

外覆索网单层气承式基坑气膜技术应用

王恺博¹, 杨洪², 高新¹, 荣乐生²

(1. 北京城建兴华地产有限公司, 北京 100080; 2. 北京城建建设工程有限公司, 北京 100165)

[摘要] 传统基坑施工常面临扬尘、噪声及雨水冲刷等环境问题,尤其在环保要求日益严格的背景下,传统防护措施已难以满足需求。基坑气膜技术通过气压支撑的膜结构,形成封闭施工空间,从源头减少对周边环境的干扰,具有环保节能、智能调控、快速部署、适应性强等优点。基坑气膜技术通过全封闭气膜结构,有效解决传统基坑施工中的扬尘、噪声及环境污染问题,尤其在城市密集区域的应用效果突出。

[关键词] 基坑;膜结构;气膜;智能调控

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)13-0106-05

Application of Single-layer Air-supported Foundation Excavation Air Film Covered with Cable Net

WANG Kaibo¹, YANG Hong², GAO Xin¹, RONG Lesheng²

(1. Beijing Urban Construction Group Xinghua Real Estate Co., Ltd., Beijing 100080, China;

2. Beijing Urban Construction Engineering Co., Ltd., Beijing 100165, China)

Abstract: Traditional excavation construction often faces environmental problems such as dust, noise, and rainfall erosion, etc. Especially against the backdrop of increasingly stringent environmental regulations, traditional protective measures are no longer sufficient to meet these demands. Excavation air-supported membrane technology utilizes a membrane structure supported by air pressure to create a fully enclosed construction space, thereby reducing disturbances to the surrounding environment at the source. It exhibits advantages such as environmental friendliness, energy efficiency, intelligent control, rapid deployment, and strong adaptability. Through its fully enclosed air-supported membrane structure, this technology effectively addresses the problems of dust, noise, and environmental pollution associated with traditional excavation construction, demonstrating particularly outstanding results in densely populated urban areas.

Keywords: foundation excavation; membrane structure; air film; intelligent control

1 基坑气膜技术

1.1 技术特点

基坑气膜技术通过全封闭气膜结构,有效解决传统基坑施工中的扬尘、噪声、光污染及环境破坏问题,尤其在城市密集区域的应用效果尤为突出。传统基坑施工常面临扬尘、噪声及雨水冲刷等环境问题,尤其在环保要求日益严格的背景下,传统防护措施已难以满足需求。基坑气膜技术通过气压支撑的膜结构,形成封闭施工空间,从源头上减少对周边环境的干扰,优势如下。

1) 环保:全封闭结构使扬尘排放量降低 90% 以上,噪声减少 60%,同时膜体可回收再利用,减少建筑垃圾。

2) 智能调控:配备恒温、恒湿系统及智能气压调节,适应极端天气条件,保障施工效率。

3) 快速部署:安装便捷,可缩短工期并降低施工成本。

4) 适应性强:支持定制化设计,适用于不同形状和规模的基坑。

1.2 工程应用情况

随着技术成熟,基坑气膜将进一步推动建筑施工与环境保护的协调发展,尤其在大型城市项目和环保敏感区域的应用潜力巨大。国内首个应用主

动水循环降温技术的基坑气膜在北京市东城区某重点民生工程中正式亮相,这一技术创新不仅破解了传统基坑气膜夏季闷热的行业难题,更以“科技+民生”的双重赋能,为城市更新注入新活力。该项目基坑气膜为全封闭施工模式,将大幅降低环境影响,并提升施工效率,综合工期预计可缩短 30%。

2 工程概况

2.1 基本情况

建设地点位于北京市东城区永外街道景泰路。项目基坑为极不规则异形场地,因此考虑采用外覆索网的单层气承式基坑气膜。主体膜材采用遮光型 PVDF 膜材,配备 2 套变频风机,通风形式采用顶部排风。项目配备智能控制系统及环境检测传感器,可检测粉尘浓度、PM10、一氧化碳、二氧化碳、二氧化氮及噪声等参数。气膜投影面积 4 500m²,汽车通道尺寸为 15m×5m×5.5m。

