

TUCENG ZHIWULEI

JIANZHU MOCAILIAO DE LIXUE XINGNENG

涂层织物类

建筑膜材料的力学性能

◎ 张营营 张其林 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

涂层织物类建筑膜材料的力学性能

张营营 张其林 著

中国矿业大学出版社

内 容 摘 要

膜材料力学性能是研究膜结构复杂非线性行为的重要基础。涂层织物类建筑膜材料是一种柔性的复合材料,具有明显的非线性、非弹性和黏弹性,其力学性能受加载历史影响明显,与传统材料差异明显。本书主要讲述涂层织物类建筑膜材料的力学性能,包括膜材料的基本力学参数、膜材料的本构关系、膜材料的破坏机理和强度准则以及膜材料的抗力不定性等四大方面。本书是依据我国现行相关设计规程编写而成,为膜结构的设计、分析和施工提供参考。

本书可以作为高等学校土木工程专业的教材,也可以作为土木工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

涂层织物类建筑膜材料的力学性能/张营营,张其林著.

—徐州:中国矿业大学出版社,2013.11

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2138 - 4

I. ①涂… II. ①张…②张… III. ①涂层织物—膜材料—建筑材料—力学性能 IV. ①TU531.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 276425 号

书 名 涂层织物类建筑膜材料的力学性能

著 者 张营营 张其林

责任编辑 杨 洋

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 8.75 字数 218 千字

版次印次 2013 年 11 月第 1 版 2013 年 11 月第 1 次印刷

定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

膜结构在我国的应用已有十余年的历史,在这期间我国在膜结构的计算与设计理论、制作与工程实践方面取得了长足的进步,并编制出版了设计与检测技术规程。目前,国内已经具备了针对大型工程自行进行计算、设计、制作、安装、检测与监测等各项工作的能力。但是,相对而言,针对膜材料本构关系及基本材料性能等基础研究方面的工作十分薄弱。

本书围绕涂层织物类膜材的力学性能展开研究,从拉伸试验研究入手,分别以单轴、双轴拉伸试验为基础,在膜材料的基本力学性能、强度准则、本构关系、膜材料的抗力不定性等方面进行了系统研究,准确掌握建筑膜材料在各种载荷作用下的拉伸性能,为膜结构的设计、分析和施工提供参考。

第一,总结了现行国内外膜结构技术规程对于膜结构设计的规定,介绍了我国规程中抗力分项系数的推导过程,讨论了不同荷载组合所对应的结构失效概率。

第二,以上海世博会世博轴膜屋面作为研究对象。首先对试验所采用的膜材料和边界连接件进行拉伸试验,获得相应的主要力学参数和有效的连接形式。然后,针对实际结构设计一个足尺模型进行静载堆载试验,研究了该模型在张拉和加载过程中的力学性能,与数值模拟进行了对比分析,发现现行的设计理论中材料本构关系的选取过于近似与实际情况差距太大,证明了引入准确的膜材料本构关系的必要性。

第三,介绍了膜材料的基本力学参数(包括抗拉强度及断裂延伸率,撕裂强度,剪切模量,单、双轴弹性模量等)的测试方法,讨论了膜材料拉伸试验的破坏现象和破坏机理。

第四,分别对全新膜材料和经过循环拉伸后的膜材料进行了拉伸性能研究。对全新膜材料进行多个比例的拉伸试验,得到了相应的拉伸曲线,拟合出相应的应力应变曲面;然后,进行了不同的应力比下的循环拉伸试验,研究了残余变形的变化规律;最后,对经过规定应力幅的循环拉伸之后的膜材料,进行不同比例的拉伸试验,得到了相应的应力应变曲面。

第五,采用偏轴拉伸的试验方法,研究了涂层织物类膜材料的破坏强度准则。研究发现膜材料有三种破坏模式:拉伸破坏、剪切破坏和拉剪混合型破坏。破坏总是沿平行或垂直于纤维方向,且发生于强度较低的纤维或发生在纤维与涂层材料的界面上。

第六,研究了拉伸速度、加载制度、温度、老化、损伤、应力松弛、焊缝连接等对膜材料力学性能的影响规律,为提出准确的设计分项系数提供了数据基础。

作 者

2013 年 6 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 膜结构的发展与应用	1
1.2 膜结构的分类与特点	3
1.3 建筑膜材料的分类和建筑物理性能	7
1.3.1 建筑膜材料的分类标准	8
1.3.2 建筑膜材料的建筑物理性能	9
1.4 现行膜结构设计规程中的相关规定	11
1.4.1 国内外膜结构技术规程中的相关规定	11
1.4.2 我国规程中设计分项系数的推导	13
1.4.3 我国规程中设计分项系数的可靠度	15
第 2 章 世博轴局部足尺模型试验	17
2.1 引言	17
2.2 工程背景	17
2.3 连接节点强度	18
2.3.1 试验设备	19
2.3.2 试验结果分析	19
2.4 足尺模型试验	23
2.4.1 试验模型	23
2.4.2 加载和测量方案	24
2.4.3 试验结果及有限元分析	26
2.4.4 试验小结	30
第 3 章 涂层织物类膜材的基本力学性能及测试方法	32
3.1 引言	32
3.2 抗拉强度和断裂延伸率	32
3.2.1 试验方法及条件	32
3.2.2 单向拉伸性能分析	34
3.3 撕裂强度	36

