

5 万方 LNG 储罐机械升顶施工关键技术与应用

刘耀玺

河南航天液压气动技术有限公司 河南 郑州 451191

【摘要】 5 万方 LNG 双金属全容储罐是中小型液化天然气储配站的核心构筑物，穹顶升顶是储罐安装施工中工艺复杂、精度要求高、安全风险大的关键工序。传统分体吊装、高空拼装工艺存在高空作业多、拼装精度差、施工周期长、安全隐患突出等问题。机械气压升顶技术依托密闭罐体气压差原理，实现穹顶地面拼装、整体气压顶升就位，可有效规避高空作业风险、提升施工质量与效率。本文以 5 万方 LNG 双金属全容储罐为工程载体，系统阐述机械气压升顶的施工原理、系统组成与完整工艺流程，梳理升顶施工的核心关键技术，分析施工过程中的精度控制、密封防护、动态平衡及应急管控要点，结合工程实测参数验证技术应用效果。工程实践表明，该升顶技术成型质量稳定、施工安全性高、经济性优异，可满足 5 万方 LNG 储罐标准化施工要求，可为同类低温储罐升顶工程提供技术参考与实践借鉴。

【关键词】 LNG 储罐；5 万方容积；机械升顶；气压顶升；施工技术；质量控制

1 引言

随着国内液化天然气能源产业快速发展，中小型 LNG 储配站建设规模持续扩大，5 万方双金属全容 LNG 储罐凭借结构安全性高、保温性能优异、造价适中的优势，广泛应用于城市燃气调峰、工业园区能源储备等工程场景。LNG 储罐穹顶作为上部核心承重与密封结构，传统施工多采用高空分片吊装、现场拼装焊接工艺，施工高度大、作业面分散，受风力、天气影响显著，极易出现拼装错位、焊接变形、密封性不足等质量问题，同时高空作业风险高、施工周期长，难以适配标准化、精细化施工要求。

机械气压升顶技术是大型储罐穹顶安装的主流先进工艺，区别于传统高空拼装模式，该技术可实现穹顶在罐底地面整体拼装成型，通过密闭罐体气压差实现整体平稳顶升，直至设计标高完成对接焊接。该工艺大幅减少高空作业量，规避高空坠落、构件吊装风险，同时保障穹顶整体拼装精度与结构整体性，具备施工效率高、成型质量好、安全可控性强等突出优势。

目前 5 万方 LNG 储罐升顶施工技术应用多依托施工经验，对系统配置、精度控制、动态平衡调控等关键技术缺乏系统性梳理，施工过程易出现顶升偏移、速度不均、密封失效等问题。基于此，本文结合 5 万方双金属全容 LNG 储罐工程实例，全面剖析机械升顶施工原理、核心工艺、关键技术及质量安全控制要点，总结工程应用成效，为同类 LNG 储罐升顶施工标准化、规范化开展提供理论与实践支撑。

2 工程概况与升顶技术原理

2.1 工程基本参数

本次研究对象为 5 万方双金属全容 LNG 储罐，储罐采用外罐混凝土、内罐低温钢材的双金属全容结构，储罐内直径 52.0m，穹顶最大跨度 51.8m，穹顶总自重约 458t，顶升总行程 28.65m。

穹顶采用钢拱顶结构，地面整体拼装成型后采用机械气压整体升顶工艺施工，罐体设计压力、密封性能、结构精度均满足低温储罐施工规范要求。工程施工场地开阔，施工周期紧凑，对升顶施工的安全性、稳定性、精准性要求极高。储罐核心施工参数如表 1 所示。

参数项目	技术指标
储罐容积	50000m ³
罐体内径	52.0m
穹顶跨度	51.8m
穹顶自重	458t
顶升总行程	28.65m
设计顶升压力	1.2~1.5kPa
允许顶升偏差	≤10mm

2.2 机械升顶技术原理

LNG 储罐机械气压升顶核心原理为**气压差静力顶升**。在储罐底板、罐壁下部与地面拼装完成的穹顶之间形成密闭腔体，通过大功率变频风机向密闭腔体持续输送洁净空气，逐步提升腔体内气压，利用罐内外气压差产生的静态浮力，克服穹顶自重、导向系统摩擦力及风荷载阻力，实现穹顶整体平稳上升。通过变频风机调控进气量、泄压阀调节腔体压力，精准控制顶升速度与姿态，配合多点位平衡导向系统，保障穹顶垂直平稳顶升，无偏移、无倾斜，最终顶升至预设标高，与罐顶压缩环精准对接固定，完成整体升顶施工。

