

# 刚性边界膜结构的特点及设计实例

胥传喜 陈楚鑫

(RIGHT TECH (S) PTE LTD)

**摘要** 刚性边界膜结构具有造型更为简洁、受工程场地约束少等特点，目前国内尚少见这类工程。文章结合具体工程，对刚性边界膜结构的设计要点、细部构造作了全面介绍；给出了一个设计实例以介绍这类膜结构工程的设计过程。

**关键词** 膜结构 刚性边界 设计 加工制作

## The Design of Rigid Edge Membrane Structure

Xu Chuanxi Stanley Tan C.S.

(RIGHT TECH (S) PTE LTD)

**Abstract** Rigid edge membrane structure has the characteristic of more succinct shape and less restrained by the project site condition; at present there are still rare this kind of project in China. The design considerations and the detailing of the rigid edge membrane structure have been presented in this article. An example was given to introduce the design process of this kind of membrane structure.

**Key words** membrane structure rigid edge design fabrication

刚性边界膜结构，是指边界为刚性构件的膜结构。相对于以索等柔性构件为边界的膜结构而言，刚性边界的膜结构具有造型更为简洁、受工程场地约束少等特点；但其造型受边界的影响更为明显，构件的加工及安装精度要求也更高，膜材的裁剪设计要更精确。刚性边界膜结构既可用于膜结构小品，也可应用于中、大型的膜结构工程，参见图 1。





图 1 刚性边界膜结构实例

本文结合具体工程实例，就刚性边界膜结构工程在设计、细部构造、加工及张拉安装中的特点等作一全面介绍。

## 1. 刚性边界膜结构的设计要点

### 1.1 找形

在柔性边界膜结构的找形中，通过改变控制点位置、膜面张力、边界索的张力或索的长度，可以得到不同的曲面形状。刚性边界的膜结构，其边界不随膜面张力而变化，边界构件的形状即为膜面的边缘形状，对膜的曲面形状确定起着决定性的作用。

在进行刚性边界膜结构找形时，要充分考虑工程所在地许可的边界情况和建筑师所期望的建筑造型，仔细确定边界的几何。同时，刚性边界膜结构的外形一般比较扁平，找形时要注意检查是否会产生积水或积雪。

### 1.2 荷载态分析与构件设计

与柔性边界膜结构相比，刚性边界膜结构的荷载态分析要特别注意边界的变形与膜面张力的相互影响。由于膜面的张力直接作用在边界构件上，构件在膜面张力作用下会产生变形，而这个变形反过来将导致膜面张力松弛，从而影响到膜面的刚度和稳定性。也就是说，刚性边界膜结构的边界并非是理想刚性的。分析时，需将边界与膜面作整体分析。由于刚性边界的结构形式常用于预应力水平较高的 PTFE 涂层覆盖玻璃纤维膜材料的结构中，在设计边界构件时，也应采用比普通钢结构中更为严格的变形控制标准。

由于大变形等缘故，膜结构的荷载态分析以及膜材料设计、柔性边界膜结构中钢索及连接件的设计等等大多基于容许应力法；而相关的钢结构构件设计一般都按现行规范采用极限状态设计法，设计时要注意不同状态下的内力转换。

### 1.3 裁剪设计

裁剪线的布置应尽可能平行于刚性边界，以形成优美的视觉效果。在确定膜材的应变补偿值时，也需考虑“刚性边界”的变形的影响。

刚性边界膜结构宜选用 PTFE 涂层覆盖的玻璃纤维膜材料并采用较高的初始张力水平，以避免因膜面应力松弛而需二次张拉。同时，选用幅宽较大的 PTFE 膜材，可减少热合线，使膜面更简洁。

## 2. 膜面预张力的施加及膜与边界构件的连接

### 2.1 膜面预张力的施加方法

柔性边界的膜结构可以通过张拉角点、顶升中柱以提升伞顶、张紧谷索以压低谷线处的膜面等方法给膜面施加预张力；刚性边界膜结构一般采用直接张拉膜边界的方法给膜面施加预张力，参见图 2<sup>[1]</sup>。

