

膜结构的裁剪设计与加工制作

胥传喜 陈楚鑫 武岳
(RIGHT TECH (S) PTE LTD) (哈尔滨工业大学)

提要 介绍了膜结构加工制作阶段的工作内容，包括裁剪设计的原则、裁剪方法、膜材的连接、裁剪下料图及加工图、膜面加工制作的工序与质量要求等。

关键词 膜结构 裁剪 应变补偿 连接 加工

Cutting Pattern Generation and Fabrication of Membrane Structure

Xu Chuanxi Stanley Tan C.S. Wu Yue
(RIGHT TECH (S) PTE LTD) (Harbin Institute of Technology)

Abstract The paper has introduced the work content of manufacture stage for the membrane structure, including the design principle for seamline layout, patterning method, the membrane material connection, the shop drawing, the fabrication and the quality requirement.

Key words membrane structure patterning strain compensation joint fabrication

除找形外，膜结构设计的另一大特点是需要进行裁剪设计，即在完成找形、荷载分析和构件设计（含膜材、索、支承钢结构的设计等）并获批准后，要购买膜材料，进行裁剪设计，加工制作膜面。本文将就膜结构加工制作阶段的工作内容，如裁剪设计的原则、裁剪方法、膜材连接方法与接缝设计、裁剪加工图、膜面制作工序与质量要求等，展开论述。

1. 膜结构裁剪设计的目的及一般原则

1. 裁剪设计的目的

膜结构建成后的膜面是预应力作用下的空间曲面。裁剪设计（或者称裁剪分析）的目的是用无应力、平面状态并有幅宽限制的膜材（卷材）去制作膜面，使这个膜面在张拉后符合找形所得的形状和应力分布，且膜面接缝布置美观，膜材用料节省。

2. 裁剪设计的内容与步骤

膜结构裁剪设计的内容与步骤如下：（1）在找形得到的空间膜面上布置裁剪线，将空间膜面划分成若干个空间膜条；（2）将空间膜条展开为平面膜片；（3）释放预应力，对平面膜片进行应变补偿（即考虑预应力释放后膜材的弹性回缩）；（4）根据以上结果，加上膜片接缝处及边角处都放量，得到平面裁剪片；给出膜材的下料图及膜面的加工图。

3. 裁剪线的布置原则

裁剪线是指空间膜曲面上膜条与膜条之间的连接线，也就是裁剪片与裁剪片拼接时的接缝。裁剪线的布置应遵循以下原则：（1）美观，有良好的视觉效果；（2）受力性能良好，通常将裁剪线布置成与膜材的经向一致，沿膜面主应力方向；（3）便于加工，避免裁剪线过于集中，以方便边角处理；（4）节省，即节省膜材且使接缝总长度尽可能地短。

通常，裁剪线的方向就是膜材的经向，即膜材的长度方向。习惯上，圆锥形（伞形）膜面的裁剪线按经向布置，马鞍形膜面的裁剪线沿平行于高点对角线的方向布置，拱支承形膜面的裁剪线多垂直于拱的跨度方向，而脊谷式膜面的裁剪线多平行于脊谷索布置；刚性边界的膜结构，裁剪线多平行于边界支承构件，如图 1 所示。设计实际工程时，不要墨守陈规。适度地改变习惯做法，有时会收到意想不到的新奇效果，参见图 2。