3.3.1	双舌撕裂试验	37
3.3.2	中心裂缝撕裂试验	38
3.3.3	梯形撕裂试验	40
3.4	剪切模量	42
3.5	弹性模量	45
3.5.1	单轴弹性模量	46
3.5.2	双轴弹性模量	46
3.6	剥离强度	48
第4章	涂层织物类膜材料的双轴拉伸性能	49
4.1	引言	49
4.2	膜材料的本构关系研究现状	49
4.3	膜材双轴拉伸试验方法	53
4.3.1	膜材双轴拉伸试验的发展	53
4.3.2	膜材双轴拉伸试验机	54
4.3.3	十字形切缝试件	55
4.3.4	加载制度	57
4.4	膜材双轴拉伸性能分析	57
4.4.1	全新膜材的多比例拉伸试验	58
4.4.2	膜材的双轴正交循环拉伸性能	61
4.4.3	经循环拉伸后的膜材双轴性能	63
4.5	实例分析	66
第5章	涂层织物类膜材料的破坏强度准则	70
5.1	引言	70
5.2	复合材料的强度准则	70
5.2.1	宏观强度准则	73
5.2.2	细观强度准则	80
5.3	实例分析	84
5.3.1	某 PTFE 膜材料的偏轴拉伸试验	84
5.3.2	现有强度准则的应用对比分析	87
5.4	本章小结	89
第6章	涂层织物类膜材料的抗力不定性分析	90
6.1	引言	90

6.2 温度对膜材力学性能的影响	91
6.2.1 抗拉强度、断裂延伸率	92
6.2.2 焊缝连接强度	94
6.2.3 温度影响系数	95
6.2.4 弹性模量	100
6.2.5 应力松弛	102
6.3 人工加速老化	104
6.4 不同浸泡时间	109
6.5 损伤测试	109
6.6 拉伸速度	112
6.7 循环拉伸	114
6.8 本章小结	116
 第7章 结语	 118
 参考文献	 119

第1章 绪 论

1.1 膜结构的发展与应用

广义建筑学从理念上和理论上将建筑学、地景学、城市规划的要点整合为一,这是广义建筑学对当代建筑师、规划师提出的新要求。建筑环境设计不仅为人类提供了广泛的活动空间,同时创造了气象万千的自然与人文景观,久居樊篱下,复得返自然。阳光、空气、绿草、水溪,人造景观把人们带入五彩缤纷、千姿百态的世界。以人为本、天人合一已是现代建筑环境学遵循的宗旨,是现代化城市建设必须遵守的原则。建筑环境与可持续发展具有鲜明的时代特征。现代化的城市是景观环境的依托,而环境的主体和服务目标则是现代人。建筑环境作为一种重要的社会文化,是人类的理想与意志的外在体现,也是时代特征和地域文化的有机结合。

膜结构是随着现代科学技术发展起来的全新建筑技术表现形式,是材料科学、建筑学、结构力学以及现代环境学高速发展的综合产物。20世纪60年代,随着现代柔性建筑材料的发展,建筑师们从帐篷这一最古老的简单建筑结构出发,构造出了魔幻般的形式—膜结构。它可以构成单曲面,多曲面等不同建筑结构形式,满足了建筑师们对建筑与美学高度统一的要求。柔性材料具有透光和防紫外线功能,在一些室外建筑和环境小品中得到广泛的应用。正是由于这一特征,夜间的灯光设计使膜结构具有鲜明的环境标志特征。优美造型的膜材,不锈钢配件和紧固件加上设计轻巧合理,表面处理严格的钢结构支撑,塑造出形式美观、设计合理的膜结构,在当今世界范围内的建筑设计中占有举足轻重的地位。

古老的膜结构在公元前几千年就已经出现,最早是由天然枝条和兽皮搭成的帐篷,然后发展到由铁木和帆布制作成各种各样的形状。但是,从欧洲古罗马帝国、中国汉朝时代到十九世纪末,膜结构几乎处于一个停滞发展的阶段。直到第二次工业革命,化学工业和工程力学迅速发展,高分子合成材料技术得到大力改进,现代膜结构开始蓬勃发展。1917年,美国兰彻斯特建议利用新发明的电力鼓风机将膜布吹胀作为野战医院,但没有真正成为使用的产品。1946年,一位名为贝尔德的人为美国军方做了一个直径15 m圆形充气的雷达罩,由此而衍生出了新的膜结构工业产业。最受人注目的是1967年Frei Otto设计的加拿大蒙特利尔博览会上的西德馆,其以轻质透明有机织片作为顶部结构,开了膜结构商业化的先河。1970年,日本大阪世博会上一座气承式膜结构的准椭圆形美

