

# 有限元法在冰箱箱体设计中的应用

孔冬<sup>1</sup>, 许锦潮<sup>1</sup>, 姚小虎<sup>2</sup>, 郭刚<sup>1</sup>, 游飞越<sup>1</sup>

1. 海信容声(广东)冰箱有限公司, 广东顺德, 528303

2. 华南理工大学土木与交通学院, 广东广州, 510641

**摘要:** 由于发泡过程冷却、制冷时内外温差、箱体承重等原因, 冰箱箱体不可避免地出现变形, 会不同程度的影响冰箱外观、装配、保温、保鲜等诸多方面, 因此冰箱箱体变形程度是关乎冰箱整机性能的重要因素之一, 在设计 and 生产过程中必须予以重视。本文运用有限元分析方法对冰箱箱体进行了热力耦合分析, 研究了箱体变形模式和机理, 并就箱体层条设计展开了讨论, 可以为设计人员提供了设计依据。

**关键词:** 冰箱箱体; 变形; 有限元; 热应力

## 1 引言

冰箱箱体变形一直是困扰冰箱生产家的问题, 由于箱体发泡过程冷却、制冷时内外温差、箱体承重等原因, 使箱体不可避免地发生变形, 严重的箱体变形不仅影响冰箱外观, 更影响冰箱的整机性能。箱体是冰箱的骨架, 冰箱的其他部分都装配在箱体上或放置在箱体内, 箱体的变形首先会影响到如门体的装配、抽屉和搁架的使用; 严重的冰箱箱体和门体还会影响门封条的密封性, 从而影响冰箱的能效和保鲜, 例如在某款节能冰箱的整机热负荷中, 因门封条漏冷导致的热负荷达到三分之一; 箱体变形同时伴随着制冷状态下内胆热应力的积聚, 再加上化学物质对内胆的侵蚀、溶胀作用, 使得内胆很容易出现开裂现象, 大大降低冰箱性能和使用寿命。因此, 针对冰箱箱

体变形的研究, 对抑制冰箱箱体变形、提高冰箱性能具有重要的意义。

有限元分析方法被广泛的应用在冰箱设计中<sup>[1-5]</sup>, 在产品概念设计阶段对产品的结构和传热性能进行仿真, 可以方便观测设计更改对产品性能的影响, 选择最优设计, 不仅能够保证设计产品的质量, 还可以加快产品开发过程, 提高设计成功率。在本文中, 我们使用有限元数值模拟方法对冰箱箱体在实际制冷状态下进行数值分析, 探索箱体变形的模式和机理, 并对模型进行优化, 以找到解决问题的有效方法。

表1 材料参数

材料	杨氏模量	泊松比	热导率	线膨胀系数
内胆	2.6GPa	0.35	$1.75e-7 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	$5e-5 \text{ K}^{-1}$
泡层	5.0MPa	0.30	$2.5e-8 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	$2e-4 \text{ K}^{-1}$
面板	207GPa	0.28	$5.0e-5 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	$1.5e-5 \text{ K}^{-1}$

运行状态后, 开始采集数据, 布置的感温热电偶的测试数值如表3所示, 冷冻室计算结果如表4所示。

由表4可知, 冷冻室的总制冷量包含管板冷冻蒸发器的对流换热制冷量与辐射换热制冷量以及连接管路的对流换热制冷量, 且辐射换热制冷量占总制冷量的百分比为34.2%, 所以辐射换热是冷冻室换热的一个重要部分, 因此在建立冷冻室蒸发器模型时必须慎重考虑冷冻

蒸发器的辐射换热模型。

## 5 结论

本文通过对冷冻室管板蒸发器对流换热模型与辐射换热模型的建立, 较准确的计算了冷冻蒸发器的制冷量, 具有较好的通用性。利用实验对所建立的模型进行验证, 发现辐射换热与对流换热一样, 都是冷冻室蒸发器换热的主要型式。

