doi:10.3969/j.issn.1672-1292.2026.02.003

基于正交试验法的血液红细胞冷库热性能优化研究

景可能[1],陈　丹[1],贺欣斓[1],丁小磊[2],顾呈华[2],
汪海宁[3],戴宇东[3],汤丁洁[4],张忠斌[1]

(1.南京师范大学能源与机械工程学院,江苏 南京 210023)
(2.江苏省疾病预防控制中心,江苏 南京 210009)
(3.南京红十字血液中心,江苏 南京 210003)
(4.江苏省血液中心,江苏 南京 210042)

[**摘要**]　血液红细胞冷库作为血液冷链中的重要储存设备,其内部温度需保持精准恒定以确保血液安全. 基于正交试验方法,开展了两组混合水平的正交模拟研究. 首先,分析几何结构和设备布局对冷库热性能的影响(正交组 1),再结合几何结构、设备布局与送风工况,探讨运行条件对热性能的影响机制(正交组 2). 结果表明,几何结构与设备布局的最优配置会随送风条件的变化而调整. 各因素对冷库热性能的影响优先级为:体积比表面积>内热源位置>冷风机位置>送风温度>送风速度>变截面比. 优化后,冷库平均温度降低 1.01 ℃,温度极差减少 1.39 ℃,温度不均匀系数下降 57.14%,速度不均匀系数下降 16.22%,能耗降低 2.31%. 研究明确了关键影响因素及其优化路径,为红细胞冷库的设计与运行优化提供了理论依据.

[**关键词**]　血液红细胞冷库,正交模拟,内热源布局,热性能,能耗
[**中图分类号**]TB61$^+$1;R457.1$^+$2　[**文献标志码**]A　[**文章编号**]1672-1292(2026)02-0021-09

Research on Thermal Performance Optimization of Red Blood Cell Cold Storage Based on Orthogonal Simulation Test Method

Jing Keneng[1], Chen Dan[1], He Xinlan[1], Ding Xiaolei[2], Gu Chenghua[2],
Wang Haining[3], Dai Yudong[3], Tang Dingjie[4], Zhang Zhongbin[1]

(1.School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023 China)
(2.Jiangsu Provincial Center for Disease Control and Prevention, Nanjing 210009, China)
(3.Nanjing Red Cross Blood Center, Nanjing 210003, China)
(4.Jiangsu Province Blood Center, Nanjing 210042, China)

Abstract: The red blood cell cold storage, as a critical storage device in the blood cold chain, needs to maintain an accurate and constant temperature to ensure blood safety. In this paper, based on the orthogonal test method, the orthogonal simulation study of two groups of mixed levels is carried out. First, the impact of geometric structure and equipment layout on the cold storage's thermal performance is analyzed (orthogonal group 1). Then, the influence mechanism of operational conditions on thermal performance is further explored by considering the geometric structure, equipment layout, and air supply conditions (orthogonal group 2). The results show that the optimal configuration of geometric structure and equipment layout adjusts according to the air supply conditions. The priority of factors affecting the thermal performance of the cold storage is specific surface area>internal heat source position>fan position>air supply temperature>air supply speed>variable cross-sectional ratio. After optimization, the average temperature of the cold storage decreases by 1.01 ℃, the temperature range reduces by 1.39 ℃, the temperature non-uniformity coefficient decreases by 57.14%, the velocity non-uniformity coefficient decreases by 16.22%, and energy consumption is reduced by 2.31%. This study identifies the key influencing factors and their optimization paths, providing a theoretical basis for the design and operation optimization of red blood cell cold storage.

Key words: red blood cell cold storage, orthogonal simulation, internal heat source layout, thermal performance, energy consumption

收稿日期:2024-11-28.

通讯作者:张忠斌,博士,教授,研究方向:数据中心(建筑)气流组织和管理、制冷空调设备性能优化及试验新方法研究. E-mail: zhangzhongbin@163.com

输血是现代医学的核心环节之一,是许多医疗和外科临床的关键环节,对保障受血者的生命安全至关重要[1-2]. 卫生当局有责任确保血液供应的及时性与充足性. 并建立完善的血液管理体系,以确保血液供应的安全性、可及性和充足性,同时协调采供血机构实现高效调配. 然而,血液及其制品的质量在储存和运输过程中易受环境条件影响. 红细胞质量是影响输血疗效和安全性的关键因素. 其在冷藏过程中若出现 2~6 ℃的温度偏差,将显著增加细菌污染风险,并引发“贮藏损伤”[3-5]. 因此,严格控制储存温度对于保障血液质量至关重要.

血液冷链作为从血液采集点到输血点的重要储存与运输机制[6],近年来受到广泛关注. 相关研究主要集中在通过人工智能[7-9]和先进算法[10-13]优化冷链供应技术,以减少运输延误和血液浪费等问题. 血液红细胞冷库在传统冷库的基础上,通过信息化、智能化和自动化技术,实现了对血液及其成分的精准储存和管理[14]. 然而,尽管在供应链优化和管理方面有所进展,血液冷库设备的热性能不稳定仍可能导致血液质量下降和资源浪费.

