

# 浅谈大跨度气膜自动化安装控制技术

洪林清 王兆华

宁波钢铁有限公司 浙江 宁波 315807

**摘要:** 随着现代建筑对大空间需求的提升,传统刚性建筑受跨度限制明显,大跨度气膜建筑因无内部梁柱、施工高效等优势逐渐兴起。本文围绕大跨度气膜自动化安装控制技术展开研究,阐述大跨度气膜建筑的概念与轻量化、高效施工等特点,分析空气压力支撑原理与自动化控制系统“监测-分析-调节”工作机制,梳理前期准备、膜体安装、机电调试及验收测试的完整技术流程,提炼大跨度实现、自动化控制、结构稳定性保障三大核心要点。研究表明,该技术通过材料选型优化、智能算法应用及荷载抵抗设计,可实现百米级跨度建筑的高效安装与稳定运行,为大跨度建筑施工提供技术参考。

**关键词:** 大跨度气膜; 自动化安装; 控制技术; 要点

引言: 大跨度气膜自动化安装控制技术的专业性与复杂性,对施工质量与结构安全至关重要。目前,行业内对该技术的系统梳理与核心要点分析仍需完善。基于此,本文从气膜建筑基础认知出发,深入剖析自动化安装控制技术原理、流程与核心要点,旨在为工程实践提供清晰技术指引,推动该技术的规范应用与发展。

## 1 大跨度气膜建筑的概念与特点

### 1.1 大跨度气膜建筑的概念

大跨度气膜建筑是一种以高强度柔性膜材为外壳,借助内部空气压力与外部大气压力的差值形成稳定支撑结构,从而实现大空间覆盖的特殊建筑形式。其核心原理是通过专用充气设备持续向膜体内输送空气,使膜体内部维持高于外部环境的气压(通常为200-500帕斯卡),利用气压差抵消膜材自重、风雪荷载等外部作用力,最终形成无内部承重梁柱的大跨度封闭空间。这种建筑形式突破了传统刚性建筑对跨度的限制,跨度可轻松达到百米以上,且整体结构由膜材、充气系统、自动化控制系统及基础锚固结构共同构成,各部分协同作用保障建筑的稳定性与功能性。

### 1.2 大跨度气膜建筑的特点

大跨度气膜建筑具有以下性能特点。(1) 结构轻量化与空间完整性,整体以柔性膜材为主材,自重仅为传统混凝土建筑的1/30左右,无需复杂内部承重结构,能最大化释放内部空间,满足大跨度、无遮挡的使用需求。(2) 施工便捷性与高效性,膜材可在工厂预制加工,现场仅需完成基础锚固、膜材拼接与设备安装,施工周期通常为传统建筑的1/5-1/3,且无需大型起重设备,对场地破坏小。(3) 节能环保性,膜材具有良好的透光性,可减少白天人工照明能耗;内部气压稳定且密封性强,

配合专用通风系统,能降低空调与供暖能耗,同时膜材可回收利用,符合绿色建筑理念。(4) 结构安全性与适应性,高强度膜材具备抗风、抗震、抗腐蚀等性能,自动化控制系统可实时监测内部气压,遇异常情况自动调节,确保建筑在不同环境下的稳定运行<sup>[1]</sup>。

## 2 大跨度气膜自动化安装控制技术原理

### 2.1 空气压力支撑原理

大跨度气膜建筑的空气压力支撑,核心是通过膜体内外气压差构建结构承载力,实现无内部承重构件的大空间支撑。在安装过程中,待膜材与基础锚固结构密封连接后,充气系统向膜体内持续注入空气,使膜体内部气压逐步高于外部大气压力,形成稳定的气压差(通常维持在200-500帕斯卡)。此时,膜材因气压差产生张力,这种张力均匀分布于整个膜体表面,将外部荷载(如膜材自重、风荷载、雪荷载)转化为膜面拉力,再通过膜体边缘的锚固系统传递至基础结构。随着气压升高,膜体逐渐展开并保持紧绷状态,其曲面形态会根据气压差自动调整,以达到受力平衡。由于气压差产生的支撑力具有全域性,无需在膜体内部设置梁柱等承重构件,仅通过气压即可支撑起百米以上的跨度,且支撑力随膜体覆盖面积的扩大均匀分布,避免局部应力集中,确保大跨度空间的结构稳定性。

