

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.01.004

布置真空绝热板的冷藏集装箱内温度分布

郭志鹏 阚安康 杨帆 陈超

(上海海事大学商船学院, 上海, 201306)

摘要:为研究布置真空绝热板对冷藏集装箱内温度分布的影响,以 20 ft 机械式冷藏集装箱为研究对象,建立箱内空气对流与换热的物理和数学模型。采用标准 $k-\epsilon$ 紊流模型,对稳态下的真空绝热板冷藏集装箱和聚氨酯冷藏集装箱内温度场分布情况进行模拟仿真。模拟结果表明:采用真空绝热板作为保温材料,冷藏集装箱箱内温度场分布状况明显优于聚氨酯冷藏集装箱,而且平均温度能够降低 0.8 K。最后,对 20 ft 实体聚氨酯冷藏集装箱进行实验,仿真与实验结果能够较好吻合,验证了模型的准确性。

关键词:真空绝热板;冷藏集装箱;温度分布均匀性

中图分类号:U664.87;TB65

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2017)01-0029-05

Temperature Distribution Inside Reefer Container Equipped with Vacuum Insulation Panels

GUO Zhipeng, KAN Ankang, YANG Fan, CHEN Chao

(Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai, 201306, China)

Abstract: In order to study the effect of the vacuum insulation panel (VIP) on the uniformity of temperature distribution inside reefer container, a physical and mathematical model of the air flow and heat transfer inside a 20-foot reefer container is established. The standard $k-\epsilon$ turbulent model is adopted to simulate the uniformity of temperature distribution inside reefer container equipped with VIP or polyurethane under the steady state. The result shows that the uniformity of temperature distribution inside reefer container equipped with VIP is better than that with the polyurethane. Meanwhile, the average temperature is reduced by 0.8 K, and the simulation result has significance to improve the quality of refrigerated transport. At last, an experiment on a 20-foot polyurethane reefer container is conducted, and the experimental result is well agreeable with the simulation, thus verifying the accuracy of the mathematical mode.

Key words: vacuum insulation panel; reefer container; uniformity of temperature distribution

随着社会和科技的发展,人们对食品营养价值的需求不断提高,冷藏运输工具及技术也得以发展^[1-2]。冷藏集装箱所运载的货物主要有冷冻货和冷却货。其中冷却货物(指果蔬等鲜活易腐货物)对温度较为敏感,温度过高会腐烂变质,温度过低

会冻伤^[3],故而保证运输途中箱内温度分布均匀且维持在一定范围内相当重要。

国内外学者针对箱内温度分布问题进行了大量研究,发现货物堆码方式^[4-7]、送风参数^[8]以及送风回风方式^[9-10]对箱内温度分布均匀性有很大影

基金项目:中国博士后科学基金(2016M590385)资助项目;上海市自然科学基金(15ZR1419900)资助项目;上海海事大学研究生创新基金(YXR2016082)资助项目。

收稿日期:2016-12-01;**修订日期:**2017-01-02

通信作者:阚安康,男,博士后,高级工程师,硕士生导师,E-mail:ankang0537@126.com。

引用格式:郭志鹏,阚安康,杨帆,等. 布置真空绝热板的冷藏集装箱内温度分布[J]. 南京航空航天大学学报,2017,49(1):29-33. GUO Zhipeng, KAN Ankang, YANG Fan, et al. Temperature distribution inside reefer container equipped with vacuum insulation panels[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(1): 29-33.

响。大部分已有研究是从箱内冷空气流动性质展开的,而关于壁面传热对箱内温度分布的影响研究甚少。事实上,外界环境通过箱壁不断向箱内输入热量,不仅不利于箱内温度控制,而且对箱内温度场分布有很大影响。