国馆,首次采用了聚氯乙烯涂层的玻璃纤维织物,这是世界上第一个大跨度的膜结构^[1,2]。

20世纪70年代以后,高强、防水、透光且表面光洁、易清洗、抗老化的建筑膜材料的出现,加之当代电子、机械和化工技术的飞速发展,膜结构大量用于滨海旅游、博览会、文艺、体育等大空间的公共建筑上。英国泰晤士河畔的千年穹顶是膜结构体系的标志性建筑,为世界瞩目。膜结构具有易建、易拆、易搬迁、易更新、充分利用阳光和空气以及与自然环境融合等特长,它是21世纪绿色建筑体系的宠儿。

20世纪90年代,上海八万人体育场是我国第一座大型的永久性膜结构,为膜结构的广泛应用拉开了序幕。此后专业膜结构企业及膜材生产厂家大量涌现,日本太阳工业集团和德国 Skyspan 等国外企业也加入了国内膜结构市场,促进了我国膜结构进一步发展。目前国内已有上百家专门从事膜结构设计施工的企业,在配合设计单位完成结构设计的同时,还承担膜材的裁剪、拼接和施工。膜结构在体育设施、交通设施、娱乐设施等公共建筑中得到广泛应用,其中体育场以半敞开的看台挑篷居多,如义乌市体育场、威海市体育中心、青岛颐中体育场等均为挑篷膜结构。2008年奥运会及2010年上海世博会上,大批膜结构工程和场馆的出现,标志着我国膜结构设计、施工技术的逐渐成熟,同时也将国内膜结构发展推向了高潮。

目前,全球范围内膜结构无论是在工程界还是在科研领域均处于热潮中。随着现代科技的进一步发展,使人类面临着保护自然环境的使命。因此,天然材料和传统的古老建筑材料必将被轻而薄且保温隔热性能良好的高强轻质材料所取代。索膜建筑技术在这项变革中将扮演重要角色,其在建筑领域内更广泛的应用是可以预见的。环境、氛围、文化、建筑形式的和谐统一,是世界范围内建筑师、规划师追求的最高目标。

膜结构作为一种建筑体系所具有的特性主要取决于其独特的形态及膜材本身的性能。恰由于此,用膜结构可以创造出传统建筑体系无法实现的设计方案。膜结构的主要特点如下^[3-7]:

① 轻质——张力结构自重小的原因在于它依靠预应力形态而非材料来保持结构的稳定性。从而使其自重比传统建筑结构的小得多,但却具有良好的稳定性。建筑师可以利用其轻质大跨的特点设计和组织结构细部构件,将其轻盈和稳定的结构特性有机地统一起来。施工周期短,更短的施工周期意味着更低的工程费用。膜工程中所有加工和制作依设计均可在工厂内完成,现场只进行作业。相比较传统建筑的施工周期,它几乎要快一倍。建筑空间的跨度大:由于自重轻,索膜建筑可以不需要内部支撑而大跨度的覆盖空间,这使得人们可以更灵活、更有创意地设计及运用更大跨度的建筑空间。

② 透光性——透光性是现代膜结构被广泛认可的特性之一。膜材的透光性可以为建筑提供所需的照度,这对于建筑节能十分重要。对于一些要求光照多且亮度高的商业建筑等尤其重要。通过自然采光与人工采光的综合利用,膜材透光性可为建筑设计提供更大的美学创作空间。夜晚,透光性将膜结构变成了光的雕塑。膜材透光性是由它的基

层纤维、涂层及其颜色所决定的。标准膜材的光谱透射比在 10%~20% 之间,有的膜材的光谱透射比可以达到 40%,而有的膜材则是不透光的。膜材的透光性及对光色的选择可以通过涂层的颜色或面层颜色来调节。通过膜材和透光保温材料的适当组合,可以使含保温层的多层膜具有透光性。即使光谱透射只有几个百分点,膜屋面对于人眼来说依然是发亮和透光的,具有轻型屋面的观感。能源损耗低:膜材料有较高的光反射性及较低的光吸收性,并且热传导较低,这极大程度上阻止太阳热能进入室内。另外,膜材的半透明性保证了适当的自然漫反射光照明室内。

