

基于 Fluent 的 XPS 保温箱温度场数值模拟方法分析

赵慧妍^a, 付志强^a, 王岩^b, 吕洪利^a, 纪秋平^a, 康勇刚^a
(天津科技大学 a.包装创新设计实验室 b.机械工程学院, 天津 300222)

摘要: **目的** 保温箱在空载情况下, 探究不同模型对保温箱温度场模拟结果的影响。**方法** 对现有保温箱内部温度场进行实测, 与建立的保温箱有限元模型进行对比分析, 验证模型可靠性, 在此基础上进一步探究边界条件、辐射模型、对流模型对保温箱内温度场模拟结果的影响。**结果** 通过验证网格无关性, 得到最优流体网格尺寸为 2.8 mm; 边界条件采用恒温固体壁面和对流换热壁面得到的温度场模拟结果最大温差为 0.1 K; 采用 P1 辐射、Rosseland、DO 辐射和无辐射模型得到的模拟结果与实验结果最大温差分别为 1.1, 4.2, 4.3, 4.3 K; 采用层流模型和湍流模型得到的模拟结果与实验结果最大温差分别为 0.6 K 和 1.9 K。**结论** 随着网格尺寸的减小, 温度场模拟数据逐渐趋于平稳; 边界条件采用恒温固体壁面和对流换热壁面得到的温度场模拟结果基本一致; 对比 P1, Rosseland, DO 和无辐射模型, P1 辐射模型得到的模拟结果与实验结果一致性较好; 与湍流模型相比, 层流模型得到的模拟结果与实验结果一致性较好。

关键词: 保温箱; 温度场; 有限元

中图分类号: TU761.12 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2018)19-0105-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.19.019

Temperature Field Simulation Method of XPS Incubator Based on Fluent

ZHAO Hui-yan^a, FU Zhi-qiang^a, WANG Yan^b, LYU Hong-li^a, JI Qiu-ping^a, KANG Yong-gang^a
(a.College Students' Innovation Laboratory of Packing Design b.College of Mechanical Engineering,
Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the effect of different models on the temperature field simulation results of the incubator under no-load conditions. The actual temperature field in the existing incubator was measured and comparatively analyzed with the established finite element model of the incubator to verify the reliability of the model. Based on that, the effects of boundary conditions, radiation model and convection model on the simulation results of temperature field in the incubator were further explored. By verifying mesh independence, the optimal fluid mesh size obtained was 2.8 mm. The constant temperature solid wall and the convective heat transfer wall were used by the boundary conditions to obtain the maximum temperature difference between the temperature field simulation results, which was 0.1 K. The maximum temperature difference between the simulation results and the experimental results obtained by P1 radiation, Rosseland, DO radiation and non-radiation model was 1.1, 4.2, 4.3, 4.3 K, respectively. The maximum temperature difference between the simulation results and the experimental results obtained by the laminar models and the turbulence models was 0.6 K and 1.9 K, respectively. With the decrease of mesh size, the simulated data of temperature field gradually become stable. The simulation results of temperature field obtained by the boundary conditions using the constant temperature solid wall and the convective heat transfer wall are basically the same. The simulation results of P1 radiation model agree well with the experimental results by comparing with P1, Rosseland, DO and non-radiation models. Compared with the turbulence model, the simulation results obtained from the laminar model agree well with the experimental results.

KEY WORDS: incubator; temperature field; finite element

收稿日期: 2018-05-30

基金项目: 天津科技大学青年创新基金 (2016LG27)

