

膜结构的基本体系与方案选择

胥传喜 武 岳
(RIGHT TECH(S) PTE LTD) (哈尔滨工业大学)

提要 膜结构所用的材料和技术均不同于传统结构。膜结构的设计一般在方案阶段就有专业膜结构公司介入。本文就膜结构方案建议阶段的工作内容及相关知识如结构体系的确定、膜材料的选择、造价估算等展开论述和讨论。

关键词： 膜结构 结构体系 膜材料 工程设计 造价估算

Structural System Determination and Cost Estimating for Membrane Construction

Xu Chuanxi Wu Yue
(RIGHT TECH(S) PTE LTD) (Harbin Institute of Technology)

Abstract The material and the technology used for membrane structure are different from the traditional structure. Usually, the specialized membrane structure company involves the construction in the design proposal stage. This lecture focuses on the knowledge of the conceptual proposal, including structure system determination, the fabric choice, the cost estimating and so on.

Key words membrane structure, structural system, fabric, engineering design, cost estimating

1. 膜结构的基本形式与结构体系

膜结构是以厚度通常小于 1 mm 的薄膜材料为主要受力构件的表面张力结构。根据施加张力的媒介不同，膜结构可分为充气膜结构和张拉膜结构两大类。

1. 充气膜结构的基本形式

充气膜结构通过向膜内充气而使膜面形成张力、维持设计的形状并承受荷载。充气膜结构的基本形式有气承式、双层或多层气垫式、气肋式等。

充气膜结构在膜结构发展的早期曾得到很大发展，其典型工程有 B.C. Place Stadium (Canada, 232X190m, 1983, 气承式)、GALET EXPO 2002 (103m/80m/71m, 双层气垫式)、Fuji Group Pavilion (Expo'70, 气肋式) 等，见图 1。除了充空气外，日本的石井一夫教授还研究了 300m X 150m 的充氦气悬浮膜结构屋顶方案[1]，而这一构想也被应用于在我国深圳龙岗商业中心 (图 2) 的工程设计中。尽管近年来膜结构的发展重点在张力膜结构上，以英国 Eden Project 为代表的、利用以透明 ETFE 膜材做成的双层或多层气垫为基本单元 (图 3) 的结构也很引人注目。



图1 充气膜结构的基本形式 a. 气承式; b. 气垫式; c. 气肋式

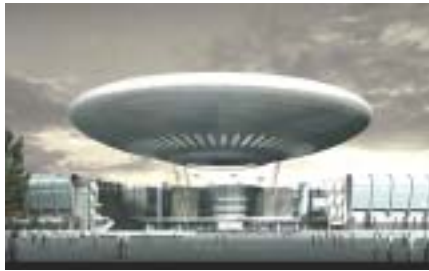


图2 龙岗商业中心充氦气悬浮膜结构方案



图3 ETFE 气垫及其代表工程

2. 张拉膜结构的基本形式

张拉膜结构以钢索、钢结构构件等为边界，通过张拉边界或顶升飞柱等手段给膜面施加张力、维持设计的形状并承受荷载。

张拉膜结构的基本外形有马鞍形、圆锥形（伞形）、拱支承形、脊谷式等，见图4。应用于实际工程的张拉膜结构常常是这些基本外形的组合。



图4 张拉膜结构的基本形式 a. 马鞍形 b. 圆锥形（伞形） c. 拱支承形 d. 脊谷式

张拉膜结构设计的一大特点是需要进行形态分析，即通常所说的找形。张拉膜结构的“自由造型”需要符合力学平衡。事实上，找形的目的不仅仅是找出一个满足平衡的形状，还包括对所找出曲面的预

应力及刚度的分析，或者说是对其曲面的病态判别及其修改。张拉膜结构的外形设计需要建筑师与专业膜结构技术人员共同完成。有关找形方法及“形”与“力”的关系等，将在下一讲中专门论述。本专题讲座将主要就张拉膜结构展开。

