

DOI: 10.7652/xjtuxb201412022

冰箱用鼠笼式丝管冷凝器换热性能的实验研究

龚勤勤¹, 黄东¹, 唐学强¹, 白连社², 魏邦福²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 合肥美菱股份有限公司, 230601, 合肥)

摘要: 基于鼠笼式丝管冷凝器周围空气温度场的实验研究结果, 为优化空气侧流场和强化换热, 对冷凝器结构进行改进, 即在冷凝器下游增设了外绕泡沫挡圈以增加通过径向可有效换热的空气流量, 同时在其上游最内圈设置泡沫堵芯以减少通过轴向基本不参与换热的空气流量。结构改进前后的实验结果表明: 通过对冷凝器结构的改进, 冷凝器出口温度降低约 0.7℃, 开机工作系数减小了 2.02%, 冰箱耗电量降低了 2.37%。实验数据还表明, 外绕挡圈和泡沫堵芯能有效减少停机时从压缩机仓和冷凝器下游向冷凝器出口所在的上游扩散的热空气量, 有利于下次开机后冷凝器快速散热和降温。

关键词: 鼠笼式丝管冷凝器; 空气温度场; 强化换热

中图分类号: TB657.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)12-0140-05

Experimental Investigation on Heat Transfer Performance of Spiral Wire-on-Tube Condenser in Domestic Refrigerator

GONG Qinqin¹, HUANG Dong¹, TANG Xueqiang¹, BAI Lianshe², WEI Bangfu²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Hefei Meiling Co. Ltd., Hefei 230601, China)

Abstract: The air temperature field around a spiral wire-on-tube condenser of a no-frost refrigerator was investigated experimentally, and then the condenser was optimized accordingly to enhance air-side heat transfer. A wind-broken foam ring was wrapped around downstream part of the condenser to increase airflow in the radial direction, and a wind-broken foam block was set in upstream part of the condenser centerline to reduce airflow in the axial direction, which nearly does not transfer heat. The results show that the condenser outlet temperature decreases by about 0.7℃, the compressor operation time ratio drops by 2.02%, and the refrigerator's electricity consumption descends by 2.37% after the optimization. Moreover, both the wind-broken ring and the wind-broken block effectively prevent high-temperature air around the compressor and downstream part of the condenser from flowing to upstream part of the condenser during the outage of compressor, which benefits the heat transfer of the condenser in next operation.

Keywords: spiral wire-on-tube condenser; air temperature field; heat transfer enhancement

冷凝器作为冰箱的重要部件之一, 其性能改进是家用冰箱节能研究的重点。丝管冷凝器由于其制造成本低, 占据空间小等优点, 在冰箱中经常被使用。以往传统直冷冰箱和冷柜中所采用的丝管冷凝

收稿日期: 2014-05-25。 作者简介: 龚勤勤(1989—), 女, 硕士生; 黄东(通信作者), 男, 副教授。

网络出版时间: 2014-07-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140728.1036.003.html>

器多为自然对流换热的外挂式丝管冷凝器或强制对流的内置板式丝管冷凝器。近几年,随着风冷冰箱的快速发展,企业设计和生产中强制对流的鼠笼式丝管冷凝器的使用量逐渐增大。

目前,学者们对丝管冷凝器的研究均集中于自然对流方式换热的丝管冷凝器,对风冷冰箱所用鼠笼式丝管冷凝器的研究几乎无从得到,且该冷凝器在冰箱实际应用中的性能改进也未有涉及。文献[1]显示,丝管冷凝器通过自然对流和辐射两种方式换热,其中自然对流换热量占总换热量的 65%;文献[2]表明,足够的散热空间($s > 200 \text{ mm}$)可以增加冷凝器向空气散热的驱动力;文献[3]表明,丝管冷凝器的自然对流换热空间在完全自由和扩大 0.3 m 时,其传热系数可分别提高 14% 和 7%~9%;文献[4]指出,冷凝器表面温度分布与平均温度水平取决于管内流体温度,而管内流体流量影响较小;文献[5]用化学试剂 TiCl_4 对丝管冷凝器周围空气流动进行了可视化研究,结果表明丝管冷凝器的周围空气流动属于混合流;文献[6]利用真空法确定丝管冷凝器的系统黑度,并指出随着单位管长钢丝根数增加,系统黑度减小;文献[7]针对丝管冷凝器的动态变化提出了一个分散式的瞬态模型,并指出该模型可以很好地预测冷凝器的动态变化,尤其是对于饱和段和过热段的过渡区的变化;文献[8]提出了一种考虑丝管的存在和空气流向影响的空气侧对流传热系数计算的关联式,并验证得出数值分析结果和实验结果的平均误差为 3.7%;文献[9]为了将直冷冰箱中冷凝器和压机表面辐射换热对冰箱室内温度的影响最小化,建议在冰箱后背与冷凝器和压机之间添加铝箔使冰箱室内温度下降约 $2 \text{ }^\circ\text{C}$;文献[10]在风道系统对鼠笼式丝管冷凝器的管程、线间距、径向和纵向管间距等几何参数对换热性能的影响进行了实验研究,发现线间距影响最显著。