传统冷库的热性能研究主要集中在库内几何结构、气流组织、设备布置和产品摆放等因素. 例如,田甜等[15]通过模拟分析冷风机不同布置方式对气流的影响,发现沿长度方向布置可提高气流均匀性并减少死角. Gong 等[16]研究了冷库内苹果纸箱设计对热性能的影响,指出适当增加纸箱隔板和壁厚有助于优化气流均匀性并减少能耗. 文献[17-19]发现货物摆放位置和体积变化会影响货物之间的传热过程,导致冷却速度和时间存在差异. Budiyanto 等[20]通过分析预冷室、冷冻室和低温储藏室的最佳运行条件,提出优化方案以减少能耗和过度冷却. Sajadiye 等[21]模拟了不同托盘箱布局对冷却性能的影响,发现交错布置可缩短冷却时间,但温度场均匀性不如直线布置. Chen 等[22]实验研究了冷库结构、设备布局和气幕设计对温度分布的影响,发现两台冷风机沿库长度方向布置可显著改善气流均匀性. 文献[23-24]优化了空气幕装置的结构,从而提高了送风性能.

上述研究为血液红细胞冷库的设计和优化提供了重要参考. 本文以江苏某血液红细胞冷库为研究对象,探讨了几何结构、设备布局及送风工况对库内气流组织和温度分布的影响. 研究设计了两组正交试验进行综合分析与比较:第一组仅改变几何结构和设备布局,第二组则同时改变几何结构、设备布局和送风工况. 通过试验验证各因素对血液红细胞冷库热性能的相互作用,从而获得最优设计方案. 最后,通过实际测试验证了该方案在热性能和能耗方面的优越性.

1　模型建立及验证

1.1　物理模型

研究以一台血液红细胞冷库为研究对象,其外部整体尺寸长(L)×宽(W)×高(H)为 6 000 mm×2 083 mm×2 000 mm,三维物理模型如图 1 所示. 冷库内部结构包括一个入口门和两列货架(分别为 A 列和 B 列),并采用变截面设计. 此外,内部设备配置包括:1 台冷风机、1 盏 50 W 照明灯、1 台 15 W 监控器、32 个 10 W 传感器,以及 1 台 750 W 的机械臂及全自动装置. 冷库的围护结构采用双面彩钢聚氨酯夹芯板,导热系数 $\lambda \leqslant 0.02$ W/(m·K),以保证良好的保温性能.

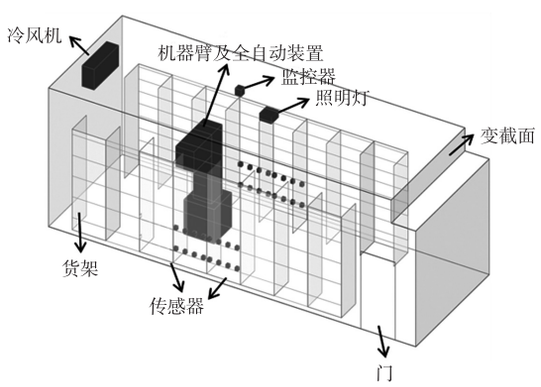


图 1　红细胞冷库三维物理模型

Fig. 1　3D physical model of red blood cell cold storage

1.2 数学模型

为简化计算,对计算模型作如下假设:(1)库内空气为不可压缩流体,符合 Boussinesp 假设(忽略黏性耗散);(2)设备内空气为稳态湍流;(3)设备外温度保持稳定;(4)忽略设备门漏风的影响. 基于以上假设,采用标准 k-ε 湍流模型,确定具体控制方程,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial \boldsymbol{\mu}_x}{\partial x}+\frac{\partial \boldsymbol{\mu}_y}{\partial y}+\frac{\partial \boldsymbol{\mu}_z}{\partial z}=0. \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{\mu}_x$ 为 x 方向的分量,m/s;$\boldsymbol{\mu}_y$ 为 y 方向的分量,m/s;$\boldsymbol{\mu}_z$ 为 z 方向的分量,m/s. 由于假设流体为不可压缩流体,密度 ρ 恒定,因此$\frac{\partial \rho}{\partial t}=0$.

动量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \boldsymbol{u}_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \boldsymbol{u}_i \boldsymbol{u}_j)=-\frac{\partial \boldsymbol{p}}{\partial x_j}+\frac{\partial \boldsymbol{r}_{ij}}{\partial x_j}+\boldsymbol{\varphi}_{g_i}+\boldsymbol{F}_i, \tag{2}$$

$$\boldsymbol{\tau}_{ij}=\boldsymbol{\mu}\left[\frac{\partial \boldsymbol{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial \boldsymbol{u}_j}{\partial x_i}\right]-\frac{2}{3}\boldsymbol{\mu}\frac{\partial \boldsymbol{u}_i}{\partial x_i}\delta_{ij}. \tag{3}$$

式中,$\boldsymbol{\tau}_{ij}$黏性力张量,Pa;$\boldsymbol{\mu}$ 黏度,Pa·s;$\boldsymbol{p}$ 静压,Pa;$\boldsymbol{\varphi}_{g_i}$为 i 方向的体积力,kg/s^2 m^2;$\boldsymbol{F}_i$ 由热源,污染源等引起的源项;$\boldsymbol{\delta}_{ij}$指两个速度分量,当 $i=j$ 时取 1,否则取 0. 由于假设流体为不可压缩流体,密度 ρ 为常数,且流动为稳态流动,因此时间导数项$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \boldsymbol{u}_i)$可忽略;源项 $\boldsymbol{F}_i$ 主要关注内部热源,忽略外部热源(如空气渗透及门热负荷)的影响.

