

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.06.021

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

陈博

(北京市通州区水务局, 北京 通州 101100)

摘要: 气膜技术作为一种新兴的施工污染控制措施,尤其在大型基坑开挖和施工过程中通过全封闭、大跨度的气膜技术可有效解决施工扬尘、噪音等问题。为探索气膜技术在大型水务工程基坑开挖和施工中的应用效果,以北京市通州区海绵城市建设项目玉带河大街防涝泵站及蓄水净化池使用的基坑气膜技术为例,采用现场实时监测、经济效益分析的方法,对其环境效益与经济效益进行定量评估。结果表明:气膜技术对总悬浮颗粒物(TSP)、粗颗粒物(PM_{10})、细颗粒物($PM_{2.5}$)的减排比例分别为63.5%、55.1%、43.4%,平均噪声衰减达47 dB,产生整体经济效益约514.8万元,对水务工程施工现场环境有明显的改善效果。验证了气膜技术在高密度城区尤其是居住区开展大型水务工程施工中的可行性。

关键词: 绿色施工;海绵城市;气膜技术;扬尘控制;效益评估

中图分类号: TU988.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)06-0149-06

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

CHEN Bo

(Beijing Municipal Water Affairs Bureau of Tongzhou District, Tongzhou District, Beijing 101100, China)

Abstract: Air-supported membrane technology which is an emerging construction pollution control measure in recent years can effectively addresses dust and noise pollution through its fully enclosed, large-span structure, particularly during excavation and construction of large foundation pits. To investigate the application effectiveness of this technology in water conservancy projects, this work focuses on the Yudaihe Street Flood Prevention Pump Station and Water Storage/Purification Pool within the Sponge City construction initiative in Tongzhou District, Beijing. By employing a combination of real-time on-site monitoring and economic benefit analysis, the environmental and economic benefits were quantitatively assessed. Results demonstrate reduction rates of 63.5%, 55.1%, and 43.4% for total suspended particles (TSP), coarse particles (PM_{10}), and fine particles ($PM_{2.5}$), respectively, along with an average noise attenuation of 47 dB. The project generated total economic benefits of approximately RMB 5.148 million and significantly improved the on-site environmental conditions, which validates the feasibility of air-supported membrane technology for large-scale water conservancy projects in high-density urban areas, especially residential zones.

Keywords: green construction; sponge city; air-supported membrane technology; dust control; benefit assessment

收稿日期:2025-08-11

修稿日期:2025-09-10

基金项目:北京市通州区新增海绵城市工程(通胡大街、玉带河大街防涝泵站及蓄水净化池)项目(S110000A00103534500)

作者简介:陈博(1985—),男,高级工程师,主要从事北京城市副中心海绵城市规划、建设等工作。E-mail:78135438@qq.com

随着城市化进程加快,高密度城区尤其是居住区附近的水务、市政施工工地越来越多,施工扬尘与噪声污染已成为城市环境治理的难点之一^[1]。传统抑尘措施如洒水、覆盖等易受限于天气条件与施工效率,难以实现全天候污染控制。气膜技术凭借全封闭结构与高效通风系统,可有效隔离施工污染源,解决在中心城区环境质量要求较高的区域施工产生的扬尘、噪声等问题,同时由于其全封闭结构的优势,在气膜内施工不受天气、气温等影响,可以大大提高施工效率,缩短施工周期,将施工对周边区域环境的影响降到最低^[2]。气膜技术最初应用于大型体育场馆与仓储设施的施工建设中,近年来逐步拓展至水务等施工领域。有研究^[3]表明,气膜可通过负压通风系统控制粉尘扩散,但其降噪机理多集中于低频声波衰减。通州区作为国家海绵城市建设试点,对施工环保技术需求迫切,气膜技术的应用可与其低影响开发目标协同推进。同时在北京市的建设工程施工现场管理要求中,《北京市大气污染防治条例》^[4]与《绿色施工管理规程》^[5]均强调施工污染的源头管控。史伟民等^[6]研究表明,深圳市中心城区基坑工程中气膜技术已实现扬尘减排 90% 以上。虽然气膜技术在国内施工工地有一定的应用,但由于缺乏针对该技术的量化评估标准,气膜技术在大型水务工程的基坑开挖及施工全过程中的实际效能仍需实证研究。本文以北京市通州区海绵城市建设项目基坑气膜示范试点项目为研究对象,结合环境监测数据与经济模型,系统评估其综合效益,填补了气膜技术在大型水务工程施工中效益评估的空白,旨在为同类工程提供数据参考。