③ 柔性——张拉膜结构不是刚性的,其在风荷载或雪荷载的作用下会产生变形。膜结构通过变形来适应外荷载,在此过程中荷载作用方向上的膜面曲率半径会减小,直至能更有效抵抗该荷载。张拉结构的灵活性使其可以产生很大的位移而不发生永久性变形。膜材的弹性性能和预应力水平决定了膜结构的变形和反应。适应自然的柔性特点可以激发人们的建筑设计灵感。不同的膜材的柔性程度也不相同,有的膜材柔韧性极佳,不会因折叠而产生脆裂或是破损,这样的材料是有效实现可移动、可展开结构的基础和前提。

④ 雕塑感——建筑形体塑造自由:多变的支撑结构和柔性膜材使建筑物更加多样化,新颖美观,同时体现结构之美,且色彩丰富,可创造更自由的建筑形体和更丰富的建筑语言。

⑤ 安全性——作为轻型结构,膜结构在地震等水平荷载作用下能保持很好的稳定性。由于轻型结构自重较轻,即使发生意外坍塌,其危险性也较传统建筑结构小。膜结构发生撕裂时,若结构布置能保证桅杆、梁等刚性支承构件不发生坍塌,其危险性会更小。膜结构的柔性使其在任意荷载作用下均以最有利的形态承载。当然,结构的布置和形状要根据荷载情况进行设计和调整。设计要确保膜面与其辅助结构协调工作,以避免力在膜面或辅助结构上集中而达结构破坏的临界值。

⑥ 经济性好——膜建筑屋面的重量仅为常规钢结构屋面的 1/30,这就降低了墙体和基础的造价。同时膜建筑奇特的夜景效果有明显的建筑可识别性和商业效应,性价比更高。

1.2 膜结构的分类与特点

现代膜结构起源于 20 世纪中期,以 1970 年的日本大阪世博会上的集中展示为标志,半个世纪以来得到了迅猛的发展和广泛的应用。在工程实践中,膜结构逐渐发展出多种应用形式,根据其构造和受力特点大致可以分成充气膜结构、张拉膜结构、骨架式膜结构和索穹顶等^[8-13]。

(1) 充气膜结构

充气膜结构利用膜面内外气体(空气)的压力差使其具有能承受自重和外荷载的稳

定的空间曲面,可分为气承式和气胀式膜结构两种。气承式膜结构以室内外的空气压力差支撑膜材,多为单层膜结构;气胀式膜结构以特定形式的气囊内外的压力差使气囊成为具备必要的刚度的构件和结构。

充气膜结构是现代膜结构发展早期较多采用的膜结构形式。1970 年大阪世博会的美国馆采用气承式膜结构,其准椭圆平面的轴线尺寸为 $140\text{ m} \times 83.5\text{ m}$,是第一个现代意义的大跨度膜结构。该次博览会上另一个具有代表性的建筑是日本的富士馆(图 1-1)。该馆平面为圆形,直径 50 m ,由 16 根直径 4 m 、长 78 m 的拱形气囊围成,是迄今为止建成的最大的气胀式膜结构。直至 80 年代中期,美国也建造了一批尺度在 $138 \sim 235\text{ m}$ 的体育馆,均采用了充气式膜结构,取得了极佳的技术经济效益。

但是 80 年代中后期以来,充气式膜结构逐渐暴露出一些问题,主要是由于意外漏气或气压控制系统不稳定而使屋面下瘪,或由于暴风雪在屋面形成局部积雪,而热空气融雪系统又效能不足导致屋面下瘪事故。

(2) 张拉膜结构

张拉膜结构是利用柔性钢索配以支承受力结构使膜面张拉形成稳定的空间曲面的膜结构形式。通常,张拉膜结构由索体和膜面共同受力,又称索—膜结构。当结构跨度较大时,可由若干张拉索膜单元组合而成。为保证膜面的稳定性,张拉膜结构通常采负高斯曲面造型。

上海世博会世博轴膜屋面(图 1-2)是迄今为止世界上最大的单体膜结构工程,其投影尺寸达 $80\text{ m} \times 1\,000\text{ m}$,采用的是张拉膜结构,由 -6.5 m 、 -1.0 m 、 4.5 m 、 10 m 标高的平面及膜结构屋顶组成,并设有 6 个特征标志性的阳光谷以满足地下空间的自然采光,阳光谷顶端与膜结构顶棚连接。它主要依靠国内研究成果和技术建造而成,6 个圆锥形“阳光谷”通过索膜结构连接。

