

冷冻海鲜产品保温箱结构设计与优化

吴肖骏¹, 胡桂林¹, 周春豪¹, 余时帆²

(1. 浙江科技学院, 杭州 310023; 2. 浙江省计量科学研究院, 杭州 310018)

摘要: **目的** 为了提高保温箱的保温性能, 对冷冻海鲜产品保温箱的结构进行设计和优化。**方法** 针对冷冻海鲜产品“小批量, 多批次”的运输需求, 设计一款用于冷冻海鲜产品运输的保温箱, 同时利用 Ansys Workbench 进行瞬态热分析, 得出保温箱内的温度场变化情况, 并通过分析温度场模拟的结果来改进保温箱的结构。最后通过实验与数值模拟相比较的方式, 验证模拟的可靠性。**结果** 在保温箱边角处增加少量保温材料就能将保温箱的保温性能提高 9.9%。**结论** 通过数值模拟的方式来改进保温箱的结构是可靠的。

关键词: 保温箱; 瞬态热分析; 保温性能

中图分类号: TB485.3; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)03-0072-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.03.014

Structural Design and Optimization of Frozen Seafood Product Incubator

WU Xiao-jun¹, HU Gui-lin¹, ZHOU Chun-hao¹, YU Shi-fan²

(1. Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Zhejiang Province Institute of Metrology, Hangzhou 310018, China)

ABSTRACT: To improve the thermal insulation performance of the incubator, design and optimize the incubator structure of frozen seafood products. With respect to the transportation demand of "small batch volume and multi-batches" of frozen seafood products, an incubator for the transportation of frozen seafood products was designed. At the same time, the transient thermal analysis was conducted with Ansys Workbench to get the temperature field change in the incubator; and the incubator structure was improved by analyzing the results of the temperature field simulation. Finally, the simulation reliability was verified by means of comparison on the experimental and numerical simulations. Adding a small amount of thermal insulation materials at the corners of the incubator could enhance 9.9% of the thermal insulation performance of the incubator. The incubator structure improved by means of numerical simulation is reliable.

KEY WORDS: incubator; transient thermal analysis; thermal insulation performance

近年来, 海鲜水产这类生鲜在国内食品行业中发展迅猛, 对冷链运输的需求量也越来越大^[1]。冷链物流车厢一般采取机械制冷^[2], 这种制冷方式虽然制冷效果好, 制冷时间无限制, 但需消耗大量的电能, 并且面对市场需求的“小批量、多批次的门对门”物流要求时, 会出现大车装小货的情况, 这给客户带来了额外的成本^[3], 同时, 部分产品流入市场存在冷链中断现象^[4], 这种情况下, 便于运输、保温效果优良的保

温箱就显得格外重要。Margeirsson 等^[5]通过实验和数值模拟的方法来比较波纹型丙酸纤维素 (CP) 塑料板材和发泡聚苯乙烯 (EPS) 这 2 种材料的热性能, 实验证明, 在运输过程中使用冰袋对于保温效果是有效的, 且 EPS 的绝热效果要好于 CP。Singh^[6]等组合了 12 种形式的保温箱并进行了热阻测试, 同时对不同保温包装盒、包装袋及蓄冷剂在单包裹运输中的保温表现进行了对比。刘翠娜^[7]等通过对便携式蓄冷保温

收稿日期: 2017-08-16

基金项目: 浙江省食品物流装备技术研究重点实验室开放基金 (KF2016019yb)