能量守恒方程为:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \boldsymbol{u}_i h)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[(k+k_i)\frac{\partial T}{\partial x_i}\right]+S_h. \tag{4}$$

式中:k 为导热率,W/(m·K);k_i 指湍流引起的导热率,W/(m·K);T 为温度,K;h 为比晗,J/kg;S_h 是体积热源,J. 由于假设流动为稳态流动,忽略瞬态项$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}$;由于密度 ρ 为常数,能量方程中的密度项可简化;设备外部环境温度保持稳定,无需考虑设备与外界之间的复杂热交换,因此 S_h 仅考虑内部热源的影响.

1.3 边界条件与初始值

设备围护结构采用第三类边界条件,外部温度为 25 ℃,地面和顶部视为绝热壁面,其余壁面传热系数取值 2.1 W/(m^2·K). 红细胞冷库的初始储存量为 40%,冷风机送风温度为 0 ℃,送风速度为 3 m/s.

1.4 网格划分及独立性研究

本文以平均温度和平均速度为评价参数,基于基础模型进行不同网格数下的温度差异分析及网格独立性测试,图 2 展示了 7 种网格数. 当网格数大于或等于 284.84×10^4 时,冷库的平均温度和平均速度趋于稳定,表明模拟结果精度高、稳定性好,因此可以选择网格数 284.84×10^4 进行本研究的后续工作.

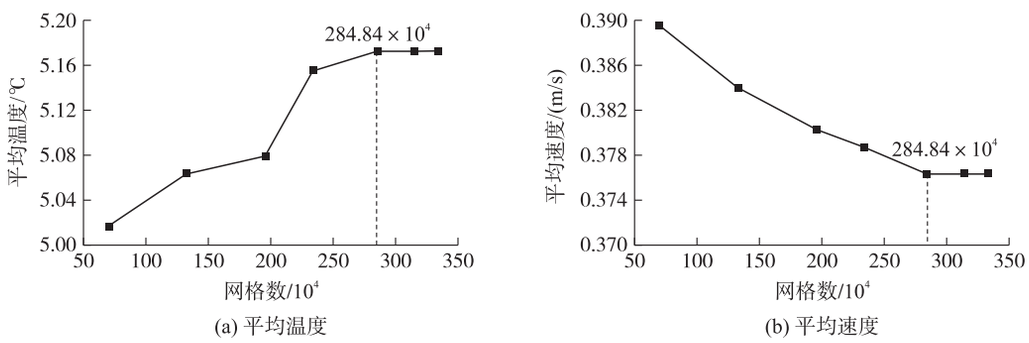


图 2 平均温度和平均速度随网格数量的变化

Fig. 2 Variation of average temperature and average velocity change with the number of grids

1.5　实验验证

本文以血液红细胞冷库为基础模型,在模型假设的基础上进行了数值模拟,获得了冷库内部气流和温度参数的空间分布特性. 基础模型的主要参数如下:体积比表面积为 2.3 m^{-1},变截面比为 1/6∶1,冷风机设置在冷库左侧,内热源位置位于冷库长度的 2/6 L 处. 送风口的送风温度为 0 ℃,送风速度为 3 m/s,外部环境温度为 25 ℃.

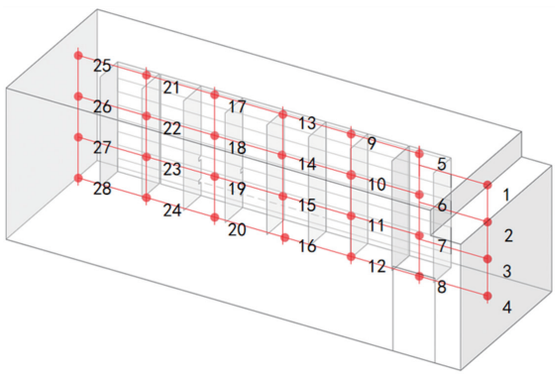


图 3　测点布置示意图

Fig. 3　Schematic diagram of measuring point arrangement

为了验证模型的准确性,本文将模拟结果与实际测量值进行了对比分析. 实测点的布置如图 3 所示,测点选取于货架 A 前方 100 mm 的空间,距墙均为 100 mm,其他测点等距布置,共设置 4×7 个测点. 模拟值与实测值的对比结果见表 1. 分析表明,实测值与模拟值的最大温差为 0.27 ℃,相对误差均小于 8.41%,误差处于合理范围内. 验证结果表明,所建立的模型能够较为准确地反映血液红细胞冷库内部的气流组织,具有良好的预测精度和可靠性.