2.2 工程特点

基坑气膜是一种兼具防尘、降噪、节能、防火、智能化的绿色施工新工艺,借助内外气压差支撑,再利用外加钢索加强整体稳定,将膜体固定于地面混凝土基础上。作业时,利用供风系统让膜内气压上升到一定数值,使气膜内外产生压力差以抵抗外力,无需任何框架梁柱,可以创造更大的、完全净空的施工空间;气膜放气后可以折叠存放,这类气膜的架设、撤收、搬运极为便利。

3 自然条件

3.1 气候条件

3.1.1 气候类型

北京市东城区属温带季风气候,四季分明;夏季(6—8 月)高温多雨,平均气温 25~30℃,极端高温可达 40℃,降水量占全年的 70%,易发短时强降雨、雷暴天气;冬季(12—2 月)寒冷干燥,平均气温 -5~5℃,极端低温 -15℃,西北风频繁,最大风速可达 6~8 级;春秋季短暂,昼夜温差大,偶有沙尘天气。

3.1.2 对工程的影响

- 1) 防风设计:气膜满足抗风压 $\geq 0.45\text{kN/m}^2$ (对应 10 级风),钢索网及锚固系统增强抗风稳定性。
- 2) 抗雪荷载:按北京 50 年一遇雪压 0.40kN/m^2 设计膜面荷载,避免积雪导致结构变形。
- 3) 排水系统:为应对夏季暴雨,配置高效排水通道,防止膜面积水。

3.2 工程地质条件

3.2.1 地基特性

土层分布以第四纪冲积层为主,表层为人工填

土,下部为粉土、砂质黏土,地基承载力为 120~180kPa;地下水位埋深较深(15~20m),但雨季可能短期上升,需做局部防渗处理。

3.2.2 对工程的影响

- 1) 基础设计采用重力式混凝土基础,确保气膜锚固系统与地基协同抗震。
- 2) 柔性连接,气膜与基坑支护结构间设置可调节节点,适应轻微土体位移。

3.3 地形与空间条件

- 1) 地形特征:广渠门外大街为城市主干道,场地地势平坦,但周边建筑密集,施工空间受限。
- 2) 施工布局:需优化气膜平面布置,预留物流通道(如汽车通道),避免干扰交通。
- 3) 临时设施:工人住宿、材料堆放需在场外解决,增加运输协调难度。

3.4 水文条件

- 1) 地表水:夏季短时强降雨易致局部积水,场地需设置截水沟、集水井等排水设施。
- 2) 地下水:对基坑开挖影响较小,但需监测地下水位变化,防止混凝土基础受潮。

3.5 环境与生态

- 1) 空气质量:北京冬季雾霾频发,气膜内部需配置环境监测设备(PM10、CO₂ 传感器)及应急通风系统。
- 2) 噪声控制:基坑邻近居民区,施工需满足 GB 12523—2011《建筑施工场界噪声限值》要求,夜间噪声 $\leq 55\text{dB}$ 。
- 3) 生态保护:施工垃圾外运消纳,工完场清,避免污染周边环境。

3.6 其他自然风险

- 1) 沙尘天气:春季沙尘可能加速膜材磨损,需选用耐磨、自洁性膜材(如 PVDF 涂层)。
- 2) 极端温度:膜材需耐候性(-30~70℃),避免低温脆化或高温软化。

4 设计概况

4.1 基坑支护设计

基坑气膜基础形式为钢筋混凝土圈梁基础,气膜施工部分不涉及地下水。

4.2 气膜设计参数

恒荷载(气膜自重) 0.012kN/m^2 ,基本风压 $W_0 = 0.3\text{kPa}$ (10 年重现期),风振系数取为 1.2,地面粗糙度为 C 类,建筑结构安全等级为三级(临时建筑),结构重要性系数为 0.9。

荷载标准值按 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》中 10 年重现期采用。基坑气膜的风荷载体