1 项目概况及研究方法

1.1 项目概况

为解决通州区海绵城市建设试点区内已建区的合流制溢流污染问题,提升区域防洪排涝能力,通州区实施了 2019 年新增海绵城市工程,主要包括两座防涝泵站及蓄水净化池,分别为通胡大街防涝泵站及蓄水净化池和玉带河大街防涝泵站及蓄水净化池。其中通胡大街防涝泵站及蓄水净化池位于通胡大街北侧(芙蓉西路和运河文化广场之间),占地约 4 822 m²,玉带河大街防涝泵站及蓄水净化池位于玉带河大街和北运河东滨河路交口,东北侧绿化带内,占地约 8 004 m²。两座防涝泵站均按五十年一遇标准设计,两座蓄水净化池均按照合流制溢流不超过 4 次/年的标准建设^[7]。上述两个工程均被纳

入了通州区海绵城市建设项目基坑气膜示范试点项目中。本文以玉带河大街防涝泵站及蓄水净化池作为研究对象。玉带河大街防涝泵站及蓄水净化池项目的基坑开挖面积为 8 000 m²,气膜覆盖面积为 13 440 m²,是目前北京市跨度、面积最大的基坑气膜,全市首例应用于施工全周期的气膜,也是首例可以在内部进行塔吊作业的基坑气膜,外观为长方形规则形状(见图 1)。配备 8 台 11 kW 风机,最大排风量 24 万 m³/h,正常使用时开启 4~5 台风机维持压力平衡,正常工况的排风量为 12~15 万 m³/h,风机选型依据《绿色施工管理规程》,并参考美国 EPA 施工通风指南^[8],确保风量满足扬尘控制需求。项目周期 18 个月,采用全封闭施工模式,监测时段涵盖昼间(6:00—22:00)与夜间(22:00—6:00)。



图 1 通州玉带河大街基坑气膜外观

1.2 环境效益评估方法

环境效益的评估主要依托于在施工时段对基坑气膜内部和膜外部(排气口)进行环境参数的在线实时监测,包括对气膜周边扬尘和噪声的监测等^[9]。

1.2.1 扬尘减排效果评估方法

基坑施工和渣土运输会产生施工扬尘,在没有基坑条件下扬尘以无组织形式排入环境空气中。基坑气膜把扬尘排放从无组织排放变为有组织的排放,从而降低扬尘排放。在基坑气膜内外设置扬尘监测点位,在施工时监测气膜排气口总悬浮颗粒物(TSP)、粗颗粒物(PM₁₀)、细颗粒物(PM_{2.5})浓度。扬尘减排计算参考《扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南》^[10]及国际通用方法^[11],并结合日本建筑环境学会标准^[12]优化,确保计算科学性,对基坑气膜扬尘减排效果进行评估。

$$D_r = \frac{E_i - E_o}{E_i} \times 100\% \quad (1)$$

$$E_i = (C_i - C_b) \times Q \quad (2)$$

$$E_o = (C_o - C_b) \times Q \quad (3)$$

式中: D_r 为扬尘减排率; E_i 为气膜内扬尘含量; E_o 为气膜外扬尘含量; C_i 为气膜内监测浓度, ug/m^3 ; C_b 为环境本底监测浓度, ug/m^3 ; C_o 为气膜外监测浓度, ug/m^3 ; Q 为排气风量, m^3/h 。