传统冷藏集装箱采用聚氨酯作为隔热材料,导热系数为 $0.03 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 左右。而真空绝热板(Vacuum insulation panel, VIP)作为一种新型隔热材料,采用玻璃纤维芯材作为芯材,导热系数极低,热传导效率仅为传统绝热材料的 $1/3$ 甚至 $1/10$ ^[11]。同聚氨酯相比,还具有厚度薄、体积小及重量轻的优点,广泛应用于冰箱、冷库、医用保温箱、航空航天和建筑等领域。目前针对真空绝热板应用方面的研究,大多侧重于其热工性能以及保温特性方面^[12-15]。本文将真空绝热板全覆盖于冷藏集装箱壁面,采用数值模拟方法,对负载下冷藏集装箱进行理论建模,研究布置真空绝热板对箱内温度场分布的影响,并与传统保温材料(聚氨酯)进行对比分析。

1 物理模型建立

1.1 冷藏集装箱示意图

本文以标准 20 ft 机械制冷冷藏集装箱为研究对象。箱体内部尺寸(长×宽×高)为 $5\,440 \text{ mm} \times 2\,280 \text{ mm} \times 2\,310 \text{ mm}$;送风口在机组端壁面下侧,尺寸为 $2\,260 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$;回风口在壁面上端,尺寸为 $1\,840 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$ 。货物在集装箱内前后、左右对称布置,货物到侧壁间的距离 $a=300 \text{ mm}$,货物前后之间的距离 $b=450$,货物左右之间的距离 $c=300$,如图 1 所示。

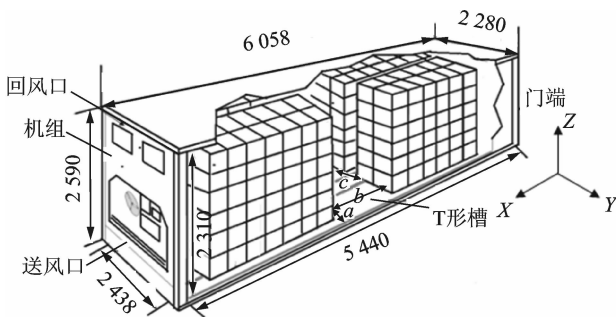


图 1 冷藏集装箱三维示意图

Fig. 1 Three-dimensional schematic diagram of reefer container

1.2 模型假设

建立冷藏集装箱 1:1 等比例数学模型之前,为了便于计算,须对模型作以下简化假设:(1) 车厢内空气为牛顿流体,满足 Boussinesq 假设;(2) 货物为固体,且无内热源;(3) 箱内密封性良好;(4) 对 T 形

槽进行了简化,忽略 T 形槽的导流效果;(5) 冷藏集装箱的进、回风口上有格栅,在计算过程中,忽略格栅对送风、回风的影响,送风口尺寸按 $2\,280 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 、回风口按 $2\,280 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$ 来计算。

1.3 物理计算模型

简化后的冷藏集装箱物理计算模型,如图 2 所示。

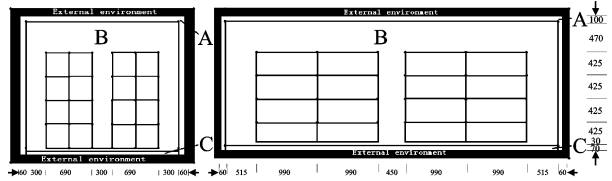


图 2 物理计算模型

Fig. 2 Physical calculation model

在已建立的模型中,单独分析各区域内部以及区域与区域之间换热方式。主要换热方式见表 1,各材料物理性质见表 2。

表 1 各区域热量传递主要形式

Tab. 1 Main forms of heat transfer in each region

区域	材料	换热方式
A	MGSS 不锈钢、隔热材料(聚氨酯、真空绝热板)、SU304 不锈钢	对流:外部空气 ↔ MGSS 不锈钢
		导热:MGSS 不锈钢 ↔ 隔热材料
		导热:隔热材料 ↔ SU304 不锈钢
		对流:SU304 不锈钢 ↔ 内部空气 B
B	空气	对流:内部空气 B ↔ SU304 不锈钢
C	SU304 不锈钢、隔热材料、金属底板	对流:内部空气 B ↔ SU304 不锈钢
		导热:SU304 不锈钢 ↔ 隔热材料
		导热:隔热材料 ↔ 金属底板
		对流:金属底板 ↔ 外部空气