## 2 有限元建模

不同型号和功能的冰箱, 箱体结构往往差异很大, 例如, 冰箱箱体顶盖和后背板使用的材料可能为, 箱体面板成型工艺、装配方式也有不同, 风冷冰箱的箱体往往具有比较复杂的风道结构等。在本文中, 我们选取了直冷冷藏箱BC-345进行分析, 其箱体主要由HIPS内胆、聚氨酯泡沫隔热层(以下简称泡层)和金属面板组成, 如图1所示。为了简化模型, 我们并未考虑埋藏在泡层中的蒸发器、制冷管路和控制线路等, 尤其是铝板蒸发器由于粘贴在内胆上, 所以在以后的工作中也会继续考虑铝板蒸发器对箱体变形的影响。

在前处理中, 冰箱箱体的HIPS内胆和金属面板使用壳体单元, 泡层划分为结构化的六面体实体单元。使用ABAQUS中的skin命令可以方便、快捷的在泡层表面赋予一层“蒙皮”单元(即HIPS内胆和金属面板的壳体单元), 壳体单元和实体单元在泡层表面共用结点。内胆、泡层和面板均采用线弹性材料模型, 表-1列出了内胆、泡层和金属门面板的材料属性。由于冰箱箱体的对称性, 我们仅考虑箱体结构的1/2进行有限元分析。

我们选择热力顺序耦合算法研究箱体在热应力下的变形, 即先计算出冰箱箱体的稳态温度场, 然后将温度场作为静力分析的体载荷,

### 参考文献

- [1] 丁国良. 小型制冷装置动态仿真与优化(第一版). 上海: 上海交通大学动力与能源工程学院, 1993.
- [2] 杨世铭. 传热学(第二版). 北京: 高等教育出版社, 1993, 417-49, 317-319.
- [3] 彦启森. 制冷技术及其应用(第一版). 北京: 中国建筑工业出版社, 2006, 27-59.
- [4] 中华人民共和国国家标准. 家用制冷器具, 冷藏冷冻箱. GB/T8059.2-1995.
- [5] 刘杰. 直冷式冰箱冷藏蒸发器的换热研究. 2010中国家用电器技术大会论文集, 139-143.

再计算出箱体的位移场的应力场。在静力分析步中,边界条件设置为限制箱体底面的三个平动自由度,并对对称面设置对称性边界条件。通过温度场分析,可以模拟冰箱在高低温冲击工况(箱体暴露在纯高温或低温的环境下)、发泡冷却过程工况和实际制冷工况(箱体外表面积为43℃,内表面为5℃),在本文中,我们仅针对冰箱箱体在实际制冷工况进行分析。

### 3 数值分析结果

#### 3.1 冰箱箱体在制冷工况下的稳态温度场

图2显示了箱体在实际制冷状态(箱体

外表面积为43℃,内表面为5℃)下的稳态温度场,从图可以看出,温度沿箱体外表面向内表面均匀的变化。图2中的稳态温度场,将作为箱体静力分析的体载荷。

#### 3.2 冰箱箱体的变形模式和收腰问题

图3分别显示了在实际制冷工况下的箱体变形云图和箱体变形机理示意图。从变形云图(图3左)可以看出箱体变形较小的部位是箱体的顶部及箱体后底面,位移变形量只有0.1mm~0.5mm,而箱体门框中间处的变形最大,最大位移达到了3.67mm,从而造成了箱体严重的收腰问题。严重的收腰问题,会影响

冰箱搁架的装配,同时也会使箱体与门体发生相对的位移,从而导致冰箱门封处发生漏冷,影响冰箱的保鲜与能效水平,因此,有必要对箱体变形机理进行深层次的分析。实际制冷的工况下,冰箱箱体冷外热, HIPS内胆和聚氨酯泡层会产生收缩热应力,由于HIPS内胆的杨氏模量远远大于泡层的杨氏模量,所以, HIPS内胆的热应力数值上要比泡层的热应力大,如公式(1)所示,