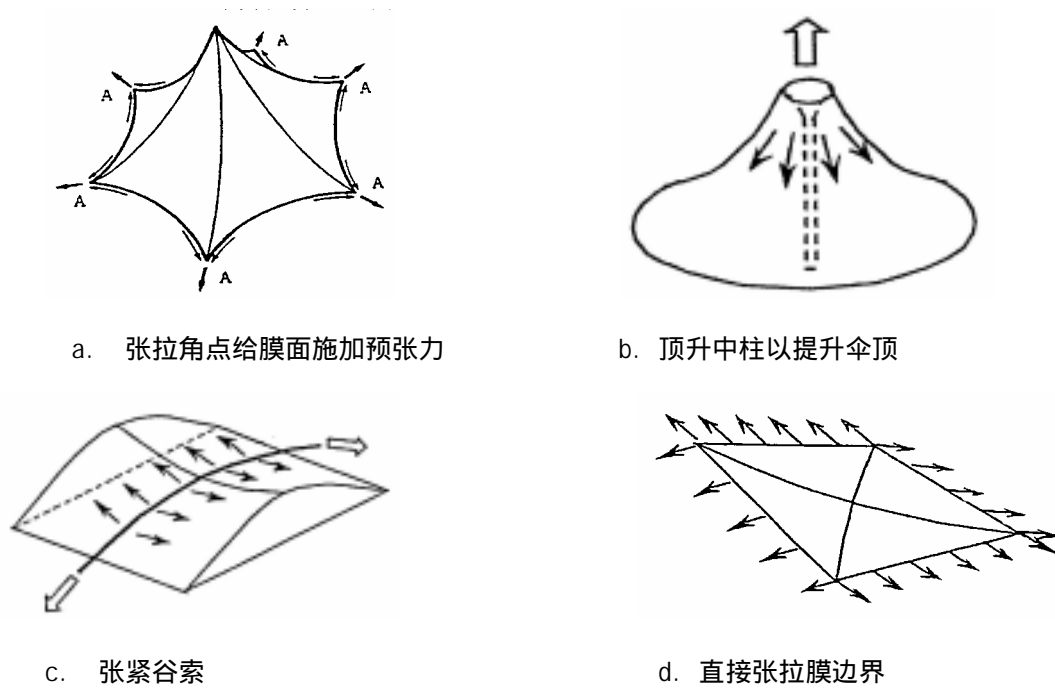


图2 膜面预张力的施加方法

## 2.2 膜与边界构件的连接方式

在刚性边界膜结构中，膜材与边界支承构件的连接有夹板连接、绳轨连接等。夹板连接是利用夹板将膜边绳处夹紧并通过螺栓直接固定在边界构件上，见图3。绳轨连接是先将膜边绳穿在铝合金制成的滑槽--绳轨(Rope Track)内，再通过拉力螺栓将绳轨与边界构件相连并拧紧螺母以张拉膜面，或通过张拉装置将其张拉至设计位置再用螺栓绑紧，参见图4。



图3 夹板固定



图4 绳轨连接

## 3. 刚性边界膜结构的细部设计及加工要求

### 3.1 连接板

连接板 (Connection Plate)是指位于膜夹板与边界构件之间钢板，其作用是将膜面的张力传递给边界构件。连接板通常用厚度为8-16mm的钢板制成，通过肋板与支承构件焊接在一起。设计连接板时，为保证膜面与边界的连接光滑，连接板的形状和弧度要与膜面相吻合。否则，边界处会出现皱褶。图5为连接板的角度和弧度随膜面在三维空间变化的例子。连接板的厚度及与边界构件的连接要满足强度要求。



图 5 连接板角度和弧度随膜面变化



图 6 膜夹板

### 3.2 膜夹板

刚性边界膜结构中用的膜夹板 (Clamp Plate) 一般用铝板制成, 分上、下两片。通常上片厚 6mm、宽 50mm, 下片厚 8mm、宽 100mm。下片上开有两排孔, 一排与上片对应、用于夹紧边缘处的膜面; 另一排用于固定膜夹板在连接板上, 如图 6 所示。膜夹板的边缘应光滑, 不得割伤膜面; 安装时宜在两片膜夹板与膜面之间放置薄的橡皮垫。图 7 给出的是一个膜夹板、连接板的节点示意图; 图 8 是一实例照片。

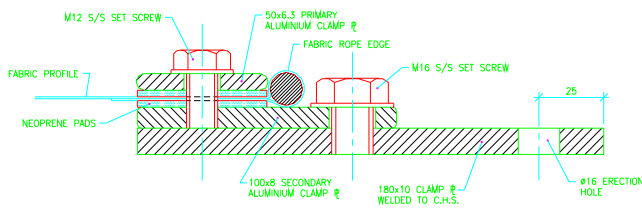


图 7 膜夹板、连接板节点示意



图 8 膜夹板、连接板及圆钢管节点实例

### 3.3 绳轨

绳轨 (Rope Track) 通常由铝合金造成, 一侧是滑槽, 供穿膜的绳边; 另一侧可以是滑槽或平板, 供与边界构件相连接。绳轨要表面光滑, 并满足机械强度要求。使用时可根据需要将绳轨弯曲成相应的弧形并做表面喷涂。图 9 所示是绳轨的几种构造。

