文章编号：1671-6612（2026）05-730-07

R290 变频压缩机在风冷厨房冰箱的能耗试验研究

邓　妮　刘　岩　徐　杨　高中勇　孟　乐　孙海滨

（青岛万宝压缩机有限公司　青岛　266510）

【摘　要】　随着 GB 26920 能效标准升级，商用制冷器具能耗要求愈发严格。以某型号的风冷厨房冰箱为研究对象，通过能耗试验，对比其理论制冷循环与实际耗电循环的循环特性。结果显示，该风冷厨房冰箱存在蒸发温度偏低、过冷度偏低、吸气管结霜的问题。针对上述问题，对制冷系统进行多维度改进：优化换热器结构、采用高效 R290 变频压缩机、将中梁防凝露电加热改为压缩机排气加热，将蒸发器电加热化霜改为压缩机热气融霜。试验结果表明，优化后风冷厨房冰箱能耗降低 60.4%，耗电量从 10.38kWh/24h 降至 4.11kWh/24h，满足 GB 26920-2024 1 级能效要求，为商用风冷厨房冰箱的节能设计提供了依据。

【关键词】　能耗升级；R290；风冷厨房冰箱；变频压缩机；制冷循环优化

中图分类号　TB652　　文献标志码　A

Research on Energy Consumption of R290 Variable Frequency Compressor in Air-Cooled Kitchen Refrigerator

Deng Ni　Liu Yan　Xu Yang　Gao Zhongyong　Meng Le　Sun Haibing

(Qingdao Wanbao Compressor Co., Ltd, Qingdao, 266510)

【**Abstract**】　With the upgrading of the national standard GB 26920 Energy Efficiency Limits and Energy Efficiency Grades for Commercial Refrigeration Equipment, the energy consumption constraints for commercial refrigeration appliances have been progressively tightened. Taking a specific model of air-cooled kitchen refrigerator as the research subject, this study conducted systematic energy consumption tests to compare the discrepancies between its theoretical refrigeration cycle characteristics and actual power consumption cycle performance. Test results indicated four key energy inefficiency issues in the original system: the evaporation temperature is too low; insufficient degree of subcooling; and frosting on the suction pipe. To address these problems, multi-dimensional optimizations were implemented for the refrigeration system: structural optimization of heat exchangers to enhance heat transfer efficiency; replacement of the original compressor with a high-efficiency R290 variable-frequency compressor; modification of the middle beam anti-condensation heating method from electric heating to compressor exhaust waste heat recovery; replacement of evaporator electric defrosting with compressor hot gas defrosting. Post-optimization tests verified that the energy consumption of the prototype was reduced by 60.4%: the 24-hour power consumption decreased from 10.38kWh to 4.11kWh, which fully meets the Level 1 energy efficiency requirements specified in GB 26920-2024. This study provides a feasible technical reference for the energy-saving design and optimization of commercial air-cooled kitchen refrigerators.

【 **Keywords** 】　Energy consumption upgrading; R290; Air-cooled kitchen refrigerator; variable-frequency compressor; Refrigerating cycle optimization

---

作者（通讯作者）简介：邓　妮（1986-），女，本科，中级工程师，E-mail：dengni@gzwbgc.com
收稿日期：2026-01-14

0　引言

GB 26920-2024《商用制冷器具能耗限定值和能效等级》[1]已于 2024 年 9 月 29 日正式发布，将于 2026 年 4 月 1 日实施。原 GB 26920.2-2015 中的 1 级能效在新标准升级后将降至 3–4 级能效[2]。这意味着商用制冷器具需大幅进行节能改造才能满足新标要求。提升制冷循环效率、降低能耗已成为行业紧迫需求。

风冷厨房冰箱是主要使用在非家庭场所的餐饮用制冷储藏柜，由于其固有的化霜周期、风扇、内部的多个加热器，导致产品的能耗大[3]。有数据表明冷藏柜的平均能耗为每年 2920kWh，冷冻柜的平均能耗为 5475kWh[4]。

