

液化天然气的运输特点分析

刘伟

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司煤制油化工销售分公司 宁夏 银川 750002

摘要：液化天然气（LNG）运输兼具技术挑战与经济考量。海运依托LNG专用船，利用膜式或球形储罐、双燃料发动机及BOG高效处理技术，实现大规模跨洋运输，具规模经济优势；陆运以公路罐车和铁路罐箱为主，灵活覆盖短途与内陆长距离需求；管道运输则通过高压无缝钢管及智能调控系统，保障长期稳定供应。三者互补，共同满足LNG多元化运输需求，同时需强化低温绝热、安全监测及应急管理，确保全程安全高效。

关键词：液化天然气；运输方式；运输特点

引言：液化天然气（LNG）作为清洁高效的能源载体，在全球能源结构转型中扮演着关键角色。其运输需兼顾低温保持（-162°C）、易燃易爆防控及经济性优化，形成海运、陆运、管道运输并存的多元化体系。海运以大型LNG船为核心，依赖先进绝热与BOG处理技术实现跨洋运输；陆运通过公路罐车与铁路罐箱灵活覆盖短途及内陆长距离；管道运输则以高压管线保障稳定供应。本文将从技术特性、运输方式、安全风险管理等维度，系统剖析LNG运输的核心特点与发展趋势。

1 LNG的基本特性与运输需求

1.1 LNG的物理化学特性

(1) 低温液化与体积压缩比：LNG即液化天然气，是天然气在低温环境下（约-162°C）液化形成的产物。这一极低温度使其体积大幅缩小，体积压缩比高达1:600，原本气态的天然气经液化后，存储和运输空间显著减少，为长距离、大量运输创造了基础条件，也让大规模储存设施的空间利用率大幅提升。(2) 易燃易爆性、挥发性：LNG属于易燃易爆物质，其蒸气与空气混合达到一定浓度范围（爆炸极限）时，遇火源易引发爆炸。同时，LNG具有较强挥发性，即便在低温储存和运输过程中，受外界环境温度影响，部分LNG会汽化产生boil-offgas（蒸发气体，简称BOG）。若BOG不能及时合理处理，会导致储存或运输设备内压力升高，增加安全风险，这对运输过程中的气体处理系统提出了严格要求。

1.2 LNG运输的核心需求

(1) 低温保持与绝热要求：由于LNG需维持在-162°C的低温状态，运输设备必须具备卓越的低温保持和绝热性能。无论是LNG运输船的储罐，还是公路、铁路运输的槽车，都需采用高效绝热材料，减少外界热量传入，降低LNG汽化量，避免因温度升高导致的压力异常，保障运输过程中LNG的物理状态稳定。(2) 安全性：安全

性是LNG运输的重中之重。运输设备需配备完善的防泄漏系统，如密封性能优良的阀门、管道及储罐结构，防止LNG泄漏引发安全事故。同时，还需设置防爆装置，如可燃气体检测报警系统、紧急切断系统等，应对可能出现的爆炸风险，确保运输全程安全。(3) 经济性：LNG运输需注重经济性，而规模化运输是降低成本的关键。通过大规模运输，可摊薄单位运输成本，如大型LNG运输船单次运输量更大，单位货物的运输费用低于小型运输工具。此外，优化运输路线、提高运输设备利用率等方式，也能进一步降低运输成本，提升LNG运输的经济性，满足市场对低成本能源运输的需求^[1]。

2 LNG主要运输方式及其特点

2.1 海运：LNG专用船运输

2.1.1 技术特点

(1) 膜式与球形储罐设计：这是LNG船储罐的两大主流技术。膜式储罐采用薄金属膜（如殷瓦钢）作为屏障，贴合船体结构，空间利用率高，能适配更大船型；球形储罐则以球形压力容器存储LNG，受力均匀，抗冲击性强，热损失率低，但占用空间较大，目前两种设计均能满足-162°C低温存储需求，保障LNG在运输中状态稳定。(2) 动力系统：早期LNG船多采用蒸汽轮机，可利用BOG作为燃料，降低能源浪费，但能耗较高、效率偏低；近年来双燃料发动机成为主流，既能使用传统燃油，也能燃烧BOG，能耗比蒸汽轮机降低约20%，同时减少碳排放，兼顾经济性与环保性，适配现代航运对能效的要求。(3) 挥发气（BOG）处理技术：BOG是LNG运输中不可避免的产物，若不处理会导致储罐压力升高。目前主流处理方式包括“再液化”和“作为燃料利用”：再液化技术通过制冷设备将BOG重新液化回储罐，减少损耗；作为燃料利用则直接将BOG供给船舶动力系统，实现能源回收，两种技术结合可将BOG处理率