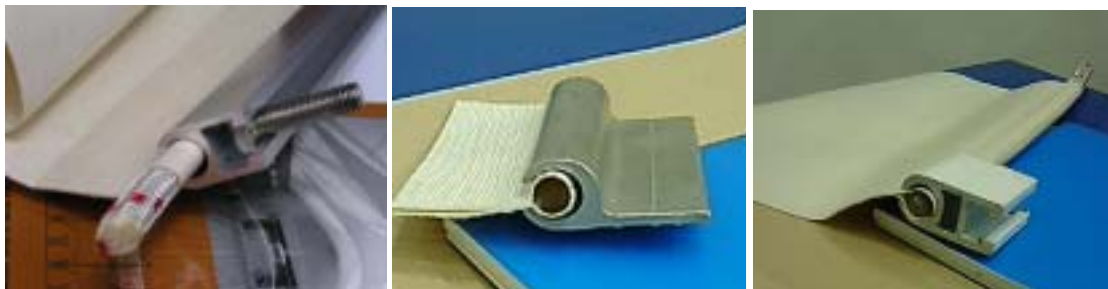


图 9 绳轨的几种构造

### 3.4 边界构件的连接、表面处理及加工精度要求

为方便安装, 边界构件的连接设计应尽量减少现场焊接。采用法兰连接并外包护盖或采用暗法兰, 既可加快现场施工速度, 又不影响美观, 见图 10 和图 11。



图 10 法兰连接



图 11 暗法兰（螺栓在钢管内）

刚性边界膜结构工程的边界构件要进行热浸镀锌、油漆或碳氟喷涂等表面处理。

刚性边界膜结构适应误差及变形的能力差，对构件的加工精度要求更为严格。支承构件安装后的几何位置误差应控制在 10mm 以内。

## 4. 刚性边界膜结构设计实例

### 4.1 工程概况

某飞禽公园要为其单轨列车增建一站台。站台为两层，二层平台由四根钢柱支承。屋盖采用膜结构，平面尺寸约为长 30m、宽 20m。建筑师希望屋盖的造型与飞禽联系起来。工程采用设计及建造 (Design and Build) 合同方式发包，即工程的设计、报批、制作及安装均由承包商负责。

### 4.2 屋盖膜结构的形状确定及支承结构体系的选择

考虑到建筑师的外形构思及下部结构支承条件的限制，采用圆钢管弯成相应的三维形状作为膜的边界（刚性边界），中间部位前后各有三根以索形成的柔性边界以丰富造型。膜结构屋盖的像一只展翅的飞禽，侧立面的造型像一只飞禽的头，如图 12、13 所示。

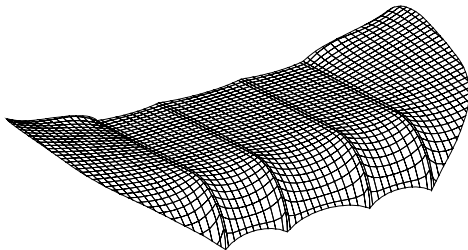


图 12 膜屋盖几何形状

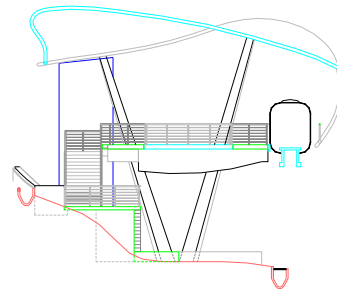


图 13 侧立面

结构支承体系方面，由于支承二层平台的柱子只有四根，而屋盖在左右两侧各悬挑 8 米多，曾提出过沿长度方向设桁架梁或将柱伸出屋面，再用拉杆吊挂两侧的悬挑部位的方案，但未被建筑师接受。最后采用的是由四根钢柱加相应的斜撑来支承由钢管焊接成整体的屋盖结构方案。

膜材选用 PTFE 涂层覆盖的玻璃纤维织物。

### 4.3 荷载取值与荷载组合

由于工程地处热带，所在地不考虑地震设防，且常年温度变化范围很小，故不考虑地震作用、降雪及变温的影响。工程设计遵循英国规范 (BS Code)。

荷载取值为：恒载，即膜的自重， $0.8\text{ kN/m}^2$ ；风荷载计算采用 CP3<sup>[2]</sup>，工程所在地基本风速为 35 m/sec。

