

真空绝热板厚度对风冷冰箱影响的模拟研究

迟丽华, 张耀吉, 黄东

(西安交通大学, 西安 710049)

(Tel:13088999293, Email: d_huang@mail.xjtu.edu.cn)

摘要: 本文主要从性能及经济性两方面对真空绝热板厚度对冰箱冷藏室和冷冻室箱温及漏热量的影响进行了分析。对侧壁分别添加 0、10、15、20mm 厚真空绝热板的冰箱进行了数值模拟, 发现真空绝热板的厚度越大: 冷藏室和冷冻室的平均温度越低, 且降低趋势变平缓; 箱体侧外壁的平均热流密度越小, 其他外壁的平均热流密度几乎没有变化; 间室总热负荷逐渐减小, 且减小趋势变平缓, 侧壁热负荷占总负荷的比例减小。对真空绝热板厚度进行了经济性分析, 结果表明真空绝热板厚度为 15mm 时经济性最佳。通过对真空绝热板厚度的经济性分析, 为冰箱真空绝热板最佳厚度的确定提供了参考。

关键词: 真空绝热板; 厚度; 平均温度; 热负荷; 经济性分析

Simulation Study on the Influence of Vacuum Insulation Panel Thickness on Air-cooled Refrigerator

Chi Lihua Zhang Yaoji Huang Dong

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

Abstract In this paper, the influence of the thickness of vacuum insulation panels on the temperature and heat leakage of refrigerators is analyzed from two aspects of performance and economy. The numerical simulation of the refrigerator with 0, 10, 15 and 20mm thick vacuum insulation panels on the side wall was carried out in this paper. The results showed that the average temperature in the refrigerating and freezer compartments became lower with the increase in the thickness of vacuum insulation panels and the temperature decreased gradually slowly. The average heat flux density in the cabinet sidewalls and the total heat load decreased with the increase in the thickness of vacuum insulation panels. Finally, the ratio of heat load at the side wall accounts for the total load is reduced. The economic analysis of the various schemes for adding vacuum insulation panels revealed that when a thickness of 15 mm covers the sides of the refrigerator, the economical efficiency is the best. The economic analysis of the thickness of the vacuum insulation panel provides a reference for the determine the best thickness of the vacuum insulation panel of the refrigerator.

Keywords Vacuum insulation panel; thickness; average temperature; heat load; economic analysis

0 前言

VIP 板是一种超绝热的保温材料, 由芯材, 表面隔膜和吸气剂构成^[1], 其导热系数约为传统的聚氨酯泡沫的 1/10^[2], 绝热性能优异; 厚度仅为普通材料的 1/7^[3], 对提高空间利用率方面有着巨大的发展潜力。目前 VIP 板已广泛应用在航天、医用、食品等各个领域。

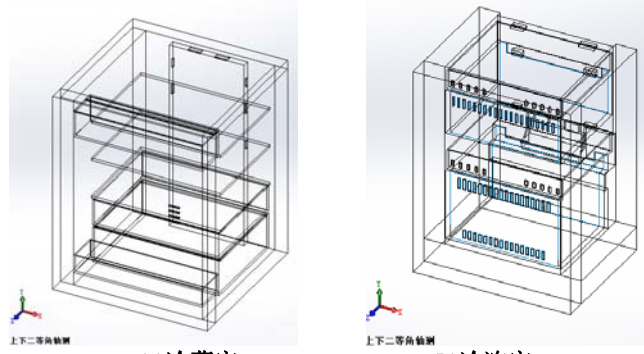
江守利等人^[4]数值研究发现, 与聚氨酯泡沫相比, 导热系数为 2.5mW/(m.K) 的 VIP 板可使经箱壁式冷凝器渗入箱内的热量减少 57.8%。秦新娟等人^[5]提出 VIP 板因导热系数低可减薄围护结构厚度, 增加箱内存储空间, 降低耗电量。何万国等人通过模拟计算发现随着 VIP 板的厚度增加, 节能效果逐渐提高, 但趋势逐渐平缓^[6]。谭维等人发现产品能耗随 VIP 板覆盖面积的增加而降低, 耗电量最多可降低 15%^[7]。戴书坚实验研究发现, 当 VIP 板厚度相同时, 发泡层厚度越薄, 加入 VIP 板的节能效果越明显^[8]。陈士发等人数值研究发现, 可将 VIP 板加装在漏热密度较大的区域, 以保证箱体保温性能最优化^[9]。

