

膜结构的工程事故与质量通病防治

胥传喜

(RIGHT TECH (S) PTE LTD)

提要 就膜结构的工程事故与质量通病加以分类剖析,探讨其发生的原因,并就如何在膜结构设计建造过程中避免工程事故、提高工程质量提出相应的对策。

关键词 膜结构 工程事故 质量通病 防治

Accident Preventing and Quality Improvement for Membrane Structure Construction

Xu Chuanxi

(RIGHT TECH (S) PTE LTD)

Abstract Analyzes the engineering accidents and the quality common failures, discusses reasons that cause them, and how to avoid the accident and improve the project quality in the construction of membrane structures.

Keywords membrane structure engineering accident quality failure Improvement

膜结构的一个显著特点是造型优美、新奇,一项优秀的膜结构建筑是一件完美的艺术品。在膜结构的设计、建造过程中,从造型设计、材料选用、构件设计、细部构造设计、裁剪设计,到加工制作、安装张拉以及建成后的使用维护等等,每一步骤中的错误或疏忽,都有可能影响到工程的质量,甚至酿成工程事故。

虽然无论从应用历史还是从工程数量方面,膜结构都无法与混凝土结构或钢结构工程相提并论,然而,在膜结构工程实践中已经发生的工程事故和暴露出来的质量通病却不得不引起人们的重视。本文根据作者所收集到的相关资料,就膜结构工程的事与质量通病加以分类剖析,探讨其发生的原因,并就如何在膜结构设计建造过程中避免工程事故、提高工程质量提出相应的对策。本文旨在引起膜结构工程建设所有相关人员对膜结构质量问题的重视,共同努力、精益求精,力争设计、建造出更多的膜结构精品。

1. 膜结构工程事故的类型及其发生的原因分析

膜结构的工程事故可分为由于气候及火灾原因引起的事故及由于设计或施工等原因引起的事故两大类。事故形式主要有膜材撕裂、结构整体倾覆、火灾烧毁、积水或积雪破坏、粗制滥造的劣质工程等。

1.1 由于气候及火灾原因引起的事故

作者谨以此文及本专题讲座献给我的膜结构启蒙老师—同济大学钱若军教授。

本文所引用的图片部分取自中华钢结构论坛(www.okok.org),部分由业界同仁提供,一并致谢。

1. 强风作用下膜材撕裂

膜结构在强风作用下出现膜材撕裂的现象时有发生。如美国丹佛国际机场（Denver International Airport）航站楼的膜结构屋盖在 2003 年 3 月的一场大风雪中被撕裂，见图 1。2004 年 4 月，成都某小区的一个膜结构工程在一场大风中被完全摧毁，如图 2 所示。



图 1 丹佛国际机场膜屋盖被撕裂



图 2 成都某膜结构被大风摧毁

造成膜结构在强风作用下膜材被撕裂的原因多与膜面松弛有关。膜面过于扁平，或预张力不足，或因膜材徐变导致松弛后没有及时进行二次张拉，膜面的整体刚度很低，在强风作用下容易出现大幅度的摆动导致膜材被撕裂或在摆动过程中撞击到其它物体而发生破坏。图 2 所示的例子就是因膜面松弛而破坏。连接部位的松动或脱落，或节点设计不合理、不恰当地限制节点的转动自由度，也可能造成膜材在强风作用下被撕裂。

2. 因积雪造成膜材撕裂

膜面积雪也会导致膜材撕裂。图 3 为国内某航站楼膜结构屋盖因积雪毁坏的情况。膜面的不均匀积雪相当于局部堆载，加之降雪后气温很低，膜材本身会冷缩并变得脆硬，膜面适应应力重分布的能力降低，易发生撕裂。



a. 组合伞形膜屋盖



b. 毁坏后的伞顶

图 3 国内某航站楼膜屋盖因积雪毁坏

3. 火灾烧毁

膜结构工程中应用最普遍的膜材料是聚四氟乙烯（PTFE）涂层覆盖玻璃纤维织物和聚氯乙烯（PVC）涂层覆盖聚酯纤维织物。前者是不可燃烧材料，后者则为阻燃材料。基于价格的因素，国内目前的工程大多数采用 PVC 膜材。PVC 膜材遇明火会被烧熔，火势不会因膜材而蔓延。图 4 为一 PVC 膜材的膜结构遇明火局部烧熔的情况^[1]；著名的麦加（Mecca）帐篷营原来的棉质帐篷毁于 1997 年大火后，改用 PTFE 膜材料重建，连帐篷四周的墙体也用 PTFE 膜材料建造，材料的防火性能是主要考虑因素，参见图 5。