目前国内外学者已围绕商用冷柜节能展开了大量的研究，为本文提供了重要参考。TAHIR A 等[5]对机械调节阀（MEPR）和电子调节阀（EEPR）在超市制冷柜的性能进行了对比，试验表明电子调节阀（EEPR）对提高箱内温度和降低蒸发器结霜有显著效果。PISSNO A 等[6]对商用冷柜毛细管和灌注量进行了试验，试验表明灌注量对制冷效果有影响。晏刚等[7]对并联双制冷系统的立式风冷陈列柜的性能进行了研究。李银龙[8]对用于中小型商用制冷设备的制冷剂循环热力学性能进行了分析。宋雪娜等[9]对轻商冷柜压缩机由定频切换变频时的系统匹配进行了研究，对毛细管流量和充注量分别进行了研究。应雨铮等[10]对商用冷柜热负荷及其绝热技术进行了研究。

现有研究围绕通用商用冷柜，针对风冷厨房冰箱的专项优化较少，本文以一台风冷厨房冰箱为对象展开研究，从制冷循环入手，提出针对性优化方案并验证效果，最终满足新国标 1 级能效。

1　试验装置和试验条件

1.1　试验对象基本参数

本文以某风冷厨房冰箱为研究对象，该风冷厨房冰箱的有效容积为 860L，气候类型为 N/4，温度分类为 L1，标注耗电量为 11.59kWh/24h，能耗等级为 3 级（依据 GB 26920.2-2015）。风冷厨房冰箱实物图、电气控制图分别如图 1、图 2 所示。

电气控制逻辑：箱体通电后，压缩机、冷凝风机、中梁发热丝等同步启动，当柜内温度达到主控制器设定值时，压缩机停机；当累计运行达到化霜周期时，化霜加热丝与水盆发热丝通电，各核心元器件的输入功率如表 1 所示。



图 1　风冷厨房冰箱实物图

Fig.1　Physical images of air-cooled kitchen refrigerator

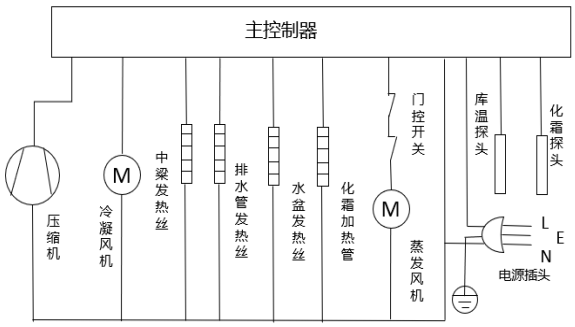


图 2　风冷厨房冰箱电气控制图

Fig.2　Electrical control diagram of air-cooled kitchen refrigerator

表 1　风冷厨房冰箱元器件功率

Table 1　Power of the components in the air-cooled kitchen refrigerator

名称	输入功率/W
冷凝风机	72
蒸发风机	36
化霜加热丝	500
中梁加热丝	75
水盘加热丝	60
排水管加热丝	7.5
温控器	0.6

1.2　试验环境与测试方法

试验在冰箱型式试验室中进行，按照 SB/T 10794.2-2012《商用冷柜第 2 部分：分类、要求和试验条件》规定的方法进行耗电量测试，具体测试

方案如下：

环境条件：温度 30℃，相对湿度 55%；压力监测：压缩机高、低压管分别布置压力表（P1、P2）测试压力；温度监测：压缩机壳体、排气管、冷凝器、过滤器、箱内、吸气管分别布置热电偶（T1~T25）测试温度；功率与耗电量监测：功率计实时采集整机输入功率，累计 24h 得到耗电量，测试示意图如图 3 所示。

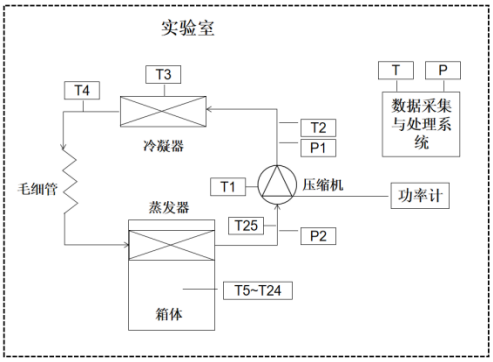


图 3　风冷厨房冰箱测试原理图

Fig.3　Test schematic diagram of air-cooled kitchen refrigerator

1.3　原风冷厨房冰箱能耗基线数据

在上述试验条件下，测得原风冷厨房冰箱的实际装载耗电量为 10.38kWh/24h。通过功率拆解分析，各部件耗电占比如图 4 所示，整机耗电最高为压缩机，占比达到 60%，其次为冷凝风机、中梁加热丝、化霜加热丝，占比分别达到 11%、11%和 10%，需重点优化。