3. 张拉膜结构的支承体系

张拉膜结构工程按支承结构及边界约束可分为三种类型，即柔性支承体系、刚性支承体系、混合支承体系（刚性支承、柔性边界），如图 5 所示。



图 5 张拉膜结构的支承体系 a. 柔性支承体系 b. 刚性支承体系 c. 混合支承体系

柔性边界膜结构和刚性支承、柔性边界膜结构，以柔性的钢索为边界，且连接膜节点板（Membrane Plate）与支承结构、已有建筑或锚固基础的连接段（Link）常做成长度可调节、在其他方向上可以转动，以较好地适应荷载作用下的变形及二次张拉。这种边界形式特别适用于采用 PVC 覆盖膜材的工程，对设计及制作、安装的精度要求也相对较低。国内目前的膜结构工程绝大多数都采用柔性边界。

刚性边界的膜结构，膜面的所有边界都为刚性构件。相对于柔性边界而言，刚性边界的膜结构造形更为简洁、受工程场地约束少，但其造形受边界的影响更为明显，且精度要求更高。

2. 膜结构的材料及其选用

与传统结构不同，膜结构以柔性的薄膜和索为主要受力材料。要进行膜结构的工程设计，必须了解其材料；在方案建议阶段，也需要就可供选择的材料作出比较并给出建议。

1. 膜材的种类及其性能

用于建筑工程的薄膜材料可以分为织物类膜材和非织物类膜材两大类。其中织物类膜材常用的有 PVC 涂层覆盖聚酯纤维织物（以下简称 PVC 膜材）以及 PTFE 涂层覆盖玻璃纤维织物（以下简称 PTFE 膜材）；非织物类膜材则以 ETFE 薄膜最具代表性和竞争性。

1. 织物类膜材的构造

织物类膜材由织物基层加表面涂层复合而成，基层提供材料以强度等力学性能，涂层则提供防火、防老化等物理及化学性能。常用的基层材料有聚酯纤维、玻璃纤维、聚丙烯纤维、聚酰胺纤维等；常用的涂层材料则有聚氯乙烯（PVC）、聚四氟乙烯（PTFE，俗称 Teflon）、硅酮及聚酰胺等等。

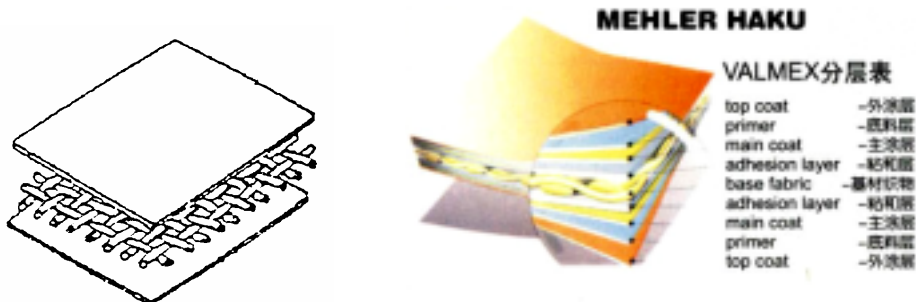


图 6 织物类膜材的构造

2. PVC 涂层覆盖聚酯纤维膜材的性能

PVC 膜材的主要性能指标如下：

- 颜色及透光性能：有多种颜色可供选择，透光率在 8%-16%之间；
- 寿命及稳定性能：寿命为 10-15 年，PVC 涂层受紫外线影响将逐步老化；
- 防火性能：阻燃材料；
- 自洁性能：自洁性能一般，随着 PVC 涂层的老化，表面会泛黄、积尘、起斑点甚至涂层脱落，在强紫外线照射地区尤为明显；
- 可加工性能：柔软、可折断，可加工性能好；可采用高频焊接融合。

常用 PVC 膜材的抗拉强度、撕裂强度等性能指标见表 1。

表 1 常用 PVC 膜材的性能指标

产品名称		VALMEX FR700	VALMEX FR900	FERRARI 1002T	FERRARI 702
材料		聚脂纤维涂 PVC	聚脂纤维涂 PVC	聚脂纤维涂乙烯基	聚脂纤维涂乙烯基
重量 (g/m ²)		800	900	1050	750
厚度 (mm)		0.60	0.8	0.8	0.6
条张拉强度 (N/5cm)	经向	3000	4200	4200	2800
	纬向	3000	4000	4000	2800
撕裂强度 (N)	经向	300	500	550	300
	纬向	300	450	500	280
粘结强度 (N/5cm)		100	125	120	100
透光率 (%)		15	13	15	11