表 1　温度测点的模拟值与实测值对比

Table 1　Comparison of experimental and simulated values of temperature measurement points

测点	模拟值	实测值	相对误差/%	测点	模拟值	实测值	相对误差/%
1	2.73	2.86	4.55	15	4.35	4.58	5.02
2	2.79	3.01	7.31	16	2.84	3.03	6.27
3	2.81	3.01	6.64	17	4.34	4.57	5.03
4	2.84	2.63	7.98	18	4.87	4.92	1.02
5	2.94	3.21	8.41	19	5.67	5.84	2.91
6	3.31	3.51	5.70	20	5.43	5.51	1.45
7	3.53	3.46	2.02	21	5.19	5.44	4.60
8	3.12	3.23	3.41	22	4.18	4.36	4.13
9	3.29	3.47	5.19	23	4.49	4.26	5.40
10	3.62	3.72	2.69	24	4.77	4.75	0.42
11	3.94	4.12	4.37	25	3.62	3.72	2.69
12	3.61	3.68	1.90	26	6.02	6.28	4.14
13	3.65	3.53	3.40	27	6.52	6.74	3.26
14	3.95	4.05	2.47	28	6.73	6.83	1.46

2　正交优化设计

2.1　选择因素和水平

综合考虑红细胞冷库的体积比表面积(记为 A)、变截面比(记为 B)、冷风机位置(记为 C)、内热源位置(记为 D)、送风速度(记为 E)及送风温度(记为 F)等因素. 其中,体积比表面积对热性能影响显著,合理取值可有效降低冷库内外热量交换. 在初始值 2.3 m^{-1}的基础上,本文选取了 2.1 m^{-1}、2.2 m^{-1}和 2.4 m^{-1}共 3 种体积比表面积值进行探讨. 此外,冷库内部的变截面比设计对优化热性能同样具有重要意义. 基于初始值 1/6∶1 的变截面比,本文新增了 0∶1、2/6∶1 和 3/6∶1 这 3 种方案.

冷风机的位置对气流流动方向和温度分布具有直接影响. 本文在冷风机初始位置设于冷库左侧的基础上,增加了分布在中间和右侧的布局方案. 红细胞冷库的内热源主要包括照明灯、传感器、监控器以及机械臂及全自动装置. 照明灯固定在冷库顶部中间位置,其他内热源在初始位 2/6 L 的基础上,分别调整至 1/6 L、3/6 L 和 4/6 L.

送风温度的变化会直接影响红细胞冷库内部的平均温度及温度分布,送风速度可以改变库内气流的流动形态,进而影响温度分布与制冷效果. 本研究针对送风温度和送风速度分别选取初始值 0 ℃和 3 m/s,其中,送风温度增加选取 0.5 ℃、1 ℃和 1.5 ℃,送风速度选取 2.6 m/s、2.8 m/s 和 3.2 m/s.

2.2 正交试验设计

正交试验通过对代表性水平组合进行排列分析,实现综合水平测试,其表示方法为 $L_n(p^m)$,其中 L 表示正交表,n 为试验数(行数),p 表示每个因素的水平数,m 为因素数(列数). 本研究采用拟水平正交法(将低水平因素转化为虚拟水平以适配标准正交表). 首先,针对几何结构和设备布置,开展 3 因素 4 水平与 1 因素 3 水平的混合水平正交 $L_n(4^3\cdot3^1)$,选用 $L_{25}(4^4)$ 表进行模拟正交,记作正交组 1. 其次,针对几何结构、设备布置及送风工况,进行 5 因素 4 水平与 1 因素 3 水平的混合水平正交 $L_n(4^5\cdot3^1)$,选择 $L_{25}(4^6)$ 表进行模拟,记为正交组 2(见表 2). 同时记录两组模拟中 25 个组合的平均温度 $\bar{T}$,温度极差 R,温度不均匀系数 σ_t 和速度不均匀系数 σ_v 记录.