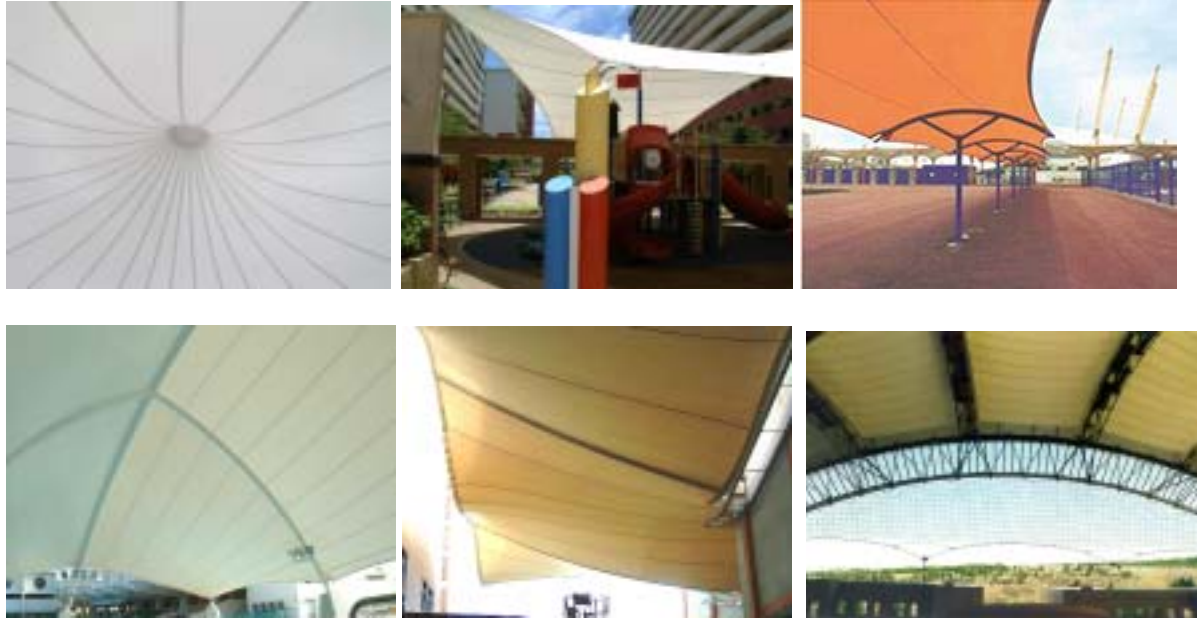


图 1 各种外形膜面裁剪线的习惯布置方式



图 2 裁剪线的其他布置方式

4. 裁剪的应变补偿

膜材裁剪时的应变补偿值（预缩量）受许多因素影响，如膜材本身的双轴拉伸性能、徐变性能、膜面应力水平、裁剪片的形状及材料经纬方向、结构尺度及支承方式、膜面热合时的收缩情况、成型时的张拉难易程度等等。应变补偿常以补偿率的形式实施。严格说来，需根据膜材在特定应力比及应力水平下的双轴拉伸试验结果，结合上述诸因素综合确定应变补偿率。

需要注意的是，膜材经、纬向的应变补偿率通常是不同的，且不同的应力分区也应采用不同的补偿率。大体上来说，常用聚氯乙烯（PVC）涂层覆盖聚酯织物的应变补偿率在 0.5% 至 0.8%；而常用聚四氟乙烯（PTFE）涂层覆盖玻璃纤维膜材的应变补偿率经向为 0.5% 至 1.0%，纬向在 1.0% 至 3.0% 之间。

2. 裁剪设计的方法

膜结构的裁剪分析最初是从量测物理模型开始的，即按一定比例制作一个所期望的结构曲面模型，用一定宽度的纸、布或其他柔性材料剪成相应的形状粘贴到模型上，经反复修改，直到完

全覆盖整个模型。将每个粘贴条揭下按比例放大后，再考虑应变补偿，即可得膜材的下料图。

对于简单、规则的可展曲面，可直接利用几何方法将其展开并得到下料图。而对于复杂曲面，需通过计算机方法确定。目前常用的裁剪方法有测地线裁剪法 (Geodesic Line Method) 及平面相交裁剪法等，现分别介绍如下。

1. 测地线裁剪法

测地线原是个大地测量学中的概念，又称短程线，其通常被理解为：经过曲面上两点并存在于曲面上的最短的曲线。可展曲面上的测地线在曲面展开成平面后为直线；不可展曲面上的测地线在展开后接近直线。测地线裁剪法，就是以测地线来剖分空间膜面。求曲面上的测地线的问题，实际上是一个求曲面上两点间曲线长度之泛函极值的问题。

