

风冷冰箱箱体气流组织研究

鲁浩翔, 王志毅*, 白雪松

浙江理工大学建筑工程学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2023年4月3日; 录用日期: 2023年5月24日; 发布日期: 2023年5月31日

摘要

为研究出风口位置对风冷冰箱温度均匀性的影响, 利用CFD软件对某品牌四门风冷冷冻冰箱建立三维流体模型, 采用RNGk- ϵ 方程湍流模型进行数值模拟分析。经过典型测点模拟温度值与实际试验温度值进行对比, 相对误差最小为1.66%, 最大为4.13%, 模拟可靠。由于模拟未考虑门缝漏热, 模拟温度稍低于试验温度。并对各个典型位置——顶部、底部、左贴靠以及侧面进行仿真模拟研究, 总结温度场、速度场的分布特征, 发现将出入风口布置在顶部中间位置温度波动最小, 且通过温度标准差可得其具有良好的温度均匀性。

关键词

数值模拟, 温度场, 风冷冰箱, 温度波动

Study on Air Distribution of Air-Cooled Refrigerator Box

Haoliang Lu, Zhiyi Wang*, Xuesong Bai

School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

Received: Apr. 3rd, 2023; accepted: May 24th, 2023; published: May 31st, 2023

Abstract

In order to study the effect of air outlet position on the temperature uniformity of air-cooled refrigerators, the three-dimensional fluid model of a four-door air-cooled refrigerator of a certain brand was established by using CFD software, and RNGk- ϵ Equation turbulence model is used for numerical simulation and analysis. After comparing the simulated temperature value of typical measuring points with the actual test temperature value, the minimum relative error is 1.66% and the maximum is 4.13%, indicating that the simulation is reliable. The simulation temperature is slightly lower than the test temperature because the door seam heat leakage is not considered in

*通讯作者。

the simulation. For each typical position—top, bottom, left and side, the simulation study is carried out, and the distribution characteristics of temperature field and velocity field are summarized. It is found that the temperature fluctuation at the middle of the top is the smallest, and it has good temperature uniformity through the standard deviation of temperature.

Keywords

Numerical Simulation, Temperature Field, Air-Cooled Refrigerator, Temperature Fluctuation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着国家经济飞速发展,商用冰箱在当下的社会生产、生活中有着举足轻重的地位,给人们带来便利[1]。人们从单纯旨在冷藏、冷冻食物转变为注重食物品质[2]。冰箱食物保存质量依赖箱体流场以及温度分布[3] [4] [5],气流组织作为评价流场、温度场的一个指标,合理的气流组织包括送回风口位置、风速、温度等参数[6]的设定。随着技术的不断发展,气流组织分布研究从实验向仿真模拟转变,利用流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)进行求解,具有节省时间成本且可以快速模拟出不同的工况等优点[7] [8] [9],为箱体气流组织设计提供依据[10] [11]。

针对性能方面,主要是人们对冰箱储存食物品质、保鲜的需求,研究学者集中于对箱体内部温度均匀性的研究[12] [13] [14] [15],通过对不同的出风口形式[16]、风口尺寸[17]以及出风角度[18]等方面进行研究以提高温度均匀性。而本文将某品牌一台四门风冷冰箱为模型,建立三维流体模型,对不同出风口位置进行模拟,对其温度场以及速度场进行分析研究,拟通过模拟结果分析找出最为合理的风口位置。

2. 模型建立

2.1. 几何模型

本文所模拟的对象为某品牌一台四门风冷冰箱,冰箱尺寸长 × 宽 × 高 = 1210 mm × 700 mm × 1500 mm。回风槽口由一个 6 × 34 mm 矩形和两个半径 3 mm 半圆组成。蒸发器位于冰箱上部装饰罩内,风扇位于蒸发器前方。循环风通过出风口进入到箱体内部,由于风机作用,使得循环风通过回风口回到蒸发器,形成强制循环。图 1 为风冷冰箱结构示意图,图 2 为进出风口位置示意图。