本文以一台单循环风冷冰箱为载体,先对鼠笼式丝管冷凝器的性能进行实验研究,之后结合实际情况,分析得出相应的冷凝器结构改进措施来改善冷凝器周围空气流场,并做出了结构改进前后的对比分析。最后,分析统计了冷凝器结构改进对冰箱整体性能的影响。

1 实验装置和测试条件

1.1 实验装置

本次实验研究选用了一台型号为 BCD-537 WPB 的单循环风冷变频冰箱为载体,其冷藏风门通

过冷藏感温包控制,压缩机启停由冷藏、冷冻感温包共同控制。该冰箱主要由一组变频往复式压缩机,鼠笼式丝管冷凝器,毛细管和叉排翅片管蒸发器组成。另外,冷凝器位于冰箱后背的压缩机仓内,其底侧放置有接水盘,接水盘与冷凝器中间有副冷凝器(压机排气先经过副冷凝器与接水盘中的化霜水进行换热);另外,冷凝器与压缩机之间安装有轴流式风机,通过从后背板进风格栅和底板内侧条缝抽吸外界空气对冷凝器进行强制对流换热。

实验通过对冷凝器的结构改进来改善冷凝器周围空气流场分布,具体改进措施如图 1 所示,给冷凝器设置外绕泡沫挡圈和泡沫堵芯。其中,外绕泡沫挡圈放置在冷凝器迎风方向的下游,与相应的后背板进风格栅开口边缘齐平,且包围冷凝器前后两个侧面和顶部,底侧留出空隙以便接水盘内无化霜水时风机快速抽吸上升的热空气,避免影响底部冷凝器的散热。泡沫堵芯放置在冷凝器迎风方向的上游并处于端头轴心位置,以减少未同冷凝器换热而直接从中心穿过的轴向无效气流量。

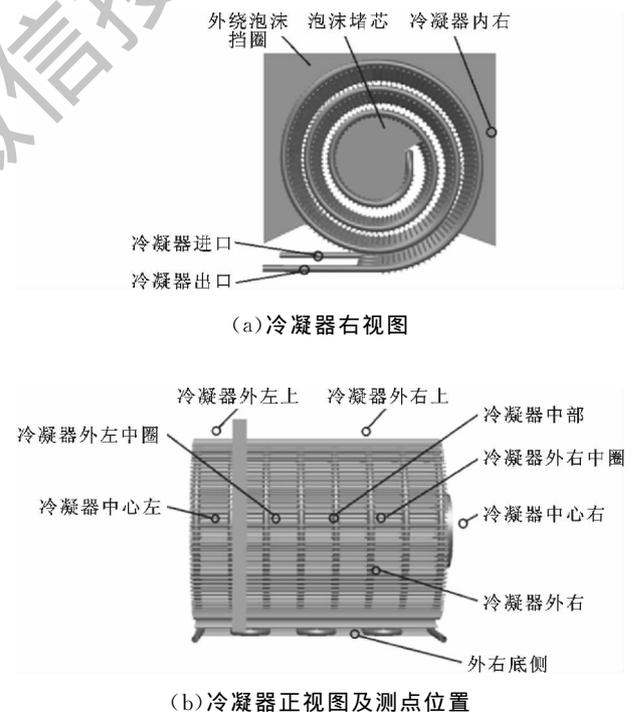


图 1 改进后冷凝器结构示意图及其测点位置分布

1.2 测试条件

实验在环境温度为 $(25.0 \pm 0.8) \text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 65% 的条件下进行。在测试过程中,冰箱冷藏、冷冻室温度分别设定为 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ 。温度测量采用直径为 0.2 mm 的铜-康铜热电偶,精度为 $\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在冷凝器进口、中部和出口及周围空气流场中均布

