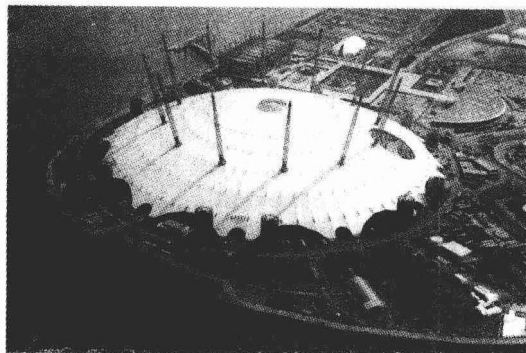


图 1-19 千年穹顶

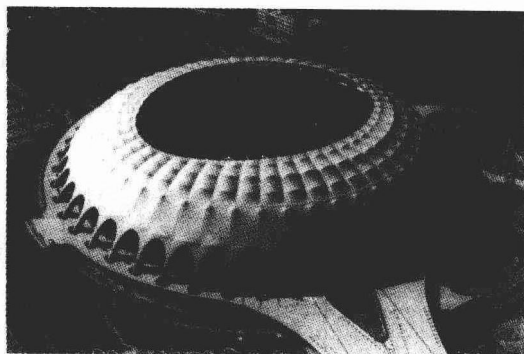


图 1-20 韩国釜山体育场

1.2 膜结构建筑的特点

膜结构作为一种全新的建筑结构形式，集建筑学、结构力学、精细化工与材料科学、计