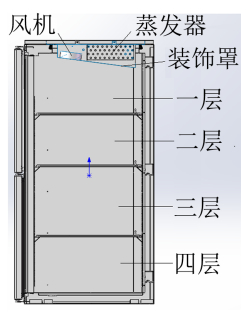


Figure 1. Structure of air-cooled refrigerator

图 1. 风冷冰箱结构

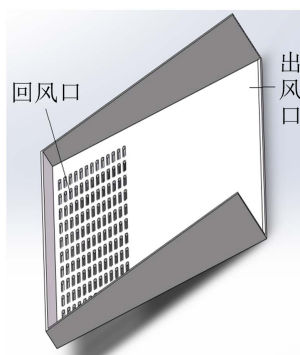


Figure 2. Location of air inlet and outlet
图 2. 进出风口位置

2.2. 数值模型

为减少数值模拟的计算量以及复杂程度作出以下假设：

- 1) 由于风冷冰箱内部的空气流动速度较为缓慢且压差变化不大，因此将空气视为不可压缩流体。
- 2) 假设室外环境温度恒定且忽略周围环境对于冰箱内部环境的干扰。
- 3) 假设冰箱内部气流为不可压缩的定常流动，满足 Boussinesq 假设，使用 RNGk- ϵ 方程湍流模型。
- 4) 不考虑箱体的漏热，出风口温度恒定。

2.3. 边界条件

为了研究冰箱内部气流组织以及温度场变化，以某品牌四门冰箱为原型，并进行相对应的简化如图 3 所示。箱体尺寸 $1210 \times 700 \times 1500$ mm，壁厚 50 mm。风冷冰箱保温层如图 4 所示，中间为发泡层，内部材质为不锈钢 201，外部材质为不锈钢 430。送风口选用速度入口，选择送风温度为 248 K，送风速度设置为 1 m/s，回风口设置为压力出口，箱体外壁四周设置绝热。

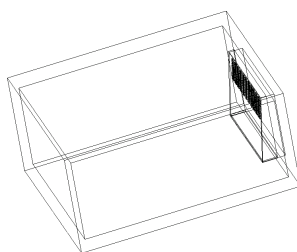


Figure 3. Simplified diagram of refrigerator
图 3. 冰箱简化图

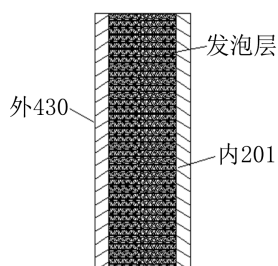


Figure 4. Schematic diagram of insulation layer
图 4. 保温层示意图

2.4. 模型网格划分

对模型网格划分, 设置网格尺寸为 100 mm, 并对出入口处进行局部加密, 加密处网格尺寸设置为 2 mm, 最终得到总网格数为 2,183,795, 如图 5 所示。

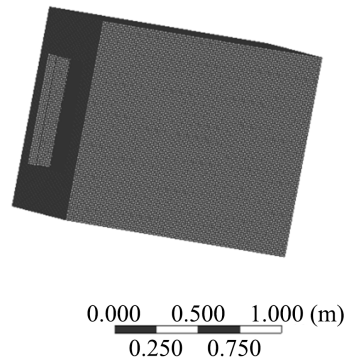


Figure 5. Model grid division
图 5. 模型网格划分

设置总体网格尺寸分别为 150 mm、125 mm、100 mm、80 mm 和 60 mm, 选取出口速度作为监测点进行独立性验证, 具体如表 1 和图 6 所示, 当网格数为 2,183,795 时, 速度变化量小于 2%。考虑到模拟成本和计算的正确性, 因此最后选用 2,183,795 的网格进行模拟计算。

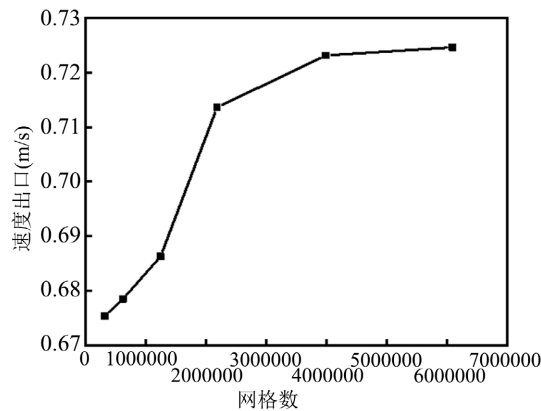


Figure 6. Grid independence verification
图 6. 网格独立性验证

Table 1. Boundary conditions

表 1. 边界条件

位置	温度	速度
入风口	$T = 248 \text{ K}$	$U = 1 \text{ m/s}$
回风口	零正常梯度	零正常梯度
前左右壁面	$T = 298 \text{ K}, h = 0.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	无滑移
顶部壁面	$T = 298 \text{ K}, h = 0.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	无滑移
底部壁面	$T = 268 \text{ K}, h = 0.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	无滑移
后壁面	$T = 298 \text{ K}, h = 9.09 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	无滑移

