

# 复杂路况下液化气体运输车罐体力学响应研究

胡文祥

荆门宏图特种飞行器制造有限公司 湖北 荆门 448000

**摘要:** 液化气体运输车罐体长期承受动态行车载荷, 复杂路况容易引发结构应力波动与形变累积, 影响储运安全。文章结合罐体构造形式与材料力学特性, 系统剖析颠簸、坡道、弯道路况的载荷作用机制, 探究流体晃动与外部载荷耦合作用下的罐体应力与形变演化规律。分析结构参数、充装状态与行车工况对力学响应的影响, 明确罐体薄弱部位的损伤发展特征, 可为罐体结构运维与工况适配提供理论支撑。

**关键词:** 液化气体运输车; 罐体结构; 复杂路况; 力学响应

**引言:** 液化气体运输车承担危化介质陆路转运任务, 罐体结构服役状态直接关乎运输环节的整体安全性。道路行驶过程中, 各类不规则路况会持续输出交变冲击载荷, 搭配罐内流体晃动产生的附加作用力, 让罐体长期处于复杂动态受力状态。受力环境的持续波动容易造成结构应力失衡与局部形变累积, 逐步诱发结构性能劣化。深入梳理复杂路况下罐体的载荷作用规律与力学响应特征, 能够完善罐体动态受力研究体系, 提升液化气体运输设备的安全管控水平。

## 1 液化气体运输车罐体基础结构与力学特性

### 1.1 运输车罐体典型结构组成

液化气体运输车罐体为承压式密闭储运结构, 整体采用卧式圆筒造型, 适配车载运输的安装与受力条件。整套结构由筒体、封头、支座、管路接口及密闭附属结构共同组成, 各部分相互配合形成完整的承压体系。筒体作为主体承载区域, 负责容纳液化介质, 承担储运过程中的各类基础荷载。封头多采用弧形冲压结构, 衔接筒体两端, 能够平缓分散端部集中应力, 规避结构应力堆积问题<sup>[1]</sup>。支座固定于罐体底部, 衔接车体与罐体结构, 传递车体振动与路面载荷, 保障罐体安装姿态的稳定性。各类接口结构经过密封处理, 维持罐体密闭承压状态, 满足液化气体储运的基础结构要求。

### 1.2 罐体主材力学性能与结构属性

液化气体运输车罐体选材以高强度承压钢材为主, 材料本身具备优良的塑性、韧性与抗疲劳性能, 适配长期动态受力与承压工况。钢材具备稳定的抗拉与抗压能力, 可耐受介质压力与行车外力带来的持续作用, 不易发生突发性结构失效。材料低温适配性能良好, 能够适配液化气体低温储运的工作环境, 规避低温脆化引发的结构隐患。罐体板材经过统一成型与焊接加工, 整体结构均匀连续, 受力传递路径规整。材质本身的抗形变能

力与结构刚度, 直接决定罐体交变荷载与承压工况下的结构稳定性。

### 1.3 充装介质物理特性与受力影响机理

液化气体经过加压液化处理, 兼具流体与高密度介质的双重物理特征, 对罐体受力状态存在明显影响。介质保持液态储存于罐体内部, 会对筒壁形成均匀静态压力, 持续作用于罐体整体内壁结构。车辆行驶产生的姿态变化, 会带动罐内介质产生流动与晃动, 形成动态惯性力, 改变罐体局部受力状态。介质密度高于常规气体, 动态运动过程中产生的惯性作用更为显著, 容易引发罐体局部应力波动。介质流体运动特性会打破罐体静态受力平衡, 使罐体受力状态具备动态变化特征。

### 1.4 罐体静态固有力学特征

无行车扰动的静态工况下, 罐体受力状态相对稳定, 整体呈现均匀承压的力学特征。内部介质压力均匀作用于筒壁与封头位置, 结构应力分布规整, 形变保持在微小弹性区间。筒体中段受力均匀, 应力数值相对平稳, 封头与筒体衔接位置因结构形态变化, 会出现小幅应力集中现象。支座支撑区域形成固定受力支点, 承担罐体与介质自重, 产生局部压应力。静态工况下罐体受力均衡、形变可逆, 是分析行车动态受力变化的基础前提。

## 2 复杂路况载荷特征与作用机制

### 2.1 路面颠簸路况动态载荷形式

路面颠簸是车辆行驶过程中最为常见的路况类型, 路面高低起伏会改变车体平稳行驶状态, 催生持续性动态载荷作用于罐体结构。路面凹凸起伏会让车体产生竖向起落运动, 带动罐体发生竖向振动, 形成反复性冲击荷载。路面坑洼、碎石等不规则路面形态, 会打乱车辆平稳行驶节奏, 让罐体承受无规律的竖向冲击<sup>[2]</sup>。这类载荷具备随机性与往复性特点, 荷载大小随路面起伏程度、行驶速度发生改变。罐体与内部液化介质会随车体