作者简介: 赵慧妍 (1996—), 女, 天津科技大学本科生, 主攻冷链运输。

通信作者: 付志强 (1982—), 男, 博士, 天津科技大学讲师, 主要研究方向为包装数值模拟技术及应用。

随着人们生活水平的提高,冷链在人们生活中扮演着越来越重要的角色。冷链运输的作用主要包括减少食物产后损耗、提高医药运输安全性、推动经济发展等^[1]。近年来随着计算机技术的兴起,有限元技术凭借其实用性、便捷性和高效性,使得越来越多的科学家使用有限元方法进行研究。Ambaw^[2]等总结了不同情况下适用的湍流模型——小保温箱适用层流模型,冷藏室适用 SST-kw 模型,冷藏车适用 RSM 模型。Moure^[3]等通过数值模拟和实验的方法,对载满2排托盘的车辆箱体的气流模式进行研究,并对2种湍流模型——RSM 模型和标准 k-ε 模型进行了评估。阎海燕^[4]等通过实验测试冷藏箱中温度场。泮国荣^[5]等通过有限元方法分析保温箱内温度场,发现保温箱内4条棱边是主要的散热点。吕传超^[6]等通过 CFD 数值模拟的方法对冰箱的温度场和速度场进行了分析。吴肖骏^[7]等利用 workbench 软件对保温箱内温度场进行分析,根据分析的结果改进保温箱结构。

尽管许多专家和学者^[8-11]运用有限元技术对保温箱内的温度场做了一些研究,取得了一些成果,但在以往的保温箱温度场仿真过程中,由于空气层厚度较小,温度较低,空气的辐射和吸收作用被忽略,认为其是透热体^[12]。文中在考虑辐射的基础上,以有限元软件 Ansys-Fluent 为平台,基于有限体积法,采用瞬态模型对保温箱内温度场分布进行数值模拟,并分析边界条件、湍流模型对温度场模拟结果的影响。

1 有限元建模

1.1 材料参数

保温箱箱体外尺寸为 395 mm×289 mm×333 mm,上下壁厚 40 mm、四周壁厚 30 mm;材料为 XPS——挤塑聚苯乙烯泡沫塑料,密度为 34 kg/m³,比热容为 500 J/(kg·K),传导系数为 0.025 W/(m·K)。蓄冷板尺寸为 265 mm×120 mm×25 mm,蓄冷板初始温度为 -4.5 °C,密度为 900 kg/m³,比热容为 2100 J/(kg·K),传导系数为 0.6 W/(m·K)。箱体实体和几何模型见图 1。

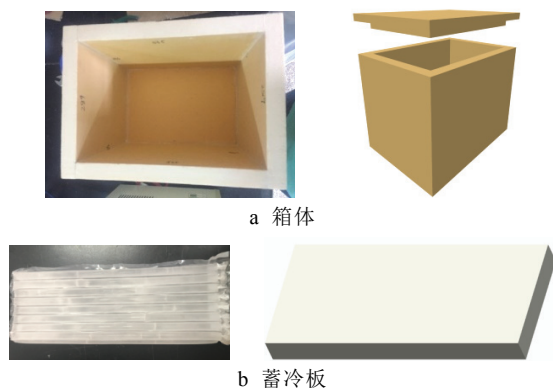


图1 XPS 保温箱
Fig.1 XPS incubator

1.2 有限元模型

根据保温箱的结构特点,对模型进行 1/4 对称简化见图 2。设置各介质的材料参数,将保温箱内壁底层上表面和蓄冷剂底层外表面设置为接触对,将保温箱外表面设置为恒温固体壁,选择层流和 P1 辐射模型。