1.2.2 噪声减排效果评估方法

在基坑气膜内、外设置连续噪声监测点位,在施工时对气膜内部和外部噪声进行连续监测,评估基坑气膜对噪声的减排效果。

$$N_r = \frac{L_i - L_o}{L_i} \times 100\% = \frac{\Delta L}{L_i} \times 100\% \quad (4)$$

式中: N_r 为噪声衰减率; L_i 为气膜内监测噪声值, dB; L_o 为气膜外监测噪声值, dB。

本文中噪声衰减值以分贝差值 $\Delta L = L_i - L_o$ 表示,未考虑能量级的对数衰减特性。

1.3 环境要素监测方案

对基坑气膜内、外环境要素进行监测,主要针对需要评估的扬尘和噪声的监测,包含对气膜内部、排气口颗粒物浓度(TSP、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$)以及气膜隔声效果、气膜内外噪声进行连续监测,具体监测点位见图 2。监测时间从 2024 年 8 月 28 日至 2024 年 12 月 27 日,现场每小时采集一次数据。

1.4 经济效益评估方法

经济效益评估主要基于基坑气膜应用后所产生的综合性成本节约进行评估,评估内容包括:

(1) 直接效益

因采用气膜技术而节省的传统扬尘与噪声控制措施费用(如减少的洒水降尘、雾炮作业、裸土覆盖等人力、设备及材料成本)。

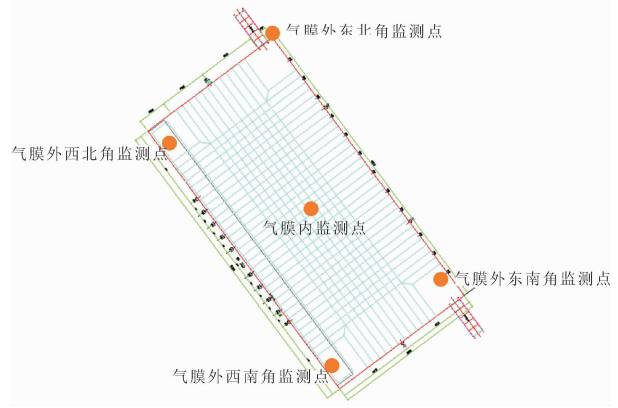


图 2 通州玉带河大街基坑气膜环境监测点位

(2) 间接效益

得益于气膜提供的全天候封闭作业环境,避免了因重污染天气、大风(四级以上)、暴雨、重大活动等外部因素导致的停工损失,从而缩短工期、降低管理成本。

(3) 隐性效益

包括冬季施工混凝土保温措施费用的节约、雨季基坑排水费用的减少,以及因减少施工扰民而降低的投诉处理成本。

经济效益通过对比应用气膜技术与传统开放式施工条件下的上述各项费用差异进行测算。

2 效益评估

2.1 扬尘减排效果

通过对气膜内部、排气口颗粒物浓度(TSP、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$)进行连续监测,监测数据变化趋势见图 3,监测数据统计见表 1。