### 2.2 自动化控制系统工作机制

大跨度气膜的自动化控制系统,通过“监测-分析-调节”的闭环流程,实现对气压、温度等关键参数的精准控制。系统搭载多种传感器,其中气压传感器布设于膜体内部不同区域,实时采集各点位气压数据;温度传感器则分别监测膜体内外环境温度,同步传输至中央控制器。中央控制器接收传感器数据后,与预设的参数阈值

进行比对分析。当监测到膜体内气压低于下限值时,控制器自动启动充气设备,向膜体内补充空气,直至气压回升至正常范围;若气压高于上限值,则开启泄压阀释放多余空气,维持气压稳定。针对温度参数,当内部温度过高或过低时,控制器会联动通风或加热设备,调节空气流通速率或补充热量,使膜体内环境温度保持在合理区间<sup>[2]</sup>。

### 3 大跨度气膜自动化安装技术流程

#### 3.1 前期准备工作

前期准备以技术校准与场地奠基为核心,分三步推进。(1)开展场地勘测与技术准备,组织团队用全站仪测定场地标高、平整度,勘察地形地貌、地质条件及地下管线分布,同步收集近3年气象数据,绘制地形图供基础设计参考;完成图纸深化设计,出具结构计算书、膜材裁剪图及机电系统原理图,通过第三方安全论证,明确气压参数、锚固强度等关键指标。(2)进行材料与设备筹备,按设计采购膜材、镀锌钢索、锚固螺栓等材料,进场后核查质保文件并抽检性能;配备25t汽车吊、热熔焊接机、变频充气风机等设备,对施工人员开展技术培训与安全交底。(3)实施基础施工,浇筑钢筋混凝土锚固环梁,内置铝合金锚固槽并预埋螺栓,螺栓间距 $\leq 50\text{mm}$ 且与主筋焊接固定;同步浇筑风机设备基础,加装100mm厚减震垫,场地周边开挖排水沟并硬化施工便道,压实度需 $\geq 93\%$ 。

#### 3.2 膜体与加固结构安装

此阶段聚焦膜体成型与结构加固,按以下流程分步操作。(1)膜材现场处理先选择平整硬化地面,铺设防水帆布与PE保护膜,采用热熔焊接工艺拼接膜单元,控制温度180-200℃、焊接速度1.5-2m/min,搭接宽度 $\geq 100\text{mm}$ ,每道焊缝需经0.2MPa气压检测,保压30min压降 $\leq 5\%$ 。(2)进行膜体吊装,按应力分布设置8个吊点,配置卸扣与拉力传感器,用25t汽车吊起吊,地面人员同步牵引,先吊装端部单元再向中部推进,避免膜体褶皱或受力不均。(3)吊装完成后实施锚固与索网安装,将膜体边缘铝合金夹板嵌入基础锚固槽,用不锈钢螺栓紧固,扭矩达35N·m,夹板与膜材间加装8mm厚三元乙丙橡胶垫片;纵横向钢索通过铸钢索夹固定,采用分级张拉法,每级持荷30min,同步监测索网挠度,确保 $\leq L/200$ (L为索段跨度)。

#### 3.3 机电设备安装与调试

机电系统安装围绕充气控制与功能保障展开。(1)充气系统先定位机组,连接DN150镀锌钢管,法兰密封面涂耐候密封胶,进风口加装降噪量 $\geq 35\text{dB}$ 的消声器;

风机出风口通过防火帆布与膜体风道口软连接,接缝用密封胶封堵,确保气密性。(2)自动化控制系统安装时,在膜体内部不同区域布设气压传感器,内外分别设置温度传感器,将设备与PLC控制柜连接,预设工作压力500-800Pa、波动范围 $\pm 50\text{Pa}$ 等参数;同步安装通风、消防、照明等辅助系统,每500m<sup>2</sup>配置1台轴流风机,智能烟感探测器间距 $\leq 10\text{m}$ ,LED防爆灯具照度 $\geq 300\text{lux}$ 。(3)调试分两步进行,先单机调试充气机组、传感器及辅助设备,再联动调试,检查气压调节响应速度、设备启停逻辑及参数反馈准确性,确保断电时备用电源切换时间 $< 15\text{s}$ 。