$$\sigma \sim \Delta T \cdot \eta \cdot E \quad (1)$$

其中,  $\sigma$  为热应力,  $\Delta T$  为温差,  $\eta$  为线膨胀系数,  $E$  为杨氏模量。由于泡层的厚度大约在4~7cm,内胆的厚度在0.5mm左右,所以,箱体变形的驱动力是内胆和泡层收缩力的共同作用。图2右显示了箱体变形机理的示意图,两侧黑色曲线表示箱体门框处收腰趋势,即两侧面板在内胆和泡层收缩力的共同作用下向内凹陷,在门框处产生最大的变形,箱体顶盖处会发生微微隆起,幅度比两侧的变形量要小。另外,由于箱体内胆上的层条结构,加大了内胆的抗弯刚度,抑制了侧板中间部位的变形,从而增大了箱体门框处的变形,加剧了箱体的收腰问题。而当去除箱体的层条结构后,释放了侧板中部的变形,虽会使侧板中部的变形量有所增大,却更大程度上减小了箱体边框处的变形量,抑制了箱体的收腰。

对于较大的冷藏箱或含有较大间室的冰箱来说,容易在内胆积聚较大的热应力,因此,在机械应力和化学介质两方面因素共同作用下容易导致内胆开裂,即内胆的应力腐蚀,极大影响冰箱制冷效果和冰箱使用寿命<sup>[6]</sup>。从图4(右)可以看出,箱体内胆的边框处较大的等效应力(4个顶点为7.792MPa),但此处的应力值由于结构简化等因素计算并不准确,泡层的热应力可以直观地表示出来,主要在与内胆附近的区域有较大的等效应力值,如图4(左)所示。我们所关心的还是在内胆后背处的应力分布,在内胆后背处的应力平均在3~5MPa的量级上,由于有限元模型并未考虑BC-345铝板蒸发器与内胆粘结的因素,其在制冷状态下的失配热应力会比计算的数值要大,使得内胆在化

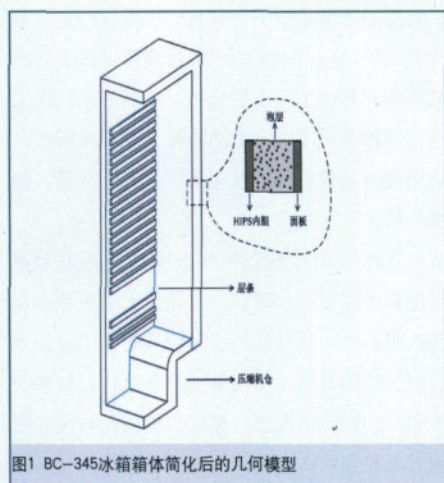


图1 BC-345冰箱箱体简化后的几何模型

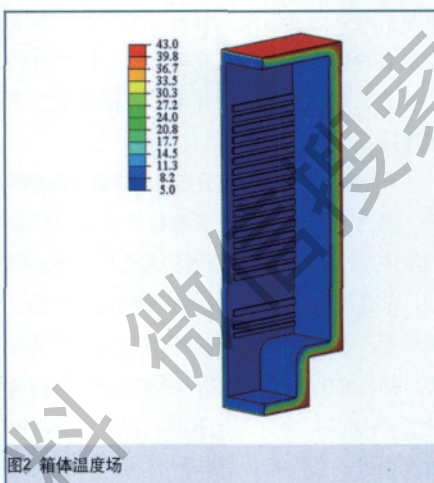


图2 箱体温度场

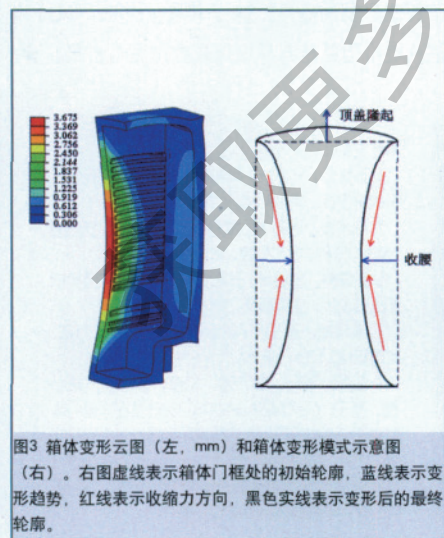


图3 箱体变形云图(左, mm)和箱体变形模式示意图(右)。右图虚线表示箱体门框处的初始轮廓,蓝线表示变形趋势,红线表示收缩力方向,黑色实线表示变形后的最终轮廓。