表 2 材料物理性质

Tab. 2 Physical properties of materials

材料	导热系数/ ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$)	厚度/ mm
空气	0.026	1.34	1 440	
金属底板	237	2 700	900	10
聚氨酯(真空绝热板)(上)	0.02 (0.003)	40 (280)	1 210	100
聚氨酯(真空绝热板)(侧)	0.02 (0.003)	40 (280)	1 210	60
聚氨酯(真空绝热板)(下)	0.02 (0.003)	40 (280)	1 210	60

1.4 边界条件及数值求解

本文选用速度入口边界条件,送风口速度设定为 $V=6\text{ m/s}$,送风温度设定值为 273.0 K 。出口采用 Outflow 边界条件。针对黏性流动,内壁面采用无滑移边界条件。外界环境温度为 $T_{\infty}=295\text{ K}$ 。当制冷系统释放的冷量与环境温度达到平衡时,箱内环境达到稳定状态^[16]。总的换热系数是基于提供的各种传热热阻,根据式(1)计算。

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (1)$$

式中: K 为传热系数; α_1 为环境与外壁面自然对流换热系数; α_2 为箱体内部表面与内部气流对流换热系数; λ_i 为各边界层的导入系数; δ_i 为各边界层的厚度。

求解方法采用有限容积法,温度、压力和标准 $k-\epsilon$ 方程对流项均选用二阶迎风离散格式。添加浮升力的影响,重力加速度 g 取 9.81 m/s^2 。

2 数值模拟结果

将 FLUENT 模拟结果导入 TECPLOT 进行可视化处理,采用聚氨酯、真空绝热板为隔热材料的冷藏集装箱整体温度等值线云图,如图 3 所示。

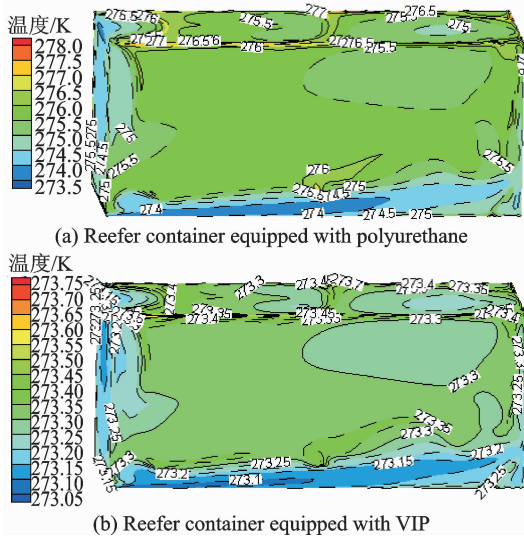


图 3 整体温度分布图

Fig. 3 Whole temperature distribution diagrams

从 FLUENT 的模拟数据可以获得:真空绝热板冷藏集装箱内温度波动范围为 $273.0\sim 273.8\text{ K}$,最大温差约为 0.8 K ;聚氨酯冷藏集装箱内温度波动范围为 $273.0\sim 277.5\text{ K}$,最大温差为 4.5 K 。通过对比可以发现,采用真空绝热板作为隔热材料,冷藏集装箱箱内温度场均匀性能够明显改善。这是因为环境通过外边界向箱内传热时,由