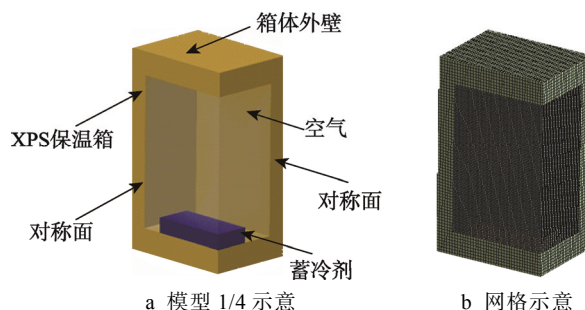


图2 有限元模型
Fig.2 FEM Model

2 有限元模型的实验验证

2.1 保温箱内温度场测试实验

参照《药品冷链保温箱通用规范》^[13],进行保温箱保温性能测试实验。将温度传感器布置在如图 3 所示的位置,温度测试过程见图 4。将蓄冷剂放在保温箱

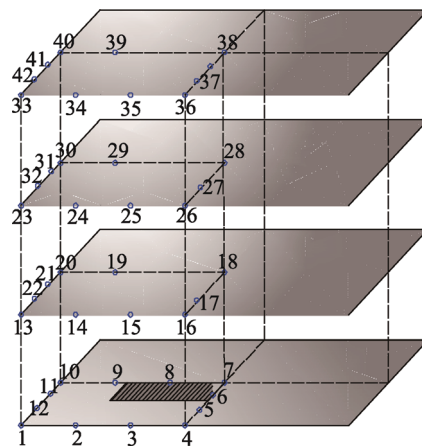


图3 温度测试点位置分布
Fig.3 Location distribution of temperature test points

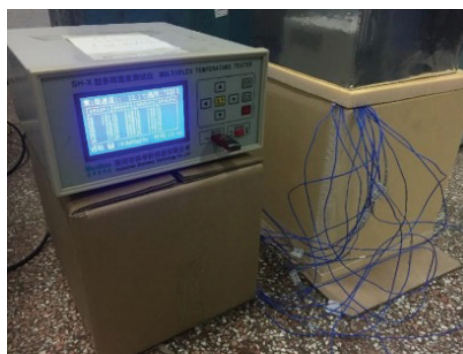


图4 温度测试过程
Fig.4 Temperature testing process

底部几何中心处并迅速密封保温箱, 打开温度记录仪, 每 1 s 记录 1 次实验数据。实验不考虑相变过程, 当温度记录仪记录的蓄冷剂温度即将接近 0 °C 时, 关闭记录仪, 实验结束, 共经历 1500 s。

2.2 结果对比

提取仿真模型 4 条棱边上的点与实验结果的温

度-时间曲线进行对比, 对比结果见图 5。从图 5a—d 中可以看出, 中上层实验点和底层 1, 4 实验点的温度曲线在实验初始从 286 K 迅速下降, 在 600 s 之后, 温度变化趋于平缓, 底层 7 和 10 实验点温度从 270 K 平稳上升, 各层模拟曲线和实验曲线变化趋势基本一致, 最大温差为 1.54 K。