表 2 正交模拟方案

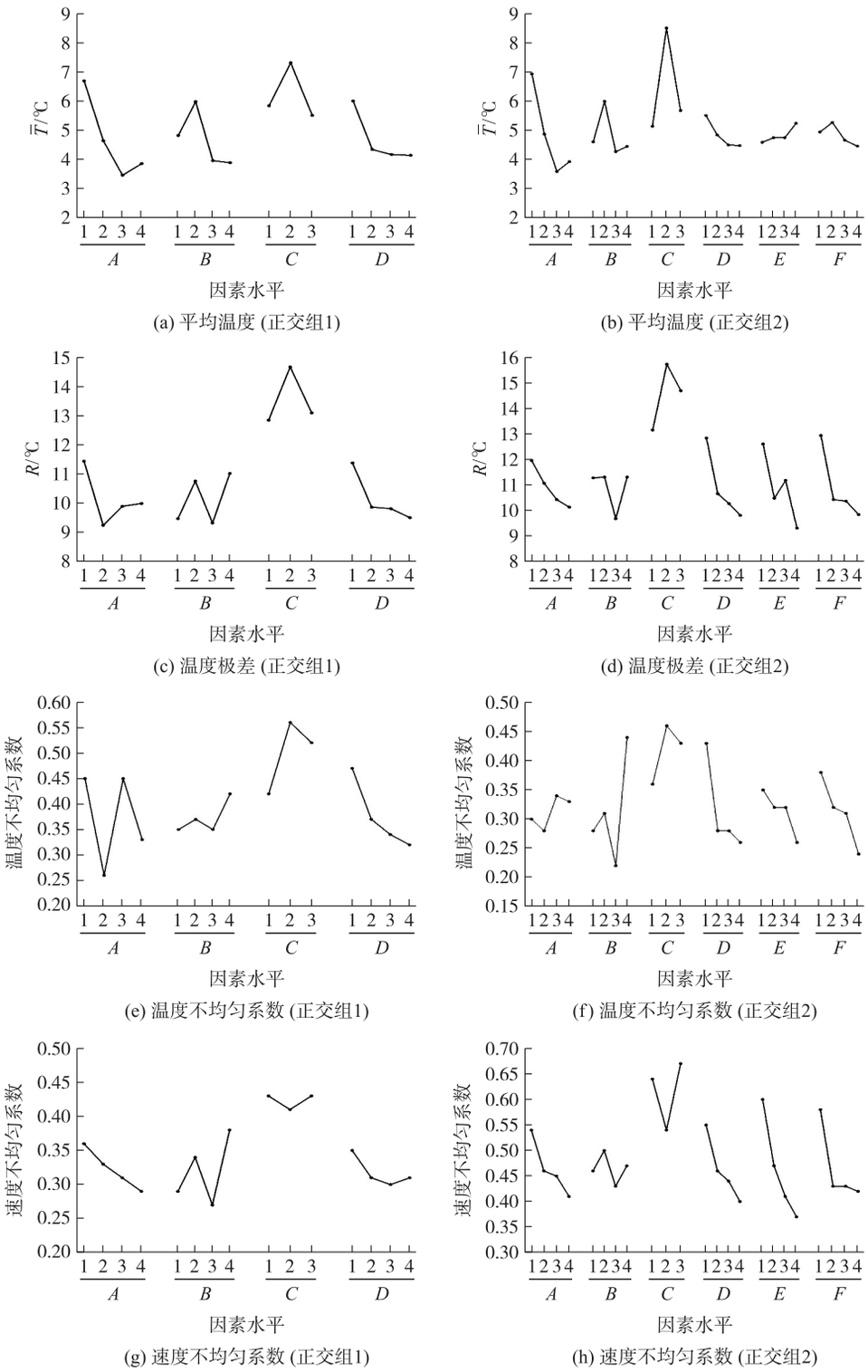
Table 2 Orthogonal simulation plan

正交组 1						模拟方案							
编号	A	B	C	D		编号	A	B	C	D	E	F	模拟方案
1	1	1	1	1	$A_1B_1C_1D_1$	1	1	1	1	1	1	1	$A_1B_1C_1D_1E_1F_1$
2	1	2	3	4	$A_1B_2C_3D_4$	2	1	2	3	4	1	2	$A_1B_2C_3D_4E_1F_2$
3	1	3	1	2	$A_1B_3C_1D_2$	3	1	3	1	2	4	3	$A_1B_3C_1D_2E_4F_3$
4	1	4	2	1	$A_1B_4C_2D_1$	4	1	4	2	1	3	4	$A_1B_4C_2D_1E_3F_4$
5	1	1	3	3	$A_1B_1C_3D_3$	5	1	1	3	3	2	1	$A_1B_1C_3D_3E_2F_1$
6	2	1	2	4	$A_2B_1C_2D_4$	6	2	1	2	4	3	2	$A_2B_1C_2D_4E_3F_2$
7	2	2	2	2	$A_2B_2C_2D_2$	7	2	2	2	2	2	1	$A_2B_2C_2D_2E_2F_1$
8	2	3	1	2	$A_2B_3C_1D_2$	8	2	3	1	2	1	2	$A_2B_3C_1D_2E_1F_2$
9	2	4	1	3	$A_2B_4C_1D_3$	9	2	4	1	3	2	3	$A_2B_4C_1D_3E_2F_3$
10	2	2	3	1	$A_2B_2C_3D_1$	10	2	2	3	1	4	4	$A_2B_2C_3D_1E_4F_4$
11	3	1	2	2	$A_3B_1C_2D_2$	11	3	1	2	2	3	4	$A_3B_1C_2D_2E_3F_4$
12	3	2	1	3	$A_3B_2C_1D_3$	12	3	2	1	3	4	3	$A_3B_2C_1D_3E_4F_3$
13	3	3	3	3	$A_3B_3C_3D_3$	13	3	3	3	3	3	1	$A_3B_3C_3D_3E_3F_1$
14	3	4	3	1	$A_3B_4C_3D_1$	14	3	4	3	1	2	2	$A_3B_4C_3D_1E_2F_2$
15	3	3	2	4	$A_3B_3C_2D_4$	15	3	3	2	4	1	3	$A_3B_3C_2D_4E_1F_3$
16	4	1	3	4	$A_4B_1C_3D_4$	16	4	1	3	4	2	3	$A_4B_1C_3D_4E_2F_3$
17	4	2	1	3	$A_4B_2C_1D_3$	17	4	2	1	3	1	4	$A_4B_2C_1D_3E_1F_4$
18	4	3	2	1	$A_4B_3C_2D_1$	18	4	3	2	1	4	4	$A_4B_3C_2D_1E_4F_4$
19	4	4	3	4	$A_4B_4C_3D_4$	19	4	4	3	4	4	1	$A_4B_4C_3D_4E_4F_1$
20	4	4	1	2	$A_4B_4C_1D_2$	20	4	4	1	2	3	2	$A_4B_4C_1D_2E_3F_2$
21	1	1	2	3	$A_1B_1C_2D_3$	21	1	1	2	3	4	2	$A_1B_1C_2D_3E_4F_2$
22	2	2	2	1	$A_2B_2C_2D_1$	22	2	2	2	1	3	3	$A_2B_2C_2D_1E_3F_3$
23	3	3	1	4	$A_3B_3C_1D_4$	23	3	3	1	4	2	4	$A_3B_3C_1D_4E_2F_4$
24	4	4	3	2	$A_4B_4C_3D_2$	24	4	4	3	2	1	1	$A_4B_4C_3D_2E_1F_1$
25	1	1	2	1	$A_1B_1C_2D_1$	25	1	1	2	1	1	1	$A_1B_1C_2D_1E_1F_1$