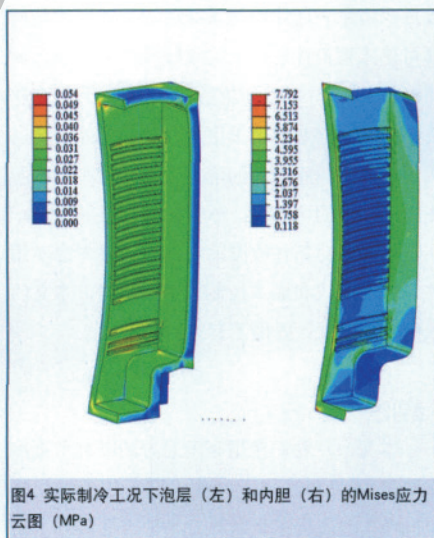


图4 实际制冷工况下泡层(左)和内胆(右)的Mises应力云图(MPa)

8788宽频段交直流电参数测量仪



Trms AC/DC  
RS-232C

0.2级

宽频(0.5Hz~2kHz)

8788电参数测量仪电能最高分辨率为1mWh, 满足【GB 21456-2008家用电器能效限值及能源效率等级】

8788仪表可以精确测量DC或0.5Hz~2kHz范围的交流信号或二者叠加的信号, 并给出电压、电流、功率、功率因数、电压正峰值、电压负峰值、电压波峰系数、电流波峰系数、电压频率、电流频率等数据。

◆测量项目: AC/DC U(600V), I(20A), P(U×I×PF), PF, F(0.5~2kHz), 电能累计, 无功电能, 谐波分析(1~50次)

◆参数设置: CT、PT、I、P上下限, bps, addr

◆显示方式: 5位, 0.5° LED, 6窗口

◆对电压电流可以给出直流分量、交流分量或有效值。精确地测量间歇性信号和半波整流信号中的直流分量。

交直流、小功率电参数测量仪

Trms RS-232C 0.5级



AC/DC  
RS-232C

8716C1交直流测量仪  
适用于半波等特殊波形的测量



AC  
RS-232C

8713B1适用于小功率测量  
最小可测量达0.01W

盘装数字电表、变送器

Trms RS-485 0.5级

单、三相, 交直流, 低、中、高频, 单参数、多参数



48×96, 96×96, 80×160, 120×120多种尺寸

青岛青智仪器有限公司

地址: 青岛市崂山区山东头路58号盛和大厦1号楼五层  
邮编: 266101  
电话/传真: (0532)81920028(多线), 81920029(多线)  
技术热线: (0)13953270323  
上海办事处: (021)62301990  
广东办事处: (020)139642282  
网址: www.qingzhi.com

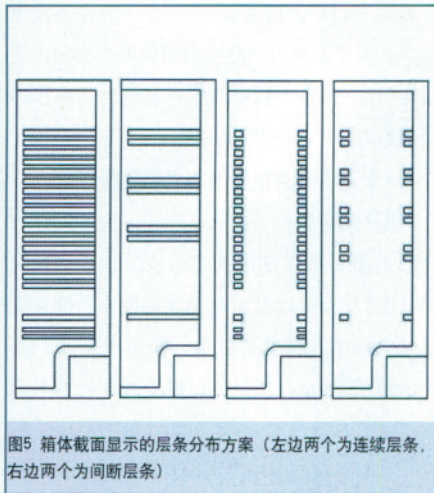


图5 箱体截面显示的层条分布方案(左边两个为连续层条, 右边两个为间断层条)