3. 模拟结果及分析

3.1. 试验、模拟对比校核

试验在公司冰箱性能实验室内进行, 实验室保持恒温, 温度为 27℃, 对四门风冷冰箱进行试验并使其可以达到最低温度且稳态状态, 运用温度探头每一分钟进行一次温度采集, 试验共进行 5 h。取稳定状态时的温度数据作为试验数据与模拟数据进行对比。测点共 9 个, 如图 7 所示。

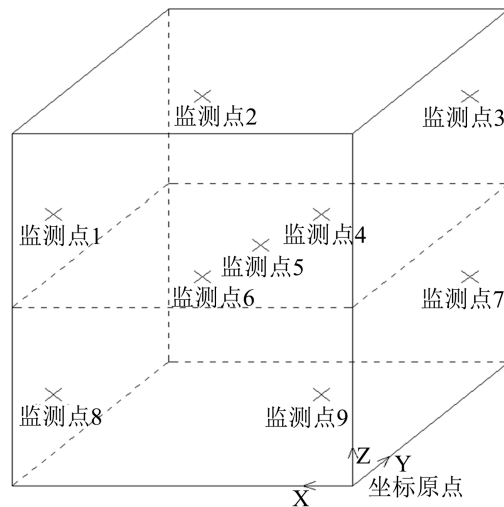


Figure 7. Layout of monitoring points

图 7. 监测点布置图

设置于冰箱一层监测点 1 (1110, 100, 1050)、监测点 2 (1110, 600, 1050)、监测点 3 (100, 600, 1050)、监测点 4 (100, 100, 1050); 二层监测点 5 (605, 350, 700); 三层监测点 6 (1110, 600, 350)、监测点 7 (100, 600, 350)、监测点 8 (1110, 100, 350)、监测点 9 (100, 100, 350)。

试验温度通过温度探头进行记录温度数据, 模拟温度通过 Ansys 软件在模型的相同位置设置监测点进行记录数据将稳态情况下温度数据对比如表 2:

Table 2. Comparison of simulation and test temperatures

表 2. 模拟、试验温度对比

监测点序号	试验温度/℃	模拟温度/℃	相对误差/%
监测点 1	-22.96	-23.34	1.66
监测点 2	-23.33	-23.87	1.83
监测点 3	-22.89	-23.24	2.40
监测点 4	-23.02	-23.67	2.27
监测点 5	-23.54	-24.05	1.77
监测点 6	-23.81	-24.32	1.74
监测点 7	-23.64	-24.41	2.04
监测点 8	-23.39	-24.05	4.13
监测点 9	-23.51	-24.12	3.68

由表 2 可知, 在 9 个监测点中, 误差最小的为 1.66%, 最大为 4.13%, 即模拟模型以及参数设置可靠。数据表明, 试验与模拟结果相近, 但存在一定的差值。且从表 2 中可以看出在冰箱趋于稳定情况下模拟温度稍低于试验温度, 这是由于未考虑到实际冰箱中门封漏热以及箱体与环境进行换热。对比模拟与试验, 表明模型可用。

3.2. 箱体内部气流组织模拟分析

箱体内部模拟结果如图 8 所示。图 8 为冰箱整体的温度分布云图, 从图中可以看出整体温度已经趋向于稳定, 冰箱边角由于涡流, 空气扰动不充分使得温度稍高于箱体内部平均温度, 图 9 为 $Y = 0.35$ 处的温度分布云图, 界面处温度分布较为均匀顶部由于左右处涡流作用使得温度稍高于其余位置, 整体温度分布合理, 能够比较好的达到所需的温度范围。

