

送风角度对冷藏室内流场及温度场的影响

张耀吉¹, 石丽华², 黄东³

(西安交通大学能源与动力工程学院, 西安 710049)
(Tel:13289360878, Email: zhangyaoji1994@foxmail.com)

摘要: 数值研究了大容量单循环风冷冰箱冷藏室的流场和温度场, 结果表明: 箱内搁物架与门体和后背板的前后间隙是顶部冷风下沉的两个主通道; 当前送风向上倾斜角度从 45° 减小至 0° 时, 送风口出风在顶层的漩涡强度减弱, 经前间隙下沉的冷气增加, 冷藏室各层的平均温度降低, 箱内温度分布更加均匀; 但随送风角度的减小, 箱内温度场改善的效果也逐渐减弱。为防止直吹带来的局部冻结, 前送风入射角为 25° 时效果较佳。

关键词: 送风角度, 冷藏室, 流场, 温度场, 数值计算

Effect of Air-supplied Angle on Flow and Temperature Fields in refrigerating Compartment of Frost-free Refrigerator

Zhang Yaoji Shi Lihua Huang Dong

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract The flow field and temperature field of the refrigerating compartment of a large-capacity frost-free refrigerator were numerically studied. The results show that air flows through the front passage between door and shelves and the back passage between back-plate and shelves. The intensity of secondary flow developed from the initial region of the air-supplied ports decreases and the supplied cold air settled through the front passage in increases with the decreased air-supplied angle, which significantly improves the cooling performance and temperature uniformity. However, the effect of air-supplied angle gradually decreases with the decreased air-supplied angle. Considering the direct blowing may cause food freezing, the best air-supplied angle can be selected as 25°.

Keywords Air-supplied angle Refrigerating Flow field Temperature field Numerical simulation

0 前言

冰箱进入无霜时代以来, 其产品结构向着多温区、大容量、智能化、节能环保的方向升级, 逐步向品质化时代迈进。随着冰箱能效新标准的实施, 对其耗电量提出了更高要求, 因此, 冰箱节能降耗设计的重要性不言而喻。

冰箱的节能和保鲜性能都与箱体内空气的流场及温度场密切相关, 因而研究箱内速度与温度分布对提升冰箱的整体性能具有重要的意义。国外, Lacerda VT 等^[1]利用 PIV 技术对风冷冰箱冷冻室进行研究, 结果表明: 其耗电量很大程度上依赖于箱内的温度分布, 而温度分布又与内部流场密切相关, 因而可通过优化箱体内部流场和温度场均匀性以降低耗电量。Gupta JK 等^[2]对一台风冷冰箱冷藏室和冷冻室内的流场与温度场进行模拟, 研究发现, 增大前送风口的送风量可改善箱内局部区域温度较高的问题。Yang KS^[3]等对一台具有冷藏室、冷冻室和果蔬室的风冷冰箱进行了动态模拟, 基于模拟结果对冷藏室和冷冻室送风口的位置进行调整, 调整后的箱温均匀性显著提高。国内, 苏秀平等^[4,5]对风冷冰箱风扇附近以及箱体内部流场进行数值模拟, 研究发现, 通过优化冷藏室送风风道结构, 适当提高冷藏室送风量, 可有效改善冷藏室降温慢、温度分布不均的问题。陈成等^[6]借助 FLUENT 软件, 对风冷冰箱的风道系统以及箱内空气进行研究, 模拟发现其风道设计不合理导致箱内温差过大, 基于此对风道类型、风口布置以及相关送风参数进行了优化, 实验表明改进措施可有效降低箱内温差, 改善冰箱保鲜性能。盛伟等^[7]对风冷冰箱内进行数值计算, 并与通过实验测量获得的某些测点处温度进行对比, 两者基本符合良好, 根据数值计算结果指出,

可以通过增大送风速率、增加或改进抽屉或狭小空间气体流道，从而改善箱内温度分布情况，降低冰箱能耗。然而对于箱内速度与温度分布优化方面，有关送风角度的研究不多见，而冷空气的入射方向直接关系到冰箱内部流场以及温度场分布，对冰箱的整体性能产生重要影响。

为研究送风角度对冷藏室温度与速度分布的影响规律，本文以一台对开门单循环风冷冰箱冷藏室为载体，对其箱内空气的流动和换热进行数值模拟，以期为提高风冷冰箱的节能与保鲜性能供理论依据。

