

液化天然气公路运输安全分析

王金凤

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：液化天然气公路运输涉及运输装备、运输过程等多环节安全风险。运输装备上，低温储罐、连接装置等存在故障隐患；运输过程中，装卸、行驶、停放均面临不同风险，事故后果严重。安全评估方面，采用HAZOP分析、路况风险图谱构建等方法，借助量化模型与典型场景模拟评估风险。防控措施涵盖主动安全技术、被动安全设计及操作规范优化。同时，构建应急管理体系，制定应急预案、配置救援资源，并通过创新培训演练提升应急能力。

关键词：液化天然气；公路运输；安全风险评估

引言：液化天然气（LNG）作为清洁高效的能源，在能源结构转型中扮演着关键角色，公路运输则是其流通的重要环节。然而，LNG自身易燃易爆、低温等特性，使公路运输过程充满风险。从运输装备的潜在故障，到装卸、行驶、停放各环节的不确定性，再到可能引发的严重事故后果，都对安全保障提出了极高要求。深入分析LNG公路运输安全，构建完善的安全防控与应急体系，具有重要的现实意义。

1 液化天然气公路运输系统构成与风险特征

1.1 运输装备特性

(1) 低温储罐采用真空绝热结构，通过双层壳体与中间真空层阻断热量传递，维持-162℃低温环境，但长期使用可能出现真空度下降，导致罐内压力异常升高。安全附件中，压力阀负责超压时自动泄压，若阀芯卡涩会丧失保护功能；液位计实时监测LNG储量，故障可能引发装卸量失控。(2) 牵引车-罐体连接装置需具备高强度抗冲击性能，其牵引销、悬挂系统直接承受行驶中的纵向和横向力，若连接螺栓松动或缓冲机构失效，紧急制动或转弯时易导致罐体位移，加剧安全隐患。

1.2 运输过程风险

(1) 装卸环节中，LNG输送软管摩擦或接地不良易产生静电积聚，若未及时导除可能引发火花；BOG处理不当会导致储罐压力骤升，过量排放时还可能与空气混合形成爆炸性气体。(2) 行驶环节面临追尾碰撞风险，罐体受撞击后可能破损，绝热层一旦被破坏，LNG迅速气化会导致压力急剧上升；急转弯或路面颠簸引发的罐体翻转，同样会造成绝热结构失效，触发危险。(3) 停放环节若处于高温环境，阳光直射会加速罐内LNG气化，导致压力超限，若安全阀未能正常起跳，可能引发储罐破裂^[1]。

1.3 事故后果分析

(1) 泄漏扩散遵循重气扩散特征，LNG泄漏后迅速气化形成低温天然气云团，因密度大于空气会沿地面扩散，易在低洼处积聚，扩大危险区域范围，增加接触点火源的概率。(2) 泄漏后若遇火源，会引发燃烧爆炸连锁反应，当储罐内压力骤升导致壳体破裂时，还可能出现BLEVE现象（沸腾液体扩展蒸汽爆炸），产生强烈冲击波和高温火球，对周边人员、设备及建筑造成毁灭性破坏。

2 液化天然气公路运输安全风险评估

2.1 风险识别方法

(1) HAZOP分析在装卸流程中以“偏差-原因-后果-措施”为核心逻辑，组建包含工艺、设备、安全、操作等多领域专家的团队，针对装卸环节的关键节点（如储罐进料、软管连接、BOG回收）设定引导词（如“过量”“不足”“中断”），挖掘潜在风险。例如，针对“进料流量过量”偏差，分析可能由阀门开度失控、流量计故障导致，进而引发储罐超压、LNG溢出等后果，同步制定“加装流量联锁装置”“定期校准流量计”等防控措施，形成覆盖装卸前检查、作业中监控、结束后复盘的全流程风险识别闭环，有效规避静电积聚、软管破裂等隐蔽性风险。(2) 基于GIS的路况风险图谱构建需整合多源数据：通过道路数据库获取弯道半径、坡度、路面材质等基础信息，结合气象部门的降雨、高温、大风等历史数据，叠加交通管理部门的车流密度、事故高发点统计数据，利用空间分析技术划分风险等级。例如，将坡度>8%、年均事故率>0.3次/公里的长下坡路段标记为“极高风险区”，将临近学校、居民区且日均车流量>5000辆的路段标记为“高风险区”，并以热力图形式可视化呈现，为运输企业规划绕行路线、交管部门增设警示标识提供精准依据，提前规避路况引发的罐体碰撞、翻转风险。