振动产生惯性运动,进一步放大结构承受的荷载强度。

## 2.2 坡度与弯道路况附加荷载机理

道路坡度变化与弯道行驶状态,会让罐体产生区别于平直路面的附加荷载,形成非对称受力工况。车辆在上坡与下坡行驶过程中,车体姿态发生倾斜,罐内介质重心出现偏移,引发轴向偏载作用力,让罐体前后区域受力分布不再均匀。弯道行驶时,车体产生侧向离心运动趋势,罐内流体介质发生侧向偏移,对罐体侧壁形成持续性侧向压力。两种路况产生的附加荷载会打破罐体原有受力平衡,造成结构应力分布偏移、受力不均的问题。

## 2.3 路况交变荷载持续作用规律

车辆长途行驶过程中,各类路况带来的载荷均以交变形式持续作用于罐体结构,形成长期反复的力学作用效果。单一颠簸路况会产生高频小幅交变荷载,长期作用在罐体支撑结构与筒体壁面。坡度、弯道切换带来的偏载荷载,属于低频大幅交变荷载,会周期性改变罐体受力方位与受力强度。交变荷载反复作用过程中,罐体结构会产生循环弹性形变,结构内部应力不断累积,为罐体结构疲劳损伤萌生与扩展提供了力学条件。

## 2.4 多类型复杂路况耦合荷载作用特征

实际运输场景中单一路况极少独立存在,颠簸、坡度、弯道等路况会相互叠加,形成多类型耦合荷载,大幅提升罐体受力复杂程度。颠簸产生的竖向冲击荷载,会与弯道侧向偏载、坡道轴向偏载相互叠加,形成多维度复合受力工况。不同类型荷载的作用方向、作用频率存在差异,会让罐体应力分布呈现无序波动状态,结构形变方向不断切换。耦合荷载的无序作用形式会加剧罐内介质紊乱晃动,介质惯性力与路面载荷相互叠加,增大罐体受力波动幅度。

# 3 复杂路况下罐体结构力学响应规律

## 3.1 路况载荷作用下罐体应力分布特征

静态工况下罐体应力分布均匀规整,复杂路况带来的各类动态载荷会彻底打破原有受力平衡,使结构应力整体呈现动态波动、实时变化的分布特征。车辆行驶过程中,路面冲击与各类偏载共同作用,筒体中段均匀受力状态被打破,各区域应力数值随行车工况变化持续浮动、动态调整。封头与筒体的衔接位置属于结构截面突变区域,受力传递路径在此处发生转折,应力集中现象会随路况载荷强度的变化不断变动,始终是罐体应力聚集的核心区域<sup>[1]</sup>。罐体底部与支座的接触点位直接承接车体传递的全部冲击荷载,局部受力集中,应力数值波动幅度更大。动态载荷的持续无序扰动,让罐体整体应力分布无法维持固定形态,始终处于动态调整的不稳定

状态。

## 3.2 罐体结构形变响应与变化规律

各类路况产生的动态荷载会持续作用于罐体结构,诱发可恢复的弹性形变,形变幅度、形变方向与形变形态随荷载类型的不同产生差异化变化。竖向颠簸荷载持续冲击罐体,使罐体产生周期性竖向微量形变,筒体壁面不断重复拉伸与压缩的变形过程。坡道倾斜与弯道转向带来的偏载作用,会引导罐体产生轴向偏移或侧向弯曲形变,打破结构对称变形特征。荷载强度较低时,罐体整体形变幅度微小,外力卸载后结构可快速回弹,恢复原始几何形态与受力状态。当各类载荷持续叠加或荷载强度提升,罐体形变覆盖范围逐步扩张,变形留存的时间持续延长。长期反复的形变循环过程,持续改变罐体结构的变形响应特性与受力适配状态。

## 3.3 介质晃动引发的罐体附加力学响应

车辆行驶姿态的频繁变动,会持续扰动罐内液态介质的平衡状态,引发不规则的往复晃动与无序流动,衍生出额外的结构力学作用效果。介质流动过程中会持续冲击筒体侧壁与封头内壁,在结构表面形成间歇性冲击荷载,为罐体增添多向受力负荷。介质重心随流体流动实时偏移,持续改变罐体整体荷载分布形式,不断打破结构原有静态受力平衡。介质晃动产生的流体惯性力,会与路面传递的机械载荷相互叠加,抬高罐体局部应力峰值,进一步加重结构形变程度。这种结构与流体相互耦合的作用形式,让罐体力学响应表现出较强的随机性与波动性,整体受力状态更加复杂。

## 3.4 不同路况条件下罐体动态响应差异特征

不同路况对应的载荷形式、作用方向与波动规律存在差异,罐体结构展现出的动态力学响应也存在明显区别,各类工况下的结构受力特征具备较强的独特性。单一颠簸路况作用下,罐体主要承受竖向交变荷载,以高频小幅的应力波动与竖向弹性形变为主,整体响应幅度相对平稳,无剧烈受力突变。连续坡道行驶工况中,罐体长期处于轴向偏载状态,前后筒体受力差值拉大,应力分布差距明显,结构形变以单向轴向偏移为主要特征。高速弯道行驶过程中,侧向惯性荷载持续作用,罐体侧向应力数值大幅上升,侧向形变成为核心响应形式。多种路况交错叠加的复杂工况下,各类荷载无序耦合,罐体应力波动无固定规律,形变方向频繁切换,持续增加整体力学响应的复杂程度。