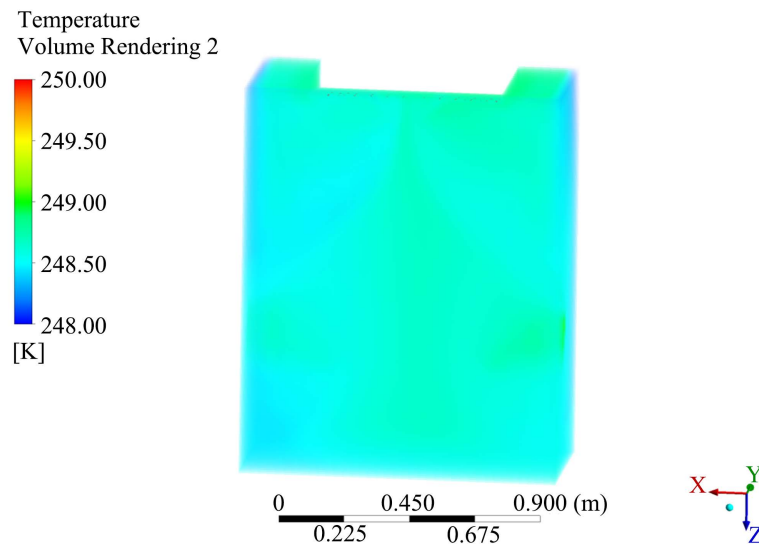


Figure 8. Temperature field of box
图 8. 箱体温度场

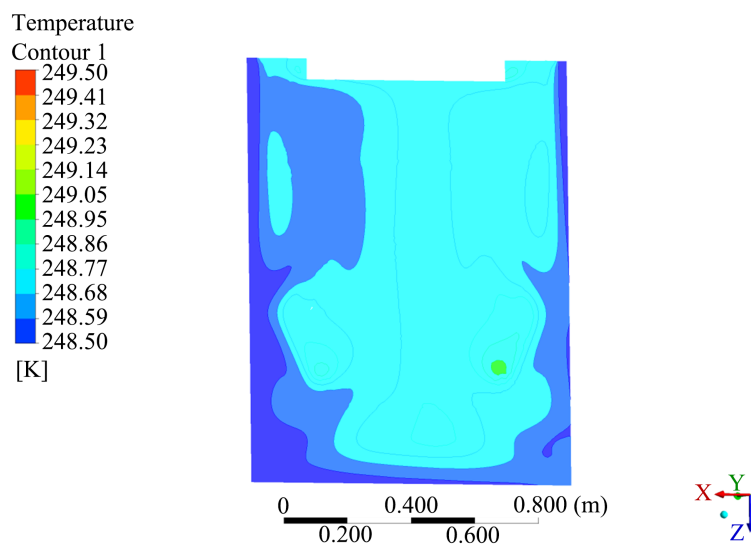


Figure 9. Temperature distribution at $Y = 0.35$ m
图 9. $Y = 0.35$ m 处温度分布图

图 10 和图 11 分别为 $Y = 0.35$, $X = 0.75$ 截面的速度矢量图。图 10 表明气流从出风口吹出后, 撞击后侧壁面后通过后壁面向下流动并在与箱体内部空气充分接触后从回风口吸入的一个趋势图。从图中可知回风速度也比较快, 是的箱体内部的气流组织循环较为良好。图 11 截面处速度分布表明由于顶部回风口位于装饰罩前端, 导致气流到达顶部后部分气流不能有效吸入回风口, 顶部两侧位置的气流在运动轨迹上形成小涡流, 对于气流的扰动具有一定的影响。且由于回风口上方风机作用, 冰箱内中间的空气向上流动, 从出风口流出在两侧形成两个涡流区。总体上来看, 箱体内部直吹平面的截面气流组织分布较为均匀。