图4 PVC膜材遇明火被局部烧熔



a. 麦加帐篷营火灾



b. 用 PTFE 膜材重建的帐篷营

图5 麦加帐篷营

1.2 由于设计或施工等原因引起的事故

1. 膜面积水

膜结构的刚度是由其几何形状和所施加的预张力共同提供的。如果膜面过于扁平或施加的预张力不足，膜面就有可能在降雨时产生积水。膜面积水会越积越多，最终有可能导致膜面撕裂或支承结构破坏。图6为一扁平膜屋面大面积积水的情形。



图6 大面积膜面积水

2. 支承结构整体倾覆造成膜材撕裂

图7所示为深圳某膜结构工程因支承结构整体倾覆造成膜材撕裂的情形。



图7 因支承结构整体倾覆造成膜材撕裂

3. 吊装不当造成膜材撕裂

吊装时，在自重及风作用下，膜材极易因应力集中而被撕裂。图 8 所示的实例是直接利用膜角节点板及边索吊装，方式不当，加上膜角切口设计缺陷（参见图 15），吊装过程中因膜面应力在膜角切口处过于集中造成膜材撕裂。



图 8 吊装方式不当加之膜角切口设计不合理造成膜材撕裂

4. 张拉不当造成膜材撕裂

图 9 为一张拉过程中发生膜材被撕裂的例子。张拉膜面时，若施力点偏向一侧造成张拉不均匀，或加载速率过快，或张拉过度、膜面应力超过材料的抗拉强度，或因加载设备如手葫芦或因锚固构件意外失效、导致膜面局部突然不均匀卸载等，都有可能造成膜材撕裂。



图 9 张拉不当造成膜材撕裂

5. 连接构件失效导致破坏

连接件是膜面或索与其它构件相连接的重要构件。连接构件的破坏形式主要有构件断裂或锚固脱落等。连接构件的失效有可能造成结构整体失稳、膜面从空中坠落等严重后果。

6. 粗制滥造的劣质工程

近年来国内膜结构发展迅速，但行业行为很不规范。一些不具备技术力量和工程经验的企业以低价竞标方式承揽膜结构工程，出现了一些粗制滥造的劣质工程。图 10 所示为某单位选用国产 PTFE 膜材料、在马路上加工制作的情形，建成后的膜面上到处可见补丁和撕破的痕迹。该工程的膜屋面最后不得不拆除。图 11 为另一个存在严重质量问题的膜结构工程，膜面上可见随意的撕口和钉子。

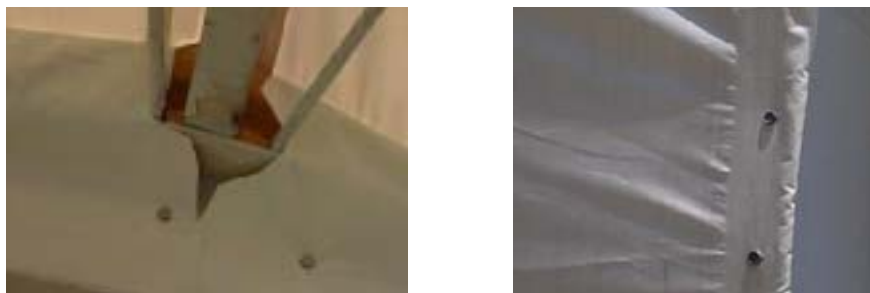


a. 在马路上加工制作

b. 随处可见的皱褶和补丁

c. 撕破的痕迹

图 10 施工时的粗制滥造



a. 内部随意的撕口和钉子

b. 膜面上的皱褶和螺丝

图 11 有严重质量问题的膜结构

2. 膜结构的质量通病分析

1. 膜材料质量问题

国内的工程目前大多数采用 PVC 涂层覆盖聚酯纤维织物膜材。这种膜材的 PVC 涂层会随时间而老化，使得膜面逐渐泛黄、变得肮脏，甚至会大面积“起皮”、涂层脱落。图 12 为两个使用 PVC 膜材的膜结构在建成 4 年左右后表面涂层严重脱落的情形。