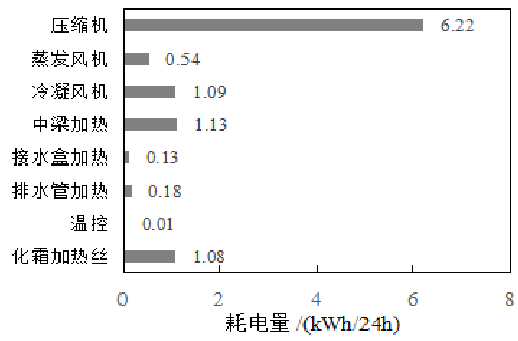


图 4　风冷厨房冰箱耗电占比

Fig.4　The electricity consumption of air-cooled kitchen refrigerator

2　原风冷厨房冰箱制冷循环问题分析

目前，主流的风冷厨房冰箱多采用单级蒸气压缩制冷。

通过试验采集原风冷厨房冰箱的温度（见图 5）、压力（见图 6）数据，结合单级蒸气压缩制冷循环原理，发现原风冷厨房冰箱制冷循环存在以下问题：

（1）蒸发温度偏低：箱体实测蒸发压力为 146.5kPa，对应 R290 制冷剂饱和温度为-33.4℃，与箱内-19.9℃形成 13.5℃传热温差，蒸发温度偏低，导致压缩机制冷量减小，制冷循环效率降低。

（2）过冷度偏低：箱体实测过冷度为 3.7℃，会导致节流后闪发气体增多，压缩机制冷量减小，制冷循环效率降低。

（3）吸气管结霜：实测压缩机吸气管管壁温度-0.4℃，吸气管结霜。

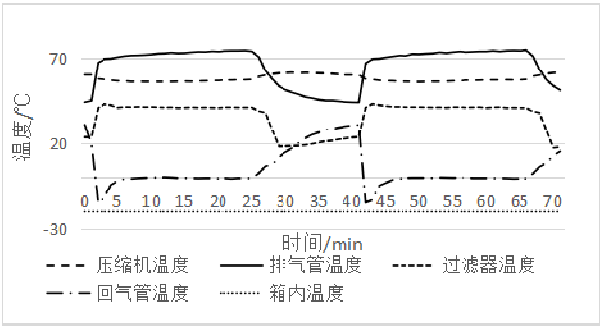


图 5　原风冷厨房冰箱实际循环温度图

Fig.5　Actual cycle temperature diagram of air-cooled kitchen refrigerator

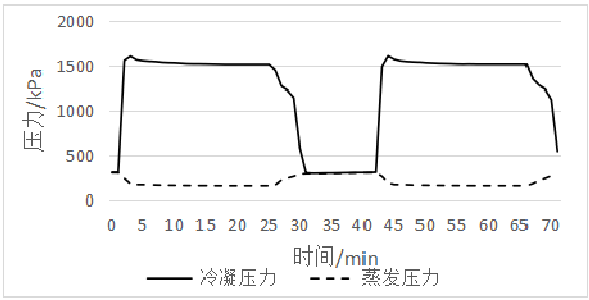


图 6　原风冷厨房冰箱实际循环吸排气压力图

Fig.6　Actual cycle intake and exhaust pressure diagram of refrigerator

3　能耗优化方案设计

针对原风冷厨房冰箱存在的问题，本文从“部件升级、循环优化、控制逻辑调整”三个维度提出了优化方案，具体改进内容如表 2 所示，优化措施的原理示意图如图 7、图 8 所示。

表 2　风冷厨房冰箱改进前后配置表

Table 2　Configuration table of air-cooled kitchen refrigerator before and after improvement