3 结果对比分析

根据正交模拟结果,图 4 显示了不同因素水平下目标参数的平均值,即 j 因素下,i 水平的所有指标之和的平均值. 结果表明,体积比表面积对温度场和速度场有显著影响. 2 水平(2.2 m^{-1})、3 水平(2.3 m^{-1})和 4 水平(2.4 m^{-1})的平均温度均在合理范围内,其中 2 水平的温度均匀性最佳,温度极差与温度不均匀系数最低. 加入送风条件后,温度极差随比表面积增大略有降低,水平 2 与水平 4 的温度差异不显著,水平 2 的温度不均匀系数依然最低. 体积比表面积过小导致温度场不均匀,过大会引起温度极差增大且均匀性下降,表明存在最优体积比表面积值. 综合考虑温度场与速度场的优化表现,建议选择 2 水平(2.2 m^{-1})作为最佳选择,变截面比对红细胞冷库温度场和速度场的影响较小. 水平 1(0∶1)、水平 3(2/6∶1)和水平 4(4/6∶1)的平均温度均在合理范围内,但送风条件改变后,平均温度显著上升. 水平 1 和水平 3 的温度极差和温度不均匀系数较低,表明简单结构和适中变截面能实现较好的温度均匀性. 水平 3 的速度场表现优于水平 1,因其有效引导气流均匀分布. 综合考虑,建议选择水平 3(2/6∶1)为最优值.

冷风机位置对红细胞冷库的温度场和速度场有不同影响. 研究表明,水平 1(左边)和水平 3(右边)的



(a) 平均温度 (正交组1)　(b) 平均温度 (正交组2)

(c) 温度极差 (正交组1)　(d) 温度极差 (正交组2)

(e) 温度不均匀系数 (正交组1)　(f) 温度不均匀系数 (正交组2)

(g) 速度不均匀系数 (正交组1)　(h) 速度不均匀系数 (正交组2)

图 4　不同因素水平下目标参数的平均值

Fig. 4　Average value of target parameters at different factor levels

平均温度均在合理范围内,其中水平 1 的热性能最佳,因冷风机利用较长气流路径均匀分布冷空气. 而水平 2(中间)具有最小的速度不均匀系数,因其能均匀扩散气流,减少滞留现象. 综合考虑温度和速度场,建议选择水平 1(左边)作为最佳位置,内热源位置对红细胞冷库的温度场和速度场有显著影响. 研究表明,内热源位置与温度和速度指标之间存在线性关系. 当内热源从水平 1(1/6L)逐渐移至水平 4(4/6L)时,温度场和速度场性能显著提升. 这是因为内热源远离冷库前端时,减少了对冷空气流动的干扰,优化了气流循环和热量分布. 因此,建议选择水平 4(4/6L)作为最佳内热源位置.

送风温度对红细胞冷库的温度场和速度场有显著影响. 当送风温度较高时,库内平均温度呈线性上升. 较低的送风温度会导致冷空气沉积在底部,形成较大的温度梯度. 而送风温度提高至水平 4(1.5 ℃)时,虽然平均温度升高,但冷空气更均匀扩散,改善了温度场的均匀性,并减少了过冷或过热现象. 此外,较高的送风温度有助于平稳空气对流,减少气流滞留,降低速度不均匀系数. 因此,综合考虑温度均匀性和储存要求,建议选择水平 3(1 ℃)作为最佳送风温度;送风速度对红细胞冷库的温度场有较大影响,但对速度场均匀性影响较小. 随着送风速度增加,空气对流和混合效果增强,冷空气分布更均匀,降低了平均温度、温度极差和温度不均匀系数,提升了冷库热性能. 较高的送风速度有效带走局部热量,减少温度梯度,气流分布更均匀,尤其在水平 4(3.2 m/s)时,速度场表现最佳,气流更加平稳均匀. 因此,建议选择水平 4(3.2 m/s)作为最佳水平.

因此,红细胞冷库的 6 个因素的最佳水平组合为 $A_2B_3C_1D_4E_3F_4$,对应于比表面积为 2.2 m^{-1},变截面高度为 2/6 H,冷风机位置为左边,内热源位置为 4/6 L,送风温度为 1 ℃. 送风速度为 3.2 m/s.

4 最优组合工况结果分析

4.1 热性能分析

血液红细胞冷库的 6 个因素的最佳水平组合为 $A_2B_3C_1D_4E_3F_4$,如表 3 所示,优化后平均温度降低 1.01 ℃,温度极差降低 1.39 ℃,温度不均匀系数 σ_t 降低 57.14%,速度不均匀系数 σ_v 降低 16.22%. 这表明优化后的几何结构、设备布局及送风工况显著改善了冷库的温度均匀性与空气流动效率.

