

# 铁路货运装备新型外包保温加热系统综合性能研究

王奉鹏

(中车齐齐哈尔车辆有限公司, 齐齐哈尔 161002)

**摘要:** **目的** 提出一种新型外包保温加热系统, 并检测其综合性能。**方法** 将冷链物流作为切入点, 提出一种新型保温加热系统, 结合传热学基础理论, 从物理性能分析、工艺性能实践、综合性能检测、应用性能验证等不同角度, 详细阐述新型保温系统的综合性能。**结果** 新型外包保温绝热材料达到热动平衡后, 漏热率与温差关系曲线相对稳定, 无大的波动点; 同时与之相搭配的新型加热系统柴油消耗量由 19.3 L/h 降低至 17.2 L/h, 平均加热时长减少了 1 h。**结论** 新型外包保温加热系统的加热效率得到了很大的提升, 并且进一步减少了热能损失, 同时加快了装卸效率。

**关键词:** 聚氨酯; 岩棉; 保温加热系统; 工艺流程; 综合性能

**中图分类号:** TB482 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)13-0184-07

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.13.027

## Comprehensive Performance of a New External Thermal Insulation Heating System for Railway Freight Equipment

WANG Feng-peng

(CRRC Qiqihar Rolling Stock Co., Ltd., Qiqihar 161002, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to propose a new external thermal insulation heating system and explore its comprehensive performance. With the cold chain logistics as the breakthrough point, a new thermal insulation heating system was proposed to elaborate the comprehensive performance of the new thermal insulation heating system from physical performance analysis, process performance practice, comprehensive performance testing, application performance verification and other aspects in combination with the basic theory of heat transfer. After the thermal-dynamic balance of the new thermal insulation material was achieved, the relationship curve between heat leakage rate and temperature difference was relatively stable and had no big fluctuation point. At the same time, the diesel consumption of the new heating system was reduced from 19.3 L/h to 17.2 L/h, and the average heating time was reduced by 1 h. The heating efficiency of the new external thermal insulation heating system is greatly improved, and the heat loss is further reduced, while the loading and unloading efficiency is accelerated.

**KEY WORDS:** polyurethane; rock wool; thermal insulation and heating system; process flow; comprehensive performance

随着国家产业结构调整, 铁路深化体制改革, 货运装备急速向多品种、个性化方向发展, 货物运输也正在向生鲜活品、军品以及特殊原料等冷链物流领域拓展。具备固液转换、液气转换或恒温保持功能的铁

路货运装备已呈现快速发展趋势, 与此同时对保持或转换运输物品状态的保温系统也提出了更高的要求, 在冷链物流中体现得更为突出。特别是无冷源冷藏集装箱, 能够在一定区域、一定时段内实现全程冷链物

收稿日期: 2019-02-21

作者简介: 王奉鹏 (1982—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为集装箱器具以及集装箱化。

流运输。而其性能的评价主要由箱体外包保温系统性能测试以及环保测试等几大项技术构成。如何选取保温材料,搭建保温系统,并通过试验论证新型保温系统综合性能,已经成为铁路冷链货运装备研制的核心技术<sup>[1]</sup>。

## 1 保温材料物理性能分析

保温材料种类繁多,例如膨胀聚苯乙烯泡沫板、保温砂浆、挤塑聚苯乙烯泡沫板、硬质聚氨酯泡沫、石灰水泥砂浆、酚醛树脂泡沫、石膏板、木材、玻璃棉毡、矿棉、岩棉板、真空绝热板等等,材料不同,其容重、导热系数、阻燃级别等均有所不同<sup>[2-4]</sup>。下

面以岩棉、聚氨酯为例,进行保温材料物理性能分析,见表 1。

通过表 1 参数可知,同等厚度的聚氨酯保温材料与现有岩棉保温材料相比,其导热系数小,温度散失慢;其密度小利于整机产品轻量化。但是聚氨酯的使用温度范围较小,耐温上限较低,一旦罐体外表面加热温度较高时就无法直接使用聚氨酯保温,需要利用耐温上限较高的有机保温材料<sup>[5]</sup>与聚氨酯进行复合处理,并通过燃烧性能测试方可投入使用,见图 1。除此外,保温材料自身的阻燃级别通常情况下由使用环境和成本支出决定。目前阶段保温系统的阻燃级别在忽略了组装误差、裁剪缺陷等因素以外,完全继承保温材料自身属性。