a. 国内南方某地的工程

b. 国外热带某地的工程

图 12 使用 PVC 膜材的膜结构发生表面涂层脱落

另外，不同批次甚至同一批次的膜材料色泽上可能有很大的差异以及存在瑕疵，膜材裁剪时应加以区分并让过有瑕疵的部位，否则会影响到结构的美观。图 13 所示为膜材的色差太大影响美观的例子。如果使用的是 PTFE 膜材，经过半年左右的阳光照射，膜面会变白、色差变小；PVC 膜材的色差则会永久存在。



图 13 膜材色差太大影响美观

2. 金属构件锈蚀

膜结构中所用的金属构件暴露在露天环境中，如材料选用或防腐措施不当，易发生锈蚀。在沿海地区或潮湿环境中更是如此。金属构件的锈蚀不仅会影响到美观，也会危及结构的安全。图 14 为膜结构中金属构件发生锈蚀的例子。



图 14 金属构件发生锈蚀

3. 设计不当

图 15 所示膜角节点板处的埋绳角度明显地与夹板角度不匹配；膜边缘穿钢索的“裤套”在节点板处的切口应开成圆角以避免应力集中，图中却开成方角，结果吊装时从此处撕裂，参见图 8。



图 15 埋绳角度及切口设计不当



图 16 焊缝脱落

4. 制作加工缺陷

制作加工缺陷包含膜面制作加工中的缺陷和钢结构及连接件制作加工中的缺陷两方面。图 16 所示的膜面出现焊缝脱落现象；图 17 是焊接时温度及加温时间控制不当、导致膜材局部被烧焦的例子；图 18 则是因为焊接加工时没有很好地清理膜材料及周围环境，结果在焊缝处出现脏痕；图 19 所呈现的是高温焊接时没有采取相应的张拉措施、膜面在加热区域出现了严重的收缩，甚至无法与膜角节点板相匹配。这些都是膜面制作加工中常见的通病。钢结构及连接件制作加工中通病是精度不够及表面不够光滑、不精致等。



图 17 膜材局部被烧焦



图 18 焊缝处出现脏痕



图 19 加热区域出现严重收缩

5. 安装中的问题

膜结构在安装过程中易出现的质量通病主要有因防护不当使膜面在地面或其它构筑物上拖动时被磨损、被划破或局部被撕裂，或因张拉调节不当而在膜面留下过多的皱褶等，参见图 20。



a. 局部磨损

b. 局部被划破

c. 局部被撕裂

图 20 膜结构安装过程中的质量通病

6. 使用中缺少维护

由于膜结构表面存在张力，膜面如有破损应及时修补，否则不但会影响美观和防水，膜面的破损在张力作用下会进一步发展。图 21 所示的膜结构没有得到应有的维护。



图 21 膜面破损没有及时修补

3. 提高膜结构工程质量的措施

根据前面列举的破坏形式和分析的原因，可以采取以下措施以防止工程事故、减少质量通病，提高膜结构的工程质量。

1. 防止膜材被撕裂

为避免膜材被撕裂，设计膜结构时应保证膜面在张拉后具有足够的刚度；细部构造设计要考虑到二次张拉的可能性；对发生松弛的膜面要及时进行二次张拉。节点设计要保证足够的转动自由度，以适应膜面在风作用下的大变形。

膜结构的施工技术设计要周详，吊装、张拉要由有安装经验的工人在安装指导人员的指导下进行。吊装时没有直接与起吊设备相连的膜角节点板及钢索等宜在膜面吊装就位后再安装，避免因节点板及钢索的自重造成膜材料撕裂。张拉过程要循序渐进，并密切监视膜面情况，避免应力集中或张拉过度。