用测地线概念作膜结构裁剪分析的问题之所以复杂，是因为膜结构几何外形的新奇多变。通过找形分析，所得到的是膜面上一些离散点的空间坐标，而不是空间曲面的方程，因而也就无法得到曲面上两点间曲线长度的泛函的显式。通常采用分段线性化的方法来处理这一问题，即用求极值确定测地线上的若干点，再用线性插值的方法求中间点，从而求得测地线。

对于一些呈球面特征的曲面或曲面区域，两端点（极点）间的测地线有无数条，即测地线并不唯一，这样就很难控制膜条的最大宽度。文献^[1]提出了在两端点间再指定一个中间点的准测地线 (Semi-Geodesic Line) 方法并已经用于膜结构设计软件 EASY 中。

测地线裁剪法的好处是接缝最短、用料较省，但裁剪线的分布及材料经、纬方向的考虑不易把握。实际应用中，在将由两条测地线及边界围成的空间膜条展开成平面时，需指定其中的一条测地线为直线。

2. 平面相交裁剪法

平面相交裁剪法是用一组平面（通常用竖向平面）去截取形所得到的曲面，将膜面分成一个个的“香蕉状”的膜条，以平面与空间曲面的交线作为裁剪线。

平面相交裁剪法常用于对称膜面的裁剪，所得到的裁剪线比较整齐、美观。

3. 膜材的连接方法及接缝设计

1. 膜材的连接方法

膜材的连接方法有机械连接、缝纫连接、热合连接等。

机械连接简称夹接，是在两个膜片的边缘埋绳，并在其重叠位置用机械夹板将膜片连接在一起，见图 3。机械连接常用于大中型结构膜面与膜面的现场拼接。

缝纫连接是用缝纫机将膜片缝在一起。采用缝纫连接时，需要注意选择缝纫用线的强度和耐久性。缝纫连接通常用于无防水要求的网状膜材结构中，或者是与热合连接同时应用在 PVC 涂覆聚酯织物的边角处理上。

热合连接又称焊接，是通过让膜材接触加热物体、或通过高频电磁波、或向膜材吹热空气等手法，使膜材获得相应的热量从而使织物上的涂层熔融，然后施加压力并冷却使膜片结合在一起。热合连接是最常用的膜材连接方法。对 PVC 膜材料，多用高频焊接，局部修补可用热风焊接；PTFE 及乙烯-四氟乙烯共聚物 (ETFE) 膜材则采用接触加热物体的高温热合方法。接缝可以是搭接，也可以是采用“背贴条”的拼接，参见图 5 所示。PTFE 膜材焊接时，需要在两层 PTFE 膜材间放置氟化乙丙烯 (FEP) 薄膜条。有关的热合设备，参见图 20 及图 21。



图 3 膜材的机械连接

2. 接缝设计

接缝设计的内容包括选择膜材的连接方法、确定接缝的宽度及方向（接缝处膜片的位置关系）、提出接缝的质量要求及测试标准等等。

膜材连接方法的选择要结合结构体量及膜面应力大小、所用膜材种类、外观要求等综合考虑。当采用热合方式时，还需确定是用搭接还是拼接。

接缝的宽度主要取决于接缝处膜面的应力大小。当采用焊接连接时，通常 PVC 膜材及 PTFE 膜材的搭接接缝宽度在 40mm 至 75mm；体量较小且膜面应力水平较低的小品中也有采用 25 mm 宽度接缝的；ETFE 膜材的焊接接缝宽度一般为 10 mm。当采用有“背贴条”的拼接接缝时，总的接缝宽度是搭接接缝的两倍。

设计时尚需指定接缝的方向，即接缝处膜片的位置关系，这主要是出于防止漏水及防止积灰等方面的考虑，以顺水流方向为原则。

加工好的接缝要求平整、光滑。热合接缝无漏焊、脱离现象，无明显的热熔斑痕及放电焦斑；缝合接缝要针距均匀、无断线跳线等现象。热合接缝的抗拉强度应不低于其母材抗拉强度的 80%，缝纫接缝的抗拉强度通常要求不低于其母材抗拉强度的 70%。