相较于传统吊装工艺，机械升顶属于静力施工模式，无冲击荷载，对储罐罐体结构无损伤，且全程可控性强，可精准调控顶升速度与姿态，适配大跨度、大自重穹顶的整体安装施工。

3 机械升顶系统组成与施工流程

3.1 升顶系统核心组成

5 万方 LNG 储罐机械升顶系统为一体化协同作业体系，主

要由供气动力系统、密封系统、平衡导向系统、监测调控系统四大模块组成，各系统协同工作，保障升顶施工安全稳定开展，系统组成及功能如表 2 所示。

系统模块	核心设备组成	主要功能
供气动力系统	变频离心风机、进气管道、稳压装置	提供稳定气源，调控进气量，维持腔体气压稳定
密封系统	柔性密封帘、密封胶条、封堵压板	封闭罐体间隙，保障腔体密闭性，防止气压泄漏
平衡导向系统	均布钢丝绳、导向滑轮、张拉调节器	约束穹顶水平偏移，保障垂直顶升，纠正倾斜偏差
监测调控系统	压力传感器、位移监测仪、风速仪、控制柜	实时监测气压、高度、姿态、风速，动态调控施工参数

3.2 整体施工工艺流程

5 万方 LNG 储罐机械升顶施工流程标准化、工序衔接紧密，核心施工步骤如下：

第一，地面拼装与探伤。在储罐内部平整地面完成穹顶钢结构分片拼装、焊接作业，对所有焊缝进行无损探伤检测，确保穹顶结构成型质量，消除结构缺陷隐患。

第二，系统布设安装。完成变频风机、进气管道、密封装置、平衡导向钢丝绳及监测设备的安装调试，检查各设备运行状态，确保系统联动正常。

第三，腔体密封封堵。对罐壁板间隙、管道洞口、底部缝隙进行全面密封封堵，安装柔性密封帘，形成完整密闭腔体，完成气密性预检测。

第四，预顶升调试。低速启动风机，小幅提升腔体内气压，实现穹顶微起升，检查穹顶姿态、密封性能、导向系统运行状态，排查设备故障与密封泄漏问题。

第五，正式匀速顶升。调试合格后，调控风机功率，保持匀速缓慢顶升，全程实时监测气压、顶升高度、穹顶水平度，动态调整参数，严控偏移偏差。

第六，对位固定与泄压。穹顶顶升至设计标高后，微调姿态精准对位罐顶压缩环，完成临时固定与焊接打底，随后缓慢开启泄压阀，平稳释放罐内气压，拆除升顶辅助设备。

4 机械升顶核心关键施工技术

4.1 地面整体拼装与精度控制技术

地面整体拼装是保障升顶质量的基础，相较于高空拼装，地面作业可大幅提升拼装精度。施工中采用分区对称拼装工艺，以储罐中心为基准，精准定位穹顶径向、环向构件，严控拼装间隙与平整度。拼装完成后，对穹顶圆度、标高、平整度进行全面复测，控制穹顶整体圆度偏差≤8mm，平面高差≤5mm，杜

绝因拼装变形导致的顶升倾斜、对位偏差问题。同时严格把控焊接工艺，采用分层对称焊接，减少焊接残余变形，保障穹顶整体结构刚度与稳定性。

4.2 密闭腔体密封技术

腔体密封性是气压升顶成功的核心前提，气压泄漏会直接导致顶升动力不足、姿态失稳。针对 5 万方大跨度储罐缝隙多、密封难度大的特点，采用多重密封防护工艺。对罐壁板竖向缝隙、底部孔洞采用密封胶条+压板封堵；在穹顶与罐壁衔接位置设置高强度柔性密封帘，利用气压自紧原理实现动态密封；施工前进行气密性试验，稳压 10min 气压无明显下降即为合格，彻底杜绝漏气、泄压问题，保障顶升过程气压稳定。

4.3 多点位动态平衡导向技术

大跨度穹顶顶升易受风力、受力不均影响产生偏移倾斜，需依托平衡导向系统精准管控姿态。本工程采用 32 根钢丝绳均布张拉的平衡体系，呈网状对称布置于穹顶四周，通过张拉调节器统一调控钢丝绳预紧力，保障受力均匀。顶升过程中，实时监测穹顶水平度，一旦出现小幅偏移，通过微调对应位置钢丝绳张力快速纠偏，严格控制穹顶水平偏差≤10mm，确保全程垂直平稳顶升，无晃动、无倾斜。

4.4 气压与顶升速度协同调控技术

顶升速度与腔体气压的协同调控是施工核心难点，速度过快易引发结构晃动，速度过慢易受外界风扰影响。施工采用分级稳压顶升模式：顶升起步阶段低压低速，缓慢克服静摩擦力；中段匀速稳压，控制顶升速度稳定在 0.3~0.5m/min，保持腔体内气压恒定在 1.2~1.5kPa；临近就位阶段减速稳压，小幅微调姿态，精准对接标高。通过变频风机闭环调控，实现气压、速度、姿态的动态协同，保障顶升全过程平稳可控。