表 1 岩棉与聚氨酯的物理性能对比  
Tab.1 Comparison of physical properties between rock wool and polyurethane

绝热材料	导热系数/(W·m <sup>-2</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	使用温度/°C	阻燃级别	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
聚氨酯特性技术指标	0.02~0.03	-60~80	A, B1, B2, B3	45~60
岩棉特性技术指标	0.035~0.041	~600	A, B1, B2, B3	80~150
备注	一般以实测为准		以实际使用为准	一般以实测为准

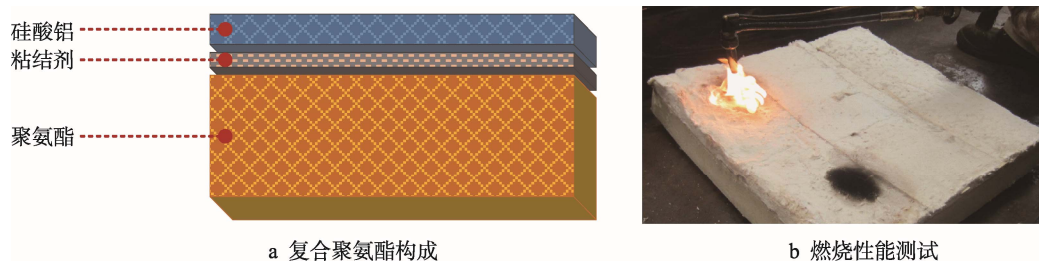


图 1 复合聚氨酯构成及燃烧性能测试

Fig.1 Composition and combustion performance test of composite polyurethane

保温材料的物理性能相互制约,简单通过某一项性能参数去判断显然是不准确的。必须本着物理性能良好,综合性能适中的原则进行选择,同时还要结合实际使用工况,才能确保所选材料充分发挥其各自的物理性能优势。

## 2 保温系统工艺性能实践

### 2.1 岩棉保温系统制造工序

岩棉外包工序通常采用层铺装,罐体第 1 层保温层采用岩棉铺装,但相应罐体外加强圈外表面无法铺设岩棉。利用松紧带铺装拉紧第 1 层保温层后,才可进行特殊胶体保温层的二层铺装,见图 2。每层铺装均需要间隙填充,以确保不影响外包的整体保温效果。

### 2.2 聚氨酯保温系统制造工序

聚氨酯外包工序通常将其预制成网格方形结

构,具体尺寸可根据罐体外形尺寸提前进行拟合性设计。完成后方可进行积木式拼接安装,见图 3。然后使用聚氨酯发泡胶密封填充网块间隙,以使得保温性能稳定。最后使用钢打包带捆绑固定,不允许与罐体脱离。

### 2.3 保温系统制造工艺流程对比

2 种保温系统工艺流程对比见图 4。岩棉外包工序有两层保温铺装,层间容易出现间隙,铺装工序相对繁琐;而聚氨酯外包工序是单层保温铺装,轻量化程度较高,有效节省了工人操作时间,而且不存在劣质工序,也不涉及到多层保温铺装的“空鼓”间隙。

综合来看,聚氨酯保温层对集装箱的保温体系搭建更具优势,为了进一步验证保温系统构成的合理性。下面以聚氨酯保温系统为例进行详细的综合性能研究,最终通过与现有岩棉保温系统应用性能进行对比,搭建完备的集装箱保温系统工艺知识体系。