4. 裁剪加工图及特殊部位的经验处理

1. 裁剪加工图

裁剪加工图包括膜片下料图、膜材排版图、膜面加工图三方面。膜片下料图是指考虑了应变补偿后的平面膜片图，亦即各裁剪片的平面坐标及经线方向；膜材排版图是指各裁剪片在特定幅宽膜材上的排列图，在考虑了边角放量及经纬方向后，排列尽可能紧凑以节约膜材；膜面加工图就是各裁剪片的拼装图。在加工图上，除了注明各裁剪片及接缝位置外，还需给出接缝及边角处理方式和放量、接缝方向、补强位置及范围、膜材型号及规格、接缝检测要求、包装时折叠的顺序及方向标识要求等等，参见图 4 至图 7。如采用自动放样及自动下料，膜片下料图以数据文件形式提供。

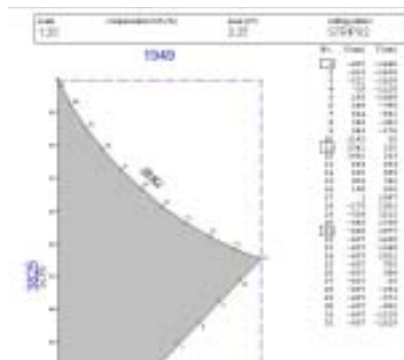


图 4 裁剪片的平面坐标

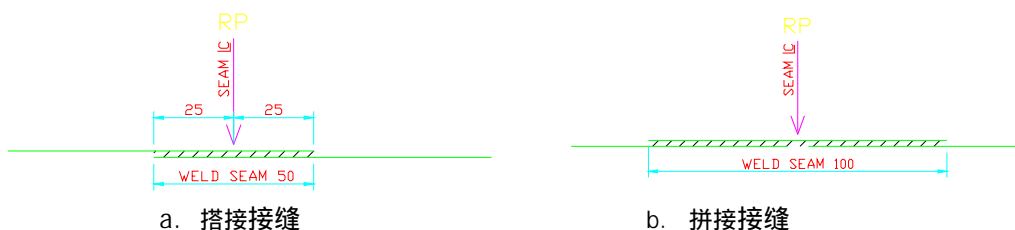


图 5 典型接缝构造

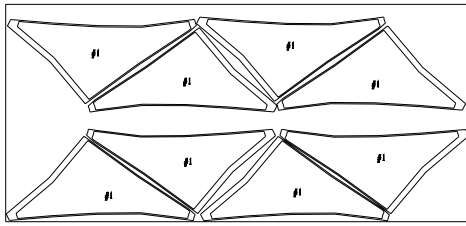


图 6 膜材排版图

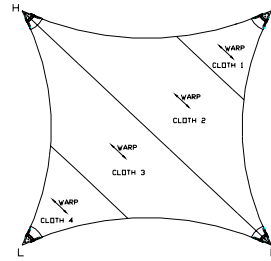


图 7 膜面拼装图

2. 特殊部位的经验处理

(1) 边角处理

放量 在膜片与膜片的连接处，因接缝需要放量；在柔性边界的膜结构中，为方便穿钢索，常将膜边放出一定的余量做成索套 (cable cuff)，俗称“裤子”；在膜节点板处以及刚性边界膜结构的边界处，常采用“绳边” (rope edge)，也需在裁剪基准线外加上适当余量以方便埋绳。图 8 和图 9 是典型的边角处理方式及放量情况。

挖弧及补强层 在膜角点，一般用膜节点板并通过连接配件连接膜面与支承结构。节点板处的膜面要作“挖弧”处理；膜角处及锥形膜面的顶部等应力比较集中，常用两层或三层膜热合在一起，即作“补强层”处理，参见图 10 及图 11。

