

从了解膜结构到个性空间创作

From the Understanding of Membrane Structure to Specialized Space Creation

撰文 叶奕彬 厦门合道工程设计集团有限公司

膜结构是建筑结构中最新发展起来的一种形式，它以性能优良的织物为材料，膜内充气，由空气压力支撑膜面，或者利用柔性钢索或刚性支撑结构将面绷紧，从而形成具有一定刚度、能够覆盖大跨度空间的结构体系。从上世纪七十年代以来，膜结构在国外就已应用于体育建筑、商业展览中心、交通服务设施等大跨度建筑中，成为结构设计选型中的一个主要方案。在国内，大跨度建筑结构里采用膜结构的形式也一直在普及。虽然所采用的技术与材料在某种程度上还要依靠国外，但是我们也在努力探索和学习经验，依靠自己的力量来完成施工。

2003年，我有幸参与到由韩国的体育建筑大师——柳春秀作为主创建筑师的厦门奥林匹克游泳馆的项目当中，与许多国内外的膜结构专家进行学习和交流，并且接触到国外的膜结构厂商，例如法国的法拉利、德国的米乐、比利时的希运、韩国的秀博、日本的中兴化成、德国的杜肯等等，使我了解到当时各国最先进的膜技术。经过系统的学习，我收集了关于膜结构技术的很多素材和资料，并尝试应用在建筑实践当中。例如，在2004年的厦门体育中心改造项目投标，我设计了“春蚕”的构思，虽然没有中标，但获得了专家的一致好评。2007年的龙海市文化体育中心项目，我设计了“大鹏展翅”和“萌芽”两个方案，

“萌芽”方案被甲方采用并实施，但由于造价原因，甲方把原设计九跨方案改成五跨，规模小了很多，留下了不少遗憾，但也总结了不少膜结构建筑的设计心得。

1 传统的膜材料

传统的膜材料大致可分为两类，一类是以玻璃纤维织布为基材，涂敷PTFE的PTFE（聚四氟乙烯树脂）膜材料；另一类是以聚酯纤维织布为基材，涂敷PVC的PVC（聚氯乙烯树脂）膜材料。二者各具特点，可根据建筑物的性质来选用。PTFE膜材料一般用于永久性建筑物，具有20年以上的耐久特性；PVC膜材料一般用于临时建筑物，耐久性在10至15年左右。

1.1 PTFE膜材料

PTFE膜材料以玻璃纤维织布为基材布，涂敷聚四氟乙烯（PTFE）而成。基材布以世界最细的B丝，即3um直径



单丝汇聚而成，具有良好的耐火性、耐久性和自洁性。经防火试验，PVC膜被火焰燃烧到作洞并蔓延，而PTFE膜有火焰却没有打洞和蔓延现象。玻璃纤维B丝相比近年来膜材厂商尝试使用的DE丝，能够确保膜材具有足够的强度和曲折耐久性。而PTFE膜表面所堆积的灰尘、大气污染物质，经过雨水的冲刷可以顺利去除以保持美观，省去了清洗工作，若完全使用四氟化乙烯树脂涂层，可以长期维持顶棚材料的性能和安全性。到目前为止，可以保持长达有30年以上的美观。PTFE膜具有半透明性，透过PTFE膜的自然光可转化为阴影少的自然漫射光，能够创造出一种柔和的空间效果。此外，白色PTFE膜反射了大部分太阳光，降低向结构物内的热传导。如果利用内部装修材料建成双重结构，可以提高冷热空调启动时的断热效果。

1.2 PVC膜材料

PVC膜材料基材布为聚酯纤维织布，涂敷聚氯乙烯树脂（PVC）而成。基布的材料及编织工艺决定了膜材的抗拉强度、抗撕裂强度等力学性能。涂敷层的PVC在一定程度上提高了膜材的防水、防火、透光和色老度、抗紫外线辐射等各项性能指标。此外，外涂层进行表面处理可进一步提高膜材的耐污、耐用性能，增加膜材的使用年限。

以往的PVC膜材，外涂层的表面处理通常使用丙烯酸（Acrylic），但丙烯酸在紫外线辐射下，自身的化学稳定性不够，耐久性和自洁性较差，所以一般适用于临时建筑或者使用年限要求不高的膜工程。在此基础上，膜材制造商在外涂层的表面处理上使用了PVDF和聚氟乙烯（PVF），其中PVDF是PVC膜材主要的表面处理方式。PVDF的使用，提高了PVC膜材在自洁性、抗老化性、耐污性及耐久性，而PVDF膜材也迅速成为了PVC膜材的主导产品。