提升至95%以上，保障运输安全与经济性^[2]。

2.1.2 经济性分析

(1) 运输成本构成：造船成本占比最高，一艘17万立方米级LNG船造价超2亿美元，且维护成本高昂；航线选择影响运输时长与燃油消耗，跨太平洋等长航线需优化路线以降低油耗；港口费用包括码头停泊、装卸作业等，专业LNG港口设施投入大，费用比普通货运港口高30%-50%，三者共同决定海运基础成本。(2) 规模经济效益：规模经济是海运降低单位成本的关键。以17万立方米级与20万立方米级LNG船为例，后者单次运输量提升约18%，但单位货物的造船成本、燃油消耗、人工成本等均降低8%-12%，目前20万立方米以上的“Q-Max”级LNG船已成为跨洋运输主力，大幅摊薄单位LNG运输成本，提升海运竞争力。

2.2 陆运：公路罐车与铁路运输

2.2.1 公路运输

(1) 低温罐车结构与安全措施：公路LNG罐车采用双层真空绝热储罐，内层为不锈钢材质，外层为碳钢，中间填充绝热材料并抽真空，能有效维持-162℃低温，热损失率控制在每天0.3%以内；安全措施方面，罐车配备紧急切断阀、安全阀、可燃气体探测器等，且罐体采用防碰撞设计，行驶中若发生泄漏，探测器可立即报警并触发紧急切断系统，避免事故扩大。(2) 适用场景：公路运输受罐车容量（通常30-50立方米）与续航里程（约500公里）限制，更适合短途运输，如从LNG接收站到内陆城市气化站、工业园区用户的接驳，或在无管道覆盖区域，为小型用户提供点对点配送，弥补长距离运输的灵活性不足。

2.2.2 铁路运输

(1) 专用LNG罐箱技术：铁路LNG运输以专用罐箱为核心，罐箱结构与公路罐车类似，但适配铁路货运车厢尺寸，采用模块化设计，可单独吊装、堆叠，方便在铁路与公路间转运；同时罐箱配备更强化的固定装置，能抵御铁路运输中的震动与冲击，确保低温绝热性能稳定，单罐箱容量可达60立方米，一列货运列车可搭载20-30个罐箱，单次运输量超1200立方米。(2) 跨区域长距离运输优势：相比公路，铁路运输续航里程更长（可达数千公里）、单次运输量更大，且受路况影响小，运输效率更稳定，适合跨省份、跨区域的长距离运输，如从西北LNG生产基地到华东消费市场的运输，能衔接海运无法覆盖的内陆地区，完善LNG运输网络。

2.3 管道运输

2.3.1 技术特点

(1) 高压输送与管线结构：管道运输采用高压输送模式，压力通常维持在10-12MPa，通过加压站保障天然气长距离流动；管线采用三层PE防腐涂层的无缝钢管，内壁光滑以减少摩擦损耗，部分关键路段配备阴极保护系统，抵御土壤腐蚀，确保管线寿命可达30年以上，适配长期连续输送需求。(2) 气化衔接与调控技术：与LNG运输衔接时，需通过接收站的高压气化器将LNG加热气化，加压至管道输送压力后注入管网。管线沿途设有调控中心，通过智能阀门调节流量与压力，结合在线泄漏检测系统，可实时监控输送状态，泄漏响应时间控制在分钟级，保障输送安全^[3]。

2.3.2 经济性分析

(1) 成本构成：初期基建成本占比最高，百公里高压管道造价约1.2-1.8亿元，需配套建设加压站、调控中心等设施；运维成本主要包括管线检测、设备维护及人员费用，约占总成本的15%-20%；能耗集中于加压站的动力消耗，单位运输能耗仅为公路运输的1/5。(2) 长期运营优势：一旦建成，管道运输的固定成本占比下降，单位运输成本随输送量增加而降低，年输送量超100亿立方米时，单位成本可降至0.15元/立方米以下，远低于海运和陆运，适合稳定的基础设施供应场景。

2.3.3 与LNG运输的互补性

(1) 固定路线vs灵活性：管道依托固定网络，实现“点对点”连续输送，如西三线管道从福建LNG接收站辐射赣、湘内陆，保障基础供气；LNG运输（海运、陆运）则可灵活调整目的地，槽车能深入管网盲区的偏远山区，船运可根据市场需求切换接收港，形成“主管网+灵活补给”的格局。(2) 场景适配互补：管道适配长期、大规模的常态化供应，LNG运输则擅长应急调峰与分散供应，如冬季用气高峰时，LNG槽车可快速补充管道缺口，而管道则为LNG接收站提供稳定的气化外输通道，两者协同满足多元供气需求。