型系数取值按现行国家标准《建筑结构荷载规范》和行业标准 JGJ/T481—2019《屋盖结构风荷载标准》以及 T/CECS 1323—2023《充气膜结构技术规程》的有关规定确定。

在各种荷载组合作用下,膜材的强度和变形,满足 CECS 158:2015《膜结构技术规程》的相关规定。充气膜结构根据使用过程中可能出现的荷载,按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行组合。

4.3 计算程序

充气膜是柔性结构,具有几何非线性特点,设计时需要按等应力平衡曲面进行分析。本工程为保证计算模拟的准确性,结构分析采用专业计算软件 3D3S Design 进行分析,风荷载为控制荷载。

4.4 技术参数

1)基础形式
本工程采用连续地梁钢筋混凝土基础作为气膜固定基础。锚栓 MS-1 和 MJ-1 为 Q235 钢,符合现行国家标准 GB/T 1591—2018《低合金高强度结构钢》,锚栓外露基础顶面的栓杆长度为 60mm。

2)主体围护结构
主体围护结构为灰色遮光型,局部有采光带,采用 PVDF 涂层,单位质量 1 250g/m²,厚度 1.1mm;适用温度为-30~70℃;燃烧性能为 B1 级,如图 1 所示。



图 1 主体围护结构
Fig.1 Main enclosure structure

3)基础锚固系统
基础锚固系统采用 100mm×100mm×6mm 镀锌角钢。

4)索网稳定系统
采用国标钢缆,纵横向索网,钢索直径 16mm,外包 PE。

5)进出门禁系统
旋转门 1 套,气膜专用气密门,手动式旋转门,2 450mm×2 450mm(宽×高);自动互锁门 1 套,1 300mm×2 400mm(宽×高);标准应急门 2 套,分别为气膜专用气压平衡门和推杠式安全应急门,1 340mm×2 450mm(宽×高),带换气窗。物流通道

门 2 套,快速涡卷门(工业级),互锁,4 500mm×4 500mm(宽×高);物流通道 1 套(见图 2),采用钢结构覆膜形式,15 000mm×5 000mm×5 500mm(长×宽×高)。

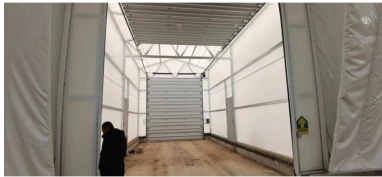


图 2 物流通道
Fig.2 Logistics channel

6)气膜风机系统
采用轴流风机,电机防护等级 IP55,包括风机、止回阀、防雨罩、防虫网,风量 40 000m³/h,全压 650Pa,电机功率 15kW,采用变频技术,如图 3 所示。



图 3 气膜风机系统
Fig.3 Air film fan system

7)智能控制系统
专业 PLC 智能控制柜采用防雨机柜,内部由电气模块、断路器、接触器、触摸屏等组成;包含气膜智能控制柜、照明控制柜,含远程报警和控制系统;包含传感器。

8)应急发电系统
本应急发电机组额定功率为 50kW,配置 ATS 自启动系统,整机为户外静音箱形式,且具备水套加热功能

9)照明系统
照明采用大功率 LED 光源,400W/盏。

10)粉尘浓度检测
总粉尘浓度测量范围:0~1 000mg/m³,量程可定制;测量误差≤±10%;工作电压 12~24V,VDC 工作电流≤56mA。

5 气膜安装施工

5.1 气膜固定
气膜与混凝土基础梁之间采用 100mm×100mm×6mm 通长压膜角钢及 M16 化学锚栓固定。钢索固

定点采用埋件与混凝土基础梁连接固定。

5.2 应急门、人员和车辆设备进出门以及排水预留口的安装

1) 首先将应急门安放到施工图纸上规定的位置并进行锚固,在确保应急门水平度和垂直度满足要求,且门板能正常开启的情况下,将应急门的门体与混凝土基础之间进行固定,然后将门体外侧的钢结构斜撑分别与门体框架和外伸混凝土基础连接固定。