表 3 优化前后指标值对比

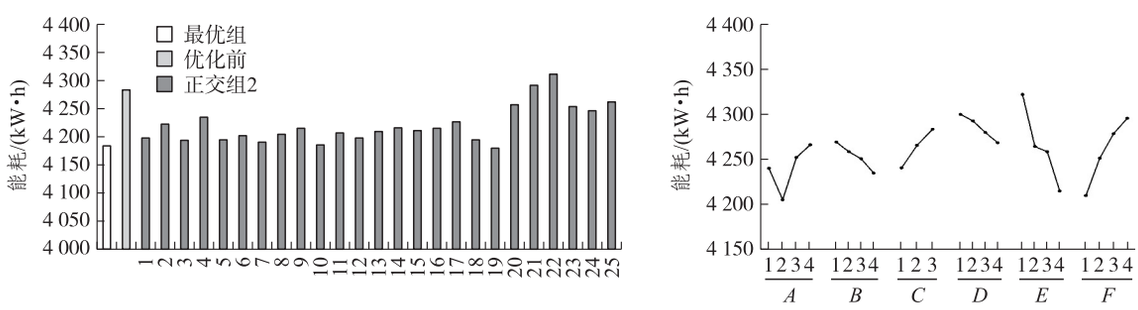
Table 3 Comparison of index values before and after optimization

目标参数	$\bar{T}$/℃	R/℃	σ_t	σ_v
优化前	5.02	5.95	0.07	0.37
优化组	4.01	4.56	0.03	0.31

4.2 能耗分析

本研究测试了红细胞冷库最优组,优化前和正交组 2 的 24 h 能耗,如图 5(a)所示,最优组与正交组 2 的能耗差异较小,且与优化前相比,最优组的能耗降低了 2.31%. 如图 5(b)进一步展示了不同因素水平下 24 h 能耗的平均值. 研究表明,几何结构、设备布局和送风工况均对能耗产生影响,其中送风工况的影响最大,几何结构和设备布局对能耗的影响较小. 送风温度和送风速度是主要影响因素:低送风温度增加制冷负荷,提升能耗;较高送风速度则增加气流扰动,导致能耗增加,而低送风速度可能导致冷却不均匀,降低效率. 从正交试验方案 19 来看,较高送风温度和较低送风速度组合下的能耗最低. 尽管最优组合的能耗并非最低,但其能耗较低,且通过牺牲少量能耗,能够有效提升冷库的热性能.

选取优化前后红细胞冷库的模拟结果,截面云图 $X=a$ 和 $X=b$ 如图 6 所示,很明显,通过优化消除了 $X=a$ 和 $X=b$ 截面角落位置出现的局部热点. 此外,在这两个横截面上的温度均匀性也得到了增强. 横截面底部的均匀性变得更好,说明整个红细胞冷库的温度均匀性得到了显著提高. 该研究消除了局部热点,显著提高了红细胞冷库内部的温度均匀性,因此,该优化方案可为红细胞冷库的改进提供参考.



(a) 最优组、优化前和正交组2的24 h能耗　　(b) 不同因素水平下24 h能耗的平均值

图 5 24 h 平均能耗

Fig. 5 Average value of 24 h power consumption

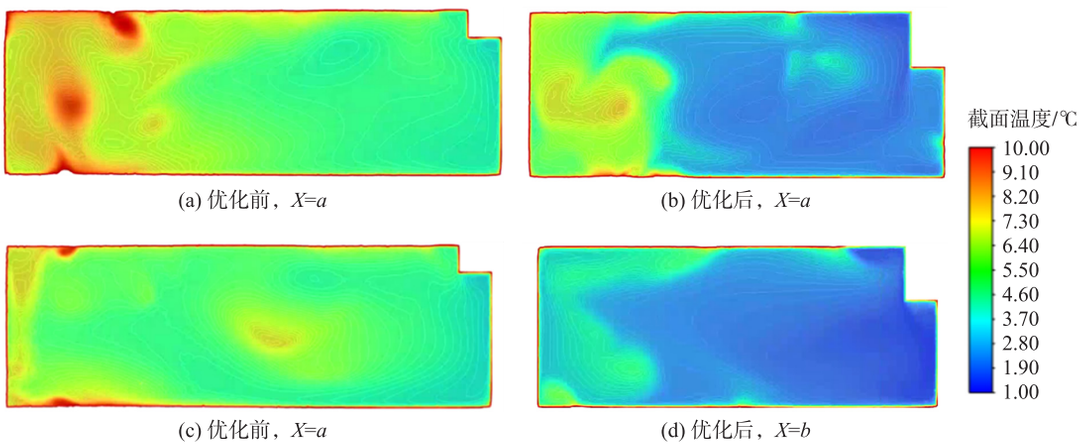


图 6　优化前后截面温度分布云图对比

Fig. 6　Comparison of temperature distribution cloud maps at cross sections before and after optimization

5　结论

(1)本研究系统探讨了红细胞冷库在不同送风条件下的几何结构与设备布局优化问题. 研究表明,几何结构与设备布局应与送风条件相匹配,以提升整体热性能. 通过分析影响温度场与速度场的关键因素,确定其优先级为:体积比表面积>内热源位置>冷风机位置>送风温度>送风速度>变截面比,为优化设计提供了理论依据.

(2)研究发现,当体积比表面积为 2.2 m^{-1}时,冷库的热性能最佳,同时,变截面设计(2/6∶1)能够引导均匀气流,减少局部气流停滞,提高空气流动效率. 冷风机布置在左侧可显著改善温度均匀性,而内热源位于 4/6L 位置时可优化气流组织,使温度分布更加均匀,减少气流不均现象.