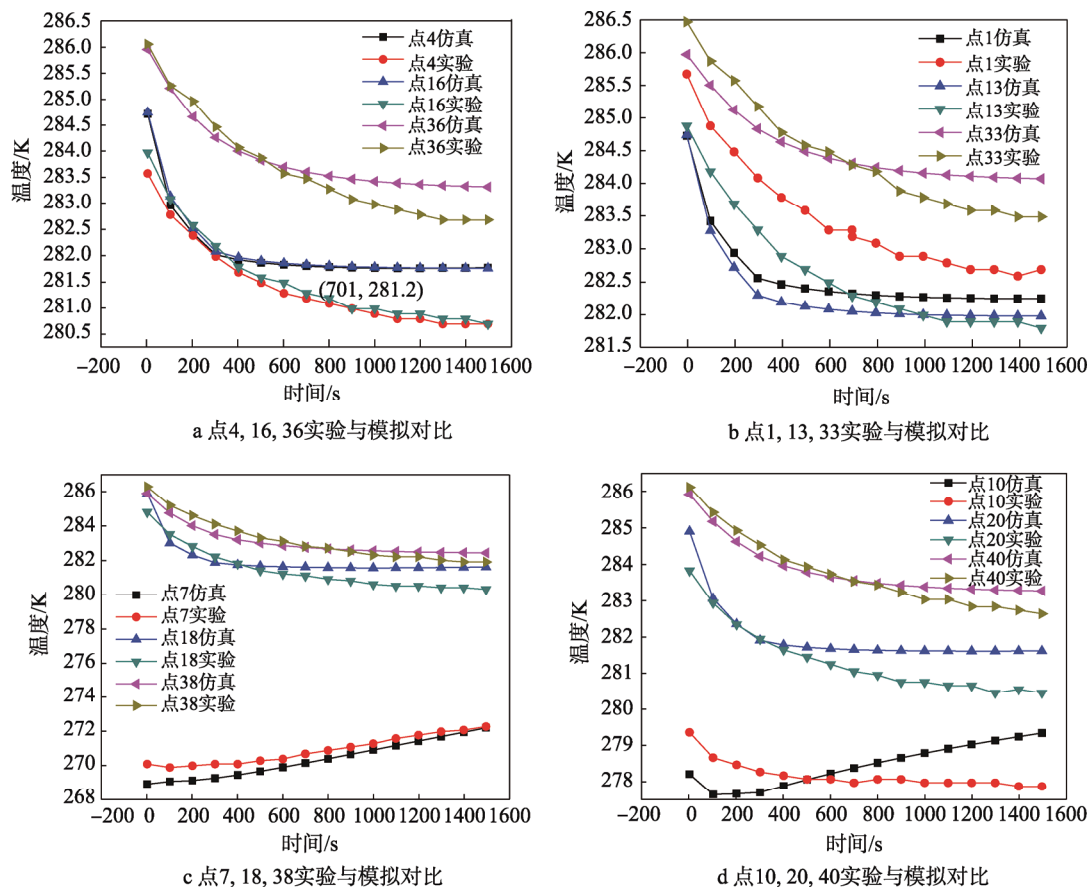


图 5 模拟与实验的温度-时间结果对比

Fig.5 Comparison of temperature-time results of simulation and experiment

3 温度场模拟结果影响因素分析

3.1 网格无关性验证

以该保温箱模型为例, 进行网格划分尺寸与模拟结果无关性的验证。在研究中, 流体是主要研究对象, 只改变流体的网格尺寸, 其余材料网格尺寸恒定, 6 种不同网格尺寸分别是 3.4, 3.2, 3, 2.8, 2.65, 2.5 mm。

提取仿真模型点 16 的温度-时间曲线进行对比, 结果见图 6。可见随着网格尺寸的减小, 模拟结果波动逐渐减小, 当网格尺寸达到 2.8 mm 时, 模拟结果趋于稳定。

3.2 边界条件

设置保温箱最外层的边界条件分别为恒温固体壁面和对流换热等 2 种, 当保温箱置于静止空气中,

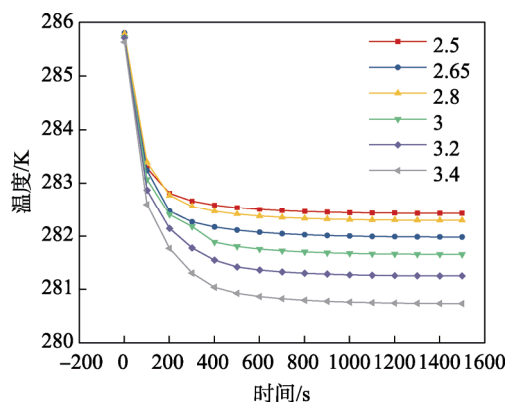


图 6 网格无关性验证

Fig.6 Mesh independence verification

空气与保温箱之间的对流换热系数为 $8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^{[14]}$, 对比对流换热和恒温固体壁面 2 种外界边界条件的设置, 得到的温度时间曲线见图 7。

由图7可见,当外界条件设置为对流换热和恒温固体壁面时,2种情况的温度-时间曲线基本重合,2条曲线在0~600 s间下降时,曲线完全重合,当时间超过600 s时,2条曲线出现分歧,对流换热壁面的曲线降温更快,比恒温壁面的温度略微低一些,最大温差为0.1 K。