名称	原箱体	改进样机
冷凝器	铜管铝翅片 风机输入功率 72W	微通道 风机输入功率 15W
蒸发器	风机输入功率 36W	风机输入功率 4W
化霜加热丝	输入功率 500W	压缩机热气化霜
中梁加热丝	输入 75W	压缩机排气管加热
毛细管流量	16L	13L
制冷剂灌注量	110g	90g
回热器	无	毛细管和吸气管锡焊式回热器
压缩机	14cc 定频 R290 压缩机	10cc 变频 R290 压缩机

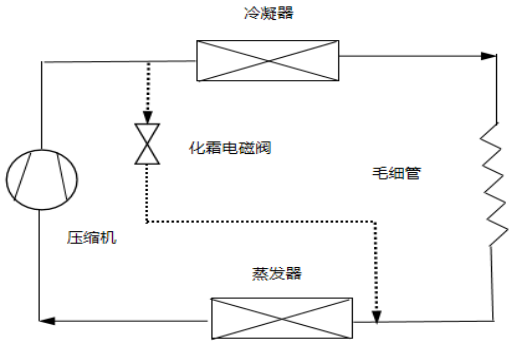


图 7　压缩机热气化霜循环图

Fig.7　Compressor thermal defrosting cycle diagram

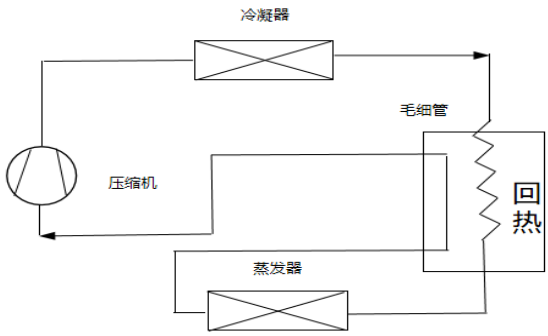


图 8　回热循环图

Fig.8　Reheat cycle diagram air-cooled kitchen refrigerator

优化措施如下：

（1）压缩机定频改变频

选用最高转速下制冷量与原定频压缩机相当的变频压缩机（见表 3），2000rpm 时，COP（性能系数）可从 1.5 提升至 1.75，大幅度降低压缩机耗电。

表 3　定频压缩机和变频压缩机性能对比

Table 3　Performance comparison of fixed-frequency compressor and variable-frequency compressor

压缩机	转速/rpm	ASHRAE LBP 工况		耗电工况 1 蒸发温度：-33.4℃ 冷凝温度：44.5℃ 过冷温度：40.8℃ 环境温度：30℃		耗电工况 2 蒸发温度：-28.2℃ 冷凝温度：37.2℃ 过冷温度：32.2℃ 环境温度：30℃	
		制冷量/W	COP/(W/W)	制冷量/W	COP/(W/W)	制冷量/W	COP/(W/W)
原装定型压缩机	3000	680	1.5	360	1.1	550	1.58
	2000	330	1.75	180	1.65	280	1.98
VFNH100ML	3000	515	1.70	270	1.62	420	1.95
	4200	680	1.6	380	1.55	585	1.85

（2）电加热改余热利用

中梁加热：利用压缩机排气管的高温余热替代电加热丝，无额外能耗；蒸发器化霜：通过电磁阀切换，将压缩机高温排气引入蒸发器化霜（见图 7），

替代电加热。

（3）增加回热循环

毛细管和吸气管之间增加回热（见图 8），让节流前的高温制冷剂与吸气管的低温制冷剂换热，通过热交换作用，提高过冷度，减轻吸气管结霜，提高循环效率。

4　优化后测试结果与分析

4.1　制冷循环工况优化效果

改进样机在 30℃环温、55%相对湿度下的温度（见图 9）、压力（见图 10）测试结果显示，原箱体制冷系统的问题均得到了改善，改善效果如下：

（1）蒸发温度：原箱体实测蒸发压力为 146.5kPa，对应 R290 制冷剂饱和温度为-33.4℃改进样机蒸发压力为 180.1kPa，对应 R290 制冷剂饱和温度为-28.2℃。蒸发温度升高 8.2℃，升高 15%。