3. PTFE 涂层覆盖玻璃纤维膜材的性能

PTFE 膜材的主要性能指标如下：

- 颜色及透光性能：只有白色一种。PTFE 膜材刚安装时略微呈黄色，随着太阳光的照射，一般在 3-6 个月变为纯白色。透光率在 10%-15%之间；
- 寿命及稳定性能：寿命为 25-30 年，涂层受紫外线影响小，稳定性好；
- 防火性能：不燃材料；
- 自洁性能：自洁性能好，雨水即可冲刷表面积尘而保持清洁；
- 可加工性能：可加工性能一般；可采用高温焊接。

常用 PTFE 的性能指标见表 2。

表 2 常用 PTFE 膜材的性能指标

产品名称		CHEMFAB SHEERFILL	CHEMFAB SHEERFILL	SKYTOP FGT-800	VERSEIDAG B18089 GF
材料		玻璃纤维涂 PTFE	玻璃纤维涂 PTFE	玻璃纤维涂 PTFE	玻璃纤维涂 PTFE
重量 (g/m ²)		1650	1375	1300	1150
厚度 (mm)		0.96	0.8	0.8	0.7
条张拉强度 (N/5cm)	经向	7000	5500	7800	7000
	纬向	6100	4800	6500	6000
撕裂强度 (N)	经向	520	530	350	500
	纬向	700	530	400	500
粘结强度 (N/5cm)		130	90		80
透光率 (%)		12~16	12~16	12	12~14

4. 网状膜材 上述膜材可做成带不同大小和间距的孔洞的网状，既可以遮阳，又可以减少作用于膜面的风荷载。同时，由于膜材为网状，由此而围护的空间又可以说是开敞的，在一些地方可以不计入总建筑面积，省却大笔的发展税费，因而也深受发展商和建筑师的喜爱。

5. ETFE 膜材

ETFE 是英文 Ethylene Tetra Fluoro Ethylene 的缩写，中文名称为乙烯-四氟乙烯共聚物。用于建筑工程上的 ETFE 膜材是由其生料加工而成的薄膜，非常坚固、耐用，并具有极高的透光性。

ETFE 膜材的性能的主要性能指标如下：

- a. 厚度：0.05mm - 0.25mm；
- b. 密度：1.75g/cm³左右，以 0.20mm 厚的 ETFE 膜材为例，其质量约 350g/m²；
- c. 颜色：透明、白色，可印制成各种颜色的图案；
- c. 透光率：单层透明膜材的透光率高达 95%，白色膜材为 50~55%；
- d. 防火性能：ETFE 为阻燃材料；
- e. 耐久性：使用年限达 25 年以上；
- f. 抗拉强度：大于 40Mpa；
- g. 破断伸长率：达 300%以上。

ETFE 材料本身的抗拉强度并不低，但由于做成的膜材很薄，以单层张拉方式应用于膜结构时，结构的跨度要比应用织物类膜材的结构来得小。通常 ETFE 膜材以多层气垫的形式（参见图 3）出现于建筑物中。

6. TENARA 膜材

正如商标名 Teflon 已成为 PTFE 膜材的代名词一样，TENARA 其实也是一种膜材的商标。所不同的是，在通常所说的 PTFE 膜材中 PTFE 只是涂层，其基层多为玻璃纤维织物；而 TENARA 膜材则是连基层也为 PTFE。与 PTFE 涂层膜材相比，TENARA 膜材更薄、更柔软，强度更高，透光率更是高达 40%。

2. 膜材料的选用

不同种类、不同品牌及同一品牌不同型号的膜材，其性能及价格各不相同。膜材的选择往往在很大程度上取决于建筑物的功能、防火要求、设计寿命和投资额。一般来说，选择膜材时主要考虑以下因素：