本文主要研究真空绝热板厚度对冷藏室和冷冻室箱温以及漏热量的影响, 然后三种厚度进行经济性分析, 得出较优的方案。

1 漏热模型建立

1.1 几何模型

冷藏室几何模型如图 1 (a) 所示。冷藏室总宽度 (X 方向) 为 600mm, 左右壁面保温层厚 50mm; 总高度 (Y 方向) 为 775mm, 顶部保温层厚 35mm, 底面与变温室相邻不设厚度; 总深度 (Z 方向) 为 590mm, 门体保温层厚 60mm, 后背板不设厚度。冷冻室几何模型如图 1 (b) 所示。冷冻室总宽度 (X 方向) 为 600mm, 左右壁面保温层厚 80mm; 总高度 (Y 方向) 为 790mm, 底部保温层厚 90mm, 顶部与变温室相邻不设厚度; 总深度 (Z 方向) 为 480mm, 门体保温层厚 80mm, 后背板不设厚度。



(a)冷藏室 (b)冷冻室
图 1 冷藏室和冷冻室箱体三维几何模型

1.2 数学模型

箱内空气流动及传热特性满足质量守恒方程、动量守恒方程以及能量守恒方程。实际冰箱运行过程属于动态过程, 但动态模拟对计算工具要求很高, 且实际情况比模拟模型要复杂, 计算结果很难具有较高准确性, 因此将问题简化为稳态问题进行研究, 各参数均与时间项无关。

对冰箱进行不停机实验, 测量该过程中各温度测点的值以及冰箱冷藏室和冷冻室各送风口送风速度, 为稳态模拟提供边界条件并验证模型准确性。冷藏室和冷冻室箱内空气视为不可压缩, 在固体壁面无速度滑移; 忽略箱内壁面间辐射换热和门封漏热; 除冰箱后背板视为绝热壁面外, 其余与外界环境接触的面均为恒温壁面, 其温度由不停机实验获得。假设送风速度均匀且出风温度与速度恒定不变, 数据由不停机实验获得。压力是基本的求解变量, 离散微分方程组采用控制容积积分法, 湍流模型选取标准 $k-\varepsilon$ 模型, 对压力与速度的耦合采用的是 SIMPLEC 算法, 压力离散采用的为标准格式, 动量离散采用的为二阶迎风格式。

1.3 模型验证

表 1 冷藏室箱内部分温度测点实验值与模拟值对比

	R1	R2	R3	果蔬	保鲜	R 感温包
实验值/ $^{\circ}\text{C}$	-18.9	-17.3	-17.1	-15.7	-14.1	-16.2
模拟值/ $^{\circ}\text{C}$	-19.9	-18.5	-17.5	-15.0	-14.8	-17.4
误差绝对值/ $^{\circ}\text{C}$	1.0	1.2	0.4	-0.7	0.7	1.2

表 2 冷冻室箱内部分温度测点实验值与模拟值对比

	F1	F2	F3	F4	F5	F 感温包
实验值/ $^{\circ}\text{C}$	-36.0	-36.0	-35.1	-33.9	-34.5	-35.6
模拟值/ $^{\circ}\text{C}$	-35.6	-35.1	-36.1	-34.3	-35.2	-36.9
误差绝对值/ $^{\circ}\text{C}$	-0.4	-0.9	1.0	0.4	0.7	1.3

通过各测点温度对比发现, 冷藏室模拟值与实验值最大差值为 1.2°C , 冷冻室模拟值与实验值最大差值为 1.3°C , 二者箱内外温差基本一致证明漏热模型准确性较高。

2 模拟结果分析

保证冰箱侧面保温层总厚度不变, 在冰箱两侧聚氨酯材料外添加厚度分别为 0、10、15、20mm 的真空绝热板。模拟时, 上述方案均采用相同的假设、初始条件、边界条件及相同的求解方法。

2.1 对冷藏的影响

1) 冷藏室温度对比

表 3 不同厚度真空绝热板冷藏室箱内平均温度

真空绝热板厚度/mm	0	10	15	20
冷藏室箱内平均温度/°C	-16.05	-17.45	-17.44	-17.62
降温幅度/°C	0	1.40	1.39	1.57