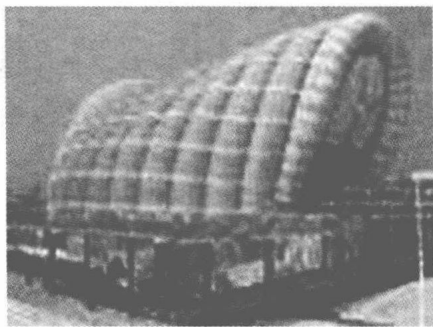


图 1-1 大阪世博会富士馆

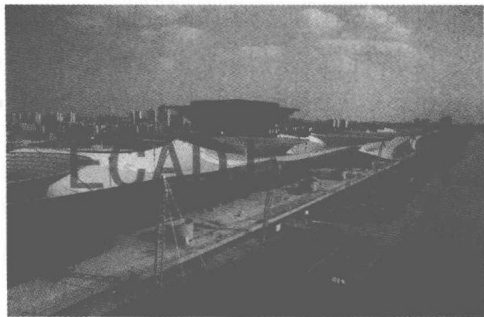


图 1-2 上海世博会世博轴膜结构

1993 年美国 Denver 国际机场候机大厅(图 1-3)采用完全封闭的张拉式膜结构,平面尺寸为 $305\text{ m} \times 67\text{ m}$,由 17 个连成一排的双支柱帐篷式单元组成,每个长条形的单元由相距 475.7 m 的两根支柱撑起。同时在每个单元内和单元邻接处设置必要的边索、脊索和谷索,膜面在这些索的作用和约束下建立预应力,并确定形状。

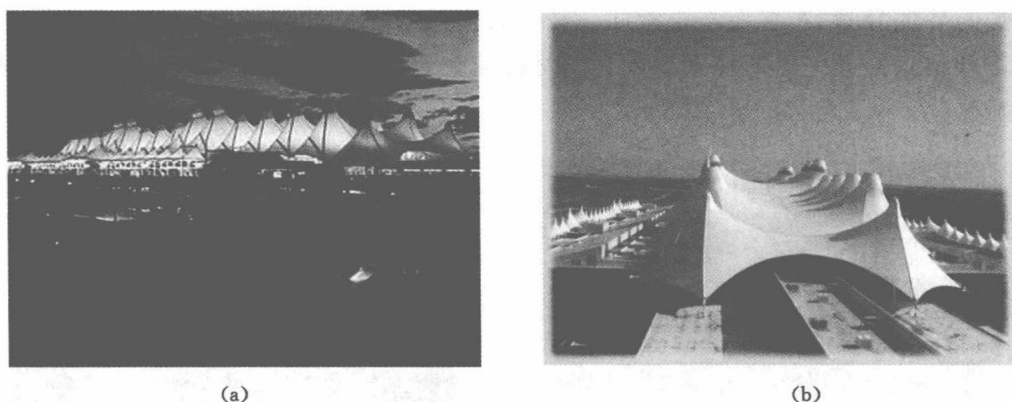


图 1-3 美国 Denver 国际机场候机大厅

(3) 骨架式膜结构

骨架式膜结构是利用结构或空间网格结构等来支承膜面的膜结构形式。与前两种膜结构形式不同,膜结构本身主要起到维护结构的作用,而并非主要受力构件。例如日本秋田县的天空穹顶(图 1-4)是一个切去两边的球面穹顶,直径为 130 m,其主要承重结构是一系列平行的格构式钢拱架,蒙以膜材后,用设在两拱中间的钢索向下拉紧,并在屋面上形成 V 形排水沟槽。膜面主要起到覆盖作用,仅在刚性骨架之间的局部范围内发挥张拉膜结构的功能。1997 年建成的上海八万人体育场(图 1-5)是我国第一座大型永久性膜结构,为膜结构的广泛应用拉开了序幕。该结构为骨架式膜结构体系,采用 PTFE 膜材,以悬挑钢桁架与环形钢桁架共同形成刚性骨架,其建造完全依靠境外技术。

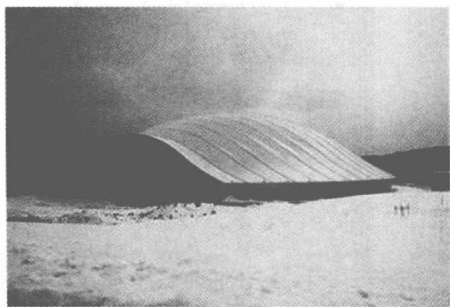


图 1-4 日本天空穹顶



图 1-5 上海八万人体育场

(4) 索穹顶结构

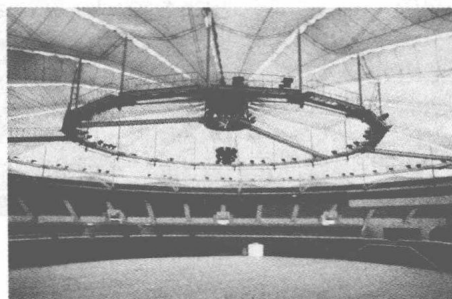
索穹顶结构是近年来最为脍炙人口的新型的张拉体系。在 Fuller 提出的张拉整体的基础上,美国工程师 Geiger 提出了一种支承在刚性周边构件上的预应力索—杆体系,并以膜面作为维护结构,将 Fuller 的“少费多用”、“连续拉、间断压”的结构思想发挥到了极致。