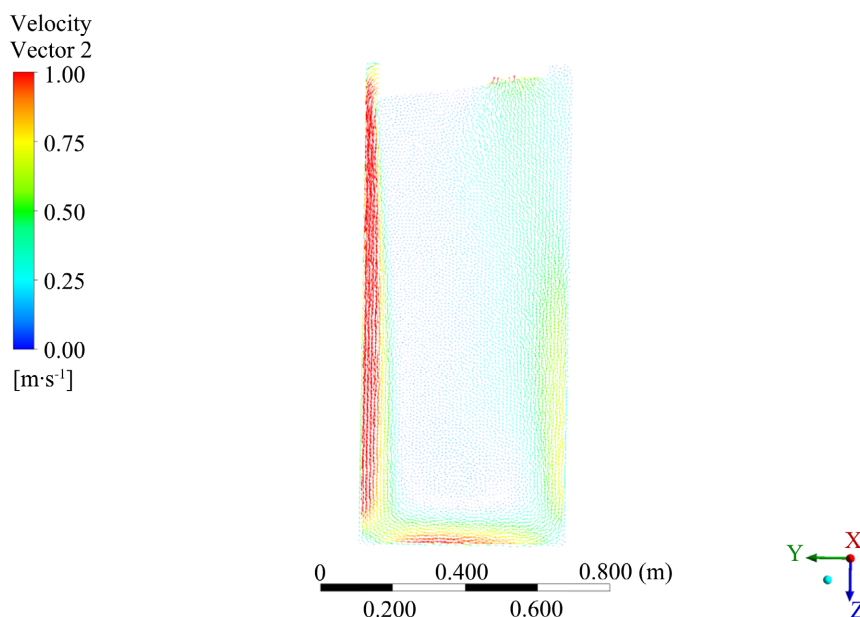


Figure 10. Section velocity vector at $Y = 0.75$ m
图 10. $Y = 0.75$ m 处截面速度矢量图

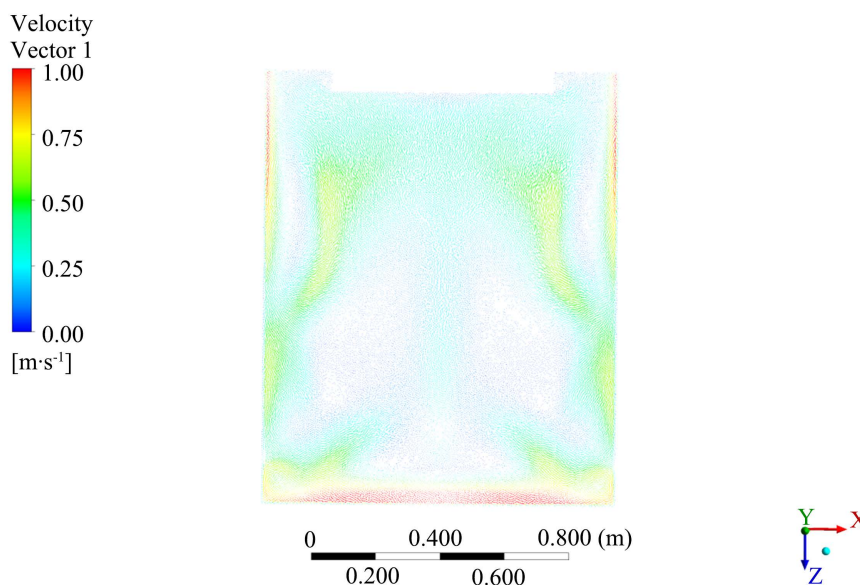


Figure 11. Section velocity vector at $X = 0.35$ m
图 11. $X = 0.35$ m 处截面速度矢量图

3.3. 不同进出风口位置的对比及分析

验证出模型有效后, 为了研究在适宜出风口风速下, 不同进出风口位置对冰箱内部的气流组织的影响, 将进出风口位置移动到正下方, 顶部与左壁面贴靠以及右侧壁面正中心进行模拟来研究分析箱体内部的流场分布情况。选取箱体内部宽度方向中间切面观察其温度场以及速度矢量, 位置如图 12。

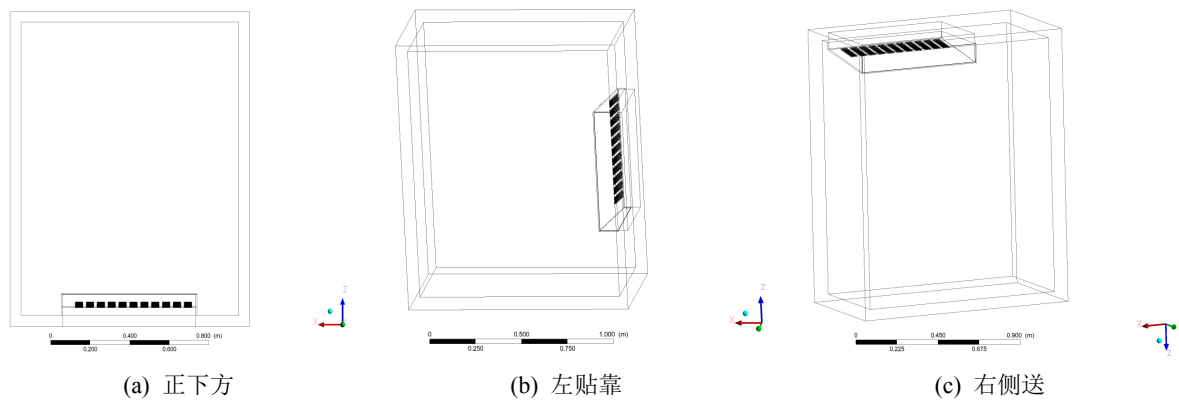


Figure 12. The arrangement of air inlet and outlet
图 12. 进出风口摆放位置

温度云图速度场如下图 13 和图 14 所示, 从各个出风口位置的 $Y = 0.35$ 界面处温度场、速度场中可以看出:

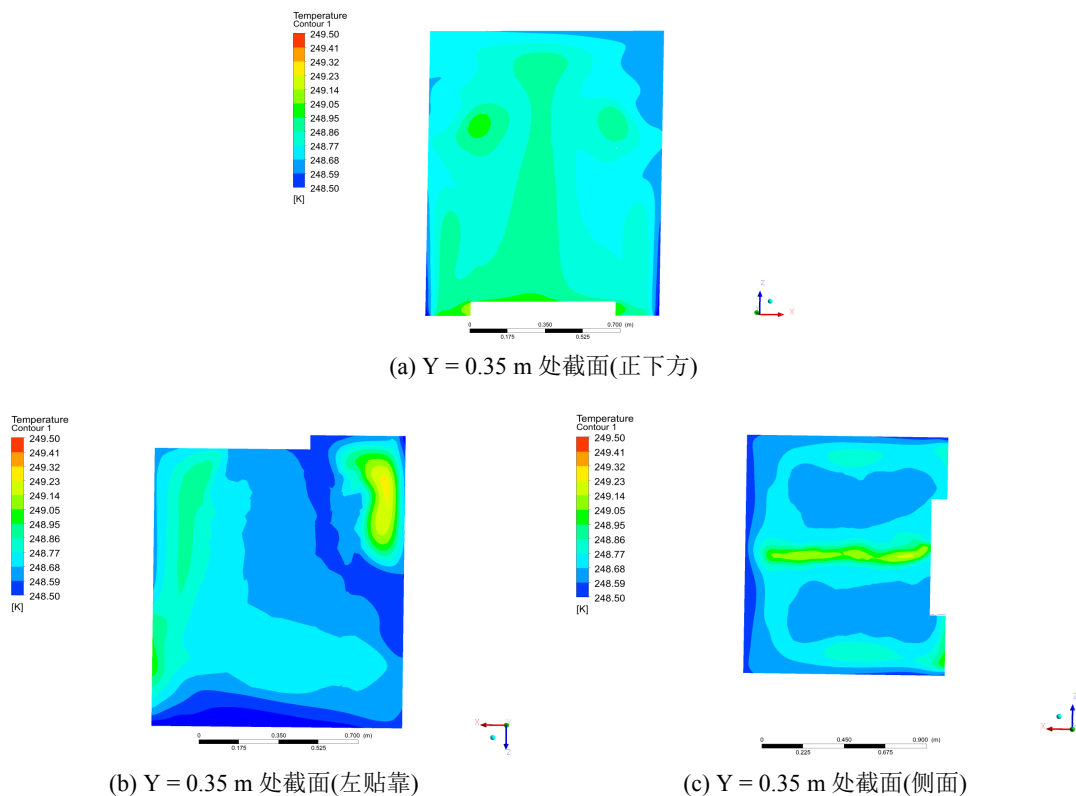


Figure 13. Temperature distribution diagram ((a)~(c))
图 13. 温度分布图((a)~(c))