1 物理模型

本文研究对象为对开门单循环风冷冰箱的冷藏室，由于蒸发器和蒸发风机均位于冷冻室后面，因此冷藏室的几何模型主要包括保温层、搁物架、门搁架以及抽屉等，如图 1 所示。冷藏送风口布置在冷藏室后背板的顶部，其中两个前送风口左右对称布置，一个下送风口中间偏左，一个回风口位于冷藏与冷冻室之间隔板的后下方。风门打开期间，蒸发风机驱动冷气由各送风口吹出，然后分别沿冷藏室搁架与门体间隙（前间隙）以及搁架与后背板间隙（后间隙）下沉，为冷藏室降温，最后温度较高的气体通过回风口，然后与冷冻室的回风混合，经蒸发器冷却完成冷藏室空气循环。由于送回风口均处于冷藏室后方，如何使冷量顺利到达箱体前方便成为了设计的重点，为此，样机的前送风口面积约为下送风口的四倍以增大前送风量，同时为与风量匹配，样机前间隙的宽度是后间隙的两倍，即前间隙为气流下沉的主通道。

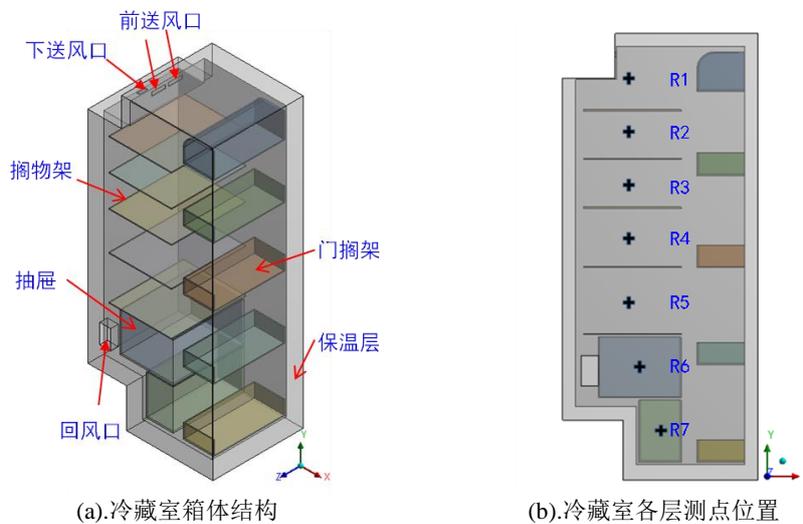


图 1 冷藏室箱体示意图

2 数学模型

2.1 基本假设

为方便模型的建立与数值计算，本文对所研究的问题进行如下假设：

- 1) 箱内空气视为牛顿流体，在固体壁面速度无滑移。
- 2) 箱体内部空气符合 Boussinesq 假设，且忽略空气的相变过程。
- 3) 箱体内部的湍流流动符合 $k-\epsilon$ 湍流模型。
- 4) 箱内各壁面的温度比较接近，辐射换热量远小于对流换热，因此忽略箱内壁面间辐射换热。
- 5) 假设送风口出风速度均匀且出风温度与速度（大小与风向）恒定不变。

2.2 控制方程

基于上述假设，冰箱冷藏室箱体内部空气的控制方程组归结如下：

$$\text{div}(\rho\phi U) = \text{div}(\Gamma_{\phi}^* \text{grad}\phi) + S_{\phi}^* \quad (1)$$

式中：

- ρ —— 密度；
- ϕ —— 通用变量；
- U —— 速度矢量；

Γ_{ϕ}^* ——广义扩散系数；

S_{ϕ}^* ——广义源项。

其展开形式：

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi}^* \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_{\phi}^* \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_{\phi}^* \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S_{\phi}^* \quad (2)$$

当 ϕ 取不同变量时，式（1）和（2）所代表的控制方程也不同，如表1。

表1 不同控制方程中广义扩散系数及源项的表达式

方程	ϕ	Γ_{ϕ}^*	S_{ϕ}^*
质量	1	0	0
X 方向动量	u	$\eta + \eta_t$	S_u
Y 方向动量	v	$\eta + \eta_t$	S_v
Z 方向动量	w	$\eta + \eta_t$	S_w
能量	T	$\frac{\eta}{P_r} + \frac{\eta_t}{\sigma_T}$	0
k	k	$\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k}$	$\rho G_k - \rho \varepsilon$
ε	ε	$\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_{\varepsilon}}$	$\frac{\varepsilon}{k} (c_1 \rho G_k - c_2 \rho \varepsilon)$