4.5 大风天气动态防控技术

室外储罐升顶施工受风力影响极大，规范要求六级及以上大风禁止顶升作业。施工中布设实时风速监测设备，全程动态监测环境风速。微风工况下，通过加密姿态监测、微调平衡系统张力抵消风扰影响；突发大风工况立即停止顶升，保持腔体稳压，锁定穹顶姿态，待风速回落至安全范围后继续施工，有效规避风荷载引发的偏移、失稳风险。

5 施工质量与安全控制要点

5.1 质量控制要点

一是严格把控拼装质量，所有构件尺寸、焊接质量必须达标，杜绝拼装变形、焊缝缺陷；二是强化密封质量管控，全方位排查腔体缝隙，确保气密性合格，杜绝隐性漏气；三是严控顶升精度，全程监测穹顶水平度、垂直度，偏差超限时立即停

机纠偏；四是精准控制就位对接精度，就位后复测标高与对位间隙，保障穹顶与罐顶结构贴合紧密、对接精准，为后续焊接成型质量奠定基础。

5.2 安全控制要点

升顶施工前完成专项安全技术交底，核查所有设备运行状态，制定气压泄漏、穹顶偏移、突发大风等应急处置预案；顶升全程实行统一指挥、分区值守，各岗位人员实时反馈监测数据，保持通讯畅通；施工区域设置警戒区，禁止无关人员进入；严禁在穹顶悬空状态下开展焊接、检修作业；泄压过程缓慢匀速，杜绝快速泄压导致的穹顶突发沉降、结构晃动，保障施工全过程安全可控。

6 工程应用效果分析

本次 5 万方 LNG 储罐采用机械气压升顶技术施工，全程一次性顶升成功，无偏移、无倾斜、无漏气故障，施工效果优良。具体应用成效如下：一是施工安全性大幅提升，全程仅少量地面作业，无高空拼装、吊装风险，安全事故零发生；二是成型精度优异，穹顶最终就位偏差仅 6mm，远低于规范允许值，圆度、平整度均满足设计及规范要求；三是施工效率显著提升，相较于传统高空拼装工艺，施工周期缩短 40%以上，大幅节约工期成本；四是结构整体性更好，地面整体拼装成型，焊接质量稳定，无分段拼接残余变形，储罐整体密封性与结构稳定性大幅提升。

同时，该技术设备投入少、可重复利用，无需大型吊装设备进场，施工成本可控，相较于传统工艺具备显著的经济与技

术优势，适配 5 万方 LNG 储罐标准化施工推广应用。

7 结论与展望

7.1 结论

本文结合 5 万方 LNG 双金属全容储罐工程实例，系统研究机械升顶施工关键技术与应用效果，得出以下结论。第一，机械气压升顶技术适配 5 万方 LNG 大跨度穹顶施工，通过气压差静力顶升，可实现穹顶地面整体拼装、一次性整体就位，安全性、精准性、经济性优势突出；第二，腔体密封技术、多点位平衡导向技术、气压速度协同调控技术是保障升顶施工成功的关键，可有效解决大跨度穹顶顶升偏移、漏气、姿态失稳等难题；第三，严格落实地面拼装精度控制、气密性检测、动态姿态监测及分级稳压顶升工艺，可有效保障升顶施工质量，成型精度满足规范要求，结构整体性优异；第四，该技术可大幅减少高空作业、缩短施工周期、降低安全风险，适配中小型 LNG 储罐规模化施工。

7.2 展望

本次施工以常规静力工况为主，未结合智能化监测、BIM 仿真等新技术开展优化应用。后续可引入 BIM 三维仿真技术，提前模拟顶升全过程，预判施工风险、优化施工参数；同时结合自动化智能监测系统，实现气压、姿态、风速数据的实时智能分析与自动调控，进一步提升升顶施工的智能化、精细化水平，为大型 LNG 储罐施工技术升级提供支撑。

参考文献：

- [1] 倪志海. 50000m³ 液化天然气低温储罐顶盖气吹升工艺[J]. 安装, 2024(06):45-48.
- [2] 叶海明. 50000m³ LNG 储罐钢罐顶气升技术[J]. 工程建设与设计, 2017(22):156-158.
- [3] 王浩, 李建军. 大型 LNG 储罐穹顶气压顶升施工关键技术[J]. 石油工程建设, 2023, 49(04):67-71.
- [4] 张天宇, 赵亮. 低温储罐气升顶施工密封与平衡控制技术[J]. 施工技术, 2024, 53(10):89-92.
- [5] 刘博文, 陈阳. 大型储罐穹顶整体气压顶升施工风险管控[J]. 化工建设工程, 2023, 45(03):34-37.
- [6] 王明远, 孙晓峰. LNG 储罐机械升顶与传统吊装工艺对比分析[J]. 当代化工, 2024, 53(02):112-115.
- [7] Zhang L, Chen H. Construction Technology and Quality Control of Pneumatic Roof Lifting for Large LNG Tanks[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023, 1156:1-6.