（2）冷凝温度：原箱体实测冷凝压力为 1518.1kPa，对应 R290 制冷剂饱和温度为 44.5℃改进样机冷凝压力为 1284kPa，对应 R290 制冷剂饱和温度为 37.2℃。冷凝温度降低 7.3℃，降低 16%。

（3）过冷度：原箱体过冷度为 3.7℃，改进样机过冷度为 5℃，过冷度降低 1.3℃。

（4）吸气管结霜：原箱体压缩机吸气管结霜，改进样机通过毛细管和吸气管增加回热，压缩机吸气管温度升高，无结霜。

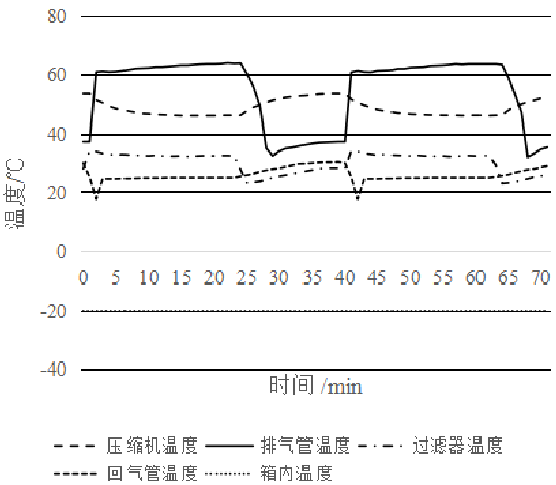


图 9　改进样机实际循环温度图

Fig.9　Improved prototype actual cycle temperature graph

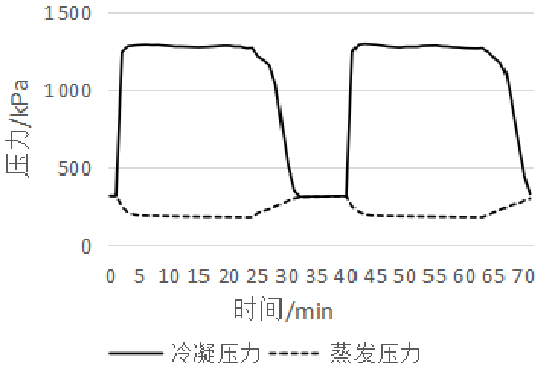


图 10　改进样机实际循环吸排气压力图

Fig.10　Improved actual cycle intake and exhaust pressure diagram of the prototype machine

4.2　变频压缩机性能优化效果

工况优化前，原定频压缩机在耗电工况 1 下 COP（性能系数）仅为 1.1，工况优化后，变频压缩机在耗电工况 2 下最高 COP（性能系数）达到 1.98，远高于定频压缩机，变频压缩机能耗优势显著。

4.3　制冷剂最佳灌注量确定

因变频压缩机在低转速时 COP 更高，因此本文在 2000rpm 下测试不同 R290 灌注量对耗电量的影响（见图 11），结果显示：灌注量为 90g 时，耗电量最低。

在 90g 灌注量下，改进样机的冷却速度（见图 12）显著提升：从室温（30℃）降至-18℃的时间比原箱体加快 17%；最低箱温（拉温深度）比原箱体低 3.7℃，达-28.5℃，制冷能力更强。