2. 防止火灾破坏

尽量减少可燃物体靠近膜面，不允许有火源。要按建筑设计防火规范的要求设置相应的消防设施，以便万一发生火灾时可将其扑灭在初期。尽可能选用不可燃的 PTFE 涂层覆盖材料。

3. 防止膜面积水

设计膜面造型时，应采用较大的膜面坡度，并使膜面排水路径便捷。根据工程所在地的降雨情况在膜面上施加相应的竖向荷载，检查变形后的膜面等高线图；如在高点以外的部位出现近似圆形或椭圆形的区域，应修改膜面的形状。张拉时，膜面的预张力需达到设计预张力水平；松弛的膜面要及时进行二次张拉；发生膜面积水情况要及时人工协助排水，并采取相应的补救、修改措施。

4. 防止连接件破坏

连接件的设计应确保其满足机械强度的要求并有适当的安全储备，加工质量要有保障。关键部位可考虑设置安全链等构造措施，以防万一连接件破坏时不致于危及到整个结构的安全。

5. 杜绝劣质工程

发展商或建筑师在选择膜结构承包商时，应详细考察其业绩记录、实地查看其承建的工程，并从技术力量、管理经验、工程业绩、财务状况等方面综合加以分析、评判，将待建工程委托给有实力、讲信誉且要价合理的膜结构专业公司。当决定兴建一个膜结构工程时，要追求最佳性能价格比，而不仅仅是追求价格最低。

6. 防治质量通病

近年来，膜材生产厂家一般都已在 PVC 涂层覆盖膜材的涂层表面再加一层 PVDF（二氟乙烯）或 PVF（氟乙烯）面层，以改善 PVC 涂层老化、脱落的情况。在强紫外线照射地区，选用 PVC 涂层覆盖膜材要慎重。即使是同一种膜材，不同厂家、不同型号甚至不同生产批次的质量也有差异，实际应用时要认真选择、详细检查；膜材的局部质量瑕疵应在裁剪下料时让过。

膜结构用的金属构件应采取有效的防腐保护措施；设计时，构件的断面尺寸选择应考虑锈蚀的影响而留有余量。尽可能选用不锈钢材料制成的构件。

膜结构的设计要精益求精，加工制作更应精雕细作。作业场地应清洁无尘，采用张拉焊接，由熟练工人严格按作业指导书进行。安装张拉要严格按施工技术设计的要求进行。有关制作加工及施工安装的具体要求可参见本专题讲座第五讲和第八讲的相应内容。

4. 结 语

虽然膜结构的发展很快，但与传统结构相比，膜结构的工程数量还很少，设计、制作及安装人员的经验也需要一个积累的过程。目前，出于市场竞争的考虑，一些工程出了质量问题也不愿公开，甚至不便讨论。一些企业本不具备从事膜结构设计、制作、安装的资质和能力，又以牺牲工程质量为代价低价竞标，而业主又多以标价最低为取舍标准，这对整个膜结构行业的健康发展是极为不利的。从人力资源合理配置的角度来看，膜结构的发展也应该走咨询设计 - 专业制作 - 工程安装三位并立的道路，即应该有专门从事膜结构设计和安装指导的咨询公司、专门从事膜加工制作（裁剪、拼接）的厂家以及专门从事项目运作及安装维护的膜结构工程公司。目前国内“小而全”的膜结构公司运作模式、“一包到底”缺少监控的行业现状不利于膜结构行业整体水平的提高。

本文就膜结构的工程事故与质量通病进行了分类剖析，探讨了如何在膜结构设计建造过程中避免工程事故、提高工程质量的问题。本文旨在引起相关人员对膜结构质量问题予以高度重视。

参考文献

[1] R. Houtman, M. Orpana, Materials for Membrane Structures, Revised version of the proceedings of the workshop "Textile Roofs 2000", 22nd to 24th June at TU Berlin, www.cseforum.net/Article/membrane_01.pdf

(膜结构设计专题讲座 完)