由表 3，冷藏风门打开期间，随真空绝热板厚度的增加，冷藏室平均温度降低，且降低趋势变平缓。分别取冷藏室侧壁、顶部、门体外壁中点和内壁中点的连线，各连线温度随壁面变化如图 2 所示。

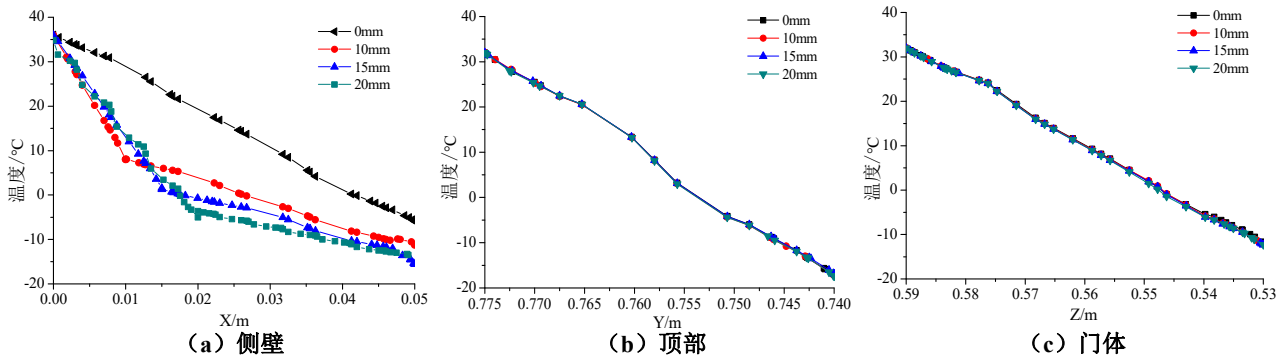


图 2 冷藏室各壁面保温层由外至内温度变化

由图 2，不管真空绝热板厚度是多少，从冷藏室各壁面外壁几何中心到内壁几何中心温度都是降低的。真空绝热板厚度越大，冷藏室侧壁温度越低，且降低趋势变平缓。另外，添加真空绝热板的三种情况，冷藏侧壁温度在其各自真空绝热板和聚氨酯材料连接处斜率改变。冷藏室侧面的真空绝热板厚度对顶部和门体保温层的温度变化几乎没有影响。

2) 冷藏室热流密度对比

表 4 不同厚度真空绝热板冷藏室热负荷计算

真空绝热板厚度/mm	0	10	15	20
冷藏侧外壁平均热流密度/ $W \cdot m^{-2}$	17.35	9.97	8.40	7.26
冷藏门外壁平均热流密度/ $W \cdot m^{-2}$	12.24	11.52	12.42	12.46
冷藏顶外壁平均热流密度/ $W \cdot m^{-2}$	21.94	23.33	22.46	22.48
冷藏底部平均热流密度/ $W \cdot m^{-2}$	-9.85	-10.10	-9.68	-8.82
冷藏室外部负荷(除底)/W	29.32	22.73	21.41	20.39
热负荷/W	25.84	19.16	17.98	17.27
侧壁热负荷占比	61.41%	47.59%	42.72%	38.45%

由表 4，冷藏风门打开期间，随真空绝热板厚度的增加：冷藏室侧外壁的平均热流密度减小，而门外壁、顶外壁和底部的平均热流密度几乎没有变化；冷藏室总热负荷减小，侧壁热负荷占总负荷的比例减小。

2.2 对冷冻的影响

1) 冷冻箱温对比

表 5 不同厚度真空绝热板冷冻室平均温度

真空绝热板厚度/mm	0	10	15	20
冷冻平均温度/°C	-35.79	-36.10	-36.19	-36.24
降温幅度/°C	0	0.31	0.40	0.45

由表 5，冷冻运行期间，随真空绝热板厚度的增加，冷冻室平均温度降低，且下降速度逐渐减小。取冷冻室侧壁、底部、门体的外壁中点和内壁中点连线，各连线温度随壁面的变化如图 3 所示。