于真空绝热板具有超高热阻,能够有效地阻止室外热量进入冷藏集装箱内部。聚氨酯隔热性能较低,当外界环境不断向内部输入热量时,对箱内温度场分布影响较大。

箱内横截面 $X=2.62, 1.31, 0, -1.31, -2.62\text{ m}$ 处温度的模拟结果如图 4 所示。

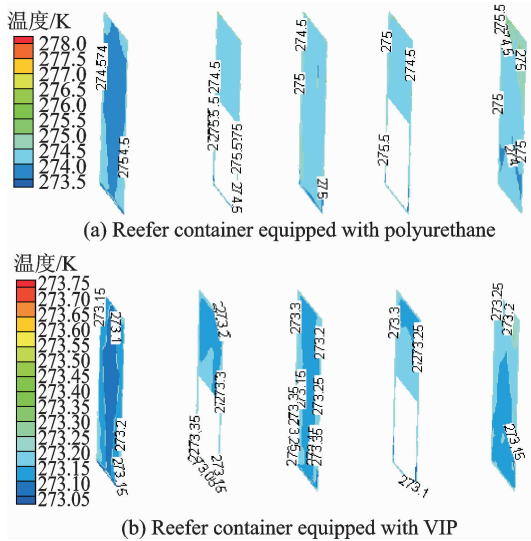


图 4 切面温度图

Fig. 4 Temperature distribution diagrams of section

从图 4 可以发现:受外界环境向箱体传热的影响,冷藏集装箱箱内近壁处的温度最高,依次向内部逐渐降低。真空绝热板冷藏集装箱近壁面温度约为 273.4 K ,聚氨酯冷藏集装箱近壁面处温度约为 274.5 K ,两者温差为 1.1 K ,由此可见真空绝热板阻热效果明显优于聚氨酯,能够提高冷藏集装箱内温度分布均匀度。

选取 $Y=0\sim 1.1\text{ m}$ (侧面到对称面)方向上各纵截面的最大温差和平均温度值,对这两种材料进行了比较,结果如图 5,6 所示。

从图 5 可以看出:真空绝热板冷藏集装箱沿 Y

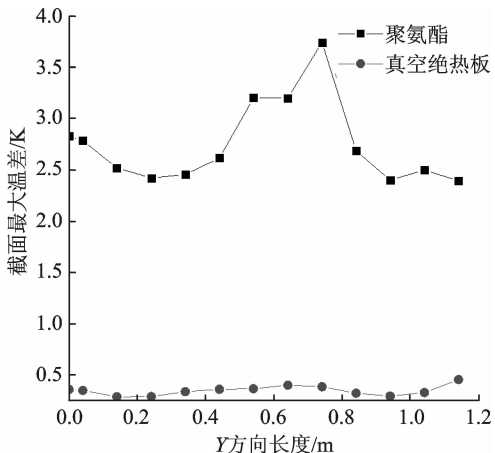


图 5 切面温差

Fig. 5 Temperature difference of section

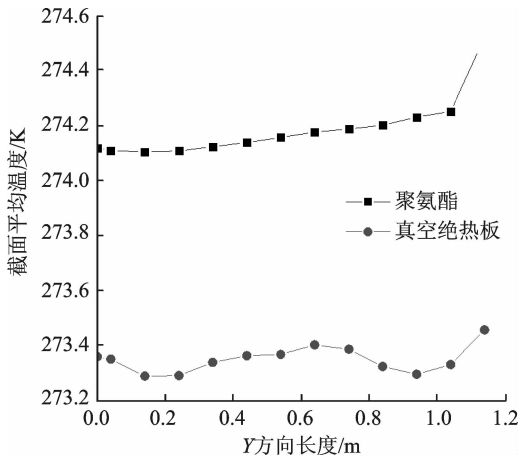


图6 切面平均温度

Fig. 6 Average temperature of section

轴方向纵截面的最大温差明显小于聚氨酯冷藏集装箱。聚氨酯集装箱内温差较大,不利于冷藏货物保鲜控制,进而影响货物运输质量。

从图6可以看出:受壁面传热影响,靠近壁面处的平均温度最高,从壁面到对称面的平均温度逐渐降低。同时也可以看出:真空绝热板冷藏集装箱沿Y轴方向纵截面的平均温度明显低于聚氨酯冷藏集装箱,两者差值在0.8 K左右。这说明采用真空绝热板作为隔热材料在提高保温性能的同时,能够明显改善箱内的温度场分布。

3 实验方法

为验证模拟结果,对聚氨酯冷藏集装箱内部温度场分布情况进行了测试实验。本实验选择的温度传感器为T形热电偶,热电偶测量精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。本文在集装箱内布置了15个热电偶温度测点,通过测取测点温度来大致描述冷藏集装箱内温度场的分布情况。实验中温度测量系统采用安捷伦34970A数据采集仪,将热电偶均匀布置在箱体内,在箱体长度方向上均匀选取3个截面,每个截面上均匀布置5个点,实际布置情况如图7所示。设置箱内送风温度为273.0 K,环境温度为295.0 K。冷藏机组运行2 h后进入稳定工况,然后每隔3 min采集一组实验数据。