置有热电偶,实时监测冰箱运行期间的测点温度变化,结构改进前、后冷凝器的测点名称和位置分布如图 1 所示。数据采集使用 Aglient34970A 多功能数据采集仪,采集间隔设定为 10 s。冰箱运行功率采用青智 8775A 数字电参数测试仪测量,通过电能累计测得一定时间内的耗电量,精度为 0.5 级。

测点位置说明:实验过程中所布测点除冷凝器进口、中部和出口为制冷剂测点外,其余均为冷凝器周围空气测点。空气测点命名中的“左”和“右”以冷凝器轴向为基准,“内”指冷凝器与冰箱内背之间的空隙,“外”指冷凝器与后背板之间的间隙,“上”指冷凝器顶侧空气,冷凝器底侧代表冷凝器与底部接水盘之间的空气。

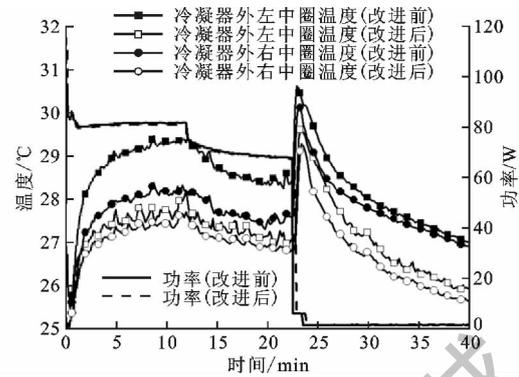
2 实验结果分析

实验中,冷凝器与周围空气进行强制对流换热,总换热系数由制冷剂侧和空气侧传热系数共同决定,而后者远小于前者,因此提高空气侧传热系数对增大总传热系数具有重要作用。本次研究通过冷凝器下游设置外绕泡沫挡圈和上游增设泡沫堵芯的方式对冷凝器结构进行改进,以改善冷凝器整体换热性能,最终降低冰箱耗电量。另外,为尽量避免冰箱运行过程动态特性的影响,特选取结构改进前后冰箱耗电量测试中间阶段的一个稳定运行单周期为代表进行对比分析。所谓单周期是指,冰箱稳定运行时进行了一次先冷藏、冷冻同时供冷后,冷冻单独供冷,最后停机的过程。

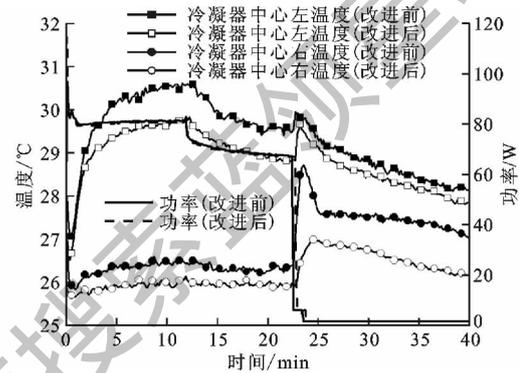
2.1 结构改进前后冷凝器周围空气流场对比分析

冰箱运行模式为先冷藏、冷冻同时供冷,之后冷冻单独供冷,最后停机。如图 2 所示,在冷藏、冷冻同时供冷的过程中,随着压缩机的启动,冷凝器开始散热,冷凝器周围空气温度逐渐升高;切换为冷冻单独供冷后,由于冰箱热负荷的降低,冷凝器周围空气温度普遍降低;在停机的瞬间,冷凝器周围空气温度均有个突升,之后快速下降,这是由停机时冷凝风机瞬间停止而冷凝器继续散热造成的。