- a. 强度，包括抗拉强度与抗撕裂强度等，视膜面的工作应力来选择；
- b. 耐久性，包括抗老化性能、徐变性能以及适应气候的能力；
- c. 防火性能，即要求材料是阻燃的还是不可燃的，这又取决于建筑物的功能及当地对建筑材料防火性能要求的规定；
- d. 价格，往往起控制作用；
- e. 膜材的可加工性能、幅宽及拟建工程的膜面形状等。

PVC 膜材的价格比较便宜，加工制作也比较方便。一般多用于对防火性能及耐久性能要求不是很高的建筑物或建筑小品等。PTFE 膜材多用于防火要求高的永久性膜结构工程。网状膜材主要用于需要减少或遮挡阳光但又有类似于开敞空间空气环境的场所，如网球场等。图 7 所示的工程是用网状膜材建造的竖向视线屏蔽结构，目的是减小作用于膜面的风压。采用银灰色是为了增加屏蔽效果。ETFE 材料由于其极好的透光性能和紫外线穿透能力，特别适合于建造需要人工模拟自然环境的建筑物，如人工生态园，以及运动场馆等等。TENARA 膜材因其高透光性、柔软、耐久性好，多用于可收缩的或高透光性的膜结构工程。图 8 是一个用 TENARA 膜材建造的高透光性结构。过于昂贵的价格使得 TENARA 目前在膜结构工程中应用较少。



图7 用网状膜材建造的竖向视线屏蔽结构



图8 用TENARA膜材建造的高透光性结构

3. 钢索及其选用

大多数膜结构工程是通过钢索来张拉膜面的。索的应用形式有形成自由造型的边索、维持形状和稳定的脊索和谷索、顶升飞柱及传递荷载的拉索等等。

用于膜结构的钢索多为不锈钢索或镀锌钢索。按其构造不同，又可分为钢绞线和钢丝绳两类，参见图9。钢丝绳比较柔软，其破断力也比相同直径的钢绞小。

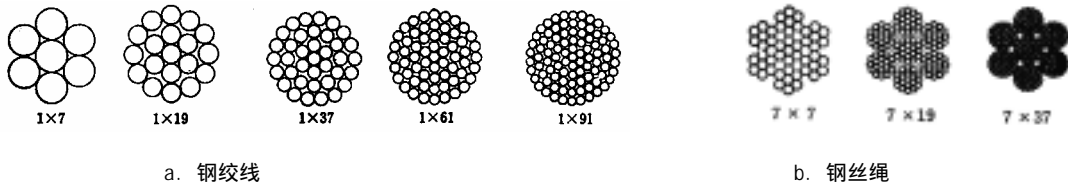


图9 钢绞线和钢丝绳

外露的拉索宜选用直径较小的不锈钢钢索，以充分体现膜结构的轻盈、美观；穿在膜边“裤套”里的边索可以考虑无油镀锌钢丝绳。索具的选择也宜与钢索相匹配。有关索及索具的内容，将在第三讲中作进一步的介绍。

3. 膜结构的造价构成及其过估算

一个膜结构工程的方案能否实施，除了技术方面的因素外，价格往往起着决定性的作用。

1. 膜结构的造价构成

与其他类型的结构工程相类似，膜结构工程的造价也包括设计费、材料费用、加工制作费用、安装费用、管理费及利税等；其中材料及加工制作费用包括膜材料、辅料、索及索具、支承钢结构等分项。

2. 膜材料费用及工程造价估算

在估算膜材的费用时，要注意膜面投影面积、膜面展开面积（表面积）、膜材料消耗面积之间的关系。在通常情况下，马鞍形及拱形膜结构的投影面积与展开面积之比约为1:1.15。膜材利用率为80-85%。即投影面积：展开面积：膜材料消耗面积约为1:1.15:1.4；对于圆锥形（伞形）膜结构而言，上述比例约为1:1.3:1.7。结构表面的曲率越大、外形越不规则，膜材利用率就越低。

