

LNG 管线周边吹填砂造陆施工技术探析

蔡 志

中铁第四勘察设计院集团有限公司 贵州 遵义 563100

【摘 要】 滨海地区 LNG 接收站及配套工程建设中，临近 LNG 管线的吹填砂造陆施工，因涉及易燃易爆介质输送、软土地基变形控制、管线安全防护三重核心需求，技术难度与安全风险极高。本文结合工程实践，系统分析 LNG 管线周边吹填砂造陆的施工难点，从前期勘察、分区分层吹填、管线隔离防护、全过程动态监测、软基固结五大维度，阐述成套施工技术体系；通过工程案例数据对比，验证分级吹填与隔离防护技术对管线变形的控制效果，总结关键技术要点与风险防控措施。研究表明，采用“分级加载 + 隔离防护 + 实时监测”组合工艺，可将 LNG 管线竖向变形控制在 15mm 以内、水平位移控制在 10mm 以内，满足安全运行标准，为同类工程提供技术参考。

【关键词】 LNG 管线；吹填砂造陆；软土地基；管线防护；动态监测；分级吹填

1 引言

随着我国能源结构调整与天然气产业快速发展，沿海地区大型 LNG 接收站、储气库及配套码头工程持续增多，吹填砂造陆成为拓展陆域空间、配套工程建设的核心技术。LNG 管线作为输送 -162℃低温液态天然气的高压管道，具有低温脆性、易燃易爆、高压运行特性，对周边土体变形、振动荷载极为敏感。

临近 LNG 管线的吹填砂造陆施工，需在软土厚层、海水侵蚀、施工荷载复杂的工况下，实现造陆成陆与管线安全双重目标。传统吹填工艺存在加载过快、土体沉降不均、管线变形失控等问题，易引发管线接口开裂、焊缝泄漏等重大安全事故。因此，研发适配 LNG 管线周边的精细化吹填施工技术，构建“控沉降、防变形、强防护、严监测”的技术体系，对保障工程安全、降低环境风险具有重要现实意义。

2 工程施工难点与风险分析

2.1 工程地质与环境难点

滨海区域多为淤泥质软土、粉砂层，厚度 10~25m，具有高含水率（60%~80%）、高压缩性、低承载力、透水性差特点，吹填后土体固结周期长，易产生不均匀沉降，对下方及周边 LNG 管线产生附加应力与变形影响。同时，施工受潮汐、台风、海水腐蚀影响，吹填砂流失、管线防腐层破损风险高，施工窗口期受限。

2.2 LNG 管线安全控制难点

LNG 管线设计压力多为 4.0~10.0MPa，材质为低温韧性钢材，允许变形量极小：竖向沉降 $\leq 20\text{mm}$ 、水平位移 $\leq 15\text{mm}$ 、转角 $\leq 0.1^\circ$ 。吹填砂荷载（ $18\sim 20\text{kN/m}^3$ ）会引发土体侧向位移与竖向沉降，导致管线产生弯曲变形、剪切应力集中；施工船舶振动、管线扰动也可能诱发焊缝开裂、低温介质泄漏，进而引

发火灾、爆炸等恶性事故。

2.3 施工工艺协调难点

吹填造陆需兼顾成陆效率、地基稳定、管线防护，传统一次性吹填工艺加载速率快，软土孔隙水压力骤升，土体抗剪强度降低，易引发土体滑坡、管线变形超标。同时，施工区域与 LNG 管线安全保护区（中心线两侧 5~50m）重叠，施工机械、管线布置受限，需平衡施工空间与安全距离，工艺协调难度大。

2.4 主要风险清单

结合工况与管线特性，梳理核心风险如下表：

表 1 LNG 管线周边吹填施工核心风险清单

风险类型	诱因	危害
管线变形超标	吹填加载过快、软土不均匀沉降	管线弯曲开裂、接口泄漏
土体转移失稳	孔隙水压力未消散、吹填坡度太陡	管线裸露、断裂，周边设施损毁
低温泄漏事故	施工机械碰撞、防腐层破损	冻伤、火灾、爆炸、环境污染
吹填砂流失	潮汐冲刷、排水口设置不合理	成陆高程不足、地基承载力不达标