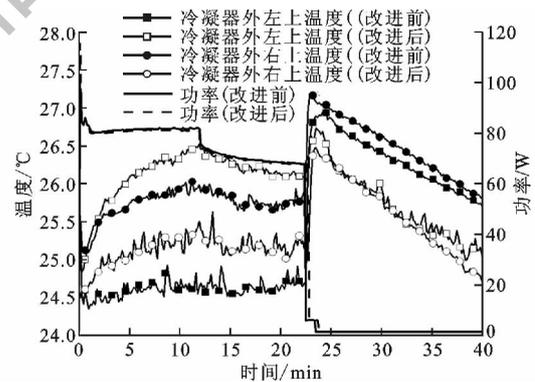
如图 2a 和图 2b 所示,冷凝器下游设置外绕挡圈和上游增设泡沫堵芯之后,在压缩机工作过程中,冷凝器外左和外右中圈周围空气温度平均分别降低约 1.5 °C 和 0.7 °C,冷凝器中心左和中心右温度分别降低了 1.0 °C 和 0.5 °C 左右。其原因是:外绕挡圈的设置阻挡了直接从冷凝器与后背板之间的空隙穿过而不与冷凝器换热的轴向无效气流;鼠笼式丝管冷凝器内圈有较大的轴向通路,使得大量气流从



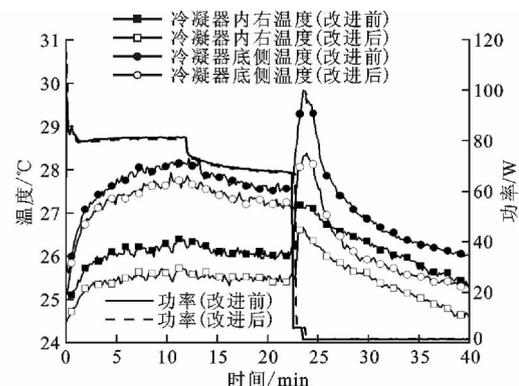
(a) 结构改进前后冷凝器外左右中圈的温度和功率变化



(b) 结构改进前后冷凝器中心左右的温度和功率变化



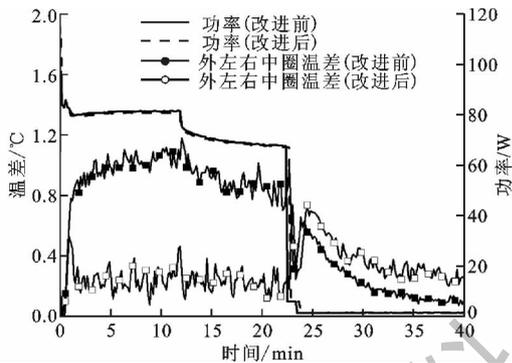
(c) 结构改进前后冷凝器外左上和外右上的温度和功率变化



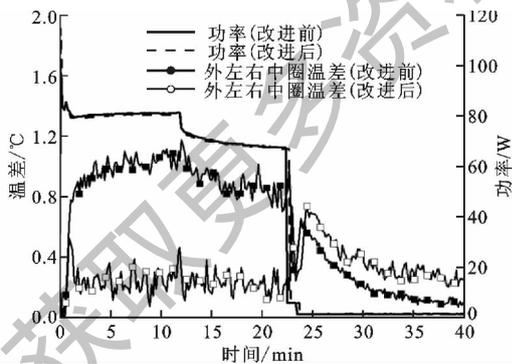
(d) 结构改进前后冷凝器内右和底侧的温度和功率变化

图 2 结构改进前后冷凝器周围空气温度场中各测点的温度变化

中心直接穿过并未与冷凝器进行换热,泡沫堵芯的增设减小了这部分轴向无效气流量。两者共同作用改变冷凝器附近空气流场分布,增加了冷凝器整体轴向有效气流量和径向气流量,而且挡圈与堵芯的存在减小了空气的轴向流通面积,进而能增大冷凝器附近的空气流速。另外,冷凝器周围有效换热气流量及气流速度的增加提高了冷凝器的换热性能,使得冷凝器左右端温差降低。同时,径向气流量和流速增加也使得冷凝器内外圈之间的温差(鼠笼式丝管冷凝器截面呈涡旋状,内外共有三圈管路,与其进行换热的空气从外圈流入,造成同一截面上外圈管路附近空气温度明显低于内圈,故内外圈周围空气有温差存在)降低。如图 3 所示,冷凝器外左右中圈温差降低约 0.8°C ,冷凝器外右中圈与外右温差降低 0.5°C 左右,即冷凝器周围空气温度场分布均匀性增强。



