

铁路机械冷藏车气密性指标确定及性能优化

景传峰, 张敏, 金晓平

(中车长江车辆有限公司, 武汉 430212)

摘要: 目的 针对铁路机械冷藏车气密性检测指标滞后, 难以反映车辆漏风特性的问题, 对其气密性指标展开研究, 寻求现有装备气密性设计方面存在的缺陷, 进而提出新造铁路机械冷藏车的气密性指标和车体气密性结构优化设计方法。方法 按照 GB/T 5600 要求, 运用压差法对 B₂₃ 型、B_{23A} 型和 B₁₀ 型铁路机械冷藏车进行气密性试验, 分析运行速度与压差、漏气量之间的关系; 通过测试和实地调研, 掌握现有铁路机械冷藏车漏气量偏大的原因, 为改进优化提供依据。结果 我国现有 B₂₃, B_{23A}, B₁₀ 型铁路机械冷藏车在 50 Pa 压差条件下的漏气量分别为 27.0, 34.1, 26.1 m³/h, 当压差升至 125, 250 Pa 时, 车厢漏气量约上升 90%~320%。上述压差条件大致对应 40, 65, 90 km/h 的车辆运行速度。在此基础上, 分析给出了新造铁路机械冷藏车的气密性指标, 提出了改进优化的具体策略。结论 新造铁路机械冷藏车的漏气量标准应设定为在 50 Pa 压差条件下不大于 10 m³/h, 比现有标准规定减少了 75%。此外, 通过使用新工艺和新技术, 改进车厢、车门和排水口结构, 减少车体漏泄点, 有效提高了车厢气密性能。

关键词: 铁路机械冷藏车; 气密性; 漏气量; 标准

中图分类号: U272.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)19-0239-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.19.035

Determination and Optimization of Air Tightness of Railway Mechanical Refrigerated Car

JING Chuan-feng, ZHANG Min, JIN Xiao-ping

(CRRC Yangtze Co., Ltd., Wuhan 430212, China)

ABSTRACT: Aiming at the problem that the air tightness testing index of railway mechanical refrigerated car is lagging behind and it is difficult to reflect the air leakage characteristic of the car, the work aims to study the air tightness index of railway mechanical refrigerated car to find the defects in the air tightness design of existing equipment, and then put forward the air tightness index of newly built railway mechanical refrigerated car and the optimum design method of air tightness structure of car body. According to the requirement of GB/T 5600, the air tightness test of B₂₃, B_{23A} and B₁₀ railway mechanical refrigerated cars was carried out in the pressure difference method, and the relationship between running speed, pressure difference and air leakage was analyzed. Through testing and field investigation, the reasons for the large air leakage of existing railway mechanical refrigerated car were grasped, which provided a basis for improvement and optimization. The air leakage of the existing B₂₃, B_{23A} and B₁₀ railway mechanical refrigerated car under 50 Pa pressure difference was 27.0 m³/h, 34.1 m³/h and 26.1 m³/h, respectively. When the pressure difference rose to 125 Pa and 250 Pa, the air leakage of the carriage rose by 90%~320%. The above-mentioned pressure difference conditions roughly cor-

收稿日期: 2019-04-22

基金项目: 国家科技支撑计划农业领域重点项目 (2013BAD19B01-1); 广东省重点领域研发计划 (2019B020225001)

作者简介: 景传峰 (1969—), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为铁道冷链装备设计。

responded to the running speed of 40 km/h, 65 km/h and 90 km/h of the car. On this basis, the air tightness index of newly built railway mechanical refrigerated car was analyzed and given, and the specific strategy of improvement and optimization was put forward. The air leakage standard of newly built railway mechanical refrigerated car should be set at 50 Pa pressure difference conditions, not more than 10 m³/h, which is 75% less than the existing standard. In addition, through the use of new technology and technology, the structure of carriage, door and drainage outlet is improved, and the leakage points of the car body are reduced, and effectively improves the air tightness of the carriage.

KEY WORDS: railway mechanical refrigerated car; air tightness; air leakage; standards

气密性和隔热性能是机械冷藏车的 2 项重要热工指标,对冷藏运输车辆的热工性能和运输经济性影响显著。气密性与隔热性互相关联,在实际中,车体气密性的恶化往往会造成车厢保温材料综合传热系数(K 值)快速增长,进而影响车厢隔热性能^[1]。目前,在进行冷藏车热工计算时,车体漏气引起的热负荷一般按车体传热热负荷的 10%简化计算。随着车速提高和车辆老化,漏气量逐渐增加,外部热空气的侵入增大了制冷机组热负荷,会造成车内降温速度减缓,降温至规定温度需要较长的时间,甚至无法达到设计温度。渗风引起的车内湿度增大还会导致制冷机组蒸发器结霜(或结冰)加剧,引起机组频繁除霜,进一步影响降温效果。此外,制冷机组工作时间延长或频繁启动增加了运输能耗并影响机组的使用寿命;车体漏气部位的结露或结霜也会在一定程度上影响车内温度分布和货物质量。国外研究亦表明,当冷藏车在运行速度超过 20 km/h 后,气密性差的车厢漏气量随运行速度增加快速增加,传热系数 K 值急剧增大,而气密性较好的车厢 K 值变化则相对较少^[2]。综上所述,无论是从节能降耗还是保障承运货物品质安全的角度出发,均应对车辆气密性指标的合理选取展开研究。鉴于问题的重要性,欧洲冷藏物流协会(ECLSA, European Cold Logistics & Storage Association)在所制定的《冷链能耗指引》中,将渗风能耗部分列为条文的第 1 条第 1 款^[3]。近年来,国内相关研究虽逐渐增加,但主要集中在公路冷藏运输领域^[4-5],由于条件限制,对铁路冷藏运输装备气密性问题的研究仍较为缺乏。随着铁路冷链需求的变化,目前新型铁路冷藏运输装备在停滞近 20 年后重新展开研制,并进展迅速。在当前铁路运输不断提速的背景下,铁路机械冷藏车气密性指标的合理确定及车体气密性结构的改进优化等问题已迫在眉睫。

1 铁路机械冷藏车气密性指标分析与确定

1.1 冷运装备气密性指标

从冷链运输装备运用机理来看,由于运行时车厢外部风压使得装备内外形成一定的压差,因此造成漏

气。风压的大小与运行速度密切相关,但测试较为困难,因此,在各国的测试标准中,均以静态测量方法代替车辆真实运行情况。鉴于问题的重要性,各国针对冷藏车气密性指标进行了一系列试验,并给出了基于压差的冷藏运输装备气密性测试方法和性能指标值。在试验测试时,铁路车辆的内外压差一般设定为 50 Pa 或 125 Pa,公路车辆内外压差设定为 100 Pa 或 125 Pa,集装箱内外压差设定为 250 Pa。将国际上通行的各类不同冷藏运输工具的气密性标准进行归纳整理,见表 1。由表 1 可知,铁路、公路车辆、集装箱等不同运输装备的气密性考核标准差异较大,在所有冷藏运输装备的气密性技术指标中,我国当前铁路机械冷藏车的气密性指标要求较低,这也影响到食品品质安全保障和运输节能,因此需对其渗风量情况进行测试分析,寻求相应的解决策略。

1.2 铁路冷藏运输装备渗风量测定及分析

为掌握我国现有铁路机械冷藏车气密性能状况及存在问题,研究者以我国常用铁路机械冷藏车为例,对 B₂₃, B_{23A} 和 B₁₀ 型冷藏车进行热工性能试验。考虑到研究成果需运用于生产实际,因此选用国际通用且便于测试的试验方法和技术指标进行研究^[14-17]。结合表 1,在新造铁路机械冷藏车气密性指标确定方面,按照 GB/T 5600 要求采用压差测试法,测试系统见图 1,压差表和流量计分别采用 CAT2000 型压差表(测量精度 5 Pa)和 MF 5706-N-800B 型气体流量计(测量精度±0.2%),温度记录仪为 Testo174 型(测量精度±0.5 K)。测试时,首先将需要测试的铁路机械冷藏车空置并密闭,通过调节流量阀,将一定量的空气以恒定速度由外界导入车内,使内外压分别稳定在 50, 125, 250 Pa,并读取渗风量。为便于比较,测试值按式(1)换算为标准状态下的渗风量。试验得到各型铁路机械冷藏车的渗风量,见表 2。

$$V_0 = pT_0V / p_0T \quad (1)$$

式中: V_0 为铁路机械冷藏车标准状态下的渗风量(m³/h); p_0 为标准大气压; p 为铁路机械冷藏车测试条件下的大气压, $p=101.3$ kPa; T_0 为标准状态下的空气温度; T 为铁路机械冷藏车测试条件下空气温度, $T=273$ K; V 为铁路机械冷藏车测试得到的渗风量(m³/h)。

表 1 冷链运输装备气密性指标
Tab.1 Air tightness requirements for cold chain transport equipment

装备类型	标准号	气密性指标	内外压差/Pa
铁路车辆	GB/T 5600 ^[6]	整体发泡式车辆为 40 m ³ /h；填装式车辆为 60 m ³ /h	50
	AAR RP-212 ^[7]	单扇平拉门车辆约为 7.1 m ³ /h 双扇平拉门车辆约为 8.5 m ³ /h	约 125
	GB 29753 ^[8]	根据传热面积不同，漏气倍数分别为： ≤3.0(传热面积>40 m ²)；≤3.8(20≤传热面积≤40 m ²)；≤6.3 (传热面积<20 m ²)	100
公路车辆	QC/T 449 ^[9]	分I、II、III等 3 级，根据传热面积不同，漏气倍数分别为： I≤1.2、II≤3.0、III≤4.8(传热面积>40 m ²)； I≤1.5、II≤3.8、III≤6.0(20≤传热面积≤40 m ²)； I≤2.1、II≤6.3、III≤8.4(传热面积<20 m ²)	100
	TTMA 38 ^[10]	20 英尺(1 英尺为 30.48 cm) 车辆≤27.6 m ³ /h 40 英尺车辆≤42.5 m ³ /h	约 125
	DIN 8959 ^[11]	0.25 m ³ /(h·m ²)	250
集装箱	GB/T 7392 ^[12]	1 个门时为 5 m ³ /h；每增加一个门，增加 5 m ³ /h	250
	ISO 1496-2 ^[13]	1 个门时为 5 m ³ /h；每增加一个门，增加 5 m ³ /h	250

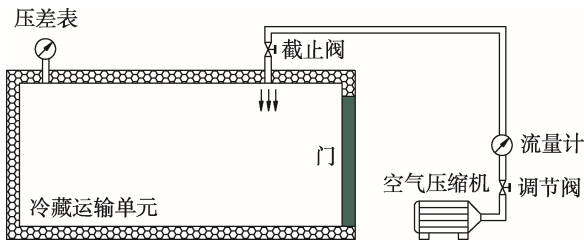


图 1 冷藏运输装备设备气密性测试系统
Fig.1 Air tightness test system of refrigerated transport equipment

表 2 各型铁路机械冷藏车渗风量
Tab.2 Air leakage of existing railway mechanical refrigerated car

车型	渗风量/(m ³ ·h ⁻¹)		
	50 Pa	125 Pa	250 Pa
B ₂₃	27	51.8	86.9
B _{23A}	34.1	65.3	110.1
B ₁₀	26.1	50.1	84.3

试验结果显示，B₂₃、B_{23A} 和 B₁₀ 型冷藏车气密性能虽均符合 GB/T 5600 的规定，但将内外压差变为 125，250 Pa 后，车厢渗风量较 50 Pa 压差时上升了 90%~320%，测试结果远大于 AAR RP-212 的要求，且与冷藏集装箱的气密性规定相差甚远。可见，由于我国铁路车辆标准制定时间较早，采用的内外压差要求最低，因此，在当前铁路运输不断提速的背景下，相关指标存在一定的滞后，亟待改进。

为进一步明确漏气量与车辆运行速度之间的关系，参考文献[18]的渗风经验公式，见式（2），推导出“内外压差-运行速度”以及“运行速度-漏气量”的变化规律，见图 2—3。

$$\Delta P = 0.7v^{1.78} \tag{2}$$

式中： ΔP 为内外压差(Pa)； v 为行驶速度(m/s)。

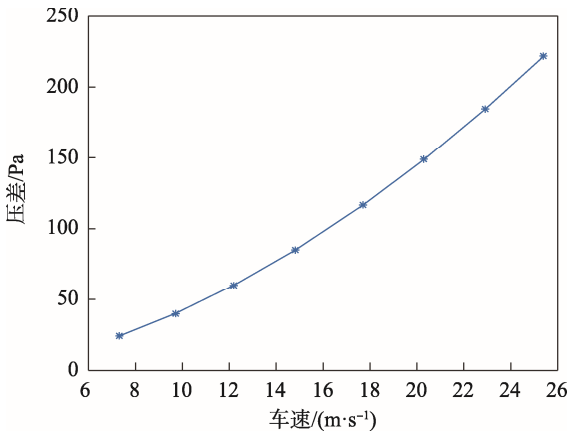


图 2 运行速度与内外压差关系
Fig.2 Relation between running speed and inner and outer pressure difference

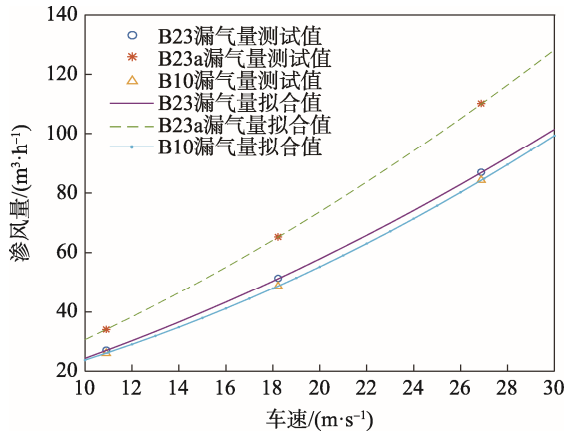


图 3 漏气量与运行速度关系
Fig.3 Relation between air leakage and running speed

2 车体气密性结构优化设计及标准确定

2.1 车体气密性结构优化设计

中车长江公司自20世纪中期起,长期从事我国铁路机械冷藏车的研究制造、维护保养等相关工作。总结多年的工作发现,内外压差和漏泄点是形成冷藏运输装备漏气的2个关键因素。由于车体内外发生换气至少需要有2个泄露点,且要分别处于正压和负压区,因此,漏泄点的尺寸、特性和位置对漏气量的影响十分明显。近年来,在对冷藏车进行针对性的气密性能检修和测试后发现,若漏泄点位于车体上部和下部,则车厢内外温差形成风管效应,进而导致漏气量增加;若漏泄点位于车厢前部和后部,端墙上的压差和吸气效应以及车辆摇摆晃动在侧墙上形成的不同压力分布则均会导致换气量明显加大。同时,运行风压、内外温差、制冷设备工作时的送风均可造成内外部产生压差,因此,想要提高车厢气密性,首先须尽可能减少车体结构上的漏泄点。此外,从铁路机械冷藏车车体结构特点来看,形成漏泄点的部位主要有底架、侧墙、车顶和端墙以及各部件连接处;制冷机组与车体之间的密封部位;车门与车体之间及排水口的密封结构处。从试验情况来看,车门、排水口等活动部件的状态对气密性能影响极大,是车辆漏气的主要原因。在上述基础上分析得到以下关键措施。

1) 车厢和车门隔热结构密封措施的改进。现有铁路冷藏车侧墙、端墙和车顶的内板采用铝板或镀锌钢板,并通过断杆铆钉拼接而成,部件连接处的二次发泡内装板也是采用断杆铆钉与内板直接连接(见图4)。由于断杆铆钉仅起铆接连接作用,在铆接过程中钉体尺寸不变,因而钉体与被铆板件孔存在间隙;同时内板采用拼接结构,因此不可避免地存在连接接缝,均会影响气密性能。由于锁芯铆钉具有较好的密封性能,近年来在冷箱和冷藏汽车等冷链运输装备上被广泛应用,因此,侧墙、端墙和车顶的内板可考虑采用薄板拼焊成整体无缝结构,二次发泡内装板应采用具有较好密封性能的锁芯铆钉连接(见图5),内装板与内板搭接面间可采用单面或双面胶带来消除贯通缝隙。

在车门方面,现有铁路冷藏车车门采用滑移嵌入

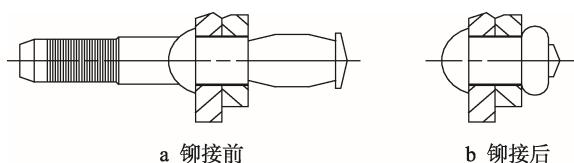


图4 断杆铆钉
Fig.4 Broken rod rivets

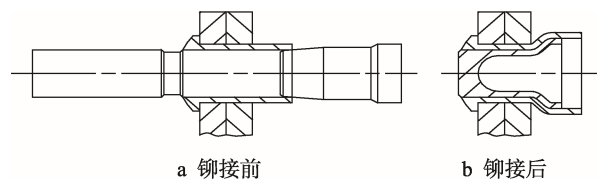


图5 锁芯铆钉
Fig.5 Lock rivet

式结构,门体上设置两道密封胶条,通过车门垂直压紧,实现车门与车体台阶式门框之间的密封。与冷箱、冷藏汽车等采用的对开车门相比,这种密封结构方式虽更有利于保障气密性,但在实际使用中,因车门尺寸较大、长时间使用导致变形以及设备装配不当等原因,将致使漏气量增大。对于上述问题,应通过配套专门的制造工艺来保证车门、门框及其组装质量。

2) 排水口密封结构改进与优化。为保障食品运输安全,冷链运输装备需定期对内部进行清洗,保障食品装载空间的卫生状况。由于在运输过程中,制冷会形成冷凝水,因此需设置排水口进行排水。现有车采用铰接方式的排水阀盖,通过加重块的自重对排水口进行密封(见图6)。该密封方式在远离铰接点的部位难以实现全密封,且在运用过程中由于锈蚀和振动等原因,易造成密封失效。近年来在冷藏集装箱上应用了一种橡胶鸭嘴排水阀结构,并将其应用于高铁客车上(见图7),具有良好的自密封性能,铁路机械冷藏车的排水口可借鉴采用该密封结构。

研究者将上述改进优化措施用于冷藏集装箱的研制之中,仍采用1.2节方法对其进行气密性测试,结果显示其渗风量明显改善。

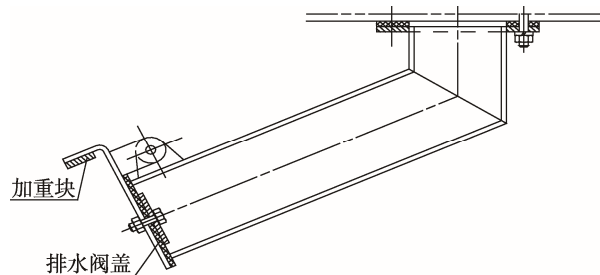


图6 机冷车排水阀
Fig.6 Drainage valve of mechanical refrigerated car

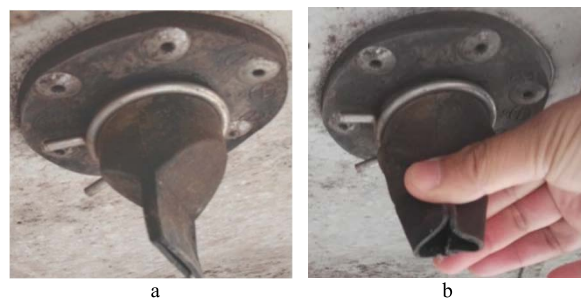


图7 冷藏集装箱用排水阀
Fig.7 Drainage valve of refrigerated container

2.2 新型铁路机械冷藏车气密性指标分析与确定

冷藏运输装备的气密性指标包含测试压差与渗风量值 2 部分。

在测试压差方面, 由上述试验数据计算推导可知, 当运行速度分别为 11, 18, 27 m/s (约为 40, 65, 90 km/h) 时, 冷藏运输装备的内外压差分别为 50, 125, 250 Pa, 通过式 (2) 可方便地进行转化和对照分析。由此可知, 选取测试基准时, 使用何种压差作为测试基准并无明显区别。对于铁路机械冷藏车, 国内原有标准 (GB/T 5600) 的测试压差为 50 Pa, 考虑到延续原有测试条件, 无需对试验台进行大规模改造, 故建议在新造铁路机械冷藏车的气密性能测试中仍将 50 Pa 作为压差条件。

在渗风量值的确定方面, 既要考虑新标准的先进性, 又要考虑现实的工艺技术水平问题及与国际接轨。为此, 首先对相关标准的渗风量指标进行汇总分析。在铁路方面, 将北美铁道协会的 AAR RP-212 渗风量指标转化为 50 Pa 压差条件, 则渗风量变为 13.5 m³/h (单扇平拉门车辆) 和 16.1 m³/h (双扇平拉门车辆)。上述指标要求明显高于 GB/T 5600, 渗风量仅为我国现有标准限定值的 20%~40% 左右。对于公路冷藏运输, 因冷藏汽车空间大小不一、运用时间长短不定 (短期运输对装备的隔热、气密性要求可适当降低), 因此, 各国冷藏汽车对气密性的要求均不高, 不宜作为铁路机械冷藏车气密性指标的参考。如美国 TTMA 38 中的渗风量指标按 50 Pa 压差条件转化后约为 52 m³/h; 我国的 GB 29753 和 QC/T 449 是基于 TTMA 38 制定, 并进一步放宽了条件; 德国的 DIN 8959 按照我国铁路机械冷藏车大小尺寸及测试压差转化后, 渗风量限定值约为 89 m³/h 左右。在保温集装箱方面, 国内外标准是一致的, 按照 ISO 1496—2 和 GB/T 7392 的要求, 保温集装箱的漏气量按照 50 Pa 压差条件转化后, 变为 16 m³/h 左右。综上所述, 从当前标准的发展来看, 增强冷藏运输装备的气密性能已成为发展的共识和趋势。在具体参数确定方面, 铁路、公路、海运运用环境条件不一, 因此, 北美铁道协会 AAR RP-212 的取值范围更值得借鉴和参考。考虑到标准制定的先进性原则、我国铁路运输高速重载的发展趋势以及新造车辆在改进优化后的气密性能, 认为将新造铁路机械冷藏车的气密性标准确定为 10 m³/h (50 Pa 压差条件下) 较为合适。上述指标既平衡了技术上的可行性, 又在参考国际标准的基础上体现了我国铁路制造水平的先进性。在性能上, 比国家标准规定的 40 m³/h 减少了 75%, 较 AAR RP-212 提高了 25%。

3 结语

气密性能是机械冷藏车的关键指标之一, 为此,

国内外均对其制定了严格的检测标准。在当前铁路运输不断提速的背景下, 铁路机械冷藏车气密性指标存在一定的滞后。在综合现有技术水平和运输条件后认为, 新造铁路机械冷藏车的漏气量标准应设定为在 50 Pa 压差条件下不大于 10 m³/h。上述指标既平衡了技术上的可行性, 又体现了我国铁路车辆制造的国际领先水平。在性能上, 比国家标准规定的 40 m³/h 减少了 75%, 较 AAR RP-212 提高了 25%。

提高铁路机械冷藏车气密性的关键是尽可能减少车体结构上的泄漏点, 因此, 新工艺新技术的使用十分必要。在车厢隔热结构方面, 可采用薄板拼焊成、接口二次发泡并使用锁芯铆钉连接的方式进行; 车门采用滑移嵌入式结构, 且应通过配套专门的制造工艺来保证车门、门框及其组装质量; 在排水口密封结构设计方面, 可使用橡胶鸭嘴排水阀代替现有铰接方式的排水阀盖。通过上述方法, 可有效提升了我国铁路冷藏车的气密性性能水平, 为新装备研制提供技术保障。

参考文献:

- [1] 李锦, 谢如鹤. 多温冷藏车降温影响参数敏感度分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 274—281.
LI Jin, XIE Ru-he. Sensitivity Analysis of Cooling Influence Parameters for Multi-temperature Refrigerated Truck[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 274—281.
- [2] 欧阳仲志. 陆上冷藏运输工具气密性能的优化[J]. 制冷, 1999, 67(2): 27—32.
OUYANG Zhong-zhi. Selecting of Air Leaking Rate for the Inland Refrigerating Transport Equipment[J]. Refrigeration, 1999, 67(2): 27—32.
- [3] ECLSA. Energy Guidelines for Refrigeration Systems in Cold Stores and Freezers[R]. London: European Cold Logistics & Storage Association, 2012.
- [4] 刘广海, 谢如鹤, FOSTER A, 等. 冷藏运输工具渗风特性试验与关键参数分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 302—308.
LIU Guang-hai, XIE Ru-he, FOSTER A, et al. The Research on Air Leakage Characteristics and Key Parameters of Refrigerated Transport Unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 302—308.
- [5] 刘广海, 谢如鹤, 邹毅峰, 等. 多温区冷藏车气密性能影响参数理论分析与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 289—296.
LIU Guang-hai, XIE Ru-he, ZOU Yi-feng, et al. Theoretical Analysis and Experiment of Air Tightness of Multi-temperature Refrigerated Truck[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 289—296.
- [6] GB/T 5600, 铁路货车通用技术条件[S].

- GB/T 5600, General Technical Conditions for Railway Freight Cars[S].
- [7] AAR RP-212, Thermal Performance Standard and Test Procedures for Insulated Box Car[S].
- [8] GB 29753, 道路运输 食品与生物制品冷藏车安全要求及试验方法[S].
GB 29753, Safety Requirements and Test Method for Refrigerating Van for Transported Food and Biological Products on Road[S].
- [9] QC/T 449, 保温车、冷藏车技术条件及试验方法[S].
QC/T 449, Technical Conditions and Test Method of Thermal Insulation Vehicle and Refrigerated Vehicle[S].
- [10] TTMA RP38, Method for Testing and Rating Heat Transmission of Controlled Temperature Vehicles/Domestic Containers[S].
- [11] DIN 8959, Insulated Food Carriers-requirements and Testing[S].
- [12] GB/T 7392, 系列 1: 集装箱的技术要求和试验方法 保温集装箱[S].
GB/T 7392, Series 1 Freight Containers-Specification and Testing. Thermal Containers[S].
- [13] ISO1496-2, Series 1 Freight Containers-specification and Testing-Part2: Thermal Containers[S].
- [14] KRIHA J. 隔热车热性能的确定[J]. 国外铁道车辆, 1984(2): 19—20.
KRIHA J. Determination of Thermal Performance of Thermal Insulation Vehicle[J]. Foreign Railway Vehicles, 1984(2): 19—20.
- [15] 刘广海, 吴俊章, FOSTER A, 等. GU-PCM2 型控温式相变蓄冷冷藏车设计与空载性能试验[J]. 农业工程报, 2019, 35(6): 288—295.
LIU Guang-hai, WU Jun-zhang, FOSTER A, et al. Design and No-load Performance Test of GU-PCM2 Temperature Controlled Phase Change Storage Refrigerator[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(6): 288—295.
- [16] RAI A, TASSOU S A. Energy Demand and Environmental Impacts of Alternative Food Transport Refrigeration Systems[J]. Energy Procedia, 2017, 123: 113—120.
- [17] 中国制冷学会. 中国制冷行业战略发展研究报告[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
CAR. Research Report on Strategic Development of Refrigeration Industry in China[M]. Beijing: China Construction Industry Publishing House, 2016.
- [18] 刘广海. 冷藏运输能耗分析与装备优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
LIU Guang-hai. Study on Analysis of Energy Consumption and Optimization of Refrigerated Transportation Equipment[D]. Changsha: Central South University, 2007.