2) 应急门固定后,将应急门框架下部及两侧与混凝土基础之间的缝隙进行密闭处理。

3) 人员进出门安装之前,完成门体的框架施工,并测量好预留门洞和安装空间是否能满足安装需要,然后将人员进出门安装在预留好门洞的混凝土基础、钢结构的框架上。

4) 为保证车辆设备进出时,充气膜良好的气密性及施工便捷性,车辆通道采用钢框架+张拉膜结构建造。在安装车辆设备进出门前,要确保通道结构已经按相应的规范施工完毕。车辆设备进出门有较高的安装精度要求,由专业工人安装。

5) 根据基坑降排水方案,在基坑四周降排水管道穿越处预留通道,便于后期降水阶段施工,避免造成气膜的二次开口。

5.3 机电设备安装

充气膜结构的机电设备包括充气控制设备、备用发电机控制柜等。

1) 充气控制设备到现场后,首先进行开箱检查,依据供货合同和设备装箱单,清点数量。然后根据施工图纸,核对设备的名称、型号、机型、电机、传动连接方式等,检查外表是否有明显变形或锈蚀、碰伤等,做好记录;填写《设备开箱记录表》,并由供货商、施工方共同签字,检查资料作为竣工资料备用;设备开箱检查完毕后,符合要求的设备直接搬运至现场安装。

2) 按照施工图纸及配置清单要求,将备用发电机、控制柜等设备吊装至施工位置,就位后用专用配件将各设备与混凝土基础固定连接。设备各部件之间要留有足够的工作空间,便于进出、调试、维护和后期维修保养。

3) 按照施工图纸及配置清单要求,将充气控制设备的各功能段吊装至施工位置,就位后用专用配件将各功能段连接,设备与混凝土基础之间进行密封,防止漏风。

4) 由于充气控制设备、发电机、控制柜等设备专业性较强,为保证设备能够正常安全有效运行,

设备的安装调试由专业技术人员进行;在安装调工作完成前,非专业技术人员、任何单位和个人不得接触设备。

5.4 气膜单元安装

为便于加工、运输和现场安装,将膜结构主体分为4个膜单元,单个膜单元重4t左右,外包装上主要标明膜单元的编号、展开方向。依次将膜单元按外包装上标示的方向展开。膜单元采用人工拖曳至场地中平铺展开,注意各个膜单元的分缝处标记、各个门洞连接处、混凝土基础梁的位置准确就位。

展开后的膜单元之间按设计要求用铝合金压板及螺栓进行连接,固定至混凝土基础的锚固连接件上。

5.5 索网安装

本项目采用纵横向索网,按施工图纸和施工组织设计要求,将每根拉索牵拉到位,进行连接、卡紧、固定。安装索网前,所有的膜单元连接、固定到位。

将每根编号的钢索按设计位置索引、展开覆盖在膜面上部。膜面上焊接有钢索限位点时,将钢索穿过限位环,按设计图和钢索上的标记位置,将钢索交叉的节点相互卡紧固定,并注意对下部膜体保护端的锚具叉耳与预埋的钢结构耳板销接连接。安装钢索时,注意对下部膜体的保护(见图4)。

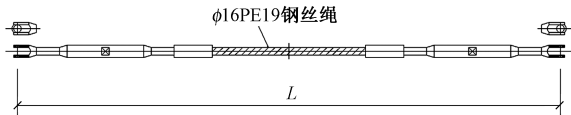


图4 钢索及压制索具
Fig. 4 Steel cables and pressed rigging

5.6 充气与调试

在门系统、机电设备、气膜主体及索网安装完成后,充气膜结构还需要充气 and 调试的过程。当风力达到4级时,不宜进行充气调试;当风力达到5级及以上时,严禁进行膜结构充气施工。

5.6.1 充气前准备

气膜充气之前,检查气膜单元之间、气膜主体与混凝土基础之间的连接情况,检查所有钢索的连接情况,确保所有的边界及连接节点满足设计要求;并对所有的设备及相关配套设施进行安装调试,确保设备能正常工作。