PVC涂层覆盖聚酯纤维膜材目前在国内市场的价格在80-140元/m²之间。膜材加工费用约50-70元/m²（加工费按展开面积计价）。膜结构的支承结构用钢量一般在10-30 kg/m²。膜结构的报价常以展开面积计算。现阶段国内各膜结构公司的投标价（含配套钢结构）一般在650-900元/m²之间。

PTFE涂层覆盖玻璃纤维膜材目前的市场价格在人民币400-700元/m²之间。因其加工难度大，加工费用也较高。国内目前还很少采用。国外建成工程的造价折人民币在1800-3000元/m²。

ETFE 膜材目前在国内尚未有应用。ETFE 的材料价格比 PTFE 涂层覆盖玻璃纤维膜材料稍低，但由于常被做成两层或三层的气垫式，且需要充气及控制设备，国外建成工程的造价折人民币也达 2400-3000 元/m²。由于 ETFE 膜材非常轻，支承结构及基础工程的造价可以大大地节省。就整个项目而言，利用 ETFE 气垫作屋盖比较于利用传统透明材料如玻璃等，其投资节省可达 40%至 50%。

3. 价格构成实例

给出一个国内某小型膜结构工程的价格构成实例供参考。该工程外形为马鞍形，膜面投影面积为 124 m²，展开面积（表面积）为 142 m²。结构体系为多柱支承张拉式。采用某品牌 PVC 膜材，实际膜材消耗量为 180 m²。用钢量按投影面积计为 14 kg/m²。

该工程的实际成交价按展开面积计为 760 元/m²。其中，膜部分含膜材料及其加工、附件加工费用等占 41%；钢结构、连接件及钢索等费用占 22%；运输等费用占 8%；现场费用及远地点施工增加费用占 3%。以上总计占总价的 74%，即按投影面积计为 562 元/m²。在此基础上，另加设计费、综合管理费、利润及税金，即为总价。

4. 膜结构的设计建造过程

膜结构的设计建造，往往从一开始就有专业膜结构公司介入，其过程一般可分为以下几个阶段：

1. 方案建议阶段：发展商（在国外常由建筑师代表发展商）提出意向，并向专业膜结构公司发出征询；专业膜结构公司根据拟建项目的功能、建筑师的造形构思等提出建议的膜结构形状和结构体系、膜材料性能资料及估算的造价。
2. 方案明确阶段：若估算的造价在发展商的预算内，发展商或建筑师接下来会约见专业膜结构公司进行商谈，以明确方案；专业膜结构公司进行初步的找形与受力分析以保证方案可行并估算构件尺寸，准备招标图纸。
3. 招标投标阶段：可以是公开招标或邀请三、四家专业膜结构公司投标。各专业膜结构公司应根据招标文件提出两个以上的结构方案，同时就项目实施过程中可能遇到的问题及解决方案提出建议。
4. 施工图设计阶段：中标的膜结构公司进行膜结构设计，包括几何外形的优化与确认、结构内力分析、施工详图设计等，并将设计结果报发展商或建筑师评价、认可，报有关当局批准。
5. 制造安装阶段：购买膜材料；进行裁剪设计；加工制作膜面及相应的附件、支承结构等；安装、清洗、交付。
6. 使用维护阶段：膜结构在交付时，专业膜结构公司向发展商提供用户手册，记载工程概况、设计参数、材料性能指标，使用注意事项，外观检查与清洗周期及方法，二次张拉方法，承建公司及膜材料生产厂家的质量保证期限，局部意外破损的修补方法，并提供修补材料；同时提交质保书。业主根据手册使用并维护膜结构。

5. 结语

膜结构方案选择的主要任务是结构外形、结构体系的确定和膜材料的选用。本文介绍了膜结构的基本外形与结构体系、膜材料的性能及其选用、膜结构的造价构成及其估算等，据此可进行膜结构设计建造过程中的方案建议阶段的工作。

参考文献

- [1] Kazuo Ishii, Membrane Structures in Japan, SPS Publishing Company, Tokyo Japan, 1995

致谢： 作者感谢蓝天教授、沈世钊院士等前辈的鼓励和指导。

本专题文章中的图片部分为笔者工作单位承建工程的照片，部分日常收集自相关资料或网站，恕不一一列出，特此致谢。