1.3 膜材优缺点对比

第一代PVDF膜材多为顶面涂敷100PVDF，底面涂敷Acrylic的单面PVDF涂层的结构方式。此膜材侧重于膜材顶面的保护，但缺乏对膜材底面的保护，各种污染物、水蒸汽等会首先侵蚀性能较差的内表层，使其老化、变质甚至脱落。这些缺点在海洋馆、游泳馆、加油站、收费站等膜建筑中表现得尤为明显。所以，对于一些要求较高的膜结构建筑，仅有一面PVDF自洁涂层的膜材是难以胜任的。

第二代PVDF膜材具有独特的双面PVDF自洁涂层，具双重保护作用，很好地解决了膜材底面对灰尘的吸附问题，在自洁性、抗老化性以及保温隔热性等方面都有较大提高。

2 新型膜材

2.1 ETFE膜材

ETFE（Ethylene-tetra fluoro ethylene）是乙烯-四氟乙烯共聚物，常用于体育场馆、温室建筑中。P类膜材是在聚酯酸纤维基布上涂敷PVC，G类膜材是在玻璃纤维基布上涂敷PTFE，而ETFE膜材没有纤维基布，仅是ETFE薄片。

ETFE膜材的优点是抗污染能力、抗紫外线能力较强，透光率高（比玻璃还大，达到95%以上）。缺点是抗拉强度、抗撕裂强度偏低，而且在受力状况下应变较复杂，一般采用气囊形式应用于骨架式膜结构中。“水立方”就采用了ETFE膜材。

2.2 EPTFE

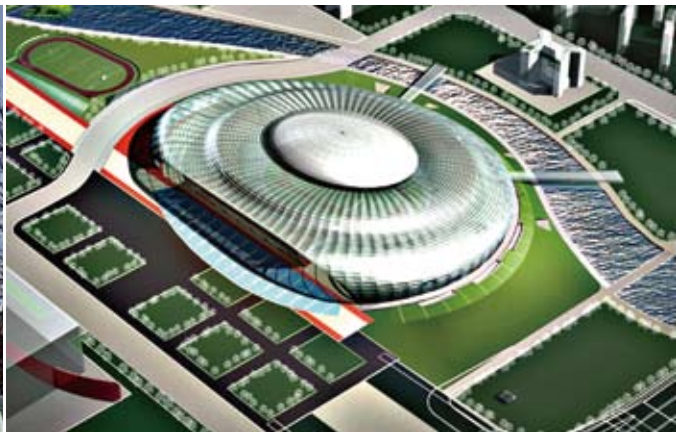
ORE公司目前研制了一种膜材产品EPTFE，称之为Tenara。这种产品基本解决了目前膜材的大多数缺点。首先，他们把EPTFE分割成纤维，用这些纤维织成膜材的基布，然后在其上下表面涂敷EPTFE，这种材料有很高的使用寿命、优秀的阻燃能力、抗拉强度和柔软性，防水性较好，可以用GORE公司发明的一种胶带进行连接。唯一的缺点是价格昂贵，与G类膜材价格相当，目前还未大面积推广。

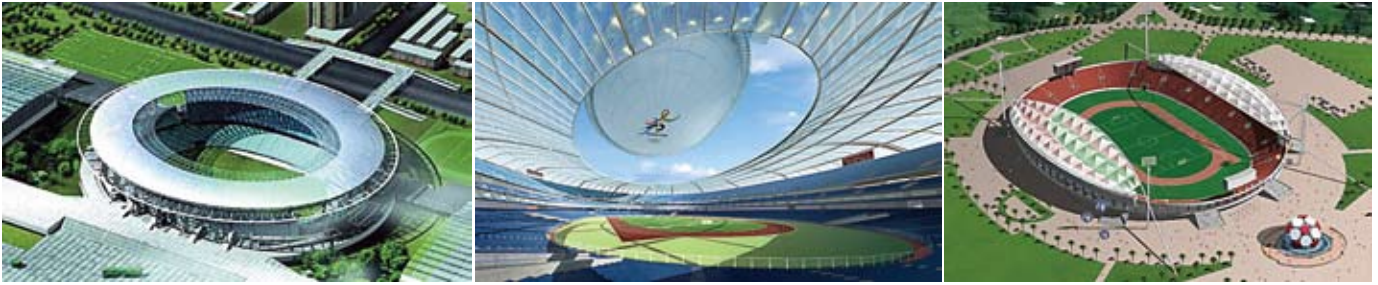
3 膜结构创造个性空间

有些建筑师由于对膜构技术缺乏了解，仍采用一些传统的结构形式，不得已而放弃某些灵感；有些建筑师没有真正了解膜构技术，仅凭自己的想象来构筑膜结构的“空中楼阁”，以至结构受力不合理，建筑造价成倍增加。实际上，对一些新的技术，只要认真探索，就能使创作思路更为灵活，让技术去激发自己的创作灵感，创造个性化的空间。

