

膜结构的施工安装与使用维护

胥传喜 陈楚鑫

(RIGHT TECH (S) PTE LTD)

提要 介绍了膜结构施工安装及使用维护阶段的工作内容和相关知识，包括施工安装的一般过程及注意事项，不同类型膜结构的安装方法及实例，膜结构的使用注意事项及维护、修补方法等等。

关键词 膜结构 施工安装 张拉 维护

Installation and Maintenance of Membrane Structure

Xu Chuanxi Stanley Tan C.S.

(RIGHT TECH (S) PTE LTD)

Abstract The paper has introduced the work content of installation and maintenance stage for the membrane structure, including the installation process, installation methods which were presented by the example projects, and the maintenance and repair methods.

Key words membrane structure installation tensioning maintenance

1. 膜结构的施工技术设计

一项膜结构工程的设计能否得以完美实施，施工安装起着关键作用。由于膜结构是以柔性材料为主要受力构件的表面张力结构，安装时的张拉顺序、预张力的施加方式及量级等等都会影响到曲面的最终形状、影响到结构的刚度和稳定性。如果说膜结构的全过程分析包括形态分析（找形）、荷载态分析以及裁剪分析的话^[1]，从工程设计的角度来看，膜结构的设计全过程还应在形状设计、构件设计的基础上加上细部连接设计、裁剪设计和施工技术设计。在这里，施工技术设计主要是为膜结构的安装提供技术准备。

膜结构的施工技术设计需要解决以下问题：

1. 明确成品膜在安装现场的展开方向；相应地，膜在工厂加工后的折叠包装方向要与此相对应；
2. 吊装或提升的方法；安装所需的机械设备；技术人员及安装工人的分工安排；
3. 预张力的施加方式、张拉顺序、加载量级；
4. 与土建、设备、装修等工种在作业现场的协调。

施工技术设计应尽可能周详，中、大型工程要选择典型单元进行试安装，以便及早发现问题，寻求相应的解决方法，以减少正式安装时的现场耽搁，确保工期和安装、张拉的质量。

2. 膜结构的安装过程及注意事项

2.1 膜结构的安装过程

膜结构的施工安装过程大体如下：

1. 在基础工程或主体结构施工完成后，进行膜支承结构的安装，并完成局部补油漆、进行防火处理等；

2. 测量支承结构及连接节点的几何并与设计值比较，对找形结果进行必要的修正；按修正后的形状进行裁剪设计，加工制作膜面；如膜面先于支承结构完工已开始制作，应通过其他方案如更换连接件等规格等来纠正偏差；

3. 将加工好的膜成品按施工组织设计的要求折叠、包装，并做好标示；运输至安装现场；

4. 清理现场，在地面铺垫保护材料；向工人讲解工序及分工；展开膜面，进行如在膜面打孔、穿钢索、安装膜角节点板或膜夹板等准备工作；在支承结构上绑扎绳网以临时支承展开的膜面；

5. 准备工作就绪后，吊装机械就位，吊装并对角点作临时固定；

6. 逐步均衡张拉，给膜面施加预张力；

7. 对边角及有褶皱的区域进行局部张拉调节，并最终固定膜面及节点；完成雨水系统安装及防水覆盖等；

8. 清洗内外膜表面。

2.2 膜结构安装的注意事项

为提高安装张拉的质量、避免工程事故，膜结构在施工安装过程中需注意以下事项：

1. 要在支承结构的构件表面的油漆干后才开始安装膜面，以防止膜面因油漆而粘结在支承构件上、膜面受到污染，甚至因粘结造成局部应力集中导致膜面撕裂；

2. 吊装或提升膜面时，要特别注意膜面不要被尖锐物体刮破或划伤，对膜面提升过程中有可能接触到的突出部位要用柔软物体包住作为保护；

3. 吊装时要注意膜面的应力分布均匀，必要时可在膜上焊接连续的“吊装搭扣”，用两片钢板夹紧搭扣来吊装（参见图 6f）；焊接“吊装搭扣”时要注意其焊接的方向，以保证吊装时焊缝处是受拉、避免焊缝受剥离。吊装时的移动过程应缓慢、平稳，并有工人从不同角度以拉绳协助控制膜的移动；大面积膜面的吊装应选择晴朗无风的天气进行，国内从 2004 年 8 月 1 日开始施行的膜结构技术规程^[2]规定风力大于三级或气温低于 4 度时不宜进行安装；应尽可能用机械设备吊装，人工提升时要注意尽量少让膜面折叠、挤揉，以免在膜面上留下折痕；

