

液化天然气铁路罐车设计及试验

何远新^{1,2}, 黄政贤¹, 刘凤伟¹, 吕长乐¹, 杨清义¹, 徐卫国¹, 沈铤³
(1.中车长江车辆有限公司 冷运装备研究所, 武汉 430212; 2.浙江大学 制冷与低温研究所, 杭州 310027; 3.全国锅炉压力容器标准化技术委员会低温技术委员会, 上海 200240)

摘要: **目的** 本文通过对液化天然气铁路罐车的设计及试验验证进行研究, 为 LNG 铁路罐车的应用提供参考。**方法** 介绍液化天然气铁路罐车的技术参数确定和结构组成, 采用 CAD、FEM 技术对罐车的结构进行设计研究及仿真分析, 通过铁路静强度和冲击试验、低温性能测试等手段验证罐车的力学性能和真空绝热指标。**结果** 液化天然气铁路罐车轴质量为 23 t、载质量不超过 41 t, 在最高运行速度 120 km/h 时能够安全运行, 每天的静态蒸发率(液氮)为 0.08%, 维持时间(液氮)达到 92 d。**结论** 液化天然气铁路罐车的技术参数及性能指标达到了设计文件和相关标准的要求。

关键词: 液化天然气; 铁路罐车; 静态蒸发率

中图分类号: U272.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)13-0299-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.13.036

Design and Test of LNG Railway Tank Car

HE Yuan-xin^{1,2}, HUANG Zheng-xian¹, LIU Feng-wei¹, LYU Chang-le¹,
YANG Qing-yi¹, XU Wei-guo¹, SHEN Xian³

(1. Institute of Cold Transportation Equipment, CRRC Yangtze Co., Ltd., Wuhan 430212, China;

2. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Technical Committee of Cryogenics, China Standardization Committee on Boilers and Pressure Vessels, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: The work aims to study the design and test verification of LNG railway tank car to provide reference for its application. Firstly, the technical parameters and structure composition of LNG railway tank car were introduced. The design, research and simulation analysis of the tank car structure were carried out by CAD and FEM technology, and the mechanical properties and vacuum insulation indexes of the tank car were verified by railway static strength and impact test, low temperature performance test, etc. With axle weight of 23 t and load not more than 41 t, the tank car could run safely at the maximum speed of 120 km/h, the static evaporation rate (liquid nitrogen) was 0.08%/d, and the maintenance time (liquid nitrogen) reached 92 days. The technical parameters and performance indexes of LNG railway tank car have reached the requirements of design documents and related standards.

KEY WORDS: LNG; railway tank car; static evaporation rate

随着我国能源结构的改革和转型升级, 液化天然气(LNG)作为一种清洁能源, 已广泛应用于居民生活、工业生产等方方面面。由于我国天然气资源主要

分布在西北等偏远地区^[1-3], 消费需求又主要集中在北方、东南沿海、长三角及华中等天然气资源较为匮乏的地区, 这种地理区位矛盾给天然气供应带来了诸

收稿日期: 2023-06-19

作者简介: 何远新(1983—), 男, 硕士, 教授级高工, 主要研究方向为深冷装备技术。

多困难,当前我国的天然气体主要通过管道输送,输送量难以保障不断增长的应用需求。国内外研究表明,LNG铁路运输是一种效率仅次于天然气管道,成本仅次于LNG运输船的最高效的陆路运输方式^[4-6]。与LNG公路运输相比,LNG铁路运输具有运量大、距离远、成本低、全天候、高可靠^[7-9]等优势,结合我国铁路网络覆盖范围广、客货分离等发展趋势,具有显著优势。