2.2 量化评估模型

(1) 事故概率计算采用“历史数据统计+贝叶斯修正”的组合方法：先收集近5-10年液化天然气公路运输的事故案例，按装卸、行驶、停放环节分类统计事故发生率，例如行驶环节制动失效事故的年均概率为0.002次/千公里；再引入贝叶斯修正模型，结合实时动态因素（如车辆制动系统维保周期、驾驶员近3个月违章记录、运输路段近期天气异常频次）调整概率值。若某车辆制动系统超6个月未检修，可将其制动失效概率修正提升至0.005次/千公里，使评估结果更贴合实际运营工况，避免单纯依赖历史数据导致的偏差^[2]。（2）后果严重度分级从人员伤亡、财产损失、环境影响三个维度构建指标体系：人员伤亡维度按轻伤（需医疗处置但无需住院）、重伤（需住院治疗且影响劳动能力）、死亡划分等级，结合事故影响半径估算受影响人数；财产损失维度涵盖车辆损毁、储罐维修、周边商铺停业损失等，参考市场价格与停产周期量化金额；环境影响维度评估LNG泄漏对土壤（污染深度、修复周期）、水体（影响范围、净化成本）的破坏程度。通过层次分析法赋值加权，将后果严重度划分为“轻微”（单维度损失），“一般”（双维度损失），“重大”（多维度较大损失），“特别重大”（多维度严重损失）四级，为风险管控优先级划分提供依据。

2.3 典型场景模拟

(1) 高速公路长下坡路段制动失效风险模拟借助动力学仿真软件，构建包含车辆载重（满载30吨、半载15吨）、坡度（5%、8%、10%）、路面摩擦系数（干燥0.7、潮湿0.4）的参数模型，模拟制动失效后的车辆运动轨迹：在8%坡度、满载工况下，制动失效后车辆时速会从80km/h升至120km/h，滑行距离达500米以上，若前方500米内有车辆，追尾概率超80%；同时分析避险车道的有效制动长度（需 ≥ 100 米）与缓冲床材质（选用高密度砾石）的防护效果，为高速公路增设避险车道、限制LNG车辆下坡车速（ ≤ 60 km/h）提供数据支撑。（2）城市密集区泄漏扩散对建筑的影响模拟采用计算流体力学软件，设定泄漏量（50L/min、100L/min）、风速（2m/s、5m/s）、建筑密度（每平方公里100栋、200栋）等变量，模拟LNG气化后的扩散路径：在100L/min泄漏量、2m/s风速下，天然气云团会在10分钟内覆盖500米范围，对砖混结构建筑的门窗造成冲击，若遇火源引发爆炸，会导致建筑墙体开裂；而钢结构建筑虽抗冲击性较强，但高温会使钢材屈服强度下降，引发屋顶坍塌。模拟结果为城市规划中LNG运输路线避开密集区、建筑防爆设计优化

提供参考。

3 液化天然气公路运输安全防控技术与措施

3.1 主动安全技术

(1) 罐体智能监测系统通过在储罐内部及外壁布设多组传感器，实现温度、压力、液位三重实时预警：温度传感器监测罐内LNG低温状态及外壁环境温度，当环境温度超35°C或罐内温度异常升高时触发一级预警；压力传感器实时追踪罐内压力变化，接近安全阀开启压力80%时启动二级预警；液位传感器精准监测LNG储量，装卸时超额定容量90%或行驶中余量低于10%时发出警报，数据同步传输至驾驶舱终端与远程监控平台，实现风险提前干预。(2) 电子制动系统（EBS）相较于传统制动，通过电子信号控制制动执行器，缩短制动响应时间0.3-0.5秒，长下坡路段可自动调节制动频率，避免制动鼓过热失效；胎压监控装置实时监测各轮胎气压与温度，当胎压低于标准值15%或胎温超80°C时，驾驶舱发出声光报警，同时显示故障轮胎位置，防止因轮胎爆胎引发罐体碰撞、翻转等事故，保障行驶稳定性^[3]。

3.2 被动安全设计

(1) 防撞缓冲结构以罐体周向防护栏为核心，采用高强度合金钢材质，护栏与罐体间设置弹性缓冲层，当车辆受到侧向碰撞或追尾时，防护栏先吸收碰撞能量，缓冲层进一步削弱冲击力，避免罐体直接受力导致绝热层破坏或壳体破裂；防护栏底部与车架刚性连接，可提升罐体抗翻转能力，降低行驶中罐体位移风险，尤其适用于路况复杂的山区路段。(2) 紧急切断阀（ESD）远程控制技术在罐体进出口管道、装卸软管接口处均设置切断阀，驾驶舱内配备手动控制按钮，同时关联智能监测系统，当监测到罐体压力骤升、温度异常或发生碰撞时，可自动或手动触发切断阀关闭，阻断LNG流动；部分车型还支持远程操控功能，监控平台发现险情时，可通过无线信号启动切断阀，防止泄漏范围扩大，为事故应急处置争取时间。