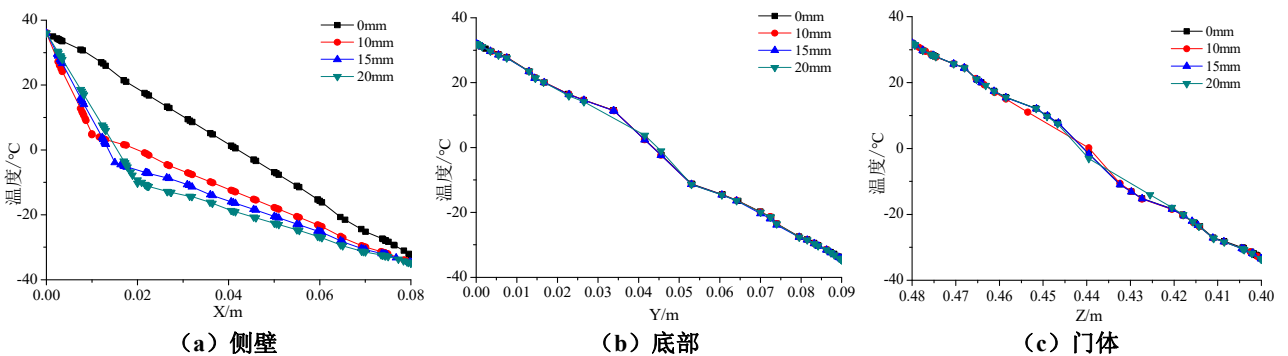


图 3 冷冻室各壁面保温层由外至内温度变化

由图 3，不管真空绝热板厚度是多少，从冷冻室各壁面外壁几何中心到内壁几何中心温度都是降低的。真空绝热板厚度越大，冷冻室侧壁温度越低，且降低趋势变平缓。另外，添加真空绝热板的三种情况，冷冻侧壁温度在其各自真空绝热板和聚氨酯材料连接处斜率改变。冷冻室侧面的真空绝热板厚度对底部和门体保温层的温度变化几乎没有影响。

2) 热流密度对比

表 6 不同厚度真空绝热板冷冻室热负荷计算

真空绝热板厚度/mm	0	10	15	20
冷冻侧外壁平均热流密度/W·m ⁻²	14.58	10.04	8.83	7.90
冷冻门外壁平均热流密度/W·m ⁻²	13.17	13.36	13.37	13.39
冷冻底外壁平均热流密度/W·m ⁻²	10.16	10.32	10.33	10.38
冷冻顶部平均热流密度/W·m ⁻²	78.51	79.46	78.54	79.74
冷冻室外部负荷(除顶)/W	20.23	16.92	16.01	15.32
热负荷/W	42.84	39.80	38.63	38.29
侧壁热负荷占比	31.12%	23.07%	20.90%	18.87%

由表 6，冷冻运行期间，随着真空绝热板厚度的增加：冷冻室侧外壁的平均热流密度减小，而门外壁、底外壁和顶部的热流密度几乎相等；冷冻室总热负荷减小，侧壁热负荷占总负荷的比例下降。

3 经济性分析

3.1 成本和收益

经查阅，聚氨酯材料成本为 530.4 元·m⁻³；10、15、20mm 厚真空绝热板成本分别为 45、75、125 元·m⁻²。由于改进是针对冰箱侧壁进行的，故只对冷藏室和冷冻室侧壁的成本变化进行计算，如表 7 所示。

表 7 不同厚度冷藏室和冷冻室侧壁的总投资 I 计算

真空绝热板厚度/mm	0	10	15	20
聚氨酯材料成本/元	22.28	18.72	16.93	15.15
真空绝热板成本/元	0	30.249	50.415	84.025
总成本 I/元	22.28	48.97	67.35	99.18

本文采用的是稳态模拟，可用实验数据来估算冰箱节能情况。实验得冷藏室和冷冻室运行时间分别占周期时长的 54.99%和 73.73%，则可计算各个方案的年经济效益，如表 8 所示。

表 8 不同厚度冷藏室和冷冻室年经济效益 P 计算

真空绝热板厚度/mm	0	10	15	20
冷藏室日耗电量/kW·h·24h ⁻¹	0.39	0.30	0.28	0.27
冷冻室日耗电量/kW·h·24h ⁻¹	0.36	0.30	0.28	0.27
节省的日耗电量/kW·h·24h ⁻¹	0.00	0.15	0.18	0.20
日节约电价/元	0.00	0.08	0.10	0.11
年经济效益 P/元	0.00	29.22	35.95	41.10