气膜充气前,对周边环境进行检查,气膜在充气过程中有一定的摇摆晃动,对有危及到膜体安全的建(构)筑物或其他物品要进行有效防护。

5.6.2 充气

膜结构主体安装完毕并准备就绪后,为尽快完成充气过程,所有的风机同时打开运行;在这个过程中,安装人员不间断地对各处连接情况、膜结构主体充气状况和设备运行情况进行查看,确保无错误操作或其他异常的情况出现;膜结构主体充气升起的过程中,专业检查人员沿周围仔细观察,确保膜体的各个部分不触碰围栏、门、机电设备等;如遇突发情况,立即暂停充气、清除障碍;整个充气过程2~3h内完成。

5.6.3 中间检测

当充气压力达到60~100Pa时,膜体结构主体基本成形;保持压力,再次对膜体结构主体、膜面拉索、各进出口及配套的框架、机械和电气设备等各处连接和设备运行进行仔细检查,发现异常情况要及时处理;膜体结构与各出入口框架或设备需要进一步连接的地方会有较大的漏气间隙,在膜单元与这些出入口框架或设计连接固定完毕前,对这些漏气间隙及时进行临时封堵。

5.6.4 再充气

所有检查出现的问题得到彻底解决后,继续充气至设计压力。

5.6.5 最终检测

充气完成后,充气膜体结构要维持在最大设计压力至少1h以上,方可切换为自动控制的状态;在此期间,要按照使用与维护中列表的项目对气膜结构的各个部分进行检查和检测。

6 结语

作为全国首例应用主动水循环降温技术的基坑气膜,该项目在技术上实现了多项突破。应用的灰色遮光型PVDF 3层膜材,搭配全封闭结构与周边喷淋系统,实现90%以上的抑尘效率,光污染减少60%以上;针对极不规则的异形场地施工难题,

采用外覆索网的单层气承式膜体结构;通过“顶部排风+湿帘降温+隔热网”组合系统,使得夏季膜内温度趋于舒适,保障一线工人的作业安全。同时,内部独立作业空间使施工噪声降低90%以上,有效避免干扰周边居民的日常生活与休息。

参考文献:

[1] 陈博. 基坑气膜技术在大型水务工程施工中的综合效益评估——以通州区玉带河大街防涝泵站及蓄水净化池为例[J]. 水利与建筑工程学报,2025,23(6):149-154,161.
CHEN B. Comprehensive benefit evaluation of air-supported membrane technology in large-scale water conservancy projects: a case study of the Yudaihe street flood prevention pump station and water storage/purification pool in Tongzhou district [J]. Journal of water resources and architectural engineering,2025,23(6):149-154,161.

[2] 李旺. 绿色地铁建设基坑智能气膜大棚的应用[J]. 智慧中国,2025(9):106-107.
LI W. Application of intelligent gas film greenhouse in foundation pit construction of green subway[J]. Wisdom China,2025(9):106-107.

[3] 史伟民,徐兆颖,高泽,等. 基坑气膜技术在高密度城市建设项目中的环境效益评价研究——以深圳市眼科医院二期工程为例[J]. 项目管理技术,2025,23(9):109-115.
SHI W M, XU Z Y, GAO Z, et al. Evaluation of environmental benefits of pit gas membrane technology in high-density urban construction projects: a case study of the second phase of Shenzhen eye hospital project [J]. Project management technology,2025,23(9):109-115.

[4] 汪宇. 基于改进 K-means 算法的基坑气膜结构风振稳定性分析[J]. 智能城市,2025,11(4):120-123.
WANG Y. Wind-induced vibration stability analysis of gas-membrane structure in foundation pit based on improved K-means algorithm[J]. Intelligent city,2025,11(4):120-123.

[5] 张士振. 绿色低碳基坑气膜施工关键技术研究[J]. 铁道建筑技术,2025(5):176-179.
ZHANG S Z. Research on key technologies of green low-carbon air-supported membrane construction for foundation pits [J]. Railway construction technology,2025(5):176-179.