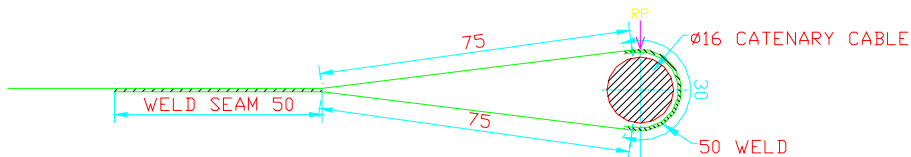


图 8 索套做法及其放量

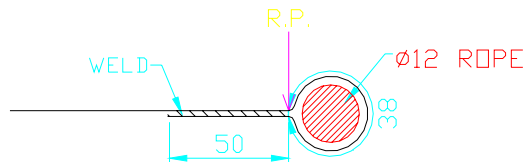


图 9 绳边做法及其放量



图 10 膜角挖弧处理

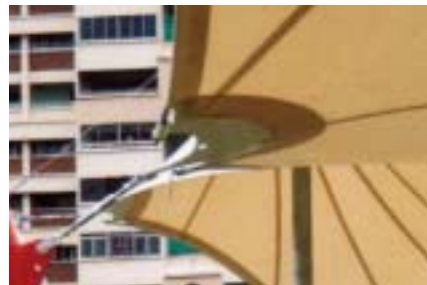


图 11 膜节点板及补强层

(2) 特殊部位应变补偿率的调整

如前所述，尽管影响膜材裁剪应变补偿值的因素很多，但实用上大多采用百分率补偿法；计算程序一般也用输入的具体百分率对膜材的经纬向进行预缩。由于膜面上可能存在不同的应力分区，且各分区及各部位在安装时的张拉难易程度不一，对特定部位，需对其应变补偿率作出调整。

对于外形为圆锥形的膜结构，在帽圈处常用圆钢板或圆环与膜面相连，安装时通常也是先将膜面固定在钢板或圆环上再顶升，因而帽圈处膜的环向应变补偿值几乎为零。同样，靠近边索处的膜在沿索的方向很难张拉，应变补偿率也需作出调整。在刚性边界的膜结构中，中间部位的膜比较容易张拉，而靠近边界处的膜张拉就比较困难，边角处的应变补偿率也宜作出适当的调整。

(3) 方便安装及考虑防水或美观的一些构造

考虑到安装的方便，除了将膜面进行必要的分块之外，还可以在膜面上特定部位焊接一些“搭扣”（lifting tape），以方便吊装及张拉，在张拉完成后再将其剪去。图 12 第一道接缝处为方便吊装而焊接的连续搭扣即为一例。出于防水或美观的考虑，也可在膜面适当部位焊接一些用于覆盖用的膜片，如图 13。



图 12 方便吊装而焊接的连续搭扣



图 13 用于防水或美观的覆盖膜片

5. 膜面加工制作工序与质量要求

1. 膜面加工制作的工序

通常，膜面的加工制作包含以下工序：（1）准备工作，包括技术准备、场地及设备准备、膜材料进场检测等；（2）放样、排版与下料；（3）热合试验；（4）热合加工；（5）边角处理；（6）清洗、包装。

2. 膜面加工的技术准备及场地要求

膜面加工的技术准备工作，主要是阅读、领会设计图纸（包括结构外形图及膜面下料、加工图），查看相关数据文件；如为人工下料，需对制作人员进行技术交底。

加工场地需平整、无尘，温度、湿度适宜；加工设备保养良好。

3. 膜材的进场检测

膜材的进场检测主要包括外观检查和物理性能检测两方面。外观检查主要是检查膜面色泽是否一致、有无斑点、小孔等，一般通过目测结合专用灯箱进行，参见图 14 及图 15。待用膜材的品牌与型号应与设计图纸一致，并为同一批号（不同批号的膜材色泽会有差异）；要求无直径 2 mm 以上的油污、瑕疵，无直径 1 mm 以上的针孔，色泽均匀一致。

物理性能检测主要是检测厚度、重量、抗拉强度及撕裂强度等，检测结果应不低于膜材性能表所列指标。由于各国的检测方法不一致，检测结果也会有出入。膜材进场时可对各项技术指标进行抽检，并检查膜材出厂时的材料检测报告和质量保证书。当抽检数据与出厂检测报告出入较大时，应通知膜材供应商并取样送权威检测机构检测、鉴定。