3.2 四个评价指标

目前经济性分析主要采用：投资收益率、静态投资回收期、财务净现值、动态投资回收期^[10]四个参数。

表 9 不同厚度冷藏室和冷冻室投资收益率 R 计算

真空绝热板厚度/mm	0	10	15	20
投资收益率 R	2.38%	47.13%	42.41%	33.45%
静态投资回收期/年	42.04	2.12	2.36	2.99
财务净现值 FNPI/元	-21.17	226.46	274.57	295.68
动态投资回收期/年	--	2.31	2.58	3.33

国家发改委规定，能源类行业设备收益率不得低于 9%。由表 9，几种方案的投资收益率均大于 9%。随真空绝热板厚度的增加：投资收益率减小，财务净现值增加，静态和动态投资回收期均增加。

3.3 多目标优化

采用线性加权和法对真空绝热板厚度进行经济性分析。对于以上四个指标，经查阅资料后^[11]，确定投资收益率、静态投资回收期、财务净现值、动态投资回收期的权重分别为 0.3、-0.1、0.4、-0.2。将各比值求和后得到三种厚度真空绝热板线性加权和分别为 0.40、0.42、0.31，可见真空绝热板厚度为 15mm 时经济性最佳。

表 10 不同厚度真空绝热板线性加权和对比

真空绝热板厚度/mm	10	15	20
投资收益率比值	1.00	0.90	0.71
静态投资回收期比值	1.00	1.11	1.41
财务净现值比值	1.00	1.21	1.31
动态投资回收期比值	1.00	1.12	1.44
线性加权和	0.40	0.42	0.31

4 结论

本文对侧壁添加 0、10、15、20mm 厚真空绝热板的冰箱进行了数值模拟，由模拟结果可知：

- 1) 随着真空绝热板厚度的增加，冷藏室和冷冻室的平均温度越低，且降低趋势变平缓。
- 2) 随着真空绝热板厚度的增加，冷藏室和冷冻室侧外壁的平均热流密度越来越小，其他外壁面的平均热流密度几乎没有变化。
- 3) 随着真空绝热板厚度的增加，冷藏室和冷冻室总热负荷逐渐减小，且减小的幅度趋于平缓，侧壁热负荷占总负荷的比例减小。
- 4) 对真空绝热板厚度进行了经济性分析，结果表明真空绝热板厚度为 15mm 时经济性最佳。
通过对真空绝热板厚度的经济性分析，为冰箱真空绝热板最佳厚度的确定提供了参考。

参考文献

- [1] Chen Z, Chen ZF, Qiu JL, et al. Vacuum Insulation Panel for Green Building[J]. Applied Mechanics and Materials. 2011, (77-78): 607-611.
- [2] 黄熠. 真空绝热板及其在冰箱上的应用[J]. 制冷技术, 2011, 31(1): 38-42.
- [3] Kollie T G, McElroy D L, Fine HA, et al. A Review of Vacuum Insulation Research and Development in the Building Materials[D]. Group of the Oak Ridge National Laboratory, 1991.
- [4] 江守利, 程文龙, 赵锐, 等. 对箱壁式冰箱使用真空隔热板的分析[J]. 制冷学报, 2007, 28(1): 54-58.
- [5] 秦新娟, 叶娟, 叶冬梅, 等. 真空绝热板在冰箱上的应用浅析[J]. 家电科技, 2016, (8): 55-57.
- [6] 何万国, 何之栩. 真空隔热板对冰箱运行特性影响的数值分析[J]. 流体机械, 2012, 40(7): 64-66.
- [7] 谭维, 杨祖华, 游飞越, 等. 真空绝热板在直冷冰箱冷冻室部位的应用研究[J]. 家电科技, 2006, (5): 49-50.
- [8] 戴书坚. 真空绝热板材料在节能冰箱上的实际应用[J]. 家电科技, 2011, (6): 72-73.
- [9] 陈士发, 韩雷, 文坚, 等. 应用CAE技术评价真空绝热板对冰箱能效的改善[C]. //2011年中国家用电器技术大会论文集, 2011: 84-88.
- [10] 包涛, 董玉军, 周翔, 等. 热泵系统的经济性分析[J]. 制冷, 2004, 02: 83-86.
- [11] 王盛夏. 企业安全投资决策的经济学研究及其系统的开发[D]. 中南大学, 2011.