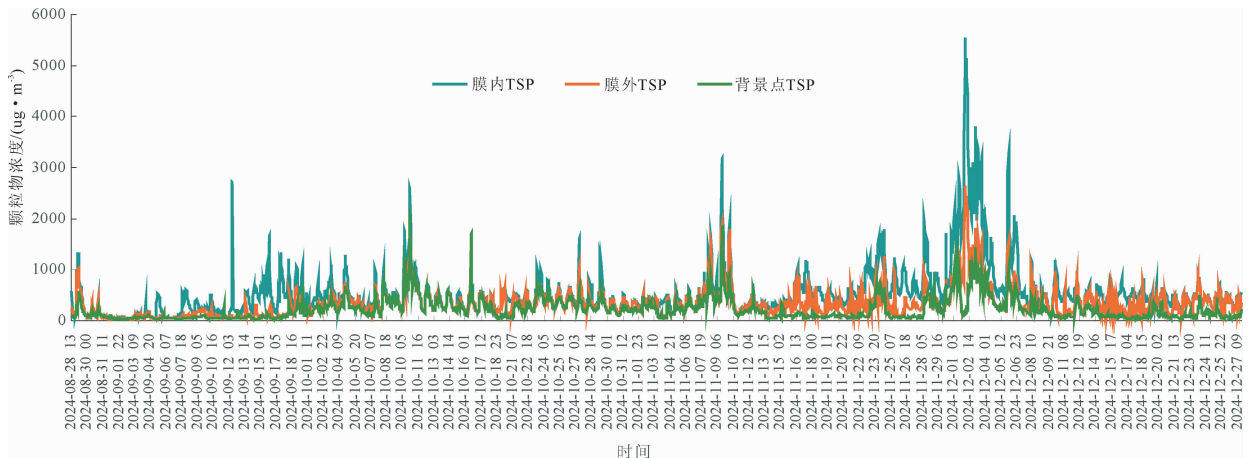


图 3 气膜内外扬尘排放监测数据变化趋势图

表 1 气膜内外扬尘排放监测数据统计

单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$

数据统计项目	膜内			膜外			背景		
	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}
总平均浓度	543.7	258.1	98.5	340.8	181.4	80.2	211.0	111.3	50.0
小时平均最大浓度	5544.1	2272.9	339.8	2640.0	1337.0	283.1	1596.4	693.7	225.8
小时平均最小浓度	25.6	18.6	13.9	24.6	17.8	12.0	19.7	14.3	9.6
昼间平均浓度	594.9	276.7	102.4	376.5	196.5	84.4	230.3	118.8	50.9
夜间平均浓度	457.4	227.0	92.0	280.7	156.0	73.0	178.4	98.6	48.3

从监测数据分析,在气膜覆盖条件下,基坑内部扬尘浓度呈现显著的空间梯度和时间波动特征。空间分布上看,气膜内 TSP 平均浓度达 $543.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (小时浓度均值范围为 $25.6 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 5544.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 而排气口 TSP 平均浓度降至 $340.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 浓度降低 37.3%, 背景点监测值进一步降至 $211.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 表明气膜对颗粒物的层级阻隔效应明显。基于表 1 中的气膜内外平均浓度以及背景值监测数据,在不

考虑排风量实时变化的情况进行理论减排率估算, TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 估算的理论减排率分别为 61.0%、52.2% 和 37.7%。

通过扬尘减排率公式(1),基于实时监测的排风量数据计算可以得出 TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 浓度减排效果,见图 4。根据监测期间逐时数据计算可得, TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 的平均减排率分别为 63.5%、55.1%、43.4%。