4. 吊装就位后，要及时固定膜边角；当天不能完成张拉的，也要采取相应的安全措施，防止夜间大风或因降雨积水造成膜面撕裂；图 1 为一工程膜展开后突然下大雨，工人冒雨清除膜面积水的情景。已部分张拉尚未张紧的膜面也易积水，要及时清理，参见图 2。图 3 所示的膜结构为毡帽形（参见第六讲图 1），图示位置是雨水管的出口，虽然还未安装，收工前要先在此处开洞，以便夜间下雨时雨水从此处流出。



图 1 冒雨清除膜面积水



图 2 清除尚未张紧膜面的积水



图 3 收工前在雨水管出口处开洞

5. 整个安装过程要严格按照施工技术设计进行，做到有条不紊；作业过程中安装指导人员要经常检查整个膜面，密切监控膜面的应力情况，防止因局部应力集中或超张拉造成意外；高空作业，要确保人身安全。

3. 膜结构的施工安装方法及实例

膜结构的安装方法因结构类型和场地情况的不同而有所区别。对于刚性边界的膜结构，可采用就近地面张拉、连同边界构件一起吊装的方法；也可采用现场空中拼装、空中张拉的方法。柔性边界的膜结构，一般都采用现场吊装就位后再逐步张拉的安装方法。下面通过三个实例分别加以说明。

1. 异位张拉吊装法

一刚性边界的膜结构，采用就近地面张拉、连同边界构件一起吊装的方法进行安装，其安装过程如图4所示。

异位张拉吊装法的张拉过程在地面完成，操作方便、省时省力；但吊装时需要大型起重设备，且需要有相应的作业空间。



a. 就近地面张拉



b. 吊装单元



c. 就位固定



d. 完工后的情形

图4 刚性边界膜结构异位张拉吊装

2. 空中拼装张拉法

某刚性边界膜结构工程，建于两栋商业建筑之间。支承结构从一栋建筑物的立面上挑出，最大挑出距离为16 m。受工地条件限制，如将结构拼装成单元后，将无法起吊；故采用空中拼装、空中张拉法。图5所示为其安装作业过程，包括：安装支承结构；安装膜夹板；布置绳网；临时固定膜边角；张拉膜面；调整边角褶皱；清洗膜面；内部装修等。



a. 安装支承结构



b. 安装膜夹板



c. 布置绳网



d. 临时固定膜边角



e. 张拉膜面



f. 调整边角褶皱



g. 清洗膜面



h. 完成装修后的内景

图 5 刚性边界膜结构空中拼装张拉

3. 吊装就位逐步张拉法

图 6 所示的是一个刚架支承柔性边界膜结构的安装过程。该工程为一跳水池的屋盖，膜面为单体、面积 1500 m^2 ，支承结构为拱形骨架。采用两台 100 t 吊车同步起吊，待膜面吊装就位后再逐步张拉边缘钢索和膜节点板，给膜面施加预张力。其安装张拉过程包括：支承结构吊装；膜展开准备；同步起吊；吊装就位；临时固定；张拉、调整；清洗、完工交付等。



a. 支承结构吊装



b. 膜展开准备



c. 两台吊车同步起吊



d. 吊装就位



e. 临时固定



f. 有待剪去的吊装搭扣



g. 张拉、调整



h. 完工后的情形

图6 刚架支承柔性边界膜结构吊装就位张拉

膜结构安装时常用的机械设备主要有用于吊装的移动式吊车（参见图 6b 及 6c）、用于工人空中作业的发动机驱动自行式曲臂型高空作业车(boom-lift, 参见图 5a)等；常用的张拉设备则有用于柔性边界膜结构角点张拉的手葫芦（见图 7a）、张拉束带（见图 7b），以及用于刚性边界膜结构边界张拉的夹具（见图 8a）及用角钢制成的特制张拉器具（见图 8b）等。



a. 手葫芦



b. 张拉束带

图7 用于柔性边界膜结构角点张拉的设备



a. 夹具



b. 特制张拉器具

图8 用于刚性边界膜结构边界张拉的设备

4. 膜结构的使用维护

在膜面张拉完成并清洗干净后，即可验收、交付使用。在交付的同时，膜结构承建商需要向业主提供使用、维护手册及质量保证书。使用维护手册中要详细列明工程概况、设计工况参数、膜材及其他材料的性能指标、使用注意事项、检修及清洗的周期及方法、修补工具、修补材料和修补方法等等，必要时需提供备用的修补材料。