#### 3.4 系统验收与性能测试

验收阶段通过多维度检测验证安装质量。结构验收重点检查膜面平整度、锚固点拉力及索网张力,确认无松动或应力集中;设备验收检测充气机组噪声、通风系统换气次数等运行参数。性能测试包括气密性测试与荷载模拟,密闭膜体后持续充气至设计压力,24h压降需 $\leq 10\%$ ;模拟12级风荷载,检测结构变形量 $\leq L/200$ 。同时测试应急系统,验证消防联动响应时间、充气系统故障时备用机组切换速度等关键指标。所有检测合格后,整理竣工资料,包括设计变更记录、材料质保文件、隐蔽工程验收记录及系统操作规程,完成交付备案<sup>[3]</sup>。

### 4 大跨度气膜自动化安装控制技术核心要点

#### 4.1 大跨度实现技术要点

大跨度气膜的跨度突破要依赖材料、设计与施工的协同控制,核心要点如下:(1)膜材性能控制。优先选用高强度聚酯纤维基布与PVC/PTFE涂层复合膜材,确保经向、纬向抗拉强度 $\geq 600\text{N}/5\text{cm}$ ,撕裂强度 $\geq 300\text{N}$ ,5000h人工加速老化后强度保留率 $\geq 80\%$ ;控制膜材厚度偏差 $\leq \pm 0.1\text{mm}$ ,表面粗糙度 $R_a \leq 3.2\mu\text{m}$ ,降低气流阻力影响。(2)曲面形态优化设计。采用非线性有限元分析软件,按 $\geq 50\text{m}$ 跨度需求设计双曲抛物面或球形曲面,确保膜面各点曲率半径满足 $1/5 \leq R_1/R_2 \leq 5$ ;控制经向、纬向预张力偏差 $\leq 5\%$ ,避免局部应力集中限制跨度。(3)边界锚固系统强化。基础锚固环梁采用C30及以上混凝土,截面宽度 $\geq 600\text{mm}$ 、高度 $\geq 800\text{mm}$ ;锚固槽用6061-T6铝合金,槽口与膜材夹板间隙 $\leq 2\text{mm}$ ;8.8级锚固螺栓间距 $\leq 300\text{mm}$ ,拧紧扭矩按设计值1.2倍控制,保障拉力传递。(4)施工精度控制。膜材用数控设备裁剪,精度 $\leq \pm 1\text{mm}/\text{m}$ ;现场设 $\geq 4$ 个同步吊点,提升速度偏差 $\leq 0.5\text{m}/\text{min}$ ;膜体分级张拉(每级25%设计值,持荷 $\geq 30\text{min}$ ),监测应力分布均匀性偏差 $\leq 10\%$ 。

#### 4.2 自动化控制关键技术要点

自动化控制系统要围绕参数监测、逻辑控制、应急响应构建,具体要点如下:(1)多参数高精度监测技术。膜体内按梅花形布气压传感器(间距 $\leq 50\text{m}$ ,精度 $\pm 2\text{Pa}$ ,采样频率 $\geq 1\text{Hz}$ );内外设温度传感器(内部距地 $1.5\text{m}$ ,外部加遮阳罩,量程 $-30\text{℃}\sim 80\text{℃}$ ,精度 $\pm 0.5\text{℃}$ );加装膜面振动传感器。(2)智能控制算法应用。用PID算法调节气压,动态优化 $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$ 参数,确保气压波动 $\leq \pm 30\text{Pa}$ ;引入模糊控制算法,按温差调节通风功率(温差 $\leq 5\text{℃}$ 低功率, $> 10\text{℃}$ 满负荷);集成自适应逻辑,随季节修正控制参数。(3)设备联动控制技术。充气系统与传感器联动:气压低于设计值90%启动主风机,高于105%关闭,主风机故障时备用机10s内切换,压降 $\leq 5\%$ ;通风系统按温度联动( $> 30\text{℃}$ 开侧通风口, $> 35\text{℃}$ 启动顶排风机);消防系统检测到烟雾 $\geq 0.1\text{mg}/\text{m}^3$ 时,关充气系统、开排烟口并启动消防水泵。(4)数据传输与存储技术。用工业以太网传数据(速率 $\geq 100\text{Mbps}$ ,延迟 $\leq 100\text{ms}$ );设本地(存1年)与云端备份,采样间隔常规 $1\text{min}/\text{次}$ 、异常 $1\text{s}/\text{次}$ ;参数超阈值时,3s内声光报警并短信通知。