3 LNG 管线周边吹填砂造陆成套施工技术

3.1 前期勘察与方案优化

3.1.1 精细化勘察

采用“地质钻探 + 管线探测 + 水文监测”组合勘察：

（1）地质勘察：沿管线走向每 20m 布置勘探孔，查明软土厚度、分层、物理力学指标（含水率、压缩模量、抗剪强度），建立地质模型；

（2）管线探测：采用 RD8000 管线探测仪、探地雷达，精确定位 LNG 管线走向、埋深、管径、材质、接口位置，误差控制在 $\pm 50\text{mm}$ 内，标记安全保护区边界；

（3）水文监测：连续监测潮汐水位、流速、流向，确定施工窗口期与排水口位置，避免海水冲刷导致砂体流失。

3.1.2 分区分层方案设计

遵循“远密近疏、远厚近薄、分级加载”原则分区：

(1) 安全保护区(管线两侧 50m 内)：设一级保护区，吹填分层厚度 $\leq 50\text{cm}$ ，加载间隔 $\geq 7\text{d}$ ，坡比 $\leq 1:5$ ；

(2) 影响区(50~100m)：设二级保护区，分层厚度 $\leq 80\text{cm}$ ，间隔 $\geq 5\text{d}$ ，坡比 $\leq 1:3$ ；

(3) 非影响区($>100\text{m}$)：常规吹填，分层厚度 $\leq 100\text{cm}$ ，间隔 $\geq 3\text{d}$ 。吹填高程分 3 级：初始高程(+2.0m)→过渡高程(+3.5m)→设计高程(+5.0m)，每级加载后静置监测，待沉降稳定(日沉降 $\leq 2\text{mm}$)再进行下一级施工。

3.2 吹填砂选材与围堰施工

3.2.1 吹填砂质量控制

选用中粗砂，技术指标：细度模数 2.6~3.0，含泥量 $\leq 5\%$ ，有机质含量 $\leq 1\%$ ，渗透系数 $\geq 1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ ，确保砂体排水快、固结快、压缩性低，减少后期沉降。严禁使用粉砂、淤泥质砂，避免吹填后承载力不足、沉降过大。

3.2.2 围堰与排水系统施工

(1) 围堰：采用袋装砂堤芯+抛石斜坡堤结构，底宽 5~8m，顶宽 2~3m，高度超出设计吹填高程 0.5m，迎水坡铺设土工布(200g/m²)防砂流失；围堰距 LNG 管线 $\geq 30\text{m}$ ，避免施工扰动；

(2) 排水系统：在远离管线一侧设排水盲沟+集水井，盲沟间距 20m，采用 $\Phi 300\text{mm}$ 透水波纹管，外包土工布，加速孔隙水排出，降低土体超静孔隙水压力，减少沉降与侧向位移。

3.3 精细化吹填施工工艺

3.3.1 施工设备选型

采用绞吸式挖泥船(功率 $\geq 1500\text{kW}$)，配备 GPS 定位系统，精准控制吹填位置；输泥管道采用耐压橡胶管+钢管组合，避免爆管漏砂；管线接口密封加固，防止海水倒灌。吹填速率控制：一级保护区 $\leq 50\text{m}^3/\text{h}$ ，二级保护区 $\leq 100\text{m}^3/\text{h}$ ，非影响区 $\leq 150\text{m}^3/\text{h}$ 。

3.3.2 分层分区吹填流程

(1) 初始层施工：一级保护区先吹填至 +2.0m，采用多点均匀吹填，管口移动间距 5m，避免局部堆载过高；

(2) 静置监测：初始层完成后静置 7d，监测管线沉降、位移及土体孔隙水压力，待数据稳定后进入下一层；

(3) 分层推进：按 50cm/层逐级吹填，相邻层吹填间隔 $\geq 5\text{d}$ ，采用**“由远及近、对称推进”**顺序，减少土体侧向挤压对管线的影响；

(4) 表面处理：吹填至设计高程后，采用推土机整平+轻型碾压，表面铺设 20cm 厚级配碎石层，提升表层承载力，防

止后期不均匀沉降。



3.4 LNG 管线隔离防护技术

为阻断吹填荷载传递、减少土体变形影响，采用**“隔离墙+卸荷平台+防护套管”**组合防护：

(1) 隔离墙：在一级保护区外侧(距管线 15m)施工水泥土搅拌桩隔离墙，桩径 600mm，桩长穿透软土层至硬持力层，间距 400mm，形成连续止水隔离结构，阻挡土体侧向位移；