图 14 膜材进场时的外观检查



图 15 灯箱检测

6. 放样、排版与下料

放样有自动放样与手工放样之分，取决于加工厂商的设备情况。自动放样是将包含各膜片 X、Y 坐标的数据文件输入电脑，经排版、优化后打印在膜布上或直接由电脑控制的切割机将膜布裁剪成片。当采用手工放样时，通常要先做出 1:1 的纸样，再将纸样放置在膜布上排版，最后划线、下料，参见图 16 至图 19。手工放样、下料的精度应控制在 ± 2 mm 以内。



图 16 自动放样



图 17 手工放样



图 18 自动下料



图 19 手工下料

7. 热合试验与焊接加工

在正式进行焊接加工前，需进行热合试验以便为热合加工提供参数依据。试验样条的抗拉强度应不低于其母材强度的 80%。在焊接加工过程中，也需定时试验并记录结果，以便随着环境温、湿度的变化及加工部位的不同，随时修正相关技术参数。

正式加工时，先将膜片在接缝处对齐，检查膜材的正反面及接缝顺序是否正确；清洁待焊区域；如为 PVC 膜材拼接接缝放置“背贴条”，如为 PTFE 膜材需在接缝处两层膜片间放置 EFP 条；根据热合试验所得到的参数进行加工。最后根据设计图纸对边角进行诸如埋绳、焊接穿钢索的“裤子” (cable cuff) 及补强处理。

热合时宜采用张拉焊接 (tension weld)，即要对待焊区域的膜材施加一定的预张力，以减小因热合造成的膜材收缩、改善张拉成型后焊缝处的应力状态。

图 20 及图 21 为一些常用的热合设备。



图 20 用于 PTFE 膜高温热合的设备



图 21 用于 PVC 膜材高频焊接的设备

5. 包装

设计者需根据施工现场及安装设备等情况，确定膜面的展开方向及折叠包装的顺序，加工好的膜面在两面清洗后，按指定要求进行折叠包装。为防止在膜表面留下明显折痕，PTFE 成品膜在折叠时应衬入圆纸筒，参见 22；ETFE 成品膜不能折叠，需放置在专用保护容器中。软质包装袋上应标识好展开方向，再加木箱包装以方便运输。



图 22 PTFE 膜折叠时衬入圆纸筒

6. 附件的设计与加工

与裁剪关系密切的附件设计主要包括用于膜角的膜节点板设计、连接件选用及边索长度的确定等等。

膜节点板的设计主要涉及形式、大小、角度、连接孔及安装孔的位置及大小、板厚、膜与节点板的连接方式以及边索与节点板的连接设计等内容。设计时，根据膜面形状及膜角处的应力大小确定其基本几何参数，验算抗拉强度、局部承压及焊缝长度等等，并由此计算连接件及边索长度。膜节点板应简洁、角度准确、传力顺畅。膜节点板常用钢板制作、热镀锌处理或以不锈钢材料制成。图 22 所示为几种常用的膜节点板形式。



图 22 几种常用的膜节点板形式

连接件的设计要保证节点有足够的转动自由度与张拉调节量，以适应膜面在风等外加荷载作用下的变形以及张拉和二次张拉的需要。连接件宜在不锈钢系列成品中选用，强度要满足设计要求（最小破断力的安全系数不小于 2.2）。

膜节点板的形式及尺寸确定后，将找形结果中参考点至参考点间的边界曲线长度减去两端索头至找形参考点的距离，即可求得边索的长度。

7. 结语

膜结构裁剪设计的内容包括布置裁剪线、计算各裁剪片的坐标、设计接缝、进行膜节点板等细部设计以及加工制作工艺设计等。裁剪设计更偏重于艺术和工艺，在更大程度上依赖于设计者的经验。

参考文献

[1] Grundig, L., Ekert, L. and Moncrieff, E., Geodesic and Semi-Geodesic Line Algorithms for Cutting Pattern Generation of Architectural Textile Structures[A], in Lan, T.T.,(Ed.), Proc. Asia-Pacific on Shell and Spatial Structures[C], Beijing, 1996