a 待裁剪岩棉板      b 一层岩棉铺装      c 二层特殊胶体铺装

图2 岩棉外包制造工序

Fig.2 Manufacturing process of outsourced rockwool



a 单块复合聚氨酯网块      b 复合聚氨酯积木式拼装      c 复合聚氨酯网块间的发泡

图3 复合聚氨酯外包制造工序

Fig.3 Manufacturing process of outsourced composite polyurethane

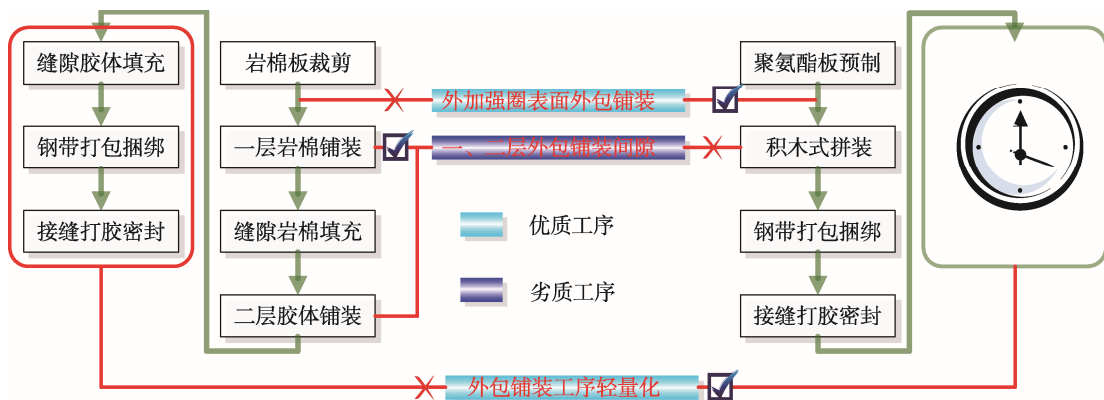


图4 岩棉与聚氨酯外包工艺流程对比

Fig.4 Process Comparison of outsourced rockwool and polyurethane

### 3 保温系统综合性能检测

#### 3.1 聚氨酯保温层平面度检测

聚氨酯保温层采用插针法检查：用直径为 1 mm

的钢针检查，要求保温层的最小厚度不得小于设计所需厚度，平面度依靠板尺靠平。

#### 3.2 聚氨酯取样检测

聚氨酯取样检测需要样品检测单位具有明确法律地位和第三方公正地位的专业质量检测机构，是石

油和化学工业产品质量监督检验中心认可的行业质检中心。具体报告内容见表 2。

表 2 聚氨酯取样检测报告单  
Tab.2 Sampling and testing report of polyurethane

样品检测设备	电子天平、导热仪、万能试验机、氧指数测定仪				
样品状态	乳黄色泡沫块、样品完好				
样块规格	350 mm×350 mm×80 mm				
样品检测项目	单位	技术指标值	实测结果	单项判定	备注
密度	kg/m <sup>3</sup>	45~60	55.9	合格	
导热系数	W/(m·°C)	0.02~0.03	0.0225	合格	
抗压强度	kPa	≥200	369	合格	
氧指数	%	≥26	32.2	合格	
样品检测结论	所检密度、导热系数(25 °C)、抗压强度其检测结果符合标准《喷涂聚氨酯硬泡体保温材料》JC/T 998 - 2006 规定的性能指标要求。				
检测过程中涉及标准：JC/T 998 - 2006《喷涂聚氨酯硬泡体保温材料》；GB/T 2406.2 - 2009《塑料用氧指数法测定燃烧行为，第 2 部分：室温试验》；GB/T 6343 - 2009《泡沫塑料及橡胶表观密度的测定》；GB/T 10297 - 1998(25 °C)《非金属固体材料导热系数的测定，热线法》；GB/T 8813 - 2008《硬质泡沫塑料压缩性能的测定》					

### 3.3 保温系统性能测试

#### 3.3.1 传热系统动态流向模拟

产品模糊设定为 20 英尺（1 英尺=0.3048 m）箱体模型，利用电热器（设定功率 2.5 kW）不断给箱内升温，而热量也在经过罐体及聚氨酯保温层向集装箱外部同步扩散<sup>[6-7]</sup>，见图 5。