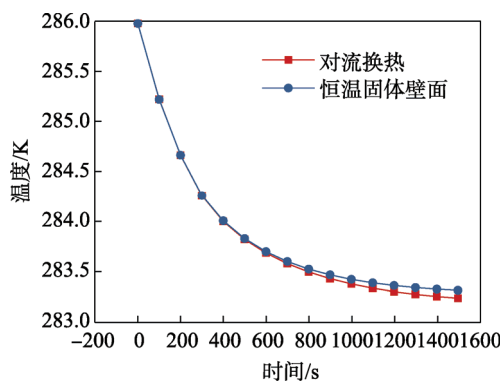


图7 不同边界条件温度-时间曲线
Fig.7 Temperature-time curves for different boundary conditions

3.3 辐射模型

Fluent有5种辐射模型,S2S适用于发生在真空介质中的辐射,多数情况都不适合模拟计算;DO适用于半透明介质的辐射和燃烧中的辐射,并且适用于所有光学厚度;DTRM适用于光学厚度大,但在处理大数目的射线问题时,对CPU要求高;P1是一个扩散方程,求解耗时少,相对于Rosseland来说,P1更适合光学强度较小的情况,P1和Rosseland通常适用的光学厚度大于1^[15]。考虑到计算成本和适用范围,

文中主要研究Rosseland辐射、P1辐射、DO辐射以及无辐射对保温箱保温性能的影响。

提取4种仿真模型中的点38在1500 s时的温度-时间曲线见图8,可见Rosseland辐射、DO辐射和无辐射模型的温度曲线变化平缓,与实验值的最大温差分别为4.2, 4.3, 4.3 K, P1辐射的温度曲线随着时间增加而降低,与实验值最大温差为1.1 K,一致性较好。

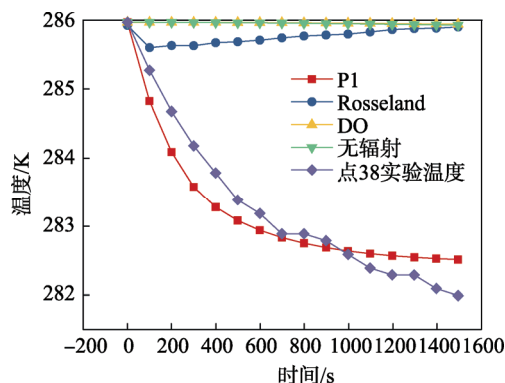


图8 不同辐射模型温度-时间曲线
Fig.8 Temperature-time curves for different radiation models

提取4种模型在1500 s时的前视温度场,见图9。可见当采用了P1辐射模型后,保温箱内温度场分布更加均匀,数值更低;采用了Rosseland辐射模型后,从云图中可以看出蓄冷剂和流体没有发生对流传导;采用了DO辐射模型和不采用辐射模型的温度云图基本一致,二者的蓄冷剂和流体发生了对流传导,但是之后在流体中发生的对流程度很微小,上层气流完全不受低温影响,不符合实验结果。

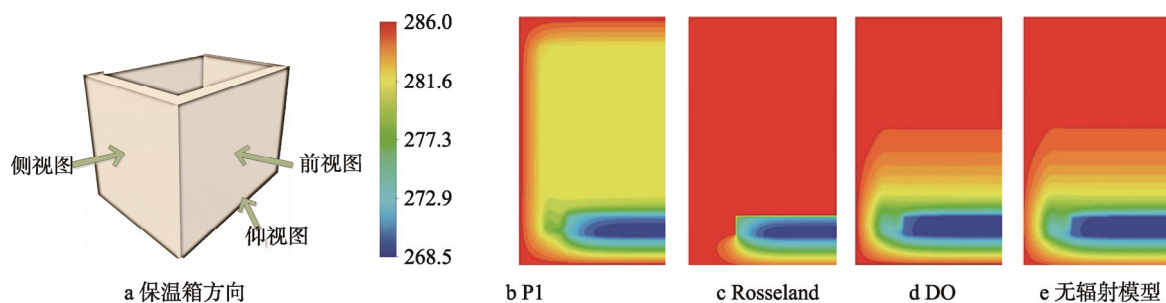


图9 不同辐射模型前视温度场
Fig.9 Front-view temperature field of different radiation models

3.4 对流模型

在自然对流中,可以用无量纲数——瑞利数 Ra 来衡量自然对流是层流还是湍流,如果 $Ra < 10^8$,则属于层流;如果 $Ra > 10^{10}$,则属于湍流;如果 $10^8 \leq Ra \leq 10^{10}$,自然对流属于层流与湍流的过渡阶段。根据模型参数可以计算出保温箱内气流的瑞利数。