作者简介: 吴肖骏 (1993—), 男, 浙江科技学院硕士生, 主攻能源装备与节能环保技术。

通信作者: 胡桂林 (1975—), 男, 浙江科技学院教授, 主要研究方向为包装工程及工程热力学。

箱传热情况的实验跟踪,发现保温箱底部散热严重,同时提出了优化保温箱结构的方案,得出使用真空绝热板能在不减小有效容积的前提下增加保温效果;戚燕俐^[8]等设计了一种三明治复合结构保温箱,并通过实验表明其具有较好的保温效果和刚度。高斯^[9]等对保温包装整体和各部分的结构进行分析,得出性能良好的蓄冷剂是今后研发的重点。安鹏^[10]等提出了部分保温法,并结合 Ansys 得出该方法在适当条件下比全保温法更具经济性。在各类模拟分析中,Ansys 作为一款有限元分析软件,其应用非常广泛^[7, 11]。有限元分析是一种用较简单的问题代替复杂问题,然后再进行求解的方法,它可以用数学的方法模拟保温箱的真实散热情况。在实际生产前利用 Ansys 预测保温箱的保温性能,分析保温箱存在的缺陷并进行优化,这样就能够大幅度缩短研究周期,降低成本。目前,关于结构设计和数值模拟相结合的研究较少,因此这里拟通过数值模拟的方式改进保温箱结构,并通过实验验证模拟的可靠性。

1 冷冻海鲜保温箱结构设计

冷冻海鲜保温箱作为一种运输专用的保温箱,需具备一定的刚度和良好的保温效果。保温箱结构见图1,外壳为双层结构,外层材料为PVC,具有一定的刚度和耐磨性,在一定程度上不会因为运输途中的颠簸以及保温箱的叠放导致保温箱裂开;内层为EPS发泡塑料,具有良好保温效果的同时还具有一定的缓冲效果,内层表面覆盖一层锡箔纸,减少辐射换热。保温箱利用 SolidWorks 软件进行设计,除外壳为双层结构外,外壳内部还设置了3个滑槽,用来放置可以插拔的挡板,能防止不同海鲜串味的发生,同时也能增加保温箱结构的强度。

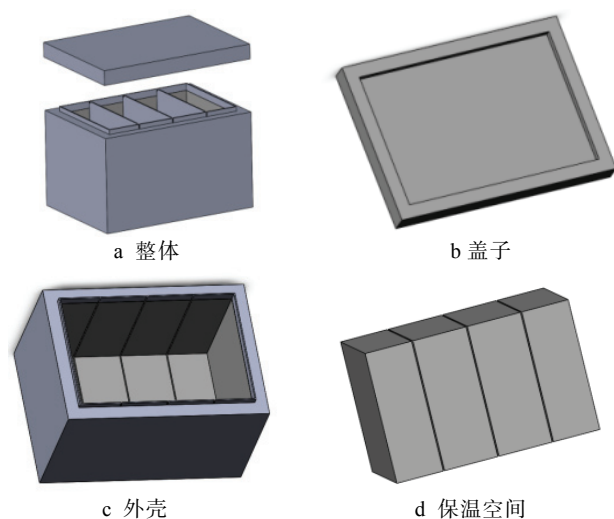


图1 保温箱结构
Fig.1 Structure of incubator

保温箱内部空间分为4个部分,靠外部的2个格子尺寸为191 mm×202 mm×69 mm,靠内部的2个格子尺寸为191 mm×202 mm×79 mm,保温箱外尺寸为350 mm×250 mm×237 mm。经计算,有效容积占总体积的55.07%。

2 海鲜保温箱的瞬态热分析

2.1 模型假设

暂时不考虑不同冷冻海鲜的热物性对模拟结果的影响,假设整个保温箱内部充满冰块,且研究对象的初始保存温度为-20℃。在运输的过程中,冰块会从固态变为固液混合,进而变为液态,在这些变化过程中伴随着复杂的热传递现象。为了便于模拟,进行如下假设:保温材料及各包装材料各向同性;保温箱内充满产品,产品与保温箱各部分之间全面接触;忽略冰块从固态到液态体积的变化;忽略各部分装配空隙的空气对流;忽略辐射现象;冰块温度为0℃时,物性参数(包括密度、导热系数、比热容)突变;在各部分接触面之间设置接触热阻^[12]。

2.2 瞬态热分析理论模型

保温箱模型的保温性能研究主要为其传热方式,基本的传热方式包括导热、对流换热和辐射这3种,在保温箱覆盖锡箔纸的条件下,辐射对模拟结果的影响不大,忽略辐射带来的影响,只考虑保温箱内部的导热和保温箱外壳与空气的自然对流。导热的基本定律为:

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \quad (1)$$

式中: q 为热流密度(W/m^2); λ 为热导率; $\partial t / \partial x$ 为物体沿热流传递方向的温度变化率。

对流换热的基本定律为:

$$q = h(t_w - t_f) \quad (2)$$

式中: h 为对流换热系数; t_w 为固体表面温度; t_f 为液体表面温度。

保温箱在运输过程中,箱子表面与大气环境之间的换热假设为大空间的自然对流,满足以下关联式^[13]:

$$Nu = \frac{h_n L}{k_p} = C(Gr \cdot Pr)^n = C \left(\frac{g \alpha L^3 \Delta t}{\nu^2} \cdot \frac{c_p \mu_p}{k_p} \right)^n \quad (3)$$

式中: Nu 为努塞尔数; Gr 为格拉晓夫数; Pr 为普朗特数; h_n 为自然对流换热系数; L 为特征长度; k_p 为流体热传导率; g 为重力加速度; α 为膨胀系数; Δt 为壁温与流体表面的温差; c_p 为流体比热容; μ_p 为流体动力粘度; ν 为流体粘度; C 和 n 为实验确定参数。

2.3 热力学参数设定及边界条件的确定

在海鲜保温箱的瞬态热分析过程中, 首先在 Workbench 的 Engineering Data 中对材料的热力学参数进行设置, 主要包括密度、导热系数和比热容, 具体设置见表 1。此外, 还需考虑相变材料的潜热。文中的相变材料是冰, 在各个温度点由潜热计算得到的焓值^[14]如下: 假设 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时焓值为 0 J/m^3 , 则当温度为 $-0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 焓值为 42.5 MJ/m^3 ; 温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 焓值为 78.6 MJ/m^3 ; 温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 焓值为 246 MJ/m^3 。保温箱运输过程中, 在忽略热辐射的情况下, 主要设置环境温度和换热系数。假设整个保温箱(包括内部的冰块)初始温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 环境温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (模拟夏天高温的影响), 对流换热系数为 $10\text{ W/(m}^2\cdot^{\circ}\text{C)}$, 保温箱内部冰块与保温箱之前的接触热传导系数为 $0.6\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ^[8], 设置结束时间为 $100\,000\text{ s}$ 。

表 1 海鲜保温箱各部分使用材料热参数
Tab.1 Thermal parameter of materials for each part of seafood incubator

材料	比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
PVC	1200	0.14	1.40
EPS	1380	0.041	0.02
水	4200	0.551	1
冰	2100	2.22	0.9

2.4 模拟结果分析

海鲜保温箱在外界环境温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下, 内部在 $100\,000\text{ s}$ 时的温度场分布见图 2。可以看出, 此时所有区域温度已大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 特别是四周棱角的地方温度特别高, 可见棱角处为散热的最严重位置。以带鱼为例, 在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下可保证新鲜的时间为 3 d , 而在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下保证新鲜的时间仅有 1 d ^[15], 这表明当保存温度高于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以后, 温度的升高会大大缩短保存的时间。假定冷冻海鲜保存的最高温度超过 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 认为该保温箱已经失去了应有的保温效果。

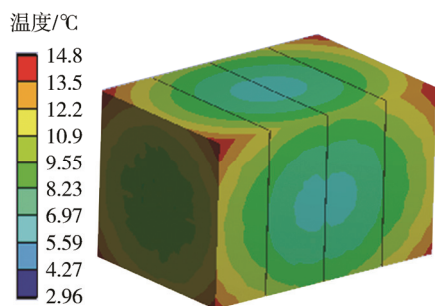


图 2 优化前保温箱内部温度场分布

Fig.2 The distribution of temperature field inside the incubator before optimization

保温箱内部最高温度和最低温度随时间的变化见图 3。可以看出, 开始时的最高温度上升较快, 这是因为保温箱本身与外界的温差较大, 而最低温度上升较慢, 这是因为外界热量还未传到保温箱中心位置。保温箱内部最低温度在 600 min 左右时开始处于极度缓慢上升状态, 这是由于冰从固态变为液态存在相变潜热, 需要吸收大量的热量, 直到 1580 min , 固态冰全部转化为液态水, 此时温度开始急剧上升。当模拟时间为 485 min 时, 最高温度开始超过 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 此时认为保温箱已失去保温效果。由此得出该保温箱的有效保温时间为 485 min 。