实验中测点对应坐标为:测点1(262, 0, 105.5);测点2(262, -104, 0);测点3(262, 0, -105.5);测点4(262, 104, 0);测点5(262, 0, 0);测点6(0, 0, 105.5);测点7(0, -104, 0);测点8(0, 0, -105.5);测点9(0, 104, 0);测点10(0, 0, 0);测点11(-262, 0, 105.5);测点12(-262, -104, 0);测点13(-262, 0, -105.5);测点14(-262, 104, 0);测点15(-262, 0, 0)。

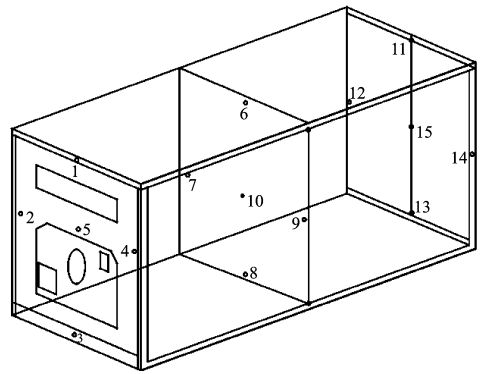


图7 箱内温度测点布局图

Fig. 7 Locations of thermocouples inside container

4 结果对比与分析

考虑冷藏集装箱箱内的对称性,选取测点1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13及15的温度进行对比。在仿真计算区域内选取与实验截面相对应处的测量点与实验进行比较。冷藏集装箱内测点温度实验值(实测值为安捷伦设备的显示值)与模拟值如表3所示。

表3 温度实验值与模拟值对比

Tab. 3 Comparison of temperature in experiments and simulation

	K					
测点	1	2	3	5	6	7
实测	273.55	273.56	273.23	273.25	273.70	273.60
模拟	273.44	273.78	273.15	273.30	273.45	273.42
测点	8	10	11	12	13	15
实测	273.28	273.55	273.78	273.64	273.45	273.57
模拟	273.35	273.48	274.17	273.95	273.80	273.93

由模拟结果与实验结果对比分析可知,箱内中部及前端误差不大,模拟结果与实测结果基本相吻合。然而对比测点11, 12, 13, 15的模拟温度值与实验值,发现门端区域出现较大误差,误差约为 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这主要是因为模拟仿真时忽略了T形地板槽(属于半覆盖式)导流的效果,致使部分冷空气未到达T形槽尾端就受热空气浮生力的影响而向上流动,造成门端区域的模拟值低于实验测量值。

5 结论

为了研究布置有真空绝热板的冷藏集装箱内温度分布规律,本文综合考虑运输过程中空气对流换热和外界对箱体传热的影响,采用两方程标准紊流模型和CFD工具对加入货物的冷藏集装箱温度场分布进行模拟仿真,得到以下结论:

(1) 布置有真空绝热板的冷藏集装箱内温差为0.8 K,明显小于聚氨酯冷藏集装箱内温差4.5 K,说明采用真空绝热板作为隔热材料能够提

高箱内温度分布均匀度。

(2) 真空绝热板冷藏集装箱内平均温度要比聚氨酯冷藏集装箱低 0.8 K 左右,有利于货物冷藏。

参考文献:

- [1] 李锦,谢如鹤. 冷藏运输装备技术研究进展[J]. 流体机械,2014,42(5):82-87.
LI Jin, XIE Ruhe. Research progress of refrigerated transport equipment technology[J]. Fluid Machinery, 2014,42(5):82-87.
- [2] 郑晨潇,刘泽勤,常远. 冷藏运输业发展现状分析及建议[J]. 安徽农业大学学报,2012,40(33):16368-16370,16461.
ZHENG Chenxiao, LIU Zheqin, CHANG Yuan. Discussion on the development status of refrigerated transport industry[J]. Journal of Anhui Agricultural University,2012,40(33):16368-16370,16461.
- [3] 郭志鹏,阚安康,孟闯,等. 船舶冷藏集装箱节能技术现状及展望[J]. 制冷技术,2016,36(3):53-59.
GUO Zhipeng, KAN Ankang, MENG Chuang, et al. The effect of cargo stacking mode on temperature discussion inside reefer container[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology,2016,36(3):53-59.
- [4] 楼海军,阚安康. 货物堆码方式对海运冷藏集装箱内温度场的影响[J]. 上海海事大学学报,2014,35(4):55-58.
LOU Haijun, KAN Ankang. Effect of cargo stack mode on temperature distribution in marine refrigerated containers[J]. Journal of Shanghai Maritime University,2014,35(4):55-58.
- [5] 朱奎. 堆码方式对冷藏集装箱箱内温度场影响的研究[D]. 上海:上海海事大学,2012.
ZHU Kui. The simulation and analysis of temperature distribution inside shipping reefer container [D]. Shanghai:Shanghai Maritime University,2012.
- [6] MOUREH J, FLICK D. Airflow pattern and temperature distribution in a typical refrigerated truck configuration loaded with pallets[J]. International Journal of Refrigeration,2004,27(5):464-474.
- [7] CHOURASIA M K, GOSWAMI T K. Simulation of effect of stack dimensions and stacking arrangement on cool down characteristics of potato in a cold store by computational fluid dynamic[J]. Biosystems Engineering,2007,96(4):503-515.
- [8] 王广海,郭嘉明,吕恩利,等. 出风道参数对冷藏集装箱温度场的影响[J]. 农业机械学报,2016,47(10):293-301.
WANG Guanghai, GUO Jiaming, LÜ Enli, et al. Effects of air-outlet duct parameters on temperature distribution in fresh-keeping container[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery,2016,47(10):293-301.
- [9] 张哲. 冷藏集装箱内部流场及送风形式的研究[D]. 天津:天津商业大学,2015.
ZHANG Zhe. Research on internal flow field and air supply form in the refrigerated container[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce,2015.
- [10] MOUREH J, TAPSOBA S, DERENS E. Air velocity characteristics within vented pallets loaded in a refrigerated vehicle with and without air ducts[J]. International Journal of Refrigeration,2009,32(2):220-234.
- [11] 陈照峰,吴操,杨勇,等. 航空级超细玻璃纤维棉毡的制备及隔音隔热性能研究[J]. 南京航空航天大学学报,2016,48(1):10-15.
CHEN Zhaofeng, WU Cao, YANG Yong, et al. Preparation of super-fine aviation glass wool and its property study on sound and thermal insulation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2016,48(1):10-15.
- [12] 纪珺,韩厚德,阚安康,等. 真空绝热板的热工性能及其在冷藏集装箱上的应用[J]. 化工学报,2008,59(2):114-118.
JI Jun, HAN Houde, KAN Ankang, et al. Thermal property of vacuum insulated panels and their application to refrigerated containers[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering,2008,59(2):114-118.
- [13] JI J, HAN H D, KAN A K. Research on the application of VIPs to reefer containers[J]. Applied Mechanics and Materials,2011,117/118/119:1067-1070.
- [14] 俞文胜,孟谦,陈武. 布置有真空绝热板的船用冷藏集装箱侧壁模型隔热性能的研究[J]. 船舶工程,2015,37(6):85-89.
YU Wensheng, MENG Qian, CHEN Wu. Study on insulation performance of marine refrigerated container's sidewall model embedded with vacuum insulation panels[J]. Ship Engineering,2015,37(6):85-89.
- [15] 阚安康,康利云,水超,等. 大温差下真空绝热板复合维护结构热工性能数值分析[J]. 上海海事大学学报,2015,35(2):68-73.
KAN Ankang, KANG Liyun, SHUI Chao, et al. Thermal performance numerical analysis on composite envelope construction of vacuum insulation panels under large temperature difference [J]. Journal of Shanghai Maritime University,2015,35(2):68-73.
- [16] ALPTEKIN E, EAZE M A, KAYANSAYAN N. Flow and heat transfer characteristics an empty refrigerated container[J]. Progress in Energy and the Environment,2014,62(1):641-652.