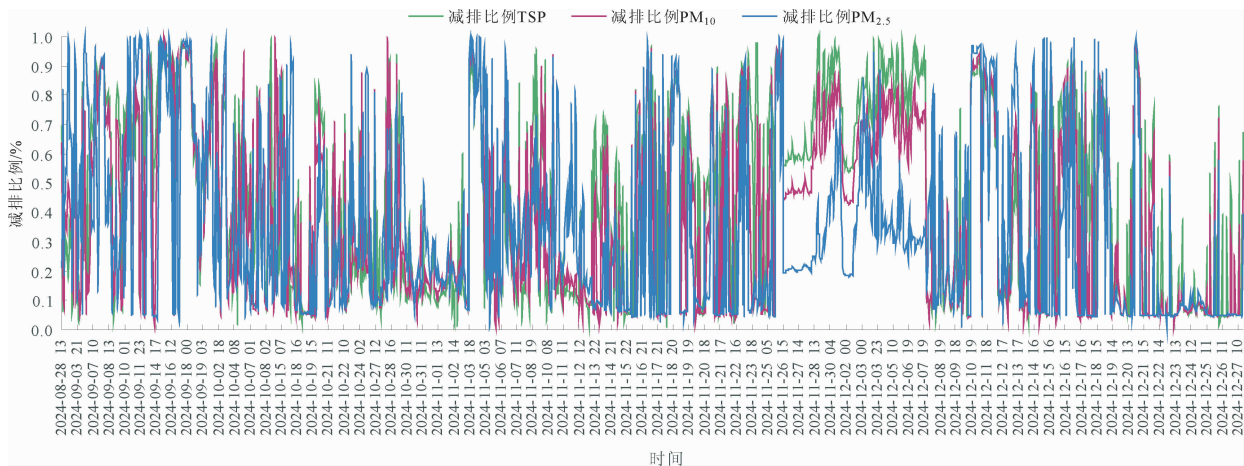


图 4 气膜内外扬尘衰减效果

2.2 噪声减排效果

2.2.1 气膜隔声效果

通过采用无线建筑声学测量系统对气膜隔声效果进行检测,并参考了隧道工程领域的相关安全指南^[13]。在气膜内安装声源和功放,在膜内、膜外安装声检测传感器,系统通过声源顺序发出 50 Hz ~ 5 000 Hz 的声波,膜内、外声检测传感器同时检测声级强度并计算气膜内外的声波衰减值。膜内外声压级监测值如图 5 所示。检测结果显示气膜在不同频率段对声音都有良好的隔音效果,声波频率越高,衰减幅度越大。在耳朵最敏感的频率段(800 Hz ~ 1 250 Hz)声波衰减幅度为 44.9 dB ~ 42.7 dB,在 5 000 Hz 时衰减幅度可以达到 60.9 dB;100 Hz ~ 5 000 Hz 平均衰减 47 dB。不同频率下气膜内外声

压级衰减值如表 2 所示,气膜内外噪声不同频率衰减值如图 6 所示。

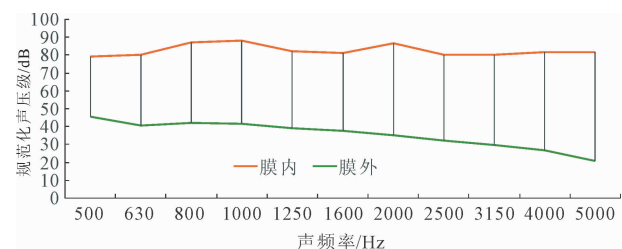


图 5 膜内外声压级监测值

2.2.2 气膜内外噪声减排效果评估

在气膜内距离气膜 1 m 处安装一台噪声在线监测设备,膜外东南角、西南角距离气膜 1 m 处各安装了 1 台噪声在线监测设备,设备安装前与经过计量

校准的手持声级计进行了比对校准。对气膜内外噪声进行连续监测。噪声变化趋势见图 7。

表 2 不同频率下气膜内外声压及声压衰减值

单位:db

名称	声频率/Hz										
	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
膜内	79.4	80.3	86.9	88.3	82.0	81.2	86.6	80.4	80.3	81.6	81.9
膜外	45.3	40.7	42.0	41.8	39.3	37.4	35.2	32.4	29.9	26.5	21.0
声压衰减	34.1	39.6	44.9	46.5	42.7	43.8	51.4	48.0	50.4	55.1	60.9

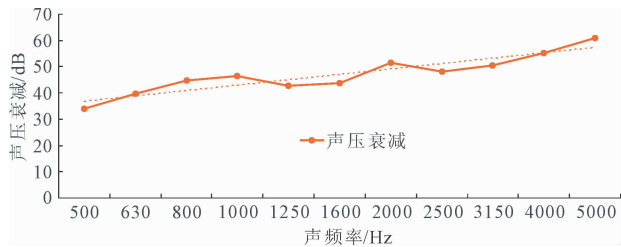


图 6 气膜内外噪声不同频率衰减值

从图 7 可以看出,膜外东南角、西南角噪声数据基本一致,表明膜外声环境较稳定。膜外噪声明显

低于膜内噪声,气膜降噪效果明显。膜内总体噪声均值为 62.7 dB,膜外东南角噪声均值为 55.7 dB,西南角噪声均值为 55.6 dB,膜内外差 7 dB 左右;按昼间(6:00~22:00)噪声、夜间(6:00~22:00)噪声进行统计,膜内昼间噪声为 63.2 dB,膜外昼间东南角噪声为 55.9 dB,西南角噪声为 55.9 dB,膜内外差值 7.3 dB;膜内夜间噪声为 61.9 dB,膜外夜间东南角噪声为 55.2 dB,西南角噪声为 55.1 dB,膜内外差值 6.7 dB 左右,详见表 3。