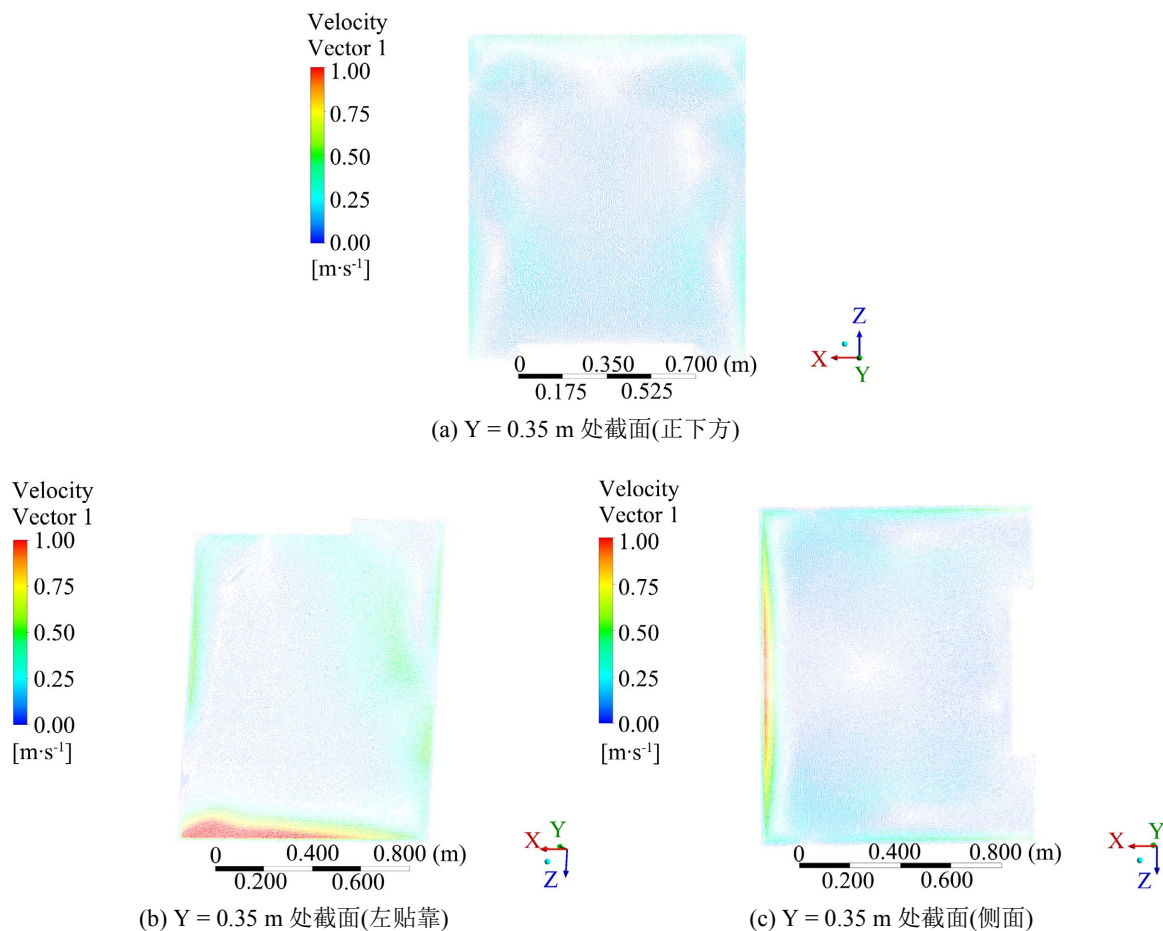


Figure 14. Velocity vector diagram ((a)~(c))
 图 14. 速度矢量图((a)~(c))

1) 下送下回时，冷风直吹后壁面，由速度场可知，在远离风口的顶端，速度较慢这是由于下送下回布置方式下，距离顶部的纵向距离相对较长，而重力的作用使得想要到达顶端的冷风所需要的流速要求更高，温度场相对均匀但整体温度高于上送上回，这是由于从出风口送出的冷风其中有部分未与箱体内部空气充分接触就从回风口流出，流速较慢，且箱体内空气换热不充分，使得其到达稳态时间也相对较长。总体来看，箱体宽度方向切面气流组织分布较为均匀，但所需时间更长且总体温度相较于顶部中间送风更高。

2) 当进出风口左贴靠与箱体时，顶部远离风口处存在一个涡流区域，由速度场可知，由于回风口位于左上方时，部分气流未被吸入回风口而在右上方形成涡流，可以看出涡流处速度逐渐减小，这是由于受到了各个壁面的撞击。从温度场可得，冷空气与右上方气流接触换热不充分导致出现温度相对较高的区域。

(3) 进回风口布置为侧送侧回时可以看出温度分布较为均匀但高于上送上回，且左壁面温度较低，这是由于冷空气从侧面出风口吹出后吹至左侧壁面使得左侧壁面与冷空气充分接触。

由表 3 可知，将稳态时各个摆放位置的九个监测点的模拟温度进行温度标准差计算。分析可知，且放置在侧面以及底部中间位置时，温度分布较为均匀但高于顶部中间位置，而左贴靠位置下温度波动性较大。温度当进回风口设置在顶部中间位置时，温度标准差最小，均匀性较高，其温度波动较小。有助于延长产品的保质期以及抑制微生物生长。