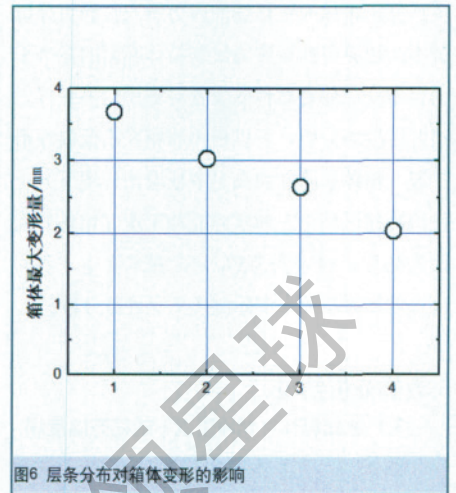


图6 层条分布对箱体变形的影响

学侵蚀和机械应力的综合作用下发生裂纹产生与扩展。通过有限元分析, 了解内胆的应力分布对优化内胆与蒸发器结构、松弛内胆热应力、降低内胆开裂几率等方面具有重要作用。

3.3 冰箱层条形状与分布对箱体变形的影响

通过对带有层条的箱体和未有层条的箱体进行对比, 发现两者的变形模式是不同的, 未有层条的箱体的最大变形出现在侧板中间位置, 因此, 层条结构的优化可以为箱体收腰的抑制提供可行的方法。在本文中, 我们设计了4种方案, 并计算出其最大位移, 前两种为连续的层条结构, 后两种为间断的层条结构, 如图5所示。

由分析结果及对比, 减少箱体上的层条数目或将原来连续的层条结构改为间断的结构都可使冰箱箱体边框上的收腰量明显减小, 如图6所示, 其中将原来的层条结构改为小突起块的结构的效果更为有效。另外, 此结构还可使内胆底面上的应力变小, 减少了内胆底面上开裂的可能性。冰箱箱体层条的设计, 不仅要考虑对箱体收腰的影响, 还要考虑实用性、装配方式和成本控制等诸多因素, 本文的工作为箱体设计提供了有力的参考。

4 结论

本文中, 我们使用有限元方法研究了直冷冷藏箱BC-345在实际制冷工况下的变形模式和机理, 并就层条形状与分布等方面展开了讨

论, 为抑制箱体变形和提高冰箱整机性能提供了有意的参考。除了目前我们所考虑的实际制冷工况外, 应用本文的研究思路还可以进行冰箱箱体在其他工况下的分析, 如高温冲击工况、箱体承重工况、发泡冷却工况等, 因此, 运用数值分析方法可以提高产品设计质量、加快产品设计。

在冰箱箱体变形的分析中, 有两方面难点应该予以重视和研究: 一是由于铝板蒸发器与内胆粘结, 往往其热应力的失配作用会加大内胆开裂的几率, 而由于其复杂结构, 对包含内胆、铝板、蒸发器、泡层等结构的建模非常困难, 需要在实验测试的基础上进行简化与修正; 二是冷藏冷冻箱的分析, 尤其是风冷冰箱由于存在结构上较为复杂的风道系统更是加大了数值分析的难度, 除了其箱体变形, 风冷冰箱风道结构更是容易出现裂纹产生与扩展。

参考文献:

- [1] 张德海, 杨培林. 冰箱侧帮变形的有限元分析及改进设计. 家电科技, 2006: 65-67.
- [2] 邵澄洋. 冰箱(柜)发冷门体成形后冷却变形的ANSYS分析. 家电科技, 2009: 84-87.
- [3] 张德海, 刘思科. 冰箱铰链轴断裂的数值模拟和改进设计. 家电科技, 2008: 49-52.
- [4] 洪在地. 基于FEA的冰箱门体变形解决方法. 家电科技, 2005: 62-64.
- [5] 孔冬, 郭刚, 游飞越, 刘斌, 李志强, 姚小虎. 基于PYTHON的ABAQUS二次开发在冰箱门体建模和分析中的应用. 中国家用电器技术大会论文集, 2010: 146-149.
- [6] 李强. 电冰箱制造过程中内胆开裂现象的研究. 家用电器科技, 2002. 7: 66-67.