1988 年的汉城奥运会的体操馆(图 1-6)是索穹顶结构的首次应用。这种体系由沿辐

射方向布置的脊索、布置在与脊索同一竖平面内的斜向拉索和竖向压杆以及将同一圈竖杆的下端结点连成一体的环索组成。膜材覆盖在脊索上,在相邻两脊索之间用一根谷索将膜材张紧。



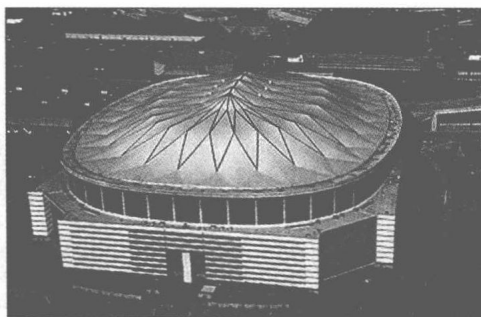
(a)



(b)

图 1-6 汉城奥运会体操馆

美国的 Levy 进一步发展了这种体系,将脊索由辐射状布置改为联方形网格的形式,斜索和压杆的布置也做了相应的调整。屋面膜单元变为菱形的双曲抛物面形状,这种负高斯曲率的曲面可自然地绷紧成形。Levy 穹顶的整体空间作用比 Geiger 穹顶相比明显加强,因而在不对称荷载或局部荷载作用下其刚度有较大提高。美国 1996 年亚特兰大奥运会体育馆(图 1-7)采用了这种体系,平面呈准椭圆形,轮廓尺寸为 $241\text{ m} \times 192\text{ m}$ 。



(a)



(b)

图 1-7 1996 年亚特兰大奥运会体育馆

(5) 可展膜结构

另外,将膜结构和折叠结构、可展结构等结合起来,完成了诸多很有建筑感染力的工程作品。同时,膜结构的广泛应用与发展,也造就了许多集建筑与结构于一体的张拉结构设计大师,例如美国的 Geiger、德国的 Frei Otto 等。图 1-8 所示为 2006 德国世界杯体育场之一的法兰克福新森林球场,采用辐射式的双层索网作为屋盖中心区域的承重体系

以及膜结构展开的滑道,是迄今为止最大规模的可展膜结构。

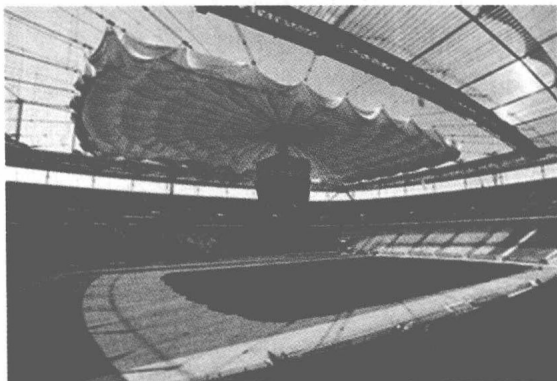


图 1-8 法兰克福新森林球场

1.3 建筑膜材料的分类和建筑物理性能

从膜结构的发展历程来看,膜结构体系和膜材料性能两者是相辅相成、相互依存、共同发展的。目前,包括找形分析、荷载分析、裁剪分析等在内的结构理论研究以及膜结构的设计分析软件的开发均取得了相当的进展。与此相对应,作为深入研究膜结构性能、确保膜结构正常、安全使用的另一重要因素,膜材料性能的研究亦需全面、深入地展开。膜结构的发展与膜材料的研发与应用密不可分。从早期的 PVC 膜材,到 PTFE 膜材,再到最新的 ETFE 膜材,每一次新型膜材的开发与应用都极大地促进了膜结构的发展。目前国内外应用的建筑膜材主要包括涂层织物类膜材和热塑化合物类膜材两大类^[13-18]。

涂层织物类膜材是一种复合材料,一般由基层、涂层、面层组成,如图 1-9 所示。基层由各种织物纤维编织而成,决定膜材的结构力学特性。涂层和面层保护基层,且具有自洁、抗污染、耐久性等作用。常用的涂层织物类膜材有外涂聚四氟乙烯的玻璃纤维类膜材(一般称为 PTFE 膜材)和外涂聚氯乙烯的聚酯纤维类膜材(一般称 PVC 膜材)。