其中：

$$\eta_t = c_{\mu} \rho k^2 / \varepsilon \quad (3)$$

$$G_k = \frac{\eta_t}{\rho} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

上述方程中引入 c_1 、 c_2 、 c_{μ} 三个系数以及 σ_T 、 σ_k 、 σ_{ε} 三个常数，一般经验值如表2：

表2 控制方程中各经验参数取值^[8]

c_1	c_2	c_{μ}	σ_T	σ_k	σ_{ε}
1.44	1.92	0.09	1.0	1.3	0.95

2.3 边界条件

冷藏室的边界条件见表3。其中，为了简化壁面的计算，同时考虑到壁面导热效应，将外界与壁面的对流换热和壁面导热等效为一个换热系数 h （热阻等效的原理）：

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{h_{env}} + \frac{\delta}{\lambda_{wall}} \quad (5)$$

式中：

h ——等效换热系数；

h_{env} ——冷藏室各壁面与外界对流换热系数；

δ ——冷藏室壁面厚度；

λ_{wall} ——冷藏室壁面导热系数。

表 3 边界条件

边界	速度 /m s ⁻¹	温度 /K	等效换热系数 /W m ⁻² K ⁻¹
前送风口	2.61i, 2.61j, 0k	246	/
下送风口	-1.95i, -2.95j, 0k	247	/
左侧壁		对流, T=247	0.47
右侧壁		对流, T=305	0.42
后背板		对流, T=305	0.42
门体	无滑移	对流, T=305	0.34
底壁		对流, T=305	0.35
顶壁		对流, T=305	0.42
压缩机仓		对流, T=308	0.42
门封		对流, T=305	3.00

保持合速度的大小不变, 通过改变各方向分速度的大小, 实现不同的送风角度。

3 计算结果与分析

3.1 模型验证

实验内容: 环境温度维持在 32°; 切断冰箱温控器, 即上电后压缩机不停机, 直至压缩机制冷量与冰箱热负荷达到平衡, 冷藏和冷冻的箱温不再变化。

由表 4 所示的特征点 (位置详见图 1 (b)) 温度对比结果可知: 各测点的模拟值与实验测试值的相对偏差均不超过 0.88%, 说明数学模型具有较高的准确性。此外, 冷藏室各测点温度的模拟值始终低于实验值, 这是由于: 忽略了箱内壁面间的辐射换热; 模型中的风速为实验测量值, 其测量存在一定误差。

表 4 冷藏室箱体内部温度测点实验值与模拟值对比

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
实验值/K	247.5	248.0	248.9	249.4	251.8	254.4	253.8
模拟值/K	245.3	247.3	248.6	248.9	251.0	252.8	252.6
相对误差	0.88%	0.30%	0.12%	0.20%	0.31%	0.62%	0.50%

3.2 结果分析

在验证了所提出的 CFD 数学模型合理性的基础上, 选取三个不同的前送风角度: 向上倾斜 45°、25° 和水平送风 (0°) 进行数值计算, 进而分析前送风角度对冷藏室温度与速度分布的影响, 结果如下:

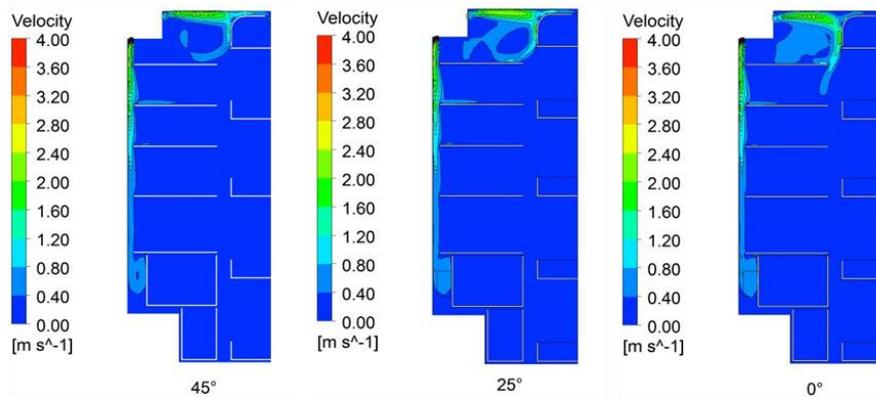


图 2 冷藏室宽度方向中心截面 (Z=220/440) 速度分布云图

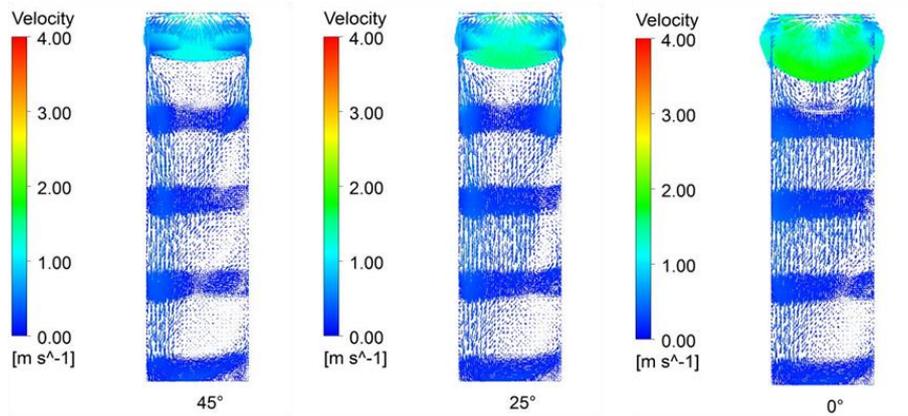


图3 冷藏室前间隙 (X=450/640) 速度矢量图

由图2可知,不同送风角度下冷藏室速度场的差别主要在前间隙:与45°相比,当前送风口向上倾斜角度为25°时,送入箱内的冷空气吹至第一层前间隙处的流速大大增加,尤其是当送风角度减小至0°时,冷空气运动至第一层搁物架下方前间隙时,仍具有较大的竖直速度分量,因而可以突破第一层搁架上的气流短循环,顺利从前间隙下沉将冷量送达冷藏室下部和前部空间(图3)。这说明,随着前送风口向上倾斜角度的减小,送风冷射流在第一层搁物架上方的流速加快,经第一层前间隙下沉的冷气量不断增加,大大减少了冷量浪费。