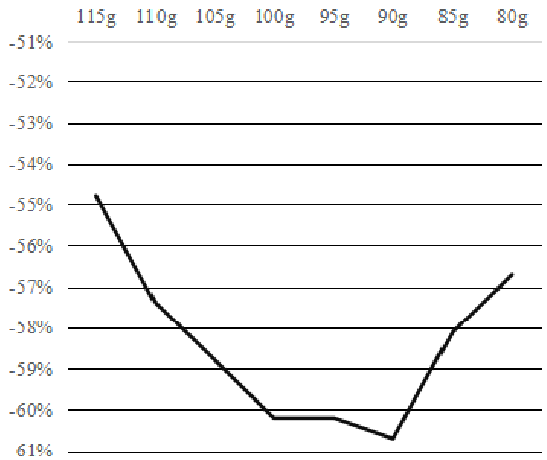


图 11　充注量-耗电曲线

Fig.11　Injection volume - Power consumption curve

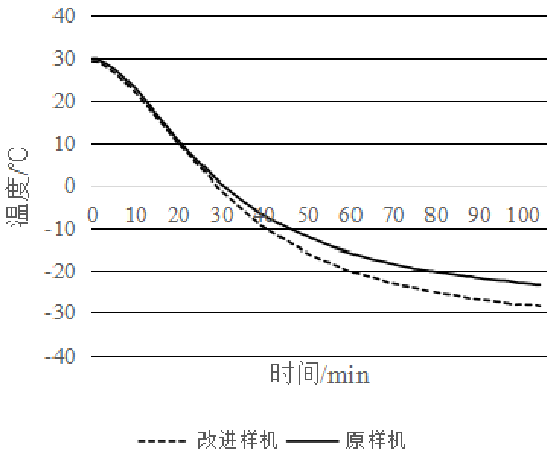


图 12　冷却速度曲线

Fig.12　Cooling rate curve

4.4　化霜优化效果验证

对比原样机电加热化霜与改进后热气化霜的性能（见图 13），改进样机相比原箱体化霜效果更好，功耗更低，化霜功耗降低 29%。需要注意的是采用热气化霜时，化霜电磁阀打开后会导致高压气体瞬间回流，高、低压压力突变，若制冷和化霜切换的逻辑不合理，会导致整机出现不制冷、化霜差等故障。因此压缩机在化霜运行时，应按照一定的控制逻辑运行。

变频压缩机在化霜期间控制逻辑如下：当变频器处于制冷运行状态时，检测到化霜信号要求化霜时，变频压缩机立即停止工作 5min，之后按照“化霜工作程序”要求执行。

化霜工作程序：

（1）正常化霜工作模式：压缩机以允许的化霜最高转速运行，当化霜需求停止后立即停机。再次启动后按照正常化霜模式继续运行。

（2）异常化霜工作模式：当压缩机以允许的化霜最高转速运行，运行时间过长或功率超过限值时，压缩机应立即停机保护 5min，再次启动时按照“化霜后控制”程序运行。

化霜后工作程序：

（1）如果控制状态是化霜，继续按照“化霜工作程序”进行控制运行。

（2）如果控制状态是制冷模式，压缩机应停止 5min 后再次启动。

化霜功率限制：压缩机在化霜模式下运行功率过高时，执行过功率降速策略，降低压缩机功率。

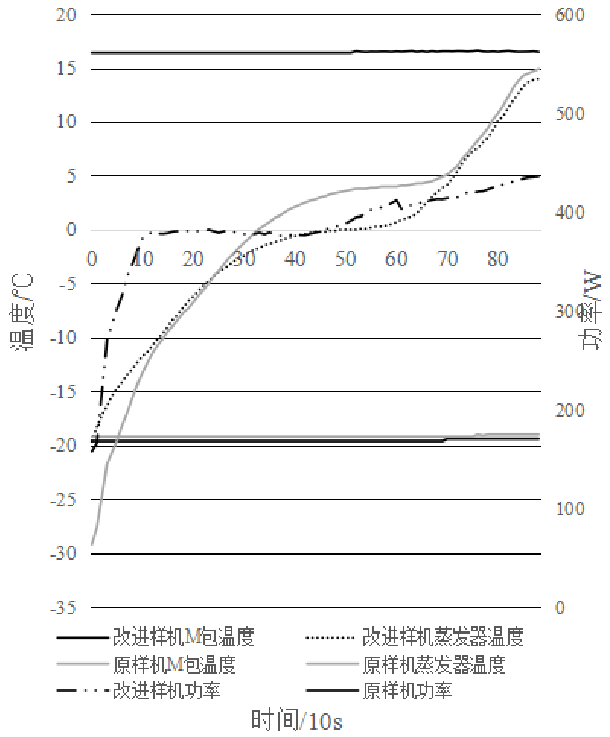


图 13　化霜曲线对比

Fig.13　Comparison of defrosting curves

4.5　最终能耗与能效等级

按照 SB/T 10794.2-2012 规定的方法测试，改进样机耗电量为 4.11kwh/24h，相比原风冷厨房冰箱耗电量降低 60.4%。依据 GB 26920-2024 计算，1 级能耗耗电量限值为 4.4kwh/24h，改进后样机耗电量达到新国标 1 级，如图 14 所示。