#### 4.3 结构稳定性保障技术要点

大跨度气膜稳定性需通过荷载抵抗、应急防护、长期维护实现,核心要点如下:(1)荷载抵抗技术。风荷载:膜边设镀锌钢绞线抗风缆索(直径 $\geq 16\text{mm}$ ,抗拉强度 $\geq 1860\text{MPa}$ ),膜面装TMD阻尼器(质量为膜体0.5%~1%,频率偏差 $\leq 5\%$ );雪荷载:膜底设电伴热融雪系统(功率 $\geq 20\text{W}/\text{m}$ ,控温 $5\text{℃}\sim 10\text{℃}$ );地震荷载:基础加 $\geq 50\text{mm}$ 弹性橡胶垫(弹性模量 $\leq 10\text{MPa}$ )。(2)应急防护技术。配2台及以上不同动力源备用风机(柴油发电机储油满足24h运行);膜体破损时启动应急补压,维持 $\geq 200\text{Pa}$ 气压,内设修补工具箱(30min内完成修补);膜面应力超设计值120%或位移超 $L/150$

时,触发停机并开启应急照明疏散。(3)长期稳定性维护技术。膜面:每6个月用 $\leq 0.8\text{MPa}$ 高压水枪清洗,透光率恢复至初始90%以上,破损处用专用胶带临时加固;锚固系统:每3个月检查螺栓扭矩(保持设计值90%~110%),锈蚀螺栓换不锈钢件;自动化系统:每月校准传感器(偏差超 $\pm 5\%$ 时更换),每季度优化PID参数,每年测试备用设备。(4)环境适应性调整技术。高温( $\geq 40\text{℃}$ ):膜面涂反射涂层(反射率 $\geq 80\%$ ),通风换气8~10次/h;低温( $\leq -10\text{℃}$ ):膜内加 $\geq 50\text{mm}$ 保温层(导热系数 $\leq 0.03\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ),充气出口控温 $\geq 10\text{℃}$ ;高湿度( $\geq 80\%$ ):通风加除湿装置(除湿量 $\geq 2\text{kg}/\text{h}$ ),控湿 $\leq 60\%$ ;强风( $\geq 25\text{m}/\text{s}$ ):抗风缆索间距减至原设计70%~80%,迎风面设挡风板<sup>[4]</sup>。

结束语:本文系统研究了大跨度气膜自动化安装控制技术,明确了气膜建筑的特性的技术原理,梳理了分阶段安装流程,提炼了涵盖材料、控制、稳定性的核心技术要点。未来,可进一步探索新型膜材研发与智能控制算法升级,完善行业标准规范,推动大跨度气膜建筑在更多领域的创新应用,为现代建筑工程技术发展注入新动力。

#### 参考文献

- [1]邱学哲,王思仁.大跨度管桁架反吊膜结构施工技术研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025(7):129-132.
- [2]许银生.浅谈膜结构施工质量控制管理[J].居业,2025(4):97-99.
- [3]付锡井,向俊华,唐义富.有限空间环境下大跨度悬空钢网壳及膜结构穹顶施工技术研究[J].水利水电施工,2024(5):123-128.
- [4]孙翔宇.膜结构吊顶四周铝板装饰反向安装技术在大型场馆项目中的应用[J].建设科技,2025(11):72-74.