3 LNG运输的安全与风险管理

3.1 主要风险类型

(1) 泄漏与爆炸风险（碰撞、设备故障）：泄漏是LNG运输的核心风险源头，多由碰撞或设备故障引发。海运中，LNG船若与其他船舶碰撞，可能导致储罐破损；陆运罐车急转弯或追尾时，罐体接口易松动；设备老化（如阀门密封件磨损、管道腐蚀）也会造成LNG泄漏。泄漏后，LNG迅速汽化形成可燃蒸气云，当浓度处于5%-15%的爆炸极限时，遇明火、静电等点火源会引发爆炸，破坏力极强，可能造成船体损毁、车辆报废及人员伤亡。(2) 低温伤害（人员冻伤、材料脆化）：LNG

维持-162°C的低温，接触人体会直接导致冻伤，若皮肤长时间接触，可能造成组织坏死；同时，低温会使运输设备的金属材料（如碳钢）发生脆化，强度下降，储罐、管道等结构易出现裂纹，进一步加剧泄漏风险，还可能导致阀门、仪表等设备失灵，影响运输系统正常运行。

（3）操作风险（装卸作业、BOG管理）：装卸作业环节操作不当易引发风险，如海运中船岸对接时，装卸臂密封不严会导致LNG泄漏；陆运罐车充装时，若超压充装或未排净罐内气体，可能引发罐体压力异常。此外，BOG管理不当也存在风险，若BOG产生量超过处理能力，储罐压力会持续升高，若安全阀失效，可能导致罐体爆裂，而直接排放BOG则会增加可燃气体浓度，提升爆炸隐患^[4]。

3.2 风险防控技术

（1）储罐双层真空绝热设计：这是抵御低温伤害、减少BOG产生的核心技术。储罐采用双层结构，内层为耐低温的不锈钢或镍合金材质，外层为高强度碳钢，两层之间抽成高真空并填充绝热材料（如珠光砂），能有效阻断外界热量传入，将每日热损失率控制在0.3%以内，既维持LNG低温状态，减少BOG生成，又避免外层材料因低温脆化，保障储罐结构安全。（2）紧急切断系统（ESD）与气体检测报警：ESD系统可在风险发生时快速切断危险源，当检测到泄漏、超压、超温等异常情况时，能自动关闭储罐进出口阀门、装卸臂阀门等，阻止LNG继续流动；气体检测报警系统则通过安装在运输设备关键部位的可燃气体探测器，实时监测LNG蒸气浓度，一旦超标立即发出声光报警，提醒工作人员及时处置，避免风险扩大。（3）船岸安全衔接协议（SISAP）：这是规范海运装卸作业、防范操作风险的重要机制。协议明确船方与岸方的安全职责，规定装卸前的设备检查（如装卸臂密封性、压力仪表准确性）、作业中的参数监控及应急处置流程，同时通过统一的通信频率和信号标准，确保船岸双方信息同步，避免因沟通不畅或操作标准不一引发安全事故。

3.3 应急管理机制

（1）泄漏处置技术（围堵、燃烧）：针对不同运输场景采用差异化处置方式。小规模泄漏时，使用防火堤、沙袋等围堵，防止LNG扩散，再通过低温泵将泄漏的LNG导回储罐；若泄漏量较大，可采用燃烧处置，在安全区域点燃泄漏的LNG蒸气，避免形成可燃蒸气云，同时利用喷雾水枪冷却周围设备，防止罐体因高温受损，减少爆炸风险。（2）国际应急协作体系（如IGU指南）：以国际天然气联盟（IGU）发布的《LNG应急响应指南》为核心，构建全球统一的应急协作体系。指南明确LNG泄漏、爆炸等事故的处置流程、技术标准及资源调配方案，各国企业可依据指南制定应急预案；同时，通过国际协作平台，实现事故信息共享、应急物资调配（如专业救援设备、防化服）及技术支援，如某国LNG船发生泄漏，可快速获得其他国家的应急专家和设备支持，提升事故处置效率，降低灾害损失。

结束语

液化天然气（LNG）运输是连接能源产地与消费市场的关键纽带，其技术密集性与安全敏感性要求持续创新。海运以大型化、智能化船舶提升经济性，陆运通过模块化罐箱与铁路网络增强灵活性，管道运输则以稳定供给筑牢基础。未来，随着低温材料、智能监控及清洁能源动力技术的突破，LNG运输将向更高效、低碳、安全的方向演进，为全球能源转型与“双碳”目标实现提供坚实支撑，推动能源物流体系迈向可持续未来。

参考文献

- [1] 杨海根.全球最大液化天然气运输加注船入级中国船级社[J].航海,2022,(04):48-49.
- [2] 肖兵.液化天然气船舶运输安全风险评估方法研究[J].中国海事大学学报,2021,(07):71-72.
- [3] 赵红江,于世学,刘国林.天然气液化技术的研究[J].南北桥,2021,(07):81-82.
- [4] 高振,常心洁,赵思思.液化天然气罐箱门到门供应和液态分销经济性分析[J].国际石油经济,2022,(05):66-67.