3.1 功能要求与基本类型

对于能进行国际赛事的正规体育场，均要求在观众席的设计上考虑采用篷盖系统。采用篷盖系统不仅可以提高建筑遮风挡雨和遮阳的能力，而且对场内声、光、电系统的设置也带来方便。常用的篷盖方式，从建筑形态上看来可以分为以下几种：（1）环绕式：对观众席整体进行全部覆盖，篷盖体系自然形成连续的环状整体，有对称与不对称两种方式，例如青岛、芜湖体育场。（2）分段式：只对观众席的主要部分——东西看台加以覆盖，篷盖体系不形成连续整体，分为相对独立的若干片段，例如义乌、烟台体育场。（3）复合式：上述两方式的复合运用，一般在





较为特殊的情况下采用，例如芜湖体育场、武汉体育场。

(4) 开启式：赛场上空为可开启或平移的活动屋面，根据使用要求打开或关闭，例如蒙特利尔体育场。无论采用何种方式，篷盖的存在都给环绕式灯光及音响系统的布置带来了方便，使场内灯光及音响的设计方式有了更多的选择，特别是观众席的观看条件有了很大改善。

3.2 方式选择与结构体系的综合运用

除了传统的钢筋混凝土结构、钢结构之外，目前用于大跨度空间结构体系的最佳方式就是索膜结构。索、膜与支撑体系整体共同工作，膜不再是简单的覆盖材料，而是参与整体工作的结构媒介；索也不是简单的拉接件，而是与膜共同参与整体预应力系统的必要环节。此种体系的结构效率很高，可以工厂预制，加工质量易控制；建筑形象限制较小，极具时代感；出挑长度对整体费用影响不大，适用于大型、超大型体育场馆。缺点是对下部结构的反力较大，给设计增加一定难度。

索膜体系最大的优势是膜材料不是作为一种材料，而是作为一种体系、一种新的建造方法而存在的。所以，索膜建筑的形态选择与结构方式的选择是密不可分的。建筑师进行建筑设计时，应该顺应所选方式的内在规律，体现它的优势，强调它的特点。在进行方式选择时，重要的不是材料，而是在满足解决功能和使用要求的前提下，对形态和体系的综合选用。

3.2.1 抵抗不均匀荷载与变形的能力

索膜结构体系具有极强的抵抗不均匀荷载和变形的能力，特别是在较大的不均匀荷载作用下，其整体预应力系统比其它体系都更具有抵抗能力。索膜建筑自身的构造特点也利于对不均匀大荷载的抵抗，如膜材的焊缝实际上起

着横向加劲肋的作用，适当地加密和加宽焊缝宽度能大大加强膜材的局部抵抗能力。

3.2.2 对恶劣气候条件的适应性

索膜结构体系对一些恶劣的气候和天气有较大的适应性，主要体现在风、雪和尘土上。

(1) 大风：索膜结构体系是一种可承受大变形的柔性体系，具有很好的抗风能力。进行体系的结构分析时，各方向风载和各种不同工况的组合，是必须考虑的问题。可以说，最不利风载工况的设计计算与分析是索膜结构体系设计时最重要的考虑因素。

(2) 大雪：国内荷载规范对各地雪荷载有明确的规定，设计中应考虑雪载的不均匀分布问题。在构造上采取一些必要的辅助措施也是有益的，例如在特大雪载区域，适当加大整体坡度也是十分有效的方法。

(3) 尘沙与污染：合理选择膜材料种类是避免或减轻尘沙或其它污染的有效方法。PTFE或其它氟类材料具有较好的抗污染和自洁功能，PVC类材料的表面涂层是增强材料抗污染能力的关键，目前常用的有Tedlar、PVDF及Acrylic等，其中Tedlar涂层为最佳。