Table 3. Temperature fluctuation
表 3. 温度波动性

摆放位置	标准差
正上方	0.409
正下方	0.454
左贴靠	0.559
侧面	0.509

4. 结论

1) 本文所使用的仿真模拟方法与同工况下的试验结果相接近, 试验与模拟监测点温度值相对误差最大为 4.13%, 最小为 1.66%, 验证了所建立的模型的适用性。

2) 以该风冷冰箱作为研究对象, 本文通过不同位置的进回风口温度场以及速度场模拟可知, 风口位于左贴靠下会产生较为明显的涡流且右上方温度明显高于其他位置, 相比之下, 顶部以及底部、侧面正中间摆放具有一定的对称性, 且位于正上方中间位置时温度较低, 分布均匀且速度分布最为合理。

3) 通过对于各个监测点进行的温度标准差计算可得, 左贴靠情形下由于明显涡流的存在导致其均匀性受较差, 摆放在顶部底部、侧面中心位置时温度场具有良好的均匀性且顶部均匀性最佳, 有利于延长产品的保鲜期并抑制微生物的滋生。

参考文献

- [1] 方旭红, 谢玉兵. 基于内流场分析的风冷冰箱结构优化设计研究[J]. 中小企业管理与科技, 2017(25): 139-140.
- [2] 盛伟, 李飞, 宋新洲, 等. 风冷冰箱冷冻室的数值模拟与试验研究[J]. 流体机械, 2015, 43(10): 79-83.
- [3] 刘永辉, 王晶, 李标, 等. 基于 CFD 技术的大容量风冷冰箱流场分析及改进设计[J]. 流体机械, 2014, 42(7): 69-73.
- [4] 何国庚, 唐琼辉. 间冷抽屉式冰箱箱内流场与温度场的数值模拟[J]. 华中科技大学学报, 2005, 33(12): 34-36.
- [5] 张魁仓, 黄海鸿, 柯庆镛, 等. 大容积薄壁冰箱风道及箱体流场分析[J]. 家用电器, 2021, 5(5): 44-47.
- [6] 金沙, 沈愫, 孙大明, 等. 变截面风管空调房间气流组织的数值模拟[J]. 制冷技术, 2018, 38(2): 61-65.
- [7] 周艳蕊, 俞炳丰, 赵蕊. 送风参数对速度场和温度影响的计算模拟和试验研究[J]. 制冷与空调(四川), 2004, 4(3): 36-41.
- [8] 魏建仓, 孙建军, 吴太虎. 野外折叠冰箱温度场仿真设计[J]. 医疗卫生装备, 2012, 33(7): 7-9.
- [9] 苏秀平, 陈江平, 陈芝久, 等. 间冷式冰箱风扇区域流场的数值模拟和优化[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(7): 1133-1136.
- [10] 贾敬芝. 上海科技馆巨幕影院气流组织优化设计[J]. 制冷与空调, 2021, 21(6): 63-67.
- [11] 曾宪顺, 赵丹, 丁国良, 等. 改进间冷式酒柜内温度场均匀性的方案与效果[J]. 制冷学报, 2017, 38(4): 79-86.
- [12] Yang, Y., Huang, D., Zhao, R., et al. (2022) Analysis of Temperature Rapid Rise Phenomenon during Damper-Off Cycle in Side-by-Side Frost-Free Refrigerator. *International Journal of Refrigeration*, **133**, 201-213. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.10.014>
- [13] Gao, J.C. and Kim, J.Y. (2019) Simulation for Improvement of Temperature Distribution Inside Refrigerator. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, **18**, 98-103. <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2019.18.12.098>
- [14] Belman-Flores, J.M. and Gallegos-Muñoz, A. (2016) Analysis of the Flow and Temperature Distribution inside the Compartment of a Small Refrigerator. *Applied Thermal Engineering*, **106**, 743-752. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.065>
- [15] 游孟醒, 刘学平, 向东, 等. 风冷冰箱冷藏室温度均匀性优化[J]. 机电产品开发与创新, 2019, 32(1): 19-21.

- [16] 黄兴宗, 钟音, 凌长明. 间冷冰箱冷藏室冷藏性能的数值研究[J]. 节能技术, 2020, 38(4): 328-332.
- [17] 陈成, 刘志峰, 罗建, 等. 基于 Fluent 的风冷冰箱的风道结构优化设计[J]. 日用电器, 2013(5): 30-35.
- [18] 张耀吉, 石丽华, 黄东. 送风角度对冷藏室内流场及温度场的影响[J]. 家电科技, 2018(S1): 55-58.