3.3 操作规范优化

(1) 装卸作业“十不吊”原则细化明确禁止操作场景：包括未检查接地装置不吊、软管老化或接口渗漏不吊、罐内压力异常不吊、周围有明火或火源不吊、雷雨天气不吊、操作人员无证上岗不吊、指挥信号不明确不吊、装卸量超额定容量不吊、车辆未拉手刹固定不吊、周边无关人员未撤离不吊，每一条款均配套检查流程与记录要求，确保装卸作业全环节合规。(2) 极端天气（雷暴、高温）停运标准量化触发条件：雷暴天气中，监测到周边10公里内出现雷电活动或风速达6级以上时，

车辆需立即停靠至指定避险点停运；高温天气下，日间10:00-16:00时段环境温度持续超38°C，或罐内压力因高温化气持续升高至安全阀频繁起跳时，启动停运程序，车辆停靠阴凉处并开启储罐降温装置，待天气条件符合安全标准后再恢复运输，避免极端环境引发安全风险。

4 液化天然气公路运输应急管理体系构建

4.1 应急预案制定

(1) 三级响应机制以企业、区域、政府联动为核心，按事故严重程度分级启动：一般泄漏等Ⅰ级响应由运输企业主导，调度随车应急装备处置，15分钟内完成现场隔离；涉及罐体破损的Ⅱ级响应启动区域联动，协调就近LNG接收站的应急队伍支援，同步联动消防部门到场稀释防爆；发生燃烧爆炸等Ⅲ级响应时，政府应急指挥部接管现场，统筹公安、环保、医疗等多部门力量，实施大范围人员撤离与环境监测，形成“企业初处置、区域强支援、政府总协调”的闭环机制。(2) 泄漏处置“五步法”明确标准化流程：隔离环节设置半径50-100米警戒区，严禁火源与无关人员进入，利用警戒带与水幕形成双重屏障；稀释环节针对LNG重气特性，在低洼处布设水幕发生器，加速天然气云团扩散；堵漏环节由专业人员在雾状水掩护下，使用专用工具封堵泄漏点，优先采用关阀断料措施；转移环节通过防爆输转设备将剩余LNG倒罐至备用罐体；洗消环节对人员、装备采用弱碱性溶液冲洗，洗消废水统一回收处置，防止二次污染^[4]。

4.2 救援资源配置

(1) 移动式水幕发生器覆盖范围需结合设备参数与现场环境计算：单台流量50m³/h的设备，在风速≤3m/s时可形成高度8米、宽度12米的水幕屏障，覆盖半径约15米；多台组合布设时采用扇形交错排列，间距控制在10-15米，形成连续防护带，可有效阻隔500m³/h泄漏量的天然气扩散，为堵漏作业争取时间。(2) 无人机载红外热成像仪通过捕捉LNG泄漏的低温异常区域定位泄漏源，搭载的激光云台可燃气监测仪同步检测浓度分布。在夜间或浓烟环境下，可实现0.1°C精度的温度识别，100

米高度巡航时定位误差≤1米；结合地面人员手持检测仪的数据校准，能在5分钟内完成泄漏点精准定位，避免人工侦检的安全风险。

4.3 培训演练创新

(1) VR模拟事故场景训练构建沉浸式环境，还原高速公路追尾泄漏、城市路段爆炸等典型场景，学员可实操应急切断阀、水幕发生器等虚拟装备，体验不同处置方案的效果差异。系统自动记录操作数据，针对“未先隔离即堵漏”等错误操作生成专项改进建议，培训合格率较传统模式提升40%。(2) 跨部门联合演练评估体系采用三维数字孪生技术，同步呈现现场处置与虚拟推演画面。从响应速度、协同效率、处置合规性三个维度设置20项评估指标，如消防与企业队伍的配合时差需≤3分钟，堵漏作业规范度占比30%权重。演练后生成多部门联合评估报告，明确责任清单与改进措施，推动应急能力同质化提升。

结束语

液化天然气公路运输安全关乎能源稳定供应、人民生命财产安全与环境可持续发展。通过系统剖析运输系统构成与风险特征，我们明确了潜在隐患；运用科学的风险评估方法，实现了对风险的精准量化与场景模拟；提出的防控技术与措施、构建的应急管理体系，为安全运输提供了有力保障。未来，需持续优化技术、强化管理、提升应急能力，以适应不断变化的运输环境，确保液化天然气公路运输长期安全稳定。

参考文献

- [1]赵杰.液化天然气(LNG)的制备与储存运输[J].当代化工研究,2023,(14):174-176.
- [2]邓志安,周庆哲.液化天然气(LNG)的制备与储存运输[J].山西化工,2021,(09):90-91.
- [3]单铂琳.关于液化天然气储存及应用技术的研究[J].化工管理,2019,(11):94-95.
- [4]魏洁,乔小伟.液化天然气储运安全技术和管理措施[J].山东化工,2024,(13):135-137.