LNG铁路运输技术目前只有美国、日本等少数国家所拥有^[10]。例如日本铁路从2000年开始采用罐式集装箱运输LNG,美国研制了容积130 m³液态乙烯铁路罐车,该车最大工作压力为0.61 MPa,载质量为50 t,该车也可用于LNG的铁路运输,且在加拿大投入应用。我国LNG运输目前以公路半挂车为主,主要适用于运输距离较短、单次运量不大的LNG接卸与转运,运输距离不超过1 000 km,最大许可容积为52.6 m³。本文结合我国铁路运输环境、载荷工况等特点,对LNG铁路罐车的结构设计、仿真分析及试验进行了研究,填补国内LNG铁路运输装备空白。

1 主要技术参数确定

结合我国23 t轴重铁路货车^[11]总体技术参数和TB/T 3550.2—2019《机车车辆强度设计及试验鉴定规范 车体 第2部分:货车车体》、GB 146.1—2020《标准轨距铁路限界 第1部分:机车车辆限界》、GB 146.2—2020《标准轨距铁路限界 第2部分:建筑限界》等设计标准规定,《铁路危险货物运输安全监督管理规定》(中华人民共和国交通运输部令2022年第24号)的要求,以及近年来在低温深冷装备方面的相关技术研究^[12-13],确定LNG铁路罐车主要技术参数如表1所示。

2 主要结构组成

LNG铁路罐车包含无押运间和带押运间2种车型,主要结构均由牵枕装配、罐体装配、管路系统、转向架、制动装置、车钩缓冲装置及安全监控系统等组成,其主要结构见图1a、图1b。带押运间LNG铁路罐车在车辆二位端设有可供押运人员工作和生活用押运间。

表1 LNG铁路罐车主要技术性能参数

Tab.1 Main technical performance parameters of LNG railway tank car

车型	运输方式	轴质 量/t	总质 量/t	载质 量/t	自质 量/t	几何 容积/m ³	设计 压力/MPa	最大允许 充装量/kg	最高运行 速度/(km·h ⁻¹)	通过最小 曲线半径/m	罐车设计 使用年限/a	罐体真空设计 使用年限/a
无押 运间	LNG铁路 罐车	23	92.5	45	47.5	125.4	0.6	45 000	120	145	20	5
带押 运间	LNG铁路 罐车	23	92.5	41.5	51	115.4	0.6	41 500	120	145	20	5