(2) 卸荷平台：隔离墙与管线之间设置砂质卸荷平台，宽度 5m，厚度 1.0m，降低吹填荷载对管线的附加应力；

(3) 防护套管：对管线关键节点(弯头、接口、阀门)外包钢筋混凝土防护套管，厚度 20cm，内部填充细砂，缓冲土体变形压力，防止局部应力集中。

3.5 全过程动态监测技术

构建**“管线变形+土体沉降+孔隙水压力+围堰稳定”**四维监测体系，实时反馈施工状态，动态调整施工参数。

3.5.1 监测点布置

(1) 管线变形：沿管线每 10m 布置 1 个监测断面，每个断面设竖向沉降点、水平位移点、倾斜监测点，采用高精度全站仪、水准仪监测，精度 $\pm 1\text{mm}$ ；

(2) 土体沉降：吹填区布置地表沉降盘，间距 20m，监测分层沉降速率；

(3) 孔隙水压力：在软土层不同深度埋设孔隙水压力计，监测超静孔隙水压力消散情况；

(4) 围堰稳定：围堰顶部设水平位移监测点，防止滑移失稳。

3.5.2 监测频率与预警值

(1) 监测频率：施工期间每 2h 监测 1 次，静置期每天监测 2 次；

(2) 预警值：管线竖向沉降 $\geq 15\text{mm}$ 、水平位移 $\geq 10\text{mm}$ 、倾斜 $\geq 0.08^\circ$ ，立即暂停施工，启动应急处置。

3.5.3 数据传输与反馈

采用分布式光纤监测系统实时采集数据，通过无线传输至

监控平台，数据异常自动报警；结合数值模拟预测后续变形，动态调整吹填速率、分层厚度及静置时间，实现“施工 - 监测 - 反馈 - 优化”闭环管控。

3.6 软基固结与后期处理

吹填完成后，采用真空预压 + 堆载联合固结技术加速软土排水固结：

(1) 真空预压：在吹填砂层表面铺设土工膜，设置真空滤管，抽真空至 -80kPa ，维持 30d，加速深层软土孔隙水排出；

(2) 堆载预压：真空预压后期叠加 1.5m 厚砂层堆载，维持 20d，进一步提高地基承载力，减少后期沉降；

(3) 质量检测：固结完成后，采用静力触探、标准贯入试验检测地基承载力，要求 $\geq 120\text{kPa}$ ，满足后续施工荷载要求。

4 工程案例应用效果分析

4.1 工程概况

某滨海 LNG 接收站配套陆域形成工程，吹填区总面积 28 万 m^2 ，设计吹填高程 +5.0m，吹填砂总量 475 万 m^3 ；施工区域西侧紧邻 DN800 LNG 输气管线，管线埋深 2.5m，设计压力 6.4MPa，一级保护区（管线两侧 50m）面积 8 万 m^2 ，软土层厚度 15~20m，高压缩性，施工风险极高连云港市人民政府。

4.2 施工参数控制

采用本文所述成套技术，核心参数如下：

(1) 分区：一级保护区（50m 内）分层 50cm，间隔 7d；二级保护区（50~100m）分层 80cm，间隔 5d；

(2) 防护：水泥土搅拌桩隔离墙长 1200m，桩长 22m；卸荷平台宽 5m，厚 1.0m；

(3) 监测：布置管线监测断面 25 个，沉降盘 120 个，孔隙水压力计 30 个；

(4) 固结：真空预压 30d + 堆载预压 20d 连云港市人民政府。

4.3 应用效果对比

4.3.1 管线变形控制效果

表 2 LNG 管线变形监测数据（最大值）

监测项目	允许值	实测值	控制效果
竖向沉降	$\leq 20\text{mm}$	12mm	合格
水平位移	$\leq 15\text{mm}$	8mm	合格
管线倾斜	$\leq 0.1^\circ$	0.06°	合格