膜结构在使用过程中，禁止接触化学溶剂；不允许有火源、热源靠近膜面；要防止利器割破、硬物蹭伤；禁止在膜面上堆放物件；膜面不允许上人。

膜结构的检查与维护宜在每年的雨季及雪季之前各进行一次；如遇大风、暴雨暴雪等恶劣天气过程，也应及时进行检查。检查的内容包括查看膜面是否有破损、涂层是否有脱落（主要是针对 PVC 膜材）、膜面的接缝是否完好；角点的连接件是否有磨损、松动或锈蚀现象；排水系统是否畅通；膜面是否有松弛；

周围是否有其它物体或构筑物会影响到膜结构的安全，等等。使用 PVC 膜材的膜结构，在交付使用半年左右应进行二次张拉，以给膜面补充预张力，抵消因膜材料的蠕变而造成的膜面张力损失。

膜结构的检查维护工作一般由专业膜结构公司会同业主共同进行。检查时要作好记录并清洗膜面，发现问题要及时修补。

5. 膜面破损的修补

在安装及使用过程中膜面可能因各种原因造成破损或破坏，如膜面加工时的漏焊或焊缝脱落；安装时在地面或其它构筑物上拖动的磨损、尖锐物体划伤或刺破、吊装或张拉时的意外撕裂；使用过程中高空坠物击破或人为破坏，等等。这些情况一旦发生，需及时修复。

视膜面破损的具体情况不同，修复工作可分为以下几种方式：

1. 如果仅仅是局部膜材的表面涂层磨损、基布织物的纤维完好，可用高性能透明胶粘贴或热合在磨损区域，如图 9 所示。

2. 如果膜面破坏范围长度小于 50mm，剪一椭圆形或圆形膜布，作为补强层焊接在破坏区域的上面，参见图 10。



图 9 表面涂层磨损的修补



图 10 膜面小孔洞的修补

3. 如果膜面破坏范围长度超过 50mm 但小于 300 mm，准备一长度和宽度比破坏范围大 150mm 的膜条，作为补强层焊接在破坏区域的膜面上。

4. 如果膜面破坏部分超过 300mm 长，需将整个破坏的单元拆下运回工厂修补或更换整个单元。

上述 1~3 的情况是现场修补，具体修补方法随所用膜材种类而定。

PVC 涂层覆盖的膜材料可采用热风机修补；将待补区域清理干净、铺放平整，补丁铺在待焊面上，用热风将膜材表面的 PVC 涂层融化，再将补丁与下层膜用小滚轮压紧使其牢固地连在一起。图 11 是用于 PVC 膜材现场修补的热风机，使用时用锡纸将出风口做成鸭嘴形以控制风流。图 12 所示为现场修补 PVC 膜材脱落焊缝的情况。



图 11 用于 PVC 膜材修补的热风机



图 12 现场修补 PVC 膜材脱落焊缝

对 PTFE 涂层覆盖的膜材，需在补丁与原破坏的膜材间加一层氟化乙丙烯（FEP）薄膜，参见图 13；再用专用手提焊接设备（类似于烙铁，图 14）压紧在补丁上，用高温使 FEP 薄膜融化从而将补丁焊接在膜面上。图 15 所示为某 PTFE 膜材工程膜面破损的现场修补实例。



图 13 氟化乙丙烯（FEP）薄膜



图 14 用于 PTFE 修补的手提焊接设备



图 15 PTFE 膜材破损的现场修补

具体操作时要注意加热温度和加热时间的把握，既要使待焊膜材的表面涂层或 FEP 薄膜充分融化从而能牢固粘在一起，又要防止因过热而烧焦膜材。

修补的补丁一般补在外表面。在气候潮湿的地区，应在内外表面分别焊接同样大小的补丁，以防修补区域因潮湿发霉而产生污染。

6. 结 语

在膜结构的设计、建造、使用和维护过程中，施工安装和维护占有重要的地位；其中施工技术设计更是与结构体系、节点处理、膜面加工后的折叠方式、吊装方式等密切相关。施工技术设计应作为膜结构设计整体过程中的一部分。

本文介绍了膜结构施工技术设计的内容；通过实例，叙述了膜结构安装的过程及方法、使用维护注意事项、膜面破损的修补方式及修补方法等，可供工程应用参考。

参考文献

- [1] 胥传喜．张力膜结构的全过程集成分析及其策略研究．空间结构，1998.11，第4卷，第4期，34-38。
- [2] 膜结构技术规程，中国计划出版社，2004