(3)优化后,冷库平均温度降低 1.01 ℃,温度极差减少 1.39 ℃,温度不均匀系数下降 57.14%,速度不均匀系数下降 16.22%,能耗降低 2.31%. 该成果为医疗冷链系统的设计与运行提供了科学依据及优化方法,有效提升了冷库的温控性能与能源利用效率.

[参考文献](References)

[1] Ehmann S, Haylock M, Heynold A K. Offline volunteering during COVID-19: A survey experiment with prior and prospective blood donors[J]. Journal of the Economic Science Association, 2024, 10: 415-427.

[2] 潘秀珍,唐家琪,李先富,等. 母婴配对血清中 TT 病毒的分子鉴定[J]. 南京师大学报(自然科学版),2002,25(3):90-93.

[3] Livshits L, Barshtein G, Arbell D, et al. Do we store packed red blood cells under "quasi-diabetic" conditions? [J]. Biomolecules, 2021, 11(7): 992.

[4] D'Alessandro A, Zimring J C, Busch M. Chronological storage age and metabolic age of stored red blood cells: Are they the same? [J]. Transfusion, 2019, 59(5): 1620-1623.

[5] 石伟,李彩云,陈玉清.蜂毒肽 Melittin 对小鼠红细胞溶血效应及影响机制分析[J]. 南京师大学报(自然科学版),2015,38(2):86-92.

[6] Asokan D, Sunny J, Pillai V M, et al. Blockchain technology: A troubleshooter for blood cold chains[J]. Journal of Global Operations and Strategic Sourcing, 2022, 15(3): 316-344.

[7] Abbasi B, Babaei T, Hosseinifard Z, et al. Predicting solutions of large-scale optimization problems via machine learning: A case study in blood supply chain management[J]. Computers & Operations Research, 2020, 119: 104941.

[8] Imamoglu G, Topcu Y I, Aydin N. A systematic literature review of the blood supply chain through bibliometric analysis and taxonomy[J]. Systems, 2023, 11(3): 124.

[9] Samani M R G, Hosseini-Motlagh S M. Collaborative activities for matching supply and demand in the platelet network[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 231: 120629.

[10] Karamipour M, Kermani M A M A. Presenting a mathematical model of blood supply chain considering the efficiency of

collection centers and development of metaheuristic algorithm in M/M/C/K queuing system[J]. Cerebral Cortex,2024,34(2):bhae012.

[11] Abdolazimi O,Pishvaee M S,Shafiee M,et al. Blood supply chain configuration and optimization under the COVID-19 using benders decomposition based heuristic algorithm[J]. International Journal of Production Research,2025,63(2):571-593.

[12] Esmaeili S,Bashiri M,Amiri A. An exact criterion space search algorithm for a bi-objective blood collection problem[J]. European Journal of Operational Research,2023,311(1):210-232.

[13] Rekabi S,Garjan H S,Goodarzian F,et al. Designing a responsive-sustainable-resilient blood supply chain network considering congestion by linear regression method[J]. Expert Systems with Applications,2024,245:122976.

[14] 何燕芳,李尧,张月萍,等. 基于智能仓储技术的血液冷藏系统的应用实践[J]. 检验医学与临床,2021,18(10):1501-1502.

[15] 田甜,李福良,张雯,等. 冷风机不同布置位置对冷库气流组织影响的模拟及实验研究[J]. 冷藏技术,2019,42(1):18-23.

[16] Gong Y F,Cao Y,Zhang X R. Forced-air precooling of apples:Airflow distribution and precooling effectiveness in relation to the gap width between tray edge and box wall[J]. Postharvest Biology and Technology,2021,177:111523.

[17] Bishnoi R,Aharwal K R. Experimental evaluation of cooling characteristic,airflow distribution and mass transfer in a cold store[J]. Journal of Food Process Engineering,2021,44(2):e13609.

[18] Bishnoi R,Aharwal K R. Experimental investigation of air flow field and cooling heterogeneity in a refrigerated room[J]. Engineering Science and Technology,an International Journal-Jestech,2020,23(6):1434-1443.

[19] 李艺哲,谢晶. 大型冷库内温度场的数值模拟与优化[J]. 食品与机械,2017,33(6):139-142,179.

[20] Budiyanto M A,Imamudien O,Lubis A,et al. Air flow distribution and cooling performance on modular cold storage for fishery commodity[J]. Energy Reports,2023,9:162-171.

[21] Sajadiye S M,Zolfaghari M. Simulation of in-line versus staggered arrays of vented pallet boxes for assessing cooling performance of orange in cool storage[J]. Applied Thermal Engineering,2017,115:337-349.

[22] Chen M,Zhao J,Zhang Z B,et al. Influencing factors of thermal performance of small-size vaccine cold storage:An experiment-based parametric study[J]. Journal of Energy Storage,2022,51:104496.

[23] 王雅博,尹玉成,刘兴华,等. 冷库空气幕气流组织优化及冷风渗透实验[J]. 制冷学报,2023,44(2):137-143.

[24] 梁政.冷库空气渗透和空气幕性能的数值模拟研究[D]. 天津:天津商业大学,2021.

[责任编辑:陈　庆]