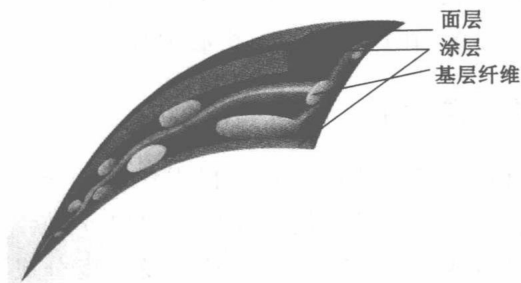


图 1-9 涂层织物类膜材构成示意图

PVC 膜材价格便宜,有白、红、蓝、绿多种颜色,应用较为广泛。膜材柔软,具有良好的拉伸性能,便于制作张拉,对裁剪中的误差具有良好的适应性。但其耐久性和自洁性较差,随着材料的老化,其性能由于涂层增型剂的外移和紫外线作用而发生改变,表面逐渐变黄、发黏,空气中的尘埃和脏物附着于膜面,是表面变脏,透光率降低,从而降低其使用年限。为改善此类膜材的耐久性和自洁性,可以在涂层外增加聚氟乙烯(PVF)或聚偏氟乙烯(PVDF)面层。PVC 膜材应用最早,柔韧性能较好,易于加工。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,自洁性差。因此,PVC 膜材一般应用于临时性建筑^[21]。

PTFE 膜材具有良好的耐久性,在大气环境中不会发黄、霉变等,而且具有良好的自洁性,难燃、阻燃,寿命长(25~30 年),适用于永久性建筑^[22]。但其价格较贵,而且膜材刚度较大,运输及施工过程中的卷、折会使膜材强度降低,故施工方便性较差,且需要在设计、裁剪过程中进行精确计算。

热塑化合物类膜材,主要指乙烯—四氟乙烯共聚物(ETFE),通常应用于需要高透光率、造型丰富的建筑物。ETFE 膜材比涂层织物类膜材更轻更薄,透光率更高,其厚度通常小于 0.3 mm,透光率可达 95%。虽然 ETFE 膜材本身强度并不低,但由于厚度太薄,因此该材料通常用于气胀式膜结构中,由多个跨度通常不大于 5 m 的两层或三层充气气垫单元构成结构整体。

目前出现一种新型的织物类膜材膨体 目前出现一种新型的织物类膜材膨体聚四氟乙烯(expanded PTFE)纤维薄膜材料(以下简称 ePTFE 膜材),其基布由膨体聚四氟乙烯纤维编织而成,表面通常为氟聚合物涂层,因此 ePTFE 膜材是纯氟聚合物材料。ePTFE 膜材极其柔软,具有很好的反复折叠性能,膜材透光率可达 40%。作为纯氟聚合物,ePTFE 膜材具有良好的抗污性能和耐久性能,可回收再加工后重复使用。试验表明:ePTFE 膜材的抗拉强度及撕裂强度较高,材料柔软,具有较好的耐徐变性能^[20]。

无论是涂层织物类膜材,还是热塑化合物类膜材,其特殊的构成决定了建筑膜材的力学性能与传统的建筑材料完全不同。膜材属于柔性材料,只能承受拉力而不能受压或受弯,只有在被施加了一定水平的预拉力后才具备所需的结构刚度。膜材属于非弹性材料,具有很强的材料非线性,其应力—应变曲线从一开始就偏离直线。膜材的应力松弛和蠕变等黏弹性特征相当显著,在设计和施工中必须加以考虑^[13,21,22]。

1.3.1 建筑膜材料的分类标准

我国《膜结构技术规程》(CECS 158:2004)根据织物膜材的基材分为 G 类(玻璃纤维)和 P 类(聚酯纤维)两大类,再按其不同的涂层与面层分别给予代号,然后根据当前国内外生产厂家提供的膜材品种,按照抗拉强度、重量及厚度分成 A、B、C、D、E 五个等级,如表 1-1 至表 1-3 所示。

表 1-1

常用膜材的类别代号和构成

类别	代号	基材	涂层	面层
G	GT	玻璃纤维	聚四氟乙烯 PTFE	—
P	PCP	聚酯纤维	聚氯乙烯 PVC	聚偏氟乙烯 PVF
	PCD	聚酯纤维	聚氯乙烯 PVC	聚偏二氟乙烯 PVDF
	PCA	聚酯纤维	聚氯乙烯 PVC	聚丙烯 Acrylic

注：GT 称 G 类，为不燃类膜材；PCF、PCD、PCA 统称 P 类，为阻燃类膜材。

表 1-2

玻璃纤维膜材(G类)类的分级

级别	A 级		B 级		C 级		D 级		E 级	
受力 方向	抗拉强度 /(N/3 cm)	厚度 /mm	抗拉强度 /(N/3 cm)	厚度 /mm	抗拉强度 /(N/3 cm)	厚度 /mm	抗拉强度 /(N/3 cm)	厚度 /mm	抗拉强度 /(N/3 cm)	厚度 /mm
		重量 /(g/m ²)		重量 /(g/m ²)		重量 /(g/m ²)		重量 /(g/m ²)		重量 /(g/m ²)
经向	5 200	0.9~1.1	4 400	0.75~0.9	3 600	0.6~0.75	2 800	0.45~0.6	2 000	0.35~0.45
纬向	4 700	≥1 550	3 500	≥1 300	2 900	≥1 050	2 200	≥800	1 500	≥500