# 4 罐体力学响应影响因素与作用机理分析

## 4.1 结构参数对罐体力学响应的影响机制

罐体自身结构设计参数是决定结构刚度水平、受力

传递效率与动态响应特性的核心因素,直接主导复杂工况下罐体的力学表现<sup>[4]</sup>。筒体壁厚、封头曲率半径、支座布设间距与接触面积等关键结构参数,会从根本上改变罐体整体刚度分布,干预应力传递路径与形变发展趋势。筒体壁厚增大能够提升筒体截面刚度,增强结构抗变形能力,有效削弱动态载荷引发的应力波动与结构形变;壁厚偏小的罐体刚度储备不足,路面轻微扰动即可引发明显的应力变化与结构变形。封头曲率设计直接管控端部应力分散效果,曲率过渡平缓可实现应力均匀疏导,曲率突变则会造成应力堆积、受力集中。支座布局方式决定罐体支撑受力格局,合理的布设形式可以均匀分散车体传递的冲击荷载,布局不合理会造成局部受力集中,干扰罐体动态受力均匀性。

#### 4.2 介质充装状态对力学响应的作用规律

罐内液化气体的充装容积比例,直接改变罐体荷载总量与流体活动空间,大幅调整罐体动态受力环境,重塑结构整体力学响应状态。低充装比例工况下,罐内预留空余空间充足,液态介质拥有充足的流动范围,车辆姿态变动时会引发大范围、高强度的流体晃动,持续冲击罐体内壁结构。流体惯性作用频繁打乱罐体受力分布,让结构应力与形变长期处于高频波动状态。高充装比例工况下,介质活动空间被大幅压缩,流体晃动幅度受到约束,内壁冲击作用有所弱化,但罐体整体荷载总量大幅提升,路面颠簸传递的竖向冲击载荷作用更强,竖向受力响应更加突出。不同充装比例形成的流体运动特征与荷载条件完全不同,直接改变罐体受力来源与动态响应模式。

#### 4.3 行车工况与路况耦合影响机理

车辆行驶速度、加减速状态、转向姿态等行车参数,与路面工况条件相互交织耦合,共同干预罐体动态力学响应的强度与规律。车辆行驶速度提升时,路面颠簸的冲击作用被放大,载荷波动频次持续加快,罐体承受的交变荷载更加密集,结构受力波动幅度随之提升。低速匀速行驶状态下,路面载荷作用平缓,外力扰动弱,结构整体响应幅度维持在较低水平。车辆启停、变速过程会产生轴向惯性作用力,改变罐体前后受力配

比,形成轴向附加荷载。转向行驶产生的侧向惯性力,可与路面起伏扰动相互叠加,构建多维度复合加载环境。行车参数与路况的协同耦合作用,持续改变罐体动态受力水平,让结构响应呈现出多样化的变化特征。

#### 4.4 罐体结构薄弱区域力学响应演化特征

罐体结构存在多处几何形态与刚度突变区域,属于天然的受力薄弱部位,这类区域在复杂路况载荷作用下的力学响应更加敏感,损伤累积与性能衰减趋势更为突出。筒体与封头交接位置、罐体与支座接触区域、结构焊接接头均为刚度不连续部位,受力传递过程中容易出现应力滞留与堆积问题。常规平稳行驶工况下,薄弱区域应力波动幅度小,数值变化平缓,整体结构可以维持稳定服役状态。长期处于颠簸、坡道、弯道耦合的复杂载荷环境时,薄弱区域应力峰值持续走高,结构形变反复累积、无法及时完全回弹。局部应力的频繁起伏循环,持续消耗结构刚度与性能储备,逐步弱化结构弹性恢复能力,是罐体整体结构性能逐步衰减的主要诱因。

#### 结束语

通过对液化气体运输车罐体结构特性、路况载荷机制及动态力学响应开展系统性分析,明确不同工况下罐体应力分布与形变变化规律,厘清结构参数、介质充装及行车条件对结构受力的影响路径。总结罐体薄弱部位的响应演化特点,梳理多因素耦合作用下的力学变化机理,能够完善车载承压罐体的受力理论研究,为罐体结构优化、工况适配及安全运行管控提供可靠的理论参考。

#### 参考文献

- [1]黄建强.低温液化气体运输车泄漏事故应急处置现状与对策研究[J].中国化工贸易,2025(34):160-162.
- [2]姜星.带自卸液泵和自发电的冷冻液化气体汽车罐车设计[J].汽车博览,2023(28):31-32.
- [3]潘彦,何烈云,傅一峰,等.液罐车罐内液体侧向晃动模态的数值模拟研究[J].力学与实践,2026,48(2):236-244.
- [4]王琼瑶,SubhashRakheja,上官文斌.带弹性膜的部分充液罐车罐体内液体横向晃动的瞬态响应分析[J].振动与冲击,2019,38(5):98-105.