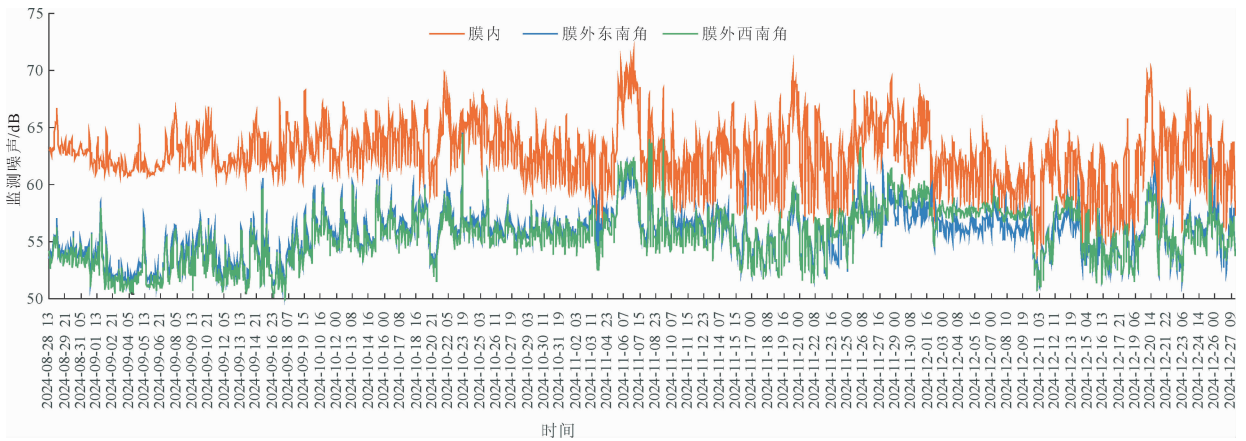


图 7 气膜内外噪声变化趋势图

表 3 气膜内外噪声监测统计表 单位:db

名称	噪声部位		膜内外噪声差值
	膜内	膜外	
总体平均值	62.7	55.7	7.0
最大值	71.5	64.5	7.0
最小值	53.2	50.5	2.7
昼间噪声均值	63.2	55.9	7.3
夜间噪声均值	61.9	55.2	6.7
昼间超标率/%	0.3	0.0	
夜间超标率/%	37.1	22.8	

注:气膜外噪声连续监测受到背景噪声和附近施工噪声、交通噪声影响,气膜内外噪声差值不能完全反应气膜隔声性能。

按照施工噪声标准要求,参照《声环境质量标准》中的标准^[14],昼间噪声不超过 70 dB,夜间噪声不超过 55 dB。从监测结果分析,膜内昼间噪声超标率为 0.3%,膜内夜间噪声超标率为 37.1%;膜外昼间噪声超标率为 0.0%,膜外夜间噪声超标率为 20%左右。根据监测结果,噪声衰减与膜内噪声值比较,计算噪声减排率。噪声频率从 500 Hz 至 5 000 Hz,通过气膜声衰减分别为 34.1 dB 至 60.9 dB,噪声衰减比例分别是 43% 至 74.4%;平均衰减 47 dB,平均衰减比例为 56.9%。不同频率衰减比例见表 4 及图 8。

表 4 气膜噪声不同频率衰减效果

声频率/Hz	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	平均衰减比例/%
衰减比例/%	42.95	49.32	51.67	52.66	52.07	53.94	59.35	59.70	62.76	67.52	74.36	56.90