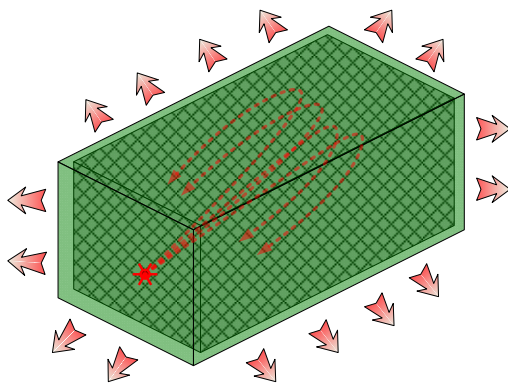


图 5 传热系统动态流向  
Fig.5 Dynamic flow of heat transfer system

#### 3.3.2 箱体内腔测温点布置

测温点的布置一般以箱体内腔长度方向中轴线为基准，上下可浮动 100 mm，同时均布设置在腔体的 6 个面上，具体可参见集装箱试验标准<sup>[8]</sup>。

#### 3.3.3 测温数据的记录以及相关曲线图的绘制

当箱体内腔升高的热量与箱体外部扩散的热量等同时，即使系统中的分子持续在作无规则热运动，箱内的温度也不会随之升高。在传热学领域将此定义为稳态过程，即通常所说的热动平衡。在此基础之上，关闭加热器，按照预先设定的箱体内腔测温点，见图

6。结合试验标准<sup>[8]</sup>要求，每 0.5 h 记录箱内外温度，记录数据不少于 18 组，见表 3。

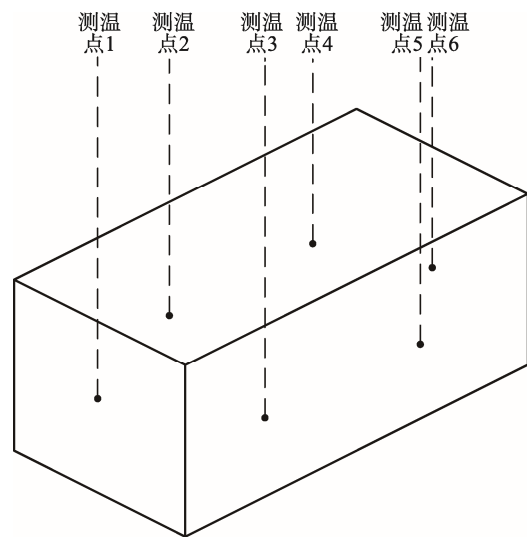


图 6 测温点布置  
Fig.6 Layout of temperature measuring points

利用表 3 数据并结合输入的热功率，计算出整箱漏热率以及传热系数<sup>[9]</sup>，具体算法如下：

$$U_{\theta} = \frac{Q}{\theta_i - \theta_t}$$

式中： $U_{\theta}$  为总漏热率 (W/°C)； $Q$  为箱内电加热器总功率 (W)； $\theta_i$  为箱内平均温度 (°C)； $\theta_t$  为箱外平均温度 (°C)。

$$K = \frac{U_{\theta}}{A}$$

式中： $K$  为传热系数 (W/(m<sup>2</sup>·°C))； $A$  为箱体散热外表面积<sup>[10]</sup>（设定 20 英尺箱体外表面积为 114.5 m<sup>2</sup>）。

表3 测温结果  
Tab.3 Temperature data record

序号	记录时间	测温点1 温度/°C	测温点2 温度/°C	测温点3 温度/°C	测温点4 温度/°C	测温点5 温度/°C	测温点6 温度/°C	平均值 /°C	室外温 度/°C	漏热率 /(W·°C <sup>-1</sup> )	传热系数 /(W·m <sup>-2</sup> ·°C <sup>-1</sup> )
1	14:00	40	40	40	40	40	40	40	21	131.579	1.149
2	14:30	40	40	40	40	40	40	40	21	131.579	1.149
3	15:00	39	39	40	39	39	39	39.83	20	126.072	1.101
4	15:30	39	39	40	39	39	40	39.33	21	136.388	1.191
5	16:00	39	39	40	39	39	40	39.33	21	136.388	1.191
6	16:30	40	39	40	39	39	40	39.50	21	135.135	1.180
7	17:00	40	39	40	40	39	40	39.67	21	127.097	1.110
8	17:30	40	39	40	40	39	40	39.67	20	127.097	1.110
9	18:00	40	39	40	40	39	40	39.67	20	127.097	1.110
10	18:30	40	39	40	40	39	40	39.67	20	127.097	1.110
11	19:00	40	40	40	40	39	40	39.83	20	126.072	1.101
12	19:30	40	40	40	40	39	40	39.83	20	126.072	1.101
13	20:00	40	39	40	40	39	40	39.67	20	127.097	1.110
14	20:30	40	39	40	40	39	40	39.67	20	127.097	1.110
15	21:00	39	39	40	40	39	40	39.50	20	128.205	1.120
16	21:30	39	39	40	40	39	40	39.50	20	128.205	1.120
17	22:00	39	39	39	39	39	40	39.17	19	123.946	1.082
18	22:30	39	39	38	39	38	39	38.67	19	127.097	1.110