(a) 结构改进前后冷凝器外左右中圈的温差和功率变化



(b) 结构改进前后冷凝器外右中圈与外右温差和功率变化

图 3 结构改进前后冷凝器左右和内外圈测点温差变化

如图 2c 所示,对冷凝器结构改进后,压缩机工作过程中冷凝器外左上温度增加了 1.8°C 左右,冷凝器外右上降低了 0.7°C 左右。说明添加外绕泡沫挡圈使得挡圈左侧有热量积聚,但是由于冷凝器进口所在的下游部分与空气的换热量对温差变化不敏感,受风量和风速影响更大,最终仍可能加强冷凝器

下游与空气的换热。设置外绕挡圈和泡沫堵芯使得冷凝器出口所在的上游部分的进风量增大,冷凝器中上游部分周围空气温度降低(如冷凝器外右上),进而使冷凝器中上游部分的换热效果得到改善。

如图 2d 所示,对冷凝器结构改进后,冷凝器底部空气温度降低约 0.4°C ,说明外绕挡圈在底部留出的空隙增大了底部进风量,进而弱化了底部接水盘负热的影响,同时由于接水盘与冷凝器底部的间距小,又不至于造成过多的无效气流。图 2d 还显示,冷凝器内右温度降低 0.6°C 左右,说明外绕挡圈和泡沫堵芯的配合使得冷凝器内侧换热性能改善,同时避免了内侧出现热量积聚。

总之,设置外绕挡圈和泡沫堵芯改变了冷凝器的气流组织,使得冷凝器轴向无效气流减少,有效气流增大,同时增加了径向有效气流。另外,图 3a 显示,结构改进前冷凝器外左右中圈温差在停机后快速下降,即外左右中圈附近空气温度迅速均匀化,而结构改进后冷凝器外左右中圈温差在停机过程中有所上升,最终高于结构改进前的温差。这说明对冷凝器结构改进后的停机过程中,冷凝器上、下游空气温度均匀化趋势减弱。此结论同样也可由图 2b 中停机时冷凝器中心左右测点温度均匀化趋势的差异来印证。图 2c 显示,冷凝器结构改进后的停机过程中,处于外绕挡圈左侧的冷凝器外左上温度下降速度有所减小,而外绕挡圈右侧的外右上空气温度下降速度有所提高。以上两点变化表明,挡圈的存在使停机后冷凝器下游高温空气被阻隔,从而改善了停机过程中冷凝器周围空气温度分布,有利于冰箱下一个稳定运行单周期内冷凝器的快速散热和降温。

2.2 改进冷凝器结构对冰箱整体性能的影响

通过以上对结构改进前后冷凝器周围空气流场的分析可知,实验通过设置外绕挡圈和泡沫堵芯改变了冷凝器的气流组织,从而改善了冷凝器的整体换热效果,冷凝器进口、中部和出口温度均得到降低,具体变化如表 1 所示。

表 1 冷藏风门关闭瞬间冷凝器的温度变化 $^{\circ}\text{C}$

结构	冷凝器进口	冷凝器中部	冷凝器出口
	温度	温度	温度
改进前	34.04	32.14	28.90
改进后	33.02	31.38	28.20
温差	-1.04	-0.76	-0.70

如表 1 所示,对冷凝器结构改进后,冷凝器进口,中部和出口温度分别下降 1.04°C 、 0.76°C 和 0.70°C 。

这进一步证明了上节对结构改进前后冷凝器周围空气流场的对比分析结果,即外绕挡圈和泡沫堵芯的设置减少了冷凝器轴向无效气流量,增加了径向有效气流量,进而使冷凝器整体换热性能得到提升。

如图 4 所示,对冷凝器结构改进后,在压缩机工作过程中,冷凝器出口温度降低约 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冷凝器出口温度的降低可以提高过冷度,从而减小蒸发器的入口干度,增大制冷量,最终降低冰箱耗电量。通过对数据的分析统计发现,冷凝器结构改进后冰箱的开机工作系数下降,运行功率也有略微的降低,进而使得冰箱耗电量减少,具体结果如表 2 所示。