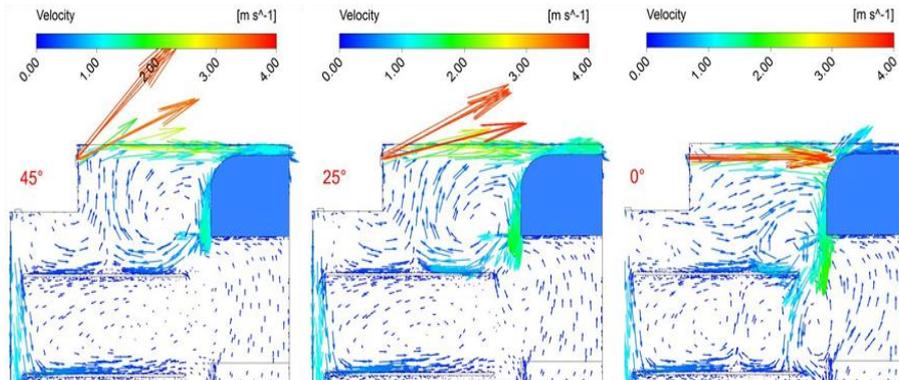


图4 冷藏室顶层局部速度矢量图

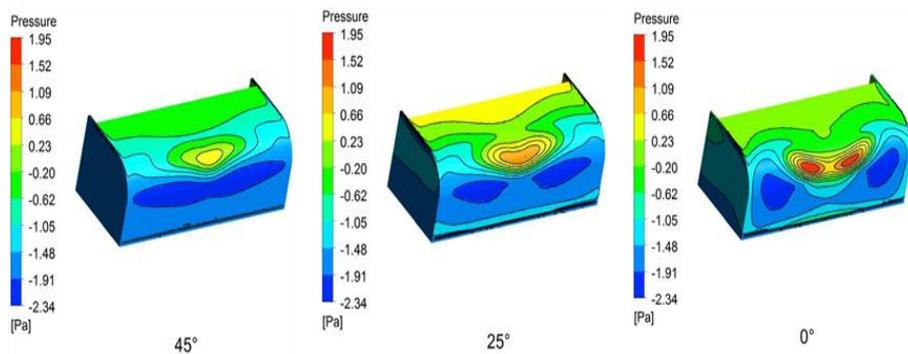


图5 冷藏室顶层门搁架处压力分布云图

前间隙下沉冷量增多原因如下:其一,随着送风角度的减小,冷空气触顶位置向门体方向移动,触顶前风速逐渐减小,其触顶的动量损失也随之减小;特别地,当送风角度减小为0°时,几乎可以避免撞击顶部壁面造成的动量损失,因而前送风口吹出的冷气在冷藏第一层,尤其是前间隙处可以保持较高的速度(图4);其二,冷气运动至前间隙的速度越大,其撞击顶层门搁架时撞击区的静压就越大,驱动冷气继续运动的压差增大,因而冷气流速就越大;其三,送风冷射流进入箱内的角度趋于平缓,造成其吹至顶层门搁架时的位置也不断下移,受压差驱动而向下运动的冷气量也随之增多(图5)。由于冷藏室的送回风口位于冷藏室顶后部,经前间隙下沉的冷气量增多,有利于箱体下部和前部温度的降低,可有效改善冷藏室的降温效果。

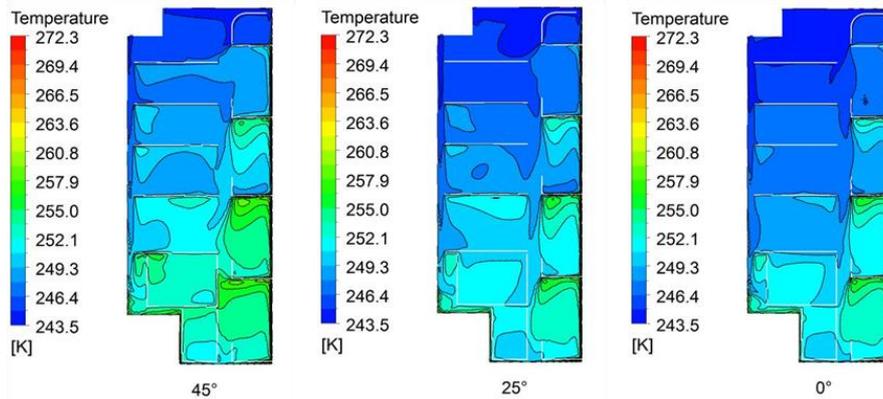


图 6 冷藏室宽度方向中心截面 ($Z=220/440$) 的温度分布云图

如图 6 所示, 随前送风角度减小, 冷藏室整体温度降低, 尤其是冷藏室底部和前部, 又由于冷藏室温度“上低下高”, 因而箱内温度分布也更加均匀。这说明送风角度的减小有利于降低冰箱能耗, 提升其整体性能。此外, 还可以观察到, 送风角度分别为 0° 和 25° 时, 冷藏室温度分布的差别明显小于 45° 和 25° 之间的差别, 可见, 随送风角度的减小, 其对冰箱性能改善的效果逐渐减弱。

4 结论

通过对风冷冰箱冷藏室进行数值计算, 研究了不同送风角度对箱内流场与温度场的影响, 结果如下:

1) 随前送风向上倾斜角度的减小, 冷藏室前间隙处冷气的下沉量增加, 箱内整体温度降低, 尤其是底部温度; 由于冷藏室内温度呈“上低下高”分布, 因而箱内最大温差也随之减小, 箱温均匀性明显改善; 此外, 随前送风角度的减小, 箱内温度场和流场的改善效果也逐渐减弱。

2) 就降温效果而言, 前送风角度选取 0° 最佳, 但是为避免较低温度的出风直接吹到食物上造成局部冻结, 前送风口需要向上倾斜一定的角度, 针对本研究, 前送风角度可以选取 25° 。

参考文献

- [1] Lacerda VT, Melo C, Barbosa JR, et al. Measurements of the air flow field in the freezer compartment of a top-mount no-frost refrigerator: the effect of temperature[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(5): 774-783.
- [2] Gupta J K, Gopal M R, Chakraborty S. Modeling of a domestic frost-free refrigerator[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30(2): 311-322.
- [3] Yang K S, Chang W R, Chen Y, et al. An investigation of a top-mounted domestic refrigerator[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(7): 1422-1427.
- [4] 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.
- [5] 苏秀平. 间冷式冰箱若干问题的理论与试验研究[D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2006.
- [6] 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.
- [7] 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. 流体机械, 2015, 43(10):79-83.
- [8] 熊莉芳, 林源, 李世武. $k-\varepsilon$ 湍流模型及其在 FLUENT 软件中的应用[J]. 工业加热, 2007, 36(4): 13-15.