

热负荷仿真在冰箱保温层优化中的应用

崔培培，刘鹏

(合肥美菱股份有限公司，合肥 230601)

(Tel:0551-62219516, Email:cuipei556@163.com)

摘要：冰箱发泡层的保温绝热效果是影响冰箱耗电量的最重要因素。本文通过建立冰箱保温层热负荷仿真模型，研究 GB12021.2《家用电冰箱耗电量限定值及能效等级》能耗测试工况 25℃环温向 16℃和 32℃两种环温转换下冰箱保温绝热优化配方改进方向，经多台样机测试验证，改进后的发泡配方可有效降低 GB12021.2-2015《家用电冰箱耗电量限定值及能效等级》两种环温下冰箱的标准耗电量。

关键词：冰箱，热负荷，保温层，冰箱仿真，耗电量

Application of Refrigerator Thermal Load Simulation on Optimization of Thermal Insulation Layer

Cui Peipei Liu Peng

(Hefei Meiling Co.Ltd, Hefei 230601)

Abstract : The refrigerator thermal insulation of the foamed layer is the most important factor affecting the power consumption. In this paper, the heat load simulation model of refrigerator insulation layer is established to study the energy consumption test condition of GB12021.2 “Frequency Limit and Energy Efficiency Rating of Household Refrigerators”. The 25℃ ambient temperature is converted to 16℃ and 32℃, Refrigerator insulation adiabatic optimizes the formula improvement direction, after several prototype tests verify, the improved foam formula can effectively reduce the GB12021.2-2015 “the limit value of household refrigerators and energy efficiency rating” two kinds of temperature under the refrigerator Standard power consumption.

Keywords Refrigerator, Heat load, Insulation, Refrigerator simulation, Power consumption

0 引言

冰箱作为最常见的家用电器已进入大众家庭，冰箱又是持续工作的家用电器，其电力消耗在家庭用电中占了较大的比例，因此冰箱节能降耗是冰箱企业追求的永恒主题。

国家标准 GB 12021.2—2015《家用电冰箱耗电量限定值及能效等级》已于2016年10月1日正式实施。与 GB 12021.2—2008标准相比，新的标准修订了各能效等级的能效系数，新的能效系数计算方法下，冰箱的能效系数会有较明显的上升。除各能效等级的能效系数外，最明显的就是耗电量测试方法的改变，如表1 GB 12021.2—2015与 GB 12021.2—2008家用电冰箱耗电量差异对比表。

表1 GB 12021.2—2015与 GB 12021.2—2008家用电冰箱耗电量差异对比

测试方法	GB 12021.2—2008	GB 12021.2—2015
耗电量	25℃环境温度测试 冷藏平均温度5℃ 冷冻最高-18℃ 日平均耗电量	16和32℃两个环境温度分别测试 冷藏平均温度4℃ 冷冻平均-18℃ 年耗电量: 16℃全年占192天, 32℃

作者简介：崔培培，(1985—)，女，制冷工程师，主要从事冰箱制冷系统匹配及性能仿真相关研究。

测试环温由25℃改为16℃和32℃两个环温下，耗电量按两个环境温度下的综合算术平均值。以往的研究主要针对GB 12021.2—2008所要求的25℃工况下对保温层进行优化发泡配方，但对更改后的16℃和32℃综合效果优化匹配研究至今未见相关报道。本文即通过分别建立原标准GB 12021.2—2008和新标准GB 12021.2—2015下的冰箱保温层仿真模型，分析两种标准下冰箱保温层优化高效点确定保温层保温优化方向，优化冰箱发泡料配方，并制作样机加以验证。

1 冰箱热负荷模型理论分析

冰箱热负荷的组成包括漏热负荷、储物热负荷、电热负荷等，其中漏热负荷是冰箱的固有特性，也是最主要的热负荷。冰箱漏热负荷主要包括：隔热层漏热、门封条泄漏热、管道等部件的传导热负荷、冰箱开停机产生的“呼吸”热负荷、制冷系统工况周期性变换增加的热负荷等。在冰箱产品设计实践中，通常把隔热层漏热、门封条泄漏热分别计算出来，将其他漏热部分作为修正值，即：

$$Q=Q1+Q2+QK。$$

式中： Q —总热负荷； $Q1$ —隔热层热负荷； $Q2$ —门封条热负荷； QK —热负荷修正值(本文仅做对比不考虑热负荷修正部分)。

根据传热学的基本理论，冰箱箱体漏热热负荷目前的处理方法是将冰箱每个面简化成有限大平板的一维导热问题进行求解。冰箱壁面的传热需要简化为随环境变温的变导热系数的一维稳态导热问题。

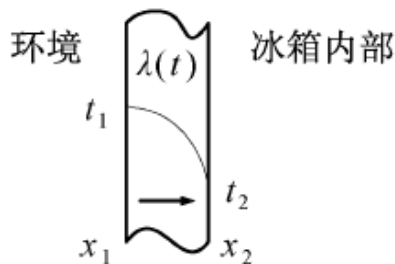


图1 变导热系数的一维稳态导热

冰箱每个面的漏热量可以用傅里叶定律表示[传热学理论公式]：

$$Q_i = -A_i \lambda_i(t) \frac{dt}{dx} \Big|_i \quad (1)$$

$$\text{令 } \bar{\lambda}_i = - \frac{\int_{t_1}^{t_2} \lambda_i(t) dt}{(t_2 - t_1)},$$

$$\text{则 } Q_i = - \frac{\bar{\lambda}_i (t_2 - t_1)_i}{\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{A_i}}$$

冰箱各面总漏热量可表示为：

$$Q1 = \sum Q_i$$

门封漏热： $Q_2 = kL\Delta t$

其中，k为门封漏热系数，L门封长度。

根据本文引言已阐述新国标GB12021.2-2015耗电量测试环境温度有单一的25℃更改为16℃和32℃，由公式（1）可知耗电量测试标准对环温的改变会导致平均导热系数变化。原以25℃环温下的发泡体系配方已无法满足16℃和32℃两种环境温度下导热系数的要求。

2 冰箱热负荷建模分析

本文以BCD-320W型号冰箱为例，通过对箱体建立热负荷模型，分析两种标准下不同环境温度热负荷变化情况。箱体外形及保温层分布参数见表2，热负荷仿真结果如表3。

表2 箱体外形尺寸及各间室保温层分布参数

型号	冷藏冷冻箱	BCD-360W
箱体尺寸	(高×宽×深)	1760×650×600
箱体	冷藏室两侧(mm)	55
	冷藏室顶部(mm)	50
	冷藏室后背(mm)	60
	冷藏室底