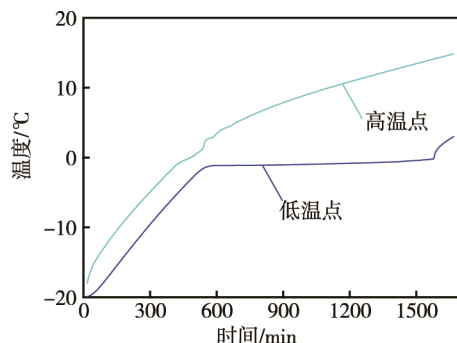


图 3 优化前保温箱内部温度变化曲线

Fig.3 The change curve of internal temperature of the incubator before optimization

3 保温箱结构优化及优化前后对比

3.1 结构优化

由前文研究可知保温箱温度最高的地方在边角处, 因此对保温箱边角处结构加以改进, 在保温箱底部 4 个角各加一个直角边长为 30 mm 、材料为 EPS 的正三棱锥结构, 见图 4a。同时改进盖子结构, 见图 4b, 使得盖子四周被直角边长为 10 mm 、材料为 EPS 的直角三棱柱覆盖。经计算, 有效容积占总体积的 54.83% , 较优化前的有效容积减少了 0.43% 。

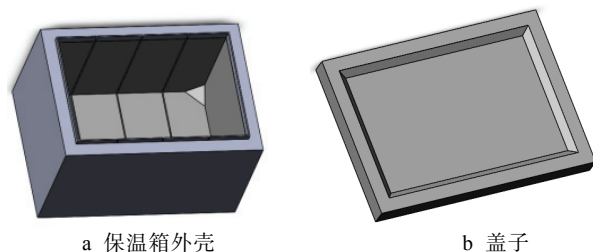


图 4 优化后的保温箱结构

Fig.4 The optimized incubator structure

3.2 同温度下优化前后对比分析

改进后的模型在与前面相同的条件下进行仿真分析, 得到的内部温度场见图 5。对比分析优化前后保温箱内部最高、最低温度的变化趋势, 得到的曲线见图 6。其中低温点 1、高温点 1 表示优化前的最低

温度和最高温度, 低温点 2、高温点 2 表示优化后的最低温度和最高温度。可以看出, 优化前后保温箱最低温度基本没有变化, 而优化后的最高温度比优化前的低。优化后的保温箱在 533 min 时温度超过了 0 °C, 即优化后保温箱的有效保温时间为 533 min, 与优化前相比, 保温效果提升了 9.9%, 而有效容积只减少了 0.43%, 在大大增加了保温箱保温效果的同时, 并没有在其他方面带来较大的缺陷, 说明该改进对实际生产具有一定意义。

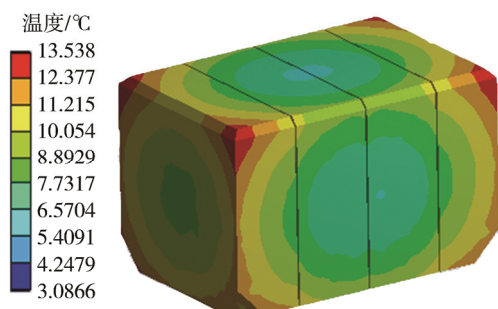


图 5 优化后保温箱内部温度场分布

Fig.5 Distribution of temperature field inside the incubator after optimization

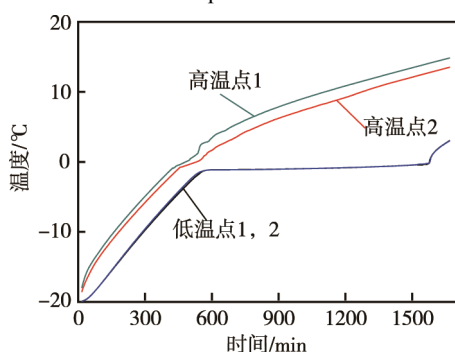


图 6 优化前后保温箱内部温度对比

Fig.6 Comparison of internal temperatures before and after optimization of the incubator