膜面预张力为  $3\text{ kN/m}$ ，经纬向相同。

膜面内力分析时采用以下荷载组合：1. 恒载加膜面预张力；2. 恒载加膜面预张力加  $0.30\text{ kN/m}^2$  的竖向荷载，检查是否有可能产生积水；3. 恒载加膜面预张力加风压力；4. 恒载加膜面预张力加风吸力；5. 恒载加膜面预张力加侧向风作用 A；6. 恒载加膜面预张力加侧向风作用 B；

#### 4.4 内力分析及构件设计

##### 1. 膜面内力分析及设计

膜面内力分析采用专用软件 EASY8.0 进行。在上述各荷载组合下，膜面的最大应力为 11.99 kN/m，最大索力为 29.63 kN。如图 12 及图 13 所示。

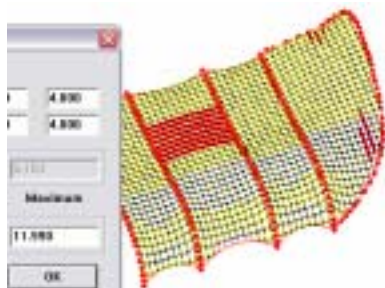


图 14 膜面最大应力

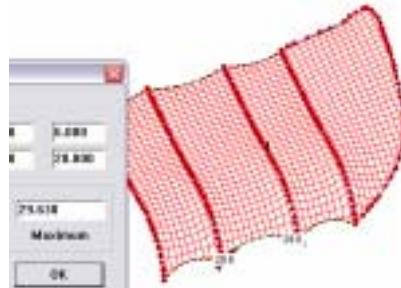


图 15 最大索力

考虑到材料库存因素，选用德国产 Versei dag B18089 GF 型号的 PTFE 膜材，张拉强度为经向 140 kN/m、纬向 120 kN/m；安全系数大于 10。

选用直径为 10 mm、1X19 的 316 不锈钢索，最小破断力为 71 kN。

##### 2. 支承结构内力分析及构件设计

鉴于所用膜结构分析软件中梁单元分析模块的前后处理都不方便，本项目的支承结构内力分析及构件设计借助软件 STAAD-PRO 2003 进行。将膜面内力分析时边界的约束力导入支承结构分析模型，并考虑相应的组合系数，进行内力分析，选择构件截面尺寸、进行规范<sup>[3]</sup>校核。

为使直接与膜相连接的构件在膜面预张力作用下不致产生过大的变形而导致膜面松弛，这些构件的截面选择稍大以保证足够的刚度。验算支承结构在靠近轨道处的最大位移，以保证列车正常运行所需的净距。

#### 4.5 裁剪分析与细部设计

出于形状的需要，屋盖膜面分为 5 个部分，每一部分的膜面与支承构件之间采用绳轨连接。将钢板在钢管上焊接成水槽状，以连接绳轨并兼作水槽。水槽两边绳轨附近的膜面上另焊接有 300mm 宽的膜材，待张拉完成后将其拉接在一起并加以绑扎，作为防水覆盖膜。图 16 为绳轨连接及水槽细部构造。



a. 安装时



b. 膜片覆盖前



c. 膜片覆盖后

图 16 绳轨连接及水槽细部构造

裁剪线沿结构纵向布置。所用膜材的幅宽为 4.7m，控制每一裁剪膜片的宽度在 2.3 m 左右；屋盖膜面每个部分各分为 8 个膜片。采用 50 mm 宽度的搭接焊缝；各裁剪片之间顺水流方向搭接，即高处的膜片在接缝的上层。整个屋盖膜的裁剪废料率为 8% 左右。

膜面下面沿长度方向的钢管设计成弧形以避免影响到膜的曲面形状。为美观起见，所有的斜撑均为圆弧形构件。图 17 为支承结构细部，图 18 为建成后的部分照片。



图 17 支承结构细部



图 18 建成后的照片

## 5. 结语

本文结合具体工程实例就国内目前较少见的刚性边界膜结构的特点及设计过程中应注意的事项等作了较为全面的介绍和论述。在设计刚性边界膜结构时，要特别注意边界构件的加工精度及其变形对膜面应力的影响；裁剪设计时对膜材料的应变补偿量（膜材预收缩量）也要把握得更为准确。本文介绍的设计过程及细部做法可供实际工程设计时参考。

## 参考文献

- [1] Kazuo Ishii, Membrane Structures in Japan, SPS Publishing Company, Tokyo Japan, 1995
- [2] Code of Basic data for the design of buildings, Chapter V, Loading, Part 2 Wind Loads, 1972
- [3] BS 5950-1:2000, Structural use of steelwork in building, Part 1: Code of practice for design – Rolled and welded sections.