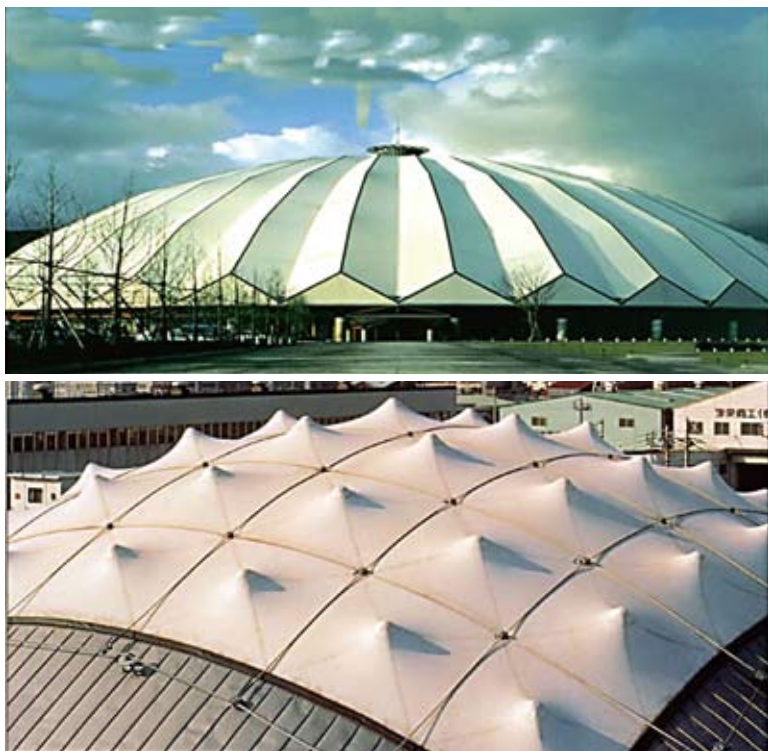
3.2.3 排水与防水

索膜建筑体系因其构造特点，具有较好的防水能力，在合理的构造设计和良好的加工技术条件下，一般没有渗漏隐患。该体系的排水坡度要求大于其它类型的建筑，设计时必须加以注意。重点部位的防水节点处理，应考虑各类材料的不同特点，必要时应作材料的相容性试验。

3.2.4 日常维护和使用寿命

索膜建筑体系被誉为免维护建筑，在长期使用过程中基本无需大量的维护工作（钢结构部分除外），可节省大





建造方式	授盖材料	材料价格	综合造价	用钢量	维护费用	使用年限
索膜 1	PTFE	50 美元/m ²	2000 元/m ²	70 公斤/m ²	极小	25—50 年
索膜 2	PVC+涂层	20 美元/m ²	1500 元/m ²	70 公斤/m ²	较小	20 年以上
钢结构 1	镀铝锌板	200 元/m ²	1500 元/m ²	120 公斤/m ²	较大	20 年以上
钢结构 2	铝合金板材	700 元/m ²	2000 元/m ²	120 公斤/m ²	较大	20 年以上

量资金。PTFE等氟类材料的使用寿命在25年以上，实际上可达到40–50年甚或更长，PVC类膜材料的使用寿命在10–20年左右。

3.3 防火与防雷

国外一些国家的消防检测结论为：PVC类材料为阻燃型，PTFE类为不燃型。目前在国内的消防检测部门，对PTFE甚或ETFE出具的检测报告均为阻燃B1级，而在国外一些国家的检测结果却为A级。究其原因，我国沿用的消防检测方法，基本上是参照欧洲的思路，即主要注重燃烧时的气体排放，日本和美国则注重燃烧时间。所以，不同的国家对膜材料的检测有不同的结论。我国目前沿用的办法，对膜材料是不适合的。在防雷方面，引下线可利用钢结构或钢索等，若采用销接方式应注意销孔处的跨接线。

3.4 工程造价

使用不同的覆盖材料，其造价也会有所差别，下表为建筑费用的直接对比与综合分析（以带有异型篷盖的四万人体体育场为例）。

结语

膜结构能够广泛地应用于建筑的各个领域：1）需要自然采光的公共建筑，如体育馆、训练房、游泳馆、展览厅等，膜材的透光性能很好地解决采光问题，节约能源；2）轻巧而美观的膜结构用于敞开或半敞开建筑物的遮蔽屋盖尤为适宜。近年来，在足球、田径等比赛的体育场中，越来越多的看台挑篷都采用膜结构。国外很多露天剧院的舞台、博览会的展览馆也都以膜材作为顶盖。在我国广大地区的农贸市场也可大力推广膜结构；3）各种类型的生产厂房与仓库，其尺寸一般比较规则，可采用膜结构并加以定型化、商品化，并且易于运输和拆装，对于紧急救灾或灾后重建也十分有用；4）在改造原有建筑物时，可以利用膜结构自重轻的优点，用其来代替传统的屋盖，连接毗邻的房屋。由于膜结构所独有的特点，它将会以更大的规模增长，通过其发展，中国与世界的交流和合作也将不断扩大。