3.3 优化后不同温度下的对比分析

将模拟的优化后保温箱的外界温度调整为 30 °C, 在其他条件相同的情况下进行模拟, 并与外界环境为 40 °C 时进行对比, 得到的结果见图 7。可以看

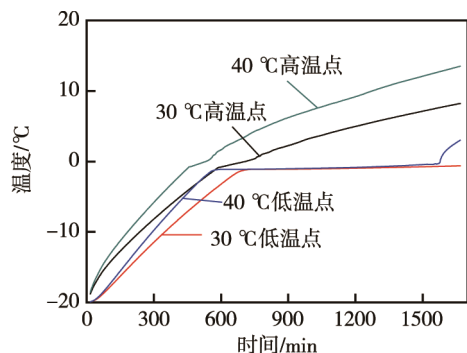


图 7 优化后不同温度下保温箱内部温度对比

Fig.7 Comparison of internal temperatures at different temperatures after optimization of the incubator

出, 30 °C 条件下的有效保温时间比 40 °C 条件下的增加了 32.7%, 说明外界环境温度对保温箱的保温效果影响较大。

4 实验验证

通过对比实验和模拟结果来证明数值模拟结果的可靠性。取 1 个 4 号 EPS 保温箱, 保温箱内部填满冰袋, 将 RC-4H 温湿度记录仪的 3 个探头分别放到保温箱的顶面中心位置、顶面短边中间位置和顶面直角顶点处。放入冰箱冷冻至 -20 °C, 再放到 30 °C 的恒温箱中, 进行多次实验, 排除偶然性, 得到 3 个位置到达 0 °C 所用的时间, 同时建立简单模型进行模拟, 将得到的模拟结果与实验进行对比。

保温箱 3 个特殊点的温度变化情况见图 8, 包括顶面短边中间位置 (点 1)、顶面直角顶点位置 (点 2) 和顶面中心位置 (点 3), 同时给出了 3 个点模拟的结果。分析结果发现, 顶面短边中间位置模拟结果与实验结果相对误差为 13.3%, 顶面直角顶点位置模拟结果与实验结果相对误差为 7.7%, 顶面中心位置模拟结果与实验结果相对误差为 9.5%, 误差均在可接受范围内。由此, 通过模拟的方式来进行保温箱结构的研究具有一定的合理性。

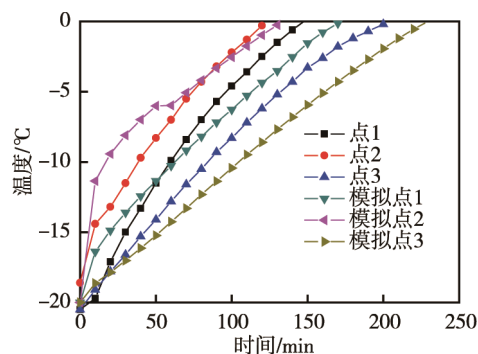


图 8 模拟结果与实验结果的对比

Fig.8 Comparison of simulation results with experimental results

5 结语

采用 Ansys 软件对保温箱的温度场进行了数值模拟, 模拟结果得出保温箱边角处散热严重, 基于该结果对保温箱结构进行优化, 模拟后与优化前进行比较, 得出保温效果的提升情况。最后通过简单实验与模拟结果的对比, 说明该模拟方式具有一定的借鉴意义。这里仅研究了保温箱的一种优化过程, 后续研究可从优化的方式及考虑更多的影响因素来增加模拟的可靠性。

参考文献:

- [1] 张敏, 谈向东, 张杰. 现代食品冷链物流的现状与发

- 展趋势[J]. 商场现代化, 2007(20): 137—138.
- ZHANG Min, TAN Xiang-dong, ZHANG Jie. The Present Situation and the Development Trend of Modern Food Cold Chain Logistics[J]. Market Modernization, 2007(20): 137—138.
- [2] HUANG Xiang, XU Fang-cheng, WU Jun-mei. Experimental Study of Air Conditioning Unit of Evaporative Cooling Assisted Mechanical Refrigeration[J]. Journal of Hunan University, 2009, 36(5): 106—110.
- [3] 陈海洋, 张建一. 蓄冷型运输保温箱在冷链中的应用[J]. 冷藏技术, 2010(3): 12—15.
- CHEN Hai-yang, ZHANG Jian-yi. Applications of Cold Storage Type Transport Box in Cold Chain[J]. Journal of Refrigeration Technology, 2010(3): 12—15.
- [4] 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(2): 24—28.
- WU Qing-gang. The Current Situation and the Countermeasures of China's Cold Chain Logistics Development[J]. China Business and Market, 2011(2): 24—28.
- [5] MARGEISSON B, GOSPAVIC R, PALSSON H, et al. Experimental and Numerical Modeling Comparison of Thermal Performance of Expanded Polystyrene and Corrugated Plastic Packaging for Fresh Fish[J]. Refrigeration, 2011, 34(2): 573—585.
- [6] SINGH S P, BURGESS G, SINGH J. Performance Comparison of Thermal Insulated Packaging Boxes, Bags and Refrigerants for Single-parcel Shipments[J]. Packaging Technology & Science, 2008, 21(1): 25—35.
- [7] 刘翠娜, 张双喜, 周恒勤, 等. 便携式蓄冷保温箱结构优化[J]. 吉林化工学院学报, 2011, 28(1): 29—33.
- LIU Cui-na, ZHANG Shuang-xi, ZHOU Heng-qin, et al. Structural Optimization of the Portable Incubator with PCM[J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2011, 28(1): 29—33.
- [8] 戚燕俐, 方悦韵, 张军. 三明治复合结构保温箱材料导热系数测定与隔热效果验证[J]. 塑料工业, 2015, 43(7): 121—123.
- QI Yan-li, FANG Yue-yun, ZHANG Jun. The Test of Thermal Conductivity and the Verification of Heat Insulation Effect of the Composited Heat Insulation Device[J]. China Plastics Industry, 2015, 43(7): 121—123.
- [9] 高斯, 钱静. 保温包装整体设计及结构分析[J]. 包装工程, 2010, 31(4): 51—65.
- GAO Si, QIAN Jing. Overall Design of Insulation Packaging and Structural Analysis[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(4): 51—65.
- [10] 安鹏, 刑义川, 张爱军. 基于部分保温法的渠道保温板厚度计算与数值模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 54—62.
- AN Peng, XING Yi-chuan, ZHANG Ai-jun. Thickness Calculation and Numerical Simulation of Insulation Board for Canal Using Partial Insulation Method[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2013, 29(17): 54—62.
- [11] 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. Analysis and Simulation for Insulation Package Based on Ansys[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011.
- [12] LYU Xue-tao, YANG Hua, ZHANG Su-mei. Effect of Contact Thermal Resistance on Temperature Distributions of Concrete-filled Steel Tubes in Fire[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 18(1): 81—88.
- [13] 陈孟, 黄庆, 翁羽, 等. 自然对流换热系数计算方法研究[C]// 第十七届全国反应堆结构力学会议, 2012.
- CHEN Meng, HUANG Qing, WENG Yu, et al. The Computational Method for Heat Transfer Film Coefficient of Nature Convection[C]// The 17th National Conference on Structural Mechanics of Reactors, 2012.
- [14] 张朝晖. ANSYS 热分析教程与实例解析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
- ZHANG Zhao-hui. ANSYS Thermal Analysis Tutorial and Case Analysis[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007.
- [15] 孟志娟. 基于多元指纹图谱技术的带鱼产地鉴别与新鲜度评价研究[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2013.
- MENG Zhi-juan. The Origin Identification and Freshness Evaluation of Trichiurus Lepturus Based on Multiple Fingerprints[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2013.