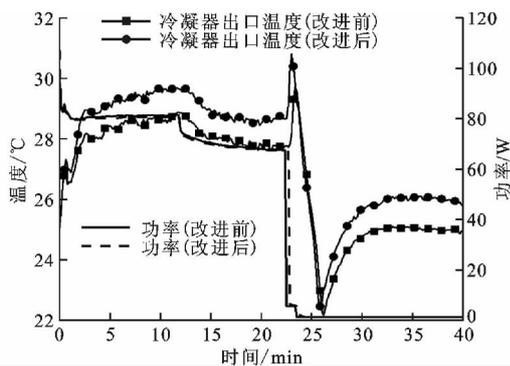


图 4 冷凝器结构改进前后冰箱稳定运行单周期内冷凝器出口温度和功率变化

表 2 冰箱的开机工作系数及耗电量变化

结构	开机工作系数	耗电量/ $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$
改进前	0.544	0.927
改进后	0.533	0.905
降低百分比/%	2.02	2.37

3 结 论

(1) 设置冷凝器外绕挡圈减小了冷凝器外侧与后背板之间不与冷凝器换热而直接流过的轴向无效气流,增加了径向有效气流。添加泡沫堵芯阻挡了直接从冷凝器中心穿过而不与冷凝器进行换热的轴向无效气流,增大了冷凝器的轴向有效气流,二者共同作用使冷凝器的整体换热效果得到改善。

(2) 冷凝器结构改进后,除外绕挡圈左侧的冷凝器外左上温度升高外,其余均降低,其中冷凝器外左中圈和中心左温度分别减少约 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,从而使得冷凝器与周围空气的换热加强,冷凝器出口温度降低 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,冰箱运行的开机工作系数和耗电量分别降低了 2.02% 和 2.37% 。

参考文献:

- [1] BANSAL P K, CHIN T C. Modelling and optimisation of wire-and-tube condenser [J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(5): 601-613.
- [2] BASSIOUNY R. Evaluating the effect of the space surrounding the condenser of a household refrigerator [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(7): 1645-1656.
- [3] DAGILIS V, HOFMANAS I. Influence of surrounding space on heat transfer effectiveness of refrigerator's condenser [J]. Mechanika, 2012, 18(3): 323-329.
- [4] 林兆庄, 胡夏萍. 用红外热像技术研究管线式冷凝器散热 [J]. 激光与红外, 1996, 26(2): 139-140. LIN Zhaozhuang, HU Xiaping. Study on heat dissipation of pipeline condenser with IR thermal imaging technique [J]. Laser & Infrared, 1996, 26(2): 139-140.
- [5] 成耀龙, 徐明仿, 吴业正. 丝管式冷凝器周围空气温度分布的实验研究及仿真 [J]. 制冷学报, 2006, 27(2): 6-9. CHENG Yaolong, XU Mingfang, WU Yezheng. Experimental investigation and numerical simulation on air temperature distribution around wire-and-tube condenser [J]. Journal of Refrigeration, 2006, 27(2): 6-9.
- [6] 李安桂, 吴业正. 冰箱钢丝管冷凝器的辐射换热特性 [J]. 制冷学报, 1998(4): 10-13. LI Angui, WU Yezheng. An investigation on radiant heat transfer of wire-on-tube condenser [J]. Journal of Refrigeration, 1998(4): 10-13.
- [7] PORKHIAL S, KHASTOO B, MODARRES RAZAVI M R. Transient response of finned-tube condenser in household refrigerators [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(14): 1725-1729.
- [8] LEE T H, YUN J Y, LEE J S, et al. Determination of airside heat transfer coefficient on wire-on-tube type heat exchanger [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(9): 1767-1776.
- [9] AFONSO C, MATOS J. The effect of radiation shields around the air condenser and compressor of a refrigerator on the temperature distribution inside it [J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(7): 1144-1151.
- [10] BARBOSA J R Jr, SIGWALT R A. Air-side heat transfer and pressure drop in spiral wire-on-tube condensers [J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(4): 939-951.

(编辑 杜秀杰)