表 1-3

聚酯纤维膜材(P类)的分级

级别	A 级		B 级		C 级		D 级		E 级	
受力 方向	抗拉强度 /(N/3 cm)	厚度 /mm	抗拉强度 /(N/3 cm)	厚度 /mm	抗拉强度 /(N/3 cm)	厚度 /mm	抗拉强度 /(N/3 cm)	厚度 /mm	抗拉强度 /(N/3 cm)	厚度 /mm
		重量 /(g/m ²)		重量 /(g/m ²)		重量 /(g/m ²)		重量 /(g/m ²)		重量 /(g/m ²)
经向	5 000	1.15~1.25	3 800	0.95~1.15	3 000	0.8~0.95	2 200	0.65~0.8	1 500	0.5~0.65
纬向	4 200	≥1 450	3 200	≥1 250	2 600	≥1 050	2 000	≥900	1 500	≥750

1.3.2 建筑膜材料的建筑物理性能

作为一种极具艺术表现力的结构形式，膜结构对膜材料的建筑物理性能也提出了较高的要求。膜材的建筑物理性能主要包括耐候性能、光学性能、声学性能、热学性能以及防火性能等多个方面。在膜结构的设计过程中，要充分了解各类膜材的各项建筑物理性能，并与膜结构整体性能结合起来，选择合适的材料进行相应的建筑设计，以取得良好的建筑效果与经济技术指标。

膜材的光学性能是指膜材对各种波段光线的作用特性，包括对可见光、紫外线、红外线的反射、透射、吸收以及散射特性。不同的膜材对各波段的光线的反射、吸收、透射差异较大。总体来说，膜材具有较好的透光性。织物膜材对自然光的透光率可达到 20%，即使对保温隔热性能要求较高而采用的双层膜建筑，其透光率也达 4%~8%。而 ETFE

膜材的透光率可达 95%，甚至超过了白玻璃。

透射光在膜结构建筑内部产生均匀的漫射光，无阴影、无眩光、无显著方向性，光线柔和均匀。白天可满足各种室内活动的需要，使得膜结构特别适用于体育设施、展览厅和天井等对采光要求较高的建筑物。另外，夜间在灯光的照射下，膜结构建筑的外表发出柔和的光，具有良好的广告宣传效应和建筑可识性。当采用内部照明时，灯具与膜面应保持适当距离，以防止灯具散发出的热量将膜面烤焦。膜材的光反射率和透光率可参照表 1-4 采用。

表 1-4 膜材的反射率和透光率

膜材种类	颜色	反射率/%	透光率/%
G 类	米白	70~80	8~18
P 类	白	75~85	6~13
	有色	45~55	4~6

膜材的声学性能与光学性能类似，包括对不同频率声波的反射（回声）、透射损耗（吸声）特性。回声和吸声特性综合决定了膜结构建筑内空间音响品质和隔音效果。单层膜材自身的声学性能较差，回声强，吸声弱，隔音量也低于一般围护结构。膜材织物对声波振动具有很强的反射性，这种反射性增加膜结构建筑内部的噪音水平。通常需要采取相应的建筑构造措施改善膜结构的建筑声学环境。例如，在膜内加装轻质、多孔的织物衬垫，可以有效地减弱声波反射并增加声波传播的衰减；在膜结构顶棚每隔一段距离悬挂隔声屏，以增加对声波的吸收，并改变顶棚的曲线造型从而改变反射方向；采用专用吸声膜内衬可明显降低回声增加吸声。但是，选择这些技术方案时必须充分考虑这些方法对膜建筑采光、防火等性能的影响。

膜结构建筑的保温隔热性能较差，目前广泛采用的膜材还不能较好地隔绝外部温度的影响。单层膜材的传热系数大，制冷能耗高，故仅适用于敞开式建筑或气候较温暖的地区。当对建筑物的保温性能有较高的要求时，可采用双层或多层膜结构。

膜材具有较好的防火性能^[23]。膜材基层自身具有不燃性或难燃性，玻璃纤维是不燃材料，聚酯纤维是难燃材料。当膜材用于半敞开建筑时，如体育场看台挑棚、公共设施罩棚、建筑艺术小品或者用于临时性建筑时，防火安全问题不大。但是用于全封闭、永久建筑的屋盖体系时，应综合考虑膜材耐火、烟气量、毒性和结构倒塌等因素判定膜结构防火性能，而不是按照传统抗火耐火进行设计。保持膜结构骨架在膜面破坏情况下的稳定性是膜结构防火需要注意的另外一个问题。膜材在膜结构中是受力材料，在火灾情况下膜材无论是烧穿还是脱落，总是最先破坏的部分。当膜材破坏、失去张力时，膜结构骨架不应倒塌。膜材的耐火性能可参照表 1-5 采用。