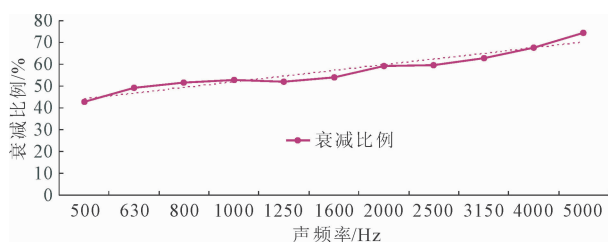


图 8 气膜内外噪声衰减比例随频率变化趋势图

2.3 经济效益评估

经济效益评估基于第 1.4 节所述的评估方法,核算了采用气膜技术后产生的综合性成本节约。本项目产生的经济效益主要来源于以下几个部分:

(1) 节约扬尘与噪声控制措施费用

采用基坑气膜后,减少了施工所需的喷淋、雾炮、裸土苫盖等传统措施投入。按每天一台雾炮车(1 500 元/日)、一台洒水车(1 500 元/日)、2 名专职人员(500 元/日)、裸土苫盖(13 440 m²),经核算,施工周期内节省此项费用约 236.3 万元。

(2) 避免停工损失的效益

气膜内全天候作业避免了因重污染预警、大风(四级以上)、暴雨预警以及重大节日等导致的停工。经统计,在本项目土方施工期间(2024-05-14—2024-10-05)暴雨预警 4 d、大风预警 13 d、空气污染 14 d、中高考期间 7 d,共节约工期 38 d;主体结构施工期间(2024-10-04—2025-02-27)大风预警 42 d、空气污染 14 d、两会期间 15 d,共计节约工期 71 d;由此节约的工期成本共计约 228.2 万元。

(3) 冬季施工节能降耗效益

冬季混凝土浇筑时,气膜内平均温度较露天环境高 15℃ 以上,大大减少了混凝土保温养护措施费用,经统计,本项工程冬季混凝土浇筑期间(2024-10-21—2025-02-27)共计节约费用约 48.3 万元。

(4) 节约基坑排水费用

雨季施工时,气膜覆盖有效减少了雨水进入基坑,大大减少了排水需求,本项工程施工中节约雨季基坑排水费用约 2 万元。

综上所述,本项目采用气膜技术后产生的整体经济效益共计 514.8 万元。该效益不仅完全覆盖了气膜技术的投资成本(327 万元),还产生了直接经

济效益 187.8 万元。此外,气膜施工显著减少了扬尘和噪声污染,施工期间各类投诉事件减少了约 150 件,带来了良好的社会与环境效益。

3 结 论

(1) 气膜技术应用于大型水务工程基坑施工时,具有良好的扬尘减排作用,经逐时数据计算,膜外扬尘比膜内扬尘 TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 的减排比例分别为 63.5%、55.1%、43.4%。

(2) 采用建筑声学测量系统测量时基坑气膜内外噪声衰减最高可达 60.9 dB(5 000 Hz,81.9 dB 至 21 dB),100 Hz~5 000 Hz 平均衰减 47 dB;采用连续噪声监测系统监测时,膜内外噪声平均衰减 7 dB。

(3) 气膜技术具有良好的隔声和抑制扬尘作用,可以减少扬尘防治措施投入,同时可以明显减少噪声扰民问题;在重污染预警、大风预警情况下连续施工,避免停工造成延期损失,缩短工期,具有较好的经济效益。

(4) 研究验证了气膜技术在扬尘与噪声协同控制中的优势,但也存在一定的应用局限和改进空间,如气温升高的季节,在气膜内高温高尘环境下,需做好内部施工人员的作业防护。

参考文献:

- [1] 孙雨欣,段媛媛,王文婷,等. 施工现场扬尘噪声污染的智能化监测研究[J]. 中国设备工程,2022(13): 173-174.
- [2] 焦 冉. 充气膜结构在基坑工程中的应用[J]. 建筑技术,2025,56(7):827-830.
- [3] 北京市规划和自然资源委员会. 通州区海绵城市专项规划(2021—2035)[R]. 北京:北京市规划和自然资源委员会,2023.
- [4] 北京市人民代表大会常务委员会. 北京市大气污染防治条例(2023 年修订版)[S]. 北京,2023.
- [5] 绿色施工管理规程:DB11/T 1192—2023[S]. 北京:北京市市场监督管理局,2023.
- [6] 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.

(下转第 161 页)

- [2] 黄智敏,付波,陆汉柱,等. 溢洪道弯道段流态改善试验研究和应用[J]. 广东水利水电,2024(4):9-13,24.
- [3] 王志超,许新发,邬年华,等. 太湖水库弯曲溢洪道水流特征及优化措施研究[J]. 水利水电技术,2019,50(3):110-116.
- [4] 徐岗,王斌,周文妍. 诸暨青山水库除险加固工程溢洪道优化布置研究[J]. 浙江水利科技,2009(2):26-27,34.
- [5] 陆芳春,徐海飞,何晓敏. 横锦水库除险加固工程溢洪道优化布置研究[J]. 浙江水利科技,2006(5):4-6.
- [6] 林荷节,屠兴刚,史斌. 青山水库泄洪隧洞出口消力池研究[J]. 浙江水利科技,2022,50(6):96-99.
- [7] 毛昶熙,周名德,柴恭纯,等. 闸坝工程水力学[M]. 第2版. 北京:中国水利水电出版社,2019.
- [8] 史修府,牧振伟,吕智,等. 溢洪道转弯段消力池水力特性优化模拟研究[J]. 长江科学院院报,2024,41(12):91-100.
- [9] 黄智敏,何小惠,黄健东,等. 阳江抽水蓄能电站下库溢洪道消能研究[J]. 水力发电学报,2007,26(5):92-96.
- [10] 王二平,赵静雅,孙东坡,等. 宽浅陡槽急流动量分布特征及稳定性研究[J]. 水土保持学报,2011,25(1):249-252.
- [11] 孙东坡,薛海,宋永军,等. 宽浅陡槽水流的稳定性及控导措施[J]. 武汉大学学报(工学版),2008,41(3):29-33,42.
- [12] 孙东坡,罗秋实,严军,等. 控导浅层急流的潜没式三角翼体特性研究[J]. 水科学进展,2007,18(4):509-515.
- [13] 高利瑶. 王瑶水库溢洪道泄洪消能特性研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2024.
- [14] 李强,林浩,孔筱雅. 基于FLOW-3D的溢洪道数值模拟[J]. 水科学与工程学报,2025(4):50-52.
- [15] 李勇,李松平,杨炬敏,等. 基于数值模拟的溢洪道水流沿程变化与护坡高度合理性分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2024,22(2):399-408.
- [16] 苏晓玉,潘亚炜,苏保印,等. 前坪水库溢洪道过流能力数值模拟研究与应用[J]. 河南水利与南水北调,2024,53(1):73-74.

(上接第154页)

- [7] 海绵城市建设技术指南:GB/T 51345—2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [8] U S. Environmental Protection Agency. Guidelines for Dust Control in Construction[R]. Washington, DC: EPA, 2018.
- [9] 兰琪. 建筑施工场所扬尘噪声在线监测系统研究与设计[J]. 山西电子技术,2018(1):84-87.
- [10] 扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南:HJ 772—2015[S]. 北京:中国环境科学出版社,2015.
- [11] U S. Environmental Protection Agency. AP-42: Compilation of Air Pollutant Emission Factors[S]. Washington, DC: EPA, 1995.
- [12] Architectural Institute of Japan. Guidelines for Environmental Design of Buildings[S]. Tokyo: AIJ, 2016.
- [13] International Tunnelling Association. Guidelines for Good Working Practice in the Tunnel Environment[R]. Switzerland: ITA, 2018.
- [14] 声环境质量标准:GB 3096—2008[S]. 北京:中国环境科学出版社,2008.