$$Ra = \frac{g\beta\Delta t L^3 \rho}{\mu\alpha} = 1.62 \times 10^3 < 10^8$$

式中: g 为重力加速度; β 为热膨胀系数, $\beta=1/273$; α 为热扩散系数, $\alpha=2.4 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$; μ 为粘滞系数, $\mu=1.83 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$; ρ 为密度, $\rho=1.225 \text{ kg}/\text{m}^3$; L 为特征长度, $L=60 \text{ mm}$; Δt 为温差, $\Delta t=7.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。通过计算得出该自然对流模型属于层流。

其他参量不变,只改变仿真模型的湍流模型,提取点38的温度-时间曲线,见图10,可见湍流模型的温度-时间曲线在0~100 s之间从286 K迅速下降至282.5 K,在100 s之后变化则逐渐平缓,与实验值的

温差较大, 最大温差为 1.9 K; 层流模型的温度-时间曲线与实验温度基本一致, 最大温差是 0.6 K。

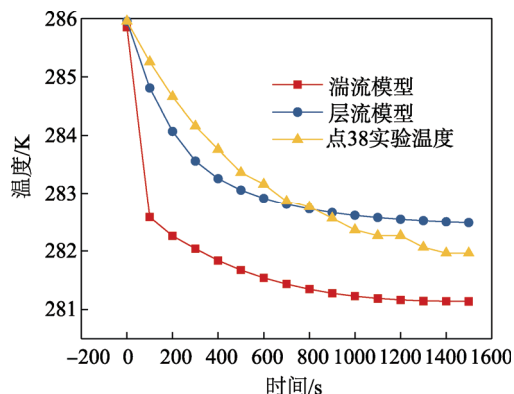


图 10 不同湍流模型温度-时间曲线

Fig. 10 Temperature-time curves of different turbulence models

4 结语

1) 针对保温箱内温度场分布, 结合保温箱保温性能测试实验, 建立有限元温度场仿真模型, 模拟与实验得到的温度-时间曲线基本一致, 验证了在传热过程中, 该仿真模型具有一定的可靠性。

2) 通过改变边界条件可知, 在小型冷链箱仿真分析中, 壁面设置为对流换热比恒温的温度略微低一些, 但对结果影响较小。

3) 通过对辐射模型对比分析可知, 在小型冷链箱仿真分析中, 采用 P1 模型比 DO 模型、Rosseland 模型和无辐射模型更符合实验结果。

4) 通过对湍流模型与层流模型的对比分析可知, 在小型冷链箱仿真分析中, 采用层流模型更符合实验结果。

参考文献:

- [1] 毋庆刚. 我国冷链物流发展现状与对策研究[J]. 中国流通经济, 2011, 25(2): 24—28.
WU Qing-gang. The Current Situation and the Countermeasures of China's Cold Chain Logistics Development[J]. China Circulation Economy, 2011, 25(2): 24—28.
- [2] AMBAW A, DELELE M A, DEFRAEYE T, et al. The Use of CFD to Characterize and Design Post-harvest Storage Facilities: Past, Present and Future[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 93(93): 184—194.
- [3] MOUREH J, MENIA N, FLICK D. Numerical and Experimental Study of Airflow in a Typical Refrigerated Truck Configuration Loaded with Pallets[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2002, 34(1): 25—42.
- [4] 阎海燕, 热西丹, 买买提, 等. 医用药品冷藏箱内温度均匀性考察[J]. 中国药房, 2012, 23(37): 3545—3546.
YAN Hai-yan, RE Xi-dan, MAI Mai-ti, et al. Investigation on Temperature Uniformity in Medical Medicine Refrigerators[J]. 2012, 23(37): 3545—3546.
- [5] 泮国荣, 徐国峰, 胡桂林, 等. 医疗保温箱的包装结构设计和有限元分析[J]. 浙江科技学院学报, 2013, 25(5): 335—339.
PAN Guo-rong, XU Guo-feng, HU Gui-lin, et al. Packaging Structure Design and Finite Element Analysis of Medical Incubator[J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2013, 25(5): 335—339.
- [6] 吕传超, 崔振科, 王乐. 冰箱冷藏室温度场和流场的数值模拟与结构优化[J]. 制冷技术, 2015, 35(5): 56—61.
LYU Chuan-chao, CUI Zhen-ke, WANG Le. Numerical Simulation and Structural Optimization of Temperature Field and Flow Field in Refrigerator Refrigerator[J]. Refrigeration Technology, 2015, 35(5): 56—61.
- [7] 吴肖骏, 胡桂林, 周春豪, 等. 冷冻海鲜产品保温箱结构设计与优化[J]. 包装工程, 2018, 39(3): 72—76.
WU Xiao-jun, HU Gui-lin, ZHOU Chun-hao, et al. Structural Design and Optimization of Frozen Seafood Incubator[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(3): 72—76.
- [8] 程宇, 张巨伟. 基于 ANSYS 的管道外自然对流换热系数的确定[J]. 当代化工, 2015, 44(11): 2720—2722.
CHENG Yu, ZHANG Ju-wei. Determination of Natural Convection Heat Transfer Coefficient Outside the Pipe Based on ANSYS[J]. Contemporary Chemical Industry, 2015, 44(11): 2720—2722.
- [9] 郭晓娟. 基于 ANSYS 的保温包装温度场数值模拟[D]. 无锡: 江南大学, 2011.
GUO Xiao-juan. Numerical Simulation of Temperature Field of Thermal Insulation Package Based on ANSYS[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011.
- [10] 郭磊. 对 FLUENT 辐射模型的数值计算与分析[J]. 制冷与空调(四川), 2014, 28(3): 358—360.
GUO Lei. Numerical Calculation and Analysis of FLUENT Radiation Model[J]. Refrigeration and Air-conditioning (Sichuan), 2014, 28(3): 358—360.
- [11] 潘欣艺, 王家俊, 王冬梅. 蓄冷剂摆放位置对保温箱温度场的影响[J]. 包装工程, 2018, 39(3): 77—82.
PAN Xin-yi, WANG Jia-jun, WANG Dong-mei. Effect of Placement of Coolant on Temperature Field of Incubator[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(3): 77—82.
- [12] 章熙民, 任泽霁, 梅飞鸣. 传热学(第3版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
ZHANG Xi-min, REN Ze-pei, MEI Fei-ming. Heat Transfer Studies (3rd Edition)[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1993.
- [13] 陈志强, 王久龙, 赵新伟. 冷链无源保温箱保温性能试验方法概述[J]. 绿色包装, 2016(2): 56—60.
CHEN Zhi-qiang, WANG Jiu-long, ZHAO Xin-wei. Summary of Test Methods for Insulation Performance of Cold Chain Passive Incubator[J]. Green Packaging, 2016(2): 56—60.
- [14] 贺平, 孙刚. 供热工程(第3版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
HE Ping, SUN Gang. Heating Engineering (3rd Edition)[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1993.
- [15] 郑贤臣. 几种辐射模型在 FLUENT 中的应用[J]. 现代科技(现代物业下旬刊), 2009, 8(11): 68—70.
ZHENG Xian-chen. Application of Several Radiation Models in FLUENT[J]. Modern Science and Technology: the Next Issue of Modern Properties, 2009, 8(11): 68—70.