注:限界符合GB 146.1—2020《标准轨距铁路限界 第1部分:机车车辆限界》的规定。

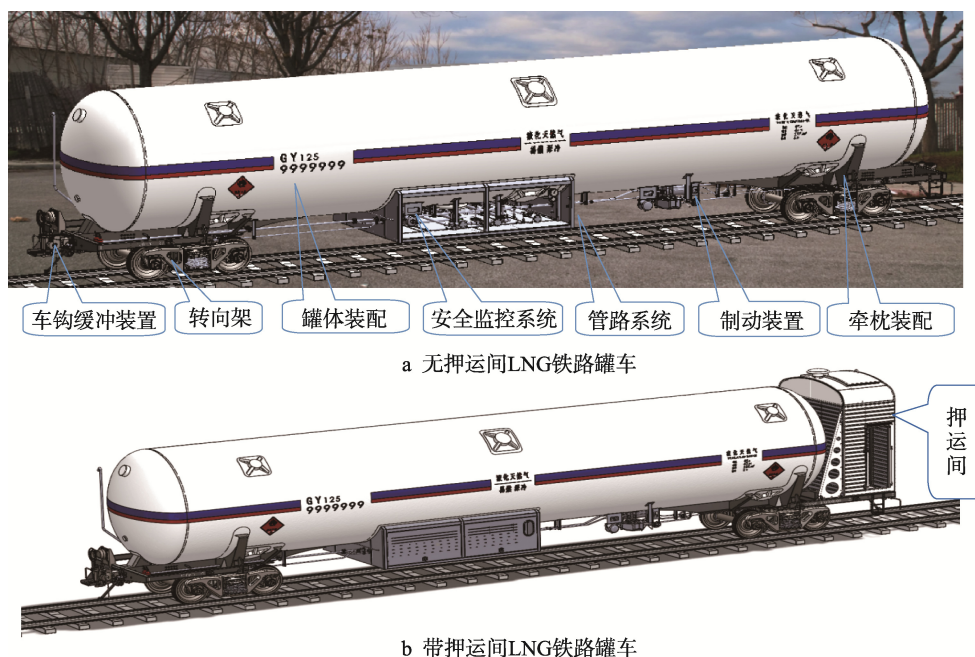


图1 LNG铁路罐车主要结构

Fig.1 Main structure of LNG railway tank car

2.1 牵枕装配

牵枕装配采用了无中梁小底架结构^[14], 该结构可以实现增大罐体设计容积、降低整车重心的目的, 同时也可以提升车辆动力学性能, 显著降低无中梁铁路罐车在传递纵向惯性力载荷时尾部的高应力^[15]。牵枕装配由牵引梁组成、枕梁组成、横梁组成、侧梁组成、端梁组成等部件组焊而成, 其结构如图 2 所示。

2.2 罐体装配

罐体装配主要由外壳、内容器、绝热层、内外罐体支撑和阀门操作箱等部件组成。其中内容器充装 $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 LNG 介质, 内容器与外壳之间的夹层用于缠绕由“铝箔+玻璃纤维纸”构成多层绝热层^[16], 并抽真空达到真空绝热的效果。内外罐体支撑主要用于将内容器的载荷传到外壳, 并降低外部热量的传导, 具有承载能力强, 导热系数低等特点。

为防止内容器泄漏造成夹层压力骤升而致外壳爆炸失效, 外壳一端封头上设有外壳防爆装置, 正常工作情况下, 依靠外部大气压力将接管、压盖和密封圈组合在一起工作, 一旦内容器泄漏的事故状态导致夹层空间压力升高, 压盖自动脱落释放压力, 对外壳起到保护作用。

2.3 管路系统

管路系统包括装卸管路、增压管路、气相管路、差压管路、溢流管路、紧急控制管路, 并设置有罐体安全阀、管路安全阀、压力表、抽真空及检测系统等安全附件, 所有管路、装卸阀门及其附件均安装在阀门操作箱内。为防止低温“穿透”, 在罐体夹层管路设计时, 液相管路设置了气封(液)结构^[17], 并考虑了较大的热力学计算热桥安全裕度。

为方便使用单位在我国铁路线路进行装卸 LNG

作业, LNG 铁路罐车的管路采用中部双侧充装对称设计, 在车辆两侧均设有装卸法兰接口, 避免铁路罐车编组充装 LNG 时, 由于非对称引起的充装管口与地面设施不匹配。

2.4 转向架

走行装置中选用我国 70 t 级铁路货车通用成熟的转 K5 型转向架^[18]。由于 LNG 铁路罐车自质量较大, 为改善空车的动力学性能, 避开挠度转换点, 对转 K5 型转向架的中央悬挂系统进行了调整。为防止静电积聚, 转向架设置有导电型心盘磨耗盘^[19], 以利于静电传递和有效释放。

2.5 车钩缓冲装置

走行装置选用我国 70 t 级铁路货车通用成熟的加强型 17 型 E 级钢车钩、锻造钩尾框、MT-2 或 HM-1 缓冲器。

2.6 制动系统

制动系统由 120 型控制阀、DAB-1 型集成制动装置、KZW-A 型空重车自动调整装置和 40 L 副风缸等组成。手制动选用 NSW 型手制动机。

2.7 安全监控系统

为满足罐车使用单位对罐车状态监测需求, 在车体侧面的阀门箱中设置了安全监控系统, 该系统包括电子式液位数据采集装置、压力数据采集装置、温度数据采集装置以及操作阀门箱内介质泄漏浓度数据采集装置。该系统可以实现地面监控调度人员以及押运间内车上押运人员通过显示装置实时监控罐内液位、压力、温度等参数, 出现泄漏或者罐体内相关参数异常时能立即获得泄漏报警信号, 并实时上传至使用单位监控平台。

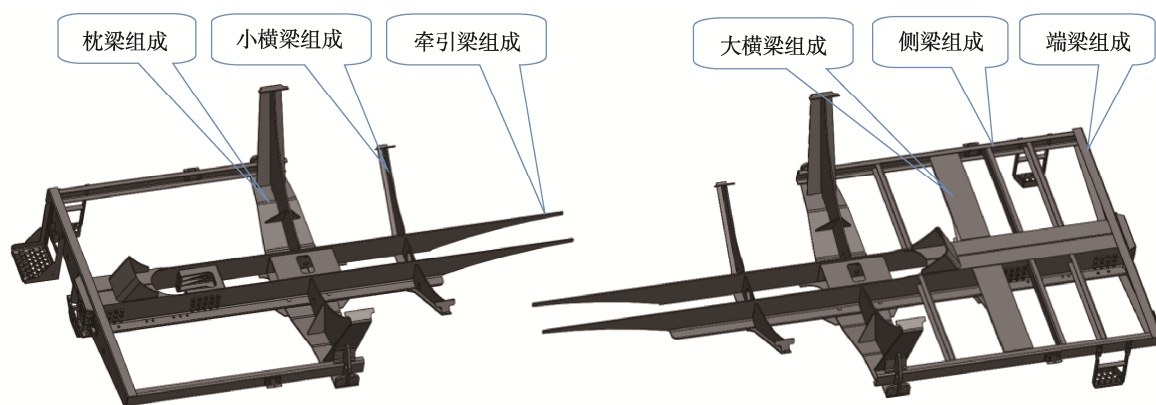


图 2 牵枕装配
Fig.2 Retractor assembly

2.8 押运间

带押运间的 LNG 铁路罐车，其押运间主要由钢结构和隔热层组成。钢结构由底架、侧墙、端墙和车顶等组焊而成。隔热层主要由隔热料、骨架、地板、内板和平顶等组成，考虑防火要求，内饰层和保温层用材料选用具有良好阻燃性能材料，其保温层选用自熄性聚苯乙烯硬质泡沫塑料，内饰层选用防火贴面胶合板。押运间内设置有供押运人员休息和生活的床铺、水箱、马桶、脸盆等设施。

3 主要计算及试验情况

3.1 计算分析

根据 TB/T 3548—2019《机车车辆强度设计及试验鉴定规范 总则》进行了整车静强度有限元仿真分析计算。由于该车体结构关于其纵向中央截面对称，

利用结构的对称性准则，分析时取其整车 1/2 结构建立力学模型，采用 HyperMesh 软件对车体进行结构离散。车体有限元模型如图 3 所示，单元总数为 521 802，节点总数为 348 975。

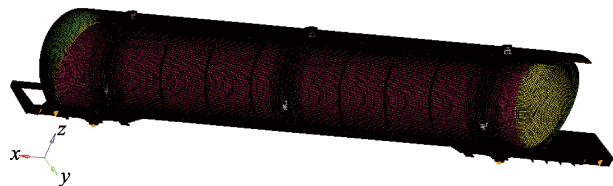


图 3 LNG 铁路罐车车体有限元模型

Fig.3 Finite element model of LNG railway tank car body

罐车纵向载荷按照第一工况拉伸 1 780 kN、第一工况压缩 1 920 kN、第二工况压缩 2 500 kN 的考核标准进行安全评估。仿真结果表明最大应力区位于牵引梁尾部的底架和罐体连接处，其仿真分析结果分别如图 4、图 5 所示，应力仿真值见表 2。

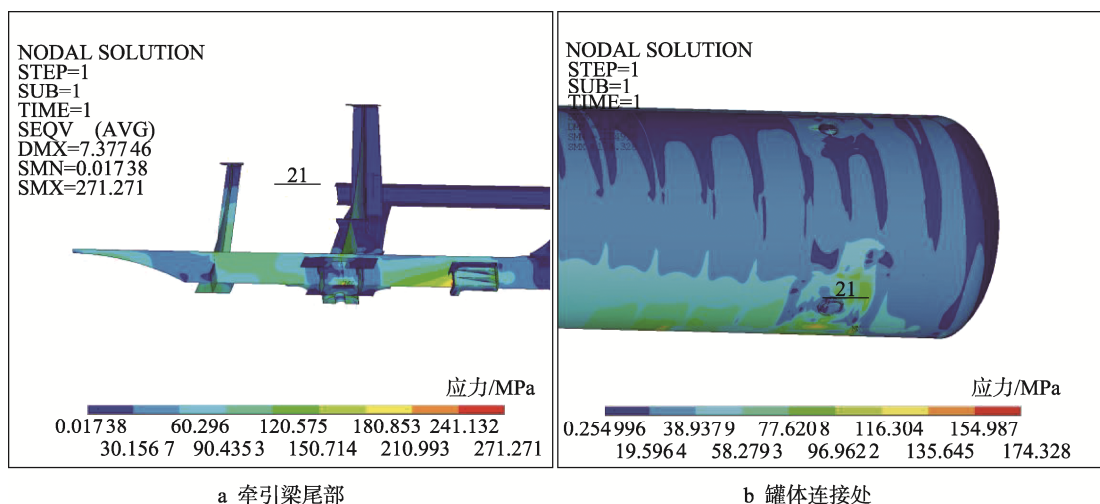


图 4 第一工况罐体及底架应力云图

Fig.4 Cloud map for stress of tank and bottom frame in the first working condition

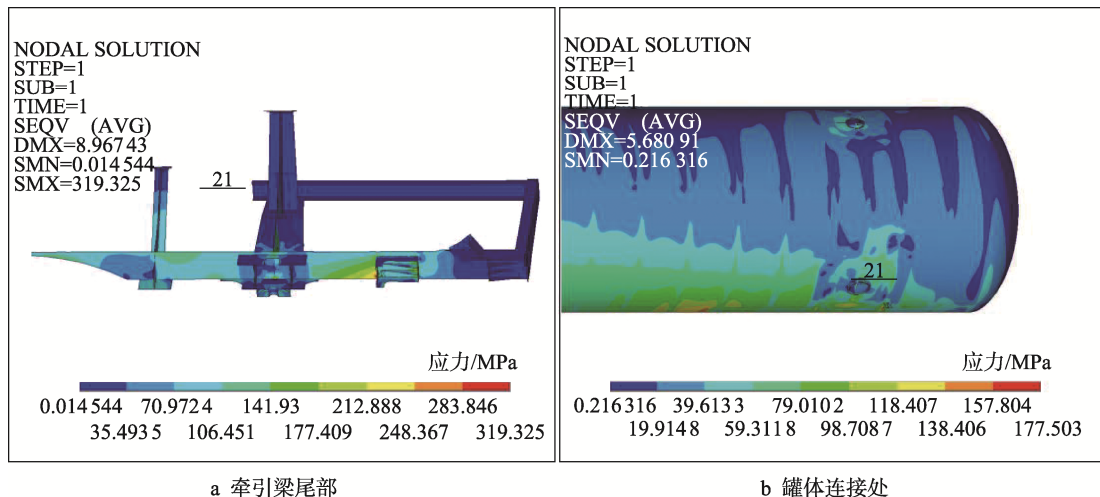


图 5 第二工况罐体及底架应力云图

Fig.5 Cloud map for stress of tank and bottom frame in the second working condition

表 2 LNG 铁路罐车牵引梁尾部区域应力仿真及试验
Tab.2 Simulation and test of stress in the tail area of traction beam of LNG railway tank car

工况	有限元计算 结果/MPa	静强度应力实测 结果/MPa	许用应力/ MPa
第一工况	271.3	179.3	281
	174.3	140.0	197
第二工况	319.3	217.4	382
	177.5	176.8	267

从表 2 可以看出,在第一工况和第二工况下,车辆罐体及牵引梁处的最大应力仿真分析值分别为 271.3、174.3、319.3、177.5 MPa,均小于许用应力,满足强度要求。

3.2 试验情况

3.2.1 静强度和冲击试验

根据 TB/T 3550.2—2019《机车车辆强度设计及试验鉴定规范 车体 第 2 部分:货车车体》完成了该型铁路罐车的静强度和冲击试验。表 2 所示为牵引梁尾部区域应力实测试验结果。

试验结果表明,在第一工况和第二工况下,车辆罐体及牵引梁处最大实测应力值分别为 179.3、140.0、217.4、176.8 MPa,均小于许用应力,满足强度要求。

3.2.2 低温性能试验

根据 GB/T 18443.5—2010《真空绝热深冷设备性能试验方法 第 5 部分:静态蒸发率测量》、GB/T 18443.7—2010《真空绝热深冷设备性能试验方法 第 7 部分:维持时间测量》,以无押运间 LNG 铁路罐车为典型产品对样车进行了低温性能试验,主要包括静态蒸发率和维持时间试验,试验介质为液氮。试验及测试结果显示,该罐车夹层封结真空度为 0.023 Pa,漏放气速率为 8.4×10^{-7} Pa·m³/s,真空漏率为 3.9×10^{-9} Pa·m³/s,真空绝热性能优越;每天的静态蒸发率(液氮)为 0.08%,维持时间(液氮)达到 92 d,达到了预定设计目标。

4 结语

本文对液化天然气铁路罐车的研制和试验情况进行了较为系统的总结和介绍,可为后续研制同类大型冷冻液化气体铁路罐车提供参考和借鉴。

随着我国清洁能源的进一步应用提升,通过采用运量大、效率高、成本低、全天候的铁路运输方式来解决 LNG 资源分布及需求不平衡等问题,这将成为重要的解决方案之一。

针对后续发展,建议国家及政府行业监督管理部门组织专题研讨和系统性分析研究。由铁路运输装备

制造企业、上游液化工厂及沿海接收站、下游加气站等用气终端以及铁路运输行业监督管理部门共同参与,推动开展示范应用工程研究。进一步全面分析系统安全性及相应保障措施和风险控制措施,同时对该运输模式技术经济性能进行进一步深入详细分析和运用总结。对大力推进我国 LNG 清洁能源使用,服务于我国社会高质量清洁低碳发展带来积极促进作用。

参考文献:

- [1] YUAN Jia-hang, WANG Li, LI Ya-ting, et al. Set Pair Prediction for Chinese Natural Gas Energy Security Based on Higher-Order Markov Chain with Risk Attitude[J]. Resources Policy, 2022, 77: 2-13.
- [2] 郑民, 李建忠, 吴晓智, 等. 我国常规与非常规天然气资源潜力、重点领域与勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(10): 1383-1397.
ZHENG Min, LI Jian-zhong, WU Xiao-zhi, et al. China's Conventional and Unconventional Natural Gas Resource Potential, Key Exploration Fields and Direction[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(10): 1383-1397.
- [3] 王永祥, 杨涛, 徐小林, 等. 中国新增油气探明经济可采储量特征分析[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(5): 13-26.
WANG Yong-xiang, YANG Tao, XU Xiao-lin, et al. Characteristics of the Proved New Addition Economic Recoverable Oil and Gas Reserves in China[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(5): 13-26.
- [4] 单彤文, 高振, 刘森儿, 等. 液化天然气罐箱铁路运输经济性分析[J]. 国际石油经济, 2020, 28(8): 100-105.
SHAN Tong-wen, GAO Zhen, LIU Miao-er, et al. Economic Analysis of LNG Tank Container Railway Transportation[J]. International Petroleum Economics, 2020, 28(8): 100-105.
- [5] 张辉, 吕志昕, 陈志先. 我国液化天然气(LNG)铁路运输区域通道设计研究[J]. 铁道货运, 2019, 37(12): 74-79.
ZHANG Hui, LYU Zhi-xin, CHEN Zhi-xian. A Study on the Design of the LNG Railway Transport Channel in China[J]. Railway Freight Transport, 2019, 37(12): 74-79.
- [6] HA O K, HWANG J S, KIM I H, et al. A Preliminary Study of Railway Transport of LNG between TKR-TSR[J]. LHI Journal of Land, Housing, and Urban Affairs, 2015, 6(2): 61-66.
- [7] WANG Zhi-qiang, QIAN Cai-fu, Li Wei. Study on Impact Process of a Large LNG Tank Container for Trains[J]. Applied Sciences, 2023, 13(3): 1351-1351.

- [8] CHEN Zeng-shun, XU Zhen-gang, LIU Yang, et al. Seismic Response of a Large LNG Storage Tank Based on a Shaking Table Test[J]. Applied Sciences, 2022, 12(15): 7663-7663.
- [9] LI Li-feng, LUO Jin-heng, WU Gang, et al. Impact Assessment of Flammable Gas Dispersion and Fire Hazards from LNG Tank Leak[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, Volume 2021: 1-15.
- [10] 黄政贤, 何远新, 吕长乐, 等. LNG 储运装备发展现状与趋势分析[J]. 石油石化物资采购, 2020(9): 122-124.
HUANG Zheng-xian, HE Yuan-xin, LYU Chang-le, et al. Development status and Trend Analysis of LNG Storage & Transportation Equipment[J]. Petroleum & Petrochemical Material Procurement, 2020(9): 122-124.
- [11] 宫振冲. 23t 轴重新型货车与既有驼峰的适应性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
GONG Zhen-chong. Study on Adaptability of 23t Axle Reconstructed Freight Cars to Existing Humps[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [12] 周伟明, 沈铤, 滕俊华. 多式联运 LNG 罐箱低温性能指标确定及测试分析[J]. 压力容器, 2018, 35(8): 1-6.
ZHOU Wei-ming, SHEN Xi, TENG Jun-hua. Determination of Cryogenic Performance Parameters and Test Analysis of Intermodal Transport LNG Tank Container[J]. Pressure Vessel Technology, 2018, 35(8): 1-6.
- [13] 周伟明, 陈朝晖, 魏蔚. 深冷真空绝热容器标准技术发展展望[J]. 压力容器, 2013, 30(2): 1-14.
ZHOU Wei-ming, CHEN Zhao-hui, WEI Wei. Standard Technical Development and Prospect of Cryogenic Vacuum Adiabatic Vessel[J]. Pressure Vessel Technology, 2013, 30(2): 1-14.
- [14] 严隽堯, 傅茂海. 车辆工程[M]. 3 版. 北京: 中国铁道出版社, 2008: 566.
YAN Jun-qing, FU Mao-hai. Vehicle Engineering[M]. 3rd ed. Beijing: China Railway Publishing House, 2008: 566.
- [15] 王剑. 出口澳大利亚柴油罐车[J]. 铁道车辆, 2009, 47(8): 23-24.
WANG Jian. The Diesel Oil Tank Car Exported to Australia[J]. Rolling Stock, 2009, 47(8): 23-24.
- [16] 沈铤. 高真空多层绝热材料绝热性能测试系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
SHEN Xian. Study on Thermal Insulation Performance Testing System of High Vacuum Multilayer Thermal Insulation Materials[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [17] 于明彬. 低温排液管道气封高度的计算[J]. 低温与特气, 2016, 34(4): 12-15.
Yu Ming-bin. Calculation of the Height Forming Gas Block for Cryogenic Drainage Pipe[J]. Low Temperature and Specialty Gases, 2016, 34(4): 12-15.
- [18] 陈雷, 张志建. 70t 级铁路货车及新型零部件[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
CHEN Lei, ZHANG Zhi-jian. 70t Railway Freight Cars and New Parts[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006.
- [19] TB/T 46—2020, 铁路车辆心盘及磨耗盘[S].
TB/T 46—2020, Center Plate and Wear Plate of Railway Vehicle[S].

责任编辑: 曾钰婵