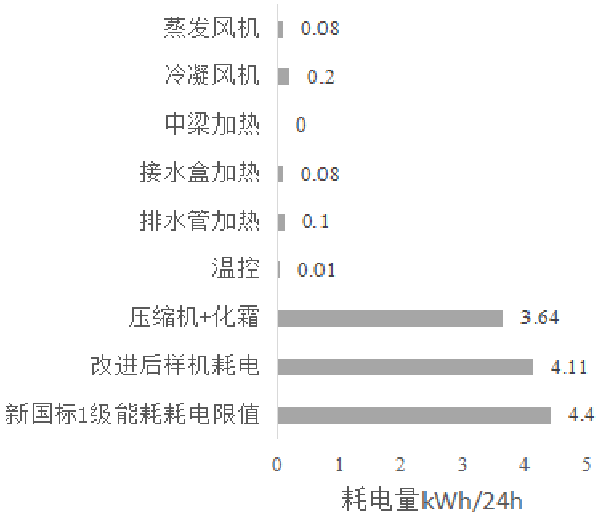


图 14　改进样机耗电量

Fig.14　Improve the power consumption of the prototype

5 结论

本文通过对风冷厨房冰箱的能耗试验与优化研究，得出以下结论：

（1）风冷厨房冰箱的能耗瓶颈源于制冷系统的缺陷：蒸发温度偏低，过冷度偏低、吸气管结霜。

（2）商用厨房冰箱的节能设计需优先关注“余热利用”（如排气加热中梁、热气化霜），可大幅减少辅助电耗。

（3）R290 制冷剂与变频压缩机的匹配需重点调整毛细管流量和灌注量，在满足拉温的同时降低能耗。

（4）变频压缩机热气化霜需配合一定的控制逻辑，避免出现整机不制冷、化霜差等问题。

（5）通过“变频压缩机+微通道换热器+余热利用+回热循环”组合优化，改进后风冷厨房冰箱耗电量降至 4.11kWh/24h，相比原箱体降低 60.4%，满足 GB 26920-2024 新国标 1 级能耗要求，为风冷厨房冰箱的节能设计提供了技术方案。

参考文献：

[1] GB 26920-2024,商用制冷器具能效限定值及能效等级[S].北京:中国标准出版社,2024.

[2] 宋雪娜,李鹤,赵东.GB 26920-2024 能效标准对轻商制冷器具能耗等级影响的试验研究[C].2025 年中国家电科技年会论文集,2025:51-54.

[3] 苗准保.我国轻型商用制冷设备发展现状[J].冷藏技术,2019,42(3):45-51.

[4] Judith EVANS,邵月月,范薇,等.冷链技术简介-第Ⅲ部分 商用、专用及家用制冷设备[J].制冷技术,2021,41(4):97-101.

[5] TAHIR A, BANSAL PK. MEPR versus EEPR valves in open supermarket refrigerated display cabinets[J]. Applied Thermal Engineering, 2005,25(2-3):191-203.

[6] PISSNO A, MARTINEZ-BALL ESTER S, CORBERAN JM, et al. Optimal design of a light commercial freezer through the analysis of the combined effects of capillary tube diameter and refrigerant charge on the performance[J]. International Journal of refrigeration, 2015,52:1-10.

[7] 晏刚,刘浩,樊超超,等.采用并联双制冷系统的立式风冷陈列柜的性能研究[J].制冷与空调,2019,19(1):67-71.

[8] 李银龙,刘国强,田健,晏刚.用于中小型商用制冷设备的制冷剂循环热力学性能分析[J].制冷与空调,2023,(12):74-79.

[9] 宋雪娜,李鹤,王双飞.轻商冷柜压缩机由定频切换变频时的系统匹配实验研究[J].家电科技,2021,(5):68-70.

[10] 应雨铮,刘国强,晏刚.商用冷柜热负荷分析及其绝热技术的研究进展[J].制冷与空调,2021,(10):7-15.