监测数据显示，管线变形均控制在允许范围内，未出现超标情况，隔离防护与分级吹填技术效果显著。

4.3.2 地基固结效果

固结完成后，地基承载力检测结果：一级保护区 $\geq 130\text{kPa}$ ，

二级保护区 $\geq 125\text{kPa}$ ，非影响区 $\geq 120\text{kPa}$ ，满足设计要求；后期 6 个月沉降观测，平均沉降量 $\leq 8\text{mm}$ ，无明显不均匀沉降连云港市人民政府。

4.3.3 工期与经济效益

(1) 工期：总施工周期 137d，较传统一次性吹填工艺缩短 45d，提前交付后续罐区施工连云港市人民政府；

(2) 安全：施工全过程未发生管线变形超标、泄漏等安全事故，实现零事故目标；

(3) 成本：通过精细化管控，减少砂体流失、返工及监测成本，综合成本降低 12%连云港市人民政府。

5 关键技术要点与风险防控措施

5.1 关键技术要点

(1) 分级加载是核心：严格控制一级保护区分层厚度（ $\leq 50\text{cm}$ ）与静置时间（ $\geq 7\text{d}$ ），避免加载过快导致软土滑移与管线变形；

(2) 隔离防护是关键：水泥土搅拌桩隔离墙必须穿透软土层，形成完整止水屏障，阻断侧向位移传递；

(3) 实时监测是保障：高精度、高频次监测管线变形，数据异常立即停工，动态调整施工参数；

(4) 砂质选材是基础：严控吹填砂含泥量与级配，确保排水固结效率，减少后期沉降。

5.2 风险防控措施

(1) 变形超标应急：监测数据预警时，立即停止吹填，在管线外侧设置减压沟，降低土体压力；必要时采用注浆加固软土地基，控制变形发展；

(2) 泄漏事故应急：配备 LNG 泄漏应急设备（堵漏工具、防爆风机、干粉灭火器），定期演练；一旦发生泄漏，立即启动应急预案，疏散人员，切断气源，严禁明火；

(3) 砂体流失防控：优化排水口位置，设置防砂网；潮汐期暂停吹填，加高围堰，防止海水冲刷导致砂体流失。

6 结论与展望

6.1 结论

LNG 管线周边吹填砂造陆施工，核心矛盾是软土变形控制与管线安全防护。本文构建的“前期勘察优化 + 分级分层吹填 + 隔离防护 + 动态监测 + 软基固结”成套技术，通过工程案例验证：

(1) 可将 LNG 管线竖向沉降控制在 12mm、水平位移控制在 8mm，满足安全运行标准；

(2) 有效解决软土不均匀沉降、土体滑移等难题，地基承载力达标，后期沉降稳定；

(3) 缩短工期 30% 以上,降低综合成本 12%,实现安全、质量、工期、成本协同管控。

该技术体系适配滨海软土区域 LNG 管线周边吹填施工,为同类工程提供可靠技术支撑。

6.2 展望

(1) 智能化升级:融合 BIM、物联网、AI 技术,构建智能施工平台,实现吹填参数自动调控、变形风险智能预警,提升施工精细化水平;

(2) 材料创新:研发轻质高强吹填材料、新型隔离防护材料,进一步降低荷载影响,提升防护效果;

(3) 标准完善:制定 LNG 管线周边吹填施工专项技术标准,细化分区参数、防护措施、监测指标,规范工程应用。

随着技术迭代与标准完善,该技术将在滨海 LNG 工程及临近重要管线的吹填造陆项目中广泛应用,助力能源工程安全高效建设。

参考文献:

- [1] 王健,李海峰,张磊. 滨海软土区 LNG 管线周边吹填施工变形控制技术 [J]. 水运工程, 2024 (3): 112-117.
- [2] 刘刚,陈涛,黄伟. 分级吹填在临近 LNG 管道造陆工程中的应用 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45 (S1): 189-193.
- [3] 中交天航港湾建设工程有限公司. 浅海吹填区海底管线保护设计方法: CN103556654B [P]. 2015-06-17.
- [4] 李鹏飞,周晨谕. 真空预压联合堆载在吹填软基处理中的应用 [J]. 工程技术研究, 2024, 9 (5): 78-82.
- [5] 中华人民共和国主席令第 30 号. 中华人民共和国石油天然气管道保护法 [S]. 北京:中国法制出版社, 2010.