注：上述数据为圆整后数值，实际允许测温误差为±0.5 °C

以上计算只能完成整个保温系统的性能测试，并没有试验数据的结论性延伸，无法验证保温绝热材料的选用测试方法。通过求出平均漏热率，观察平均漏热率与平均温差的关系，才能判断出绝热材料的选用合理性，并为后期新的绝热材料应用建立试验测试依据<sup>[11-14]</sup>。平均漏热率具体算法如下：

$$U = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{\theta}$$

式中：U 为平均漏热率 (W/°C)；n 为数据记录频次。

结合表 3 中的平均温差，绘制平均漏热率与平均温差的关系曲线，见图 7。

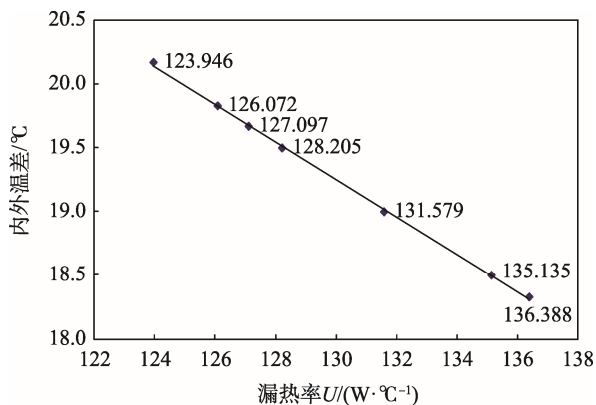


图 7 漏热率与温差关系曲线  
Fig.7 Relation curve of heat leakage rate and temperature difference

由图 7 可知，聚氨酯保温体系的传热系统中，温差越大漏热率越低，相应传热系数越小，整体保温性能就越好，同时也就能更好克服外界温度变化。新的绝热材料完全可以套用以上试验计算流程，观察漏热率与温差关系曲线，就可判定绝热材料应用的合理性。

## 4 加热系统热流结构分析及应用性能验证

### 4.1 现有串联加热系统分析

对现有沥青罐式集装箱串联加热系统进行固态沥青加热过程的模拟仿真分析，见图 8。加热管在罐体内部串联而成，从一端黄色网格加热，热气在罐体内部散热后从另一端黄色网格排出<sup>[15]</sup>。沥青从初始温度 20 °C 升高至 150 °C 完全融化，需要耗时 10.75 h。

由图 8 可知，串联加热系统在沥青加热过程中热气在系统内流动快，出口温度高，从而热损耗较大，加热效率低，卸货慢。从制造工艺角度讲，整个串联系统管路煨制困难，同时全部采用钢管，重量大，降低了沥青运输效率。

### 4.2 新型并联加热系统研制

针对串联加热系统的不足，提出了新型并联加热系统研制方案。通过串联、并联加热系统管路热

流以及加热效率的对比，验证新型并联加热系统的结构模式。

#### 4.2.1 加热系统管路热流对比

新型并联加热系统加热口附近温度较高，采用大直径钢管，在罐体另一端设置若干并联小直径散热管，并联散热管总散热面积大，可提高散热效率，在散热后汇到一个主管，排出废气，见图 9。

整个并联加热系统降低了管径，增大了散热面积。管系局部优选铝合金加热管，降低加热系统重量，

提高运输效率<sup>[16]</sup>。为减轻罐体自重，小直径散热管也可优选铝合金材料，铝合金管系与钢管采用法兰连接，降低工艺组装难度。

#### 4.2.2 加热系统应用性能验证

将罐内沥青充装率接近最大值，以现有罐箱产品加热系统和公司新制罐箱加热系统分别取 3 个罐箱作对比试验，采用火焰加热器加热沥青，对柴油消耗、加热时间进行记录，检验加热系统的加热效率，结果见表 4 和 5。

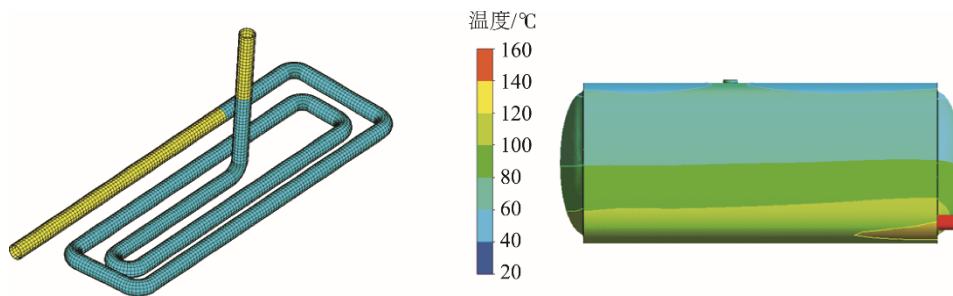


图 8 温度模拟仿真分析  
Fig.8 Analog simulation analysis of temperature

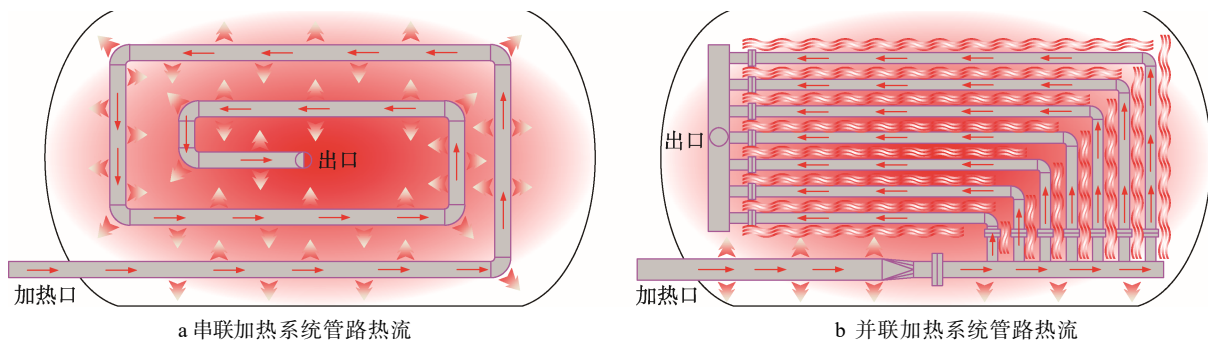


图 9 加热系统管路热流对比  
Fig.9 Comparison of heat flow in pipeline of heating system

表 4 加热系统性能对比结果  
Tab.4 Comparison on performance of heating system

产品类别	卸料地点	起始温度/°C	外界温度/°C	加热时间	停热时间	加热时长/h	油底温度/°C	油耗(柴油)/L
原罐箱	王家营	55	13~25	4月30日 10:40	4月30日 18:10	7.5	140	135
原罐箱	王家营	51	13~25	4月30日 16:00	5月01日 02:30	10.5	140	189
原罐箱	玉溪	50	13~25	4月30日 18:45	5月01日 01:20	6.58	136	147.5
新罐箱	大连旅顺	55	20~25	7月30日 11:05	7月30日 18:50	7.75	150	133
新罐箱	大连旅顺	55	20~25	8月26日 08:45	8月26日 17:26	8.18	150	147
新罐箱	大连旅顺	62	20~25	9月04日 08:38	9月04日 16:10	7.53	150	130.8

表 5 加热系统能耗对比结果  
Tab.5 Comparison on energy consumption of heating system

产品类别	柴油平均耗量/L	平均油耗/(L·h <sup>-1</sup> )	平均能源支出/元
原有罐箱	157.2	19.3	115.8
新型罐箱	136.9	17.2	103.2

由表4和5可知,新型罐箱的加热系统效率得到了很大的提升,并且进一步减少了热能损失,缩短了卸货时间,有效降低了柴油消耗,减少了能源支出成本。

## 5 结语

保温系统综合性能直接影响到运输货物状态的保持能力。特别是对低温密度高、高温密度低的特殊原料来说,能够直接减少加热时间,加快装卸效率,真正实现铁路货运装备结构特点和运输经济增长点的紧密结合。随着新型保温系统在铁路货运装备的深化应用,也将逐步成为中国铁路冷链物流经济持续健康发展的技术支持。

### 参考文献:

- [1] 中国物流与采购联合会, 冷链物流专业委员会. 中国冷链物流发展报告[R]. 2015.  
China Federation of Logistics and Procurement, Professional Committee of Cold Chain Logistics. China Cold Chain Logistics Development Report[R]. 2015.
- [2] XIA Cao, LJAMES Lee, TOMY Widya, et al. Polyurethane/Clay Nanocomposites Foams: Processing, Structure and Properties[J]. *Polymer*, 2005, 46: 775—783.
- [3] 徐培林, 张舒琴. 聚氨酯材料手册[K]. 北京: 化学工业出版社, 2002.  
XU Pei-lin, ZHANG Shu-qin. Handbook of Polyurethane Materials[K]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [4] GB/T 17430—1998, 绝热材料最高使用温度的评估方法[S].  
GB/T 17430—1998, Method for Evaluating the Maximum Service Temperature of Insulating Materials[S].
- [5] GB/T 16400—2003, 绝热用硅酸铝棉及其制品[S].  
GB/T 16400—2003, Aluminum Silicate Cotton for Insulation and Its Products[S].
- [6] SCHLICHTING H. Boundary Layer Theory[M]. 7th ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1979.
- [7] INCROPERA F P, DEWITT D P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer[M]. 5th ed. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [8] GB/T 7392—1998, 货物集装箱系列1标准中第2部分—保温集装箱技术条件和试验方法[S].  
GB/T 7392—1998, Part 2 of Standard 1 of Freight Container Series: Technical Conditions and Test Methods for Thermal Insulation Containers[S].
- [9] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.  
YANG Shi-ming, TAO Wen-quan. Heat Transfer[M]. 4th Edition. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [10] 运辆货车函[2014]458号文件, 铁路快运车辆载货标准空间尺寸及集装器具 第1部分—形式及轮廓尺寸[S].  
Document No.458, Transport Vehicle Letter [2014], Standard Spatial Dimensions and Containers for Railway Express Vehicles Part 1-Form and Contour Dimensions[S].
- [11] ASTM C411—2005, Standard Test Method for Hot-Surface Performance of High-Temperature Thermal Insulation[S].
- [12] ISO 8142—1990, Thermal Insulation-bonded Preformed Man-made Mineral Fibre Pipe Sections-specification[S].
- [13] BS EN 14706—2005, Thermal Insulation Products for Building Equipment and Industrial Installations- Determination of Maximum Service Temperature[S].
- [14] BS EN 14707—2005, Thermal Insulating Products for Building Equipment and Industrial Installations-Determination of Maximum Service Temperature for Preformed Pipe Insulation[S].
- [15] 杨涛, 贾志绚, 连晋毅, 等. 一种提高沥青温度均化方法的仿真与试验研究[J]. 太原科技大学学报, 2017, 38(2): 116—119.  
YANG Tao, JIA Zhi-xuan, LIAN Jin-yi, et al. Simulation and Experimental Study of a Method of Improving Asphalt Temperature Homogellization. *Journal of Taiyuan University of Science and Technology*, 2017, 38(2): 116—119.
- [16] 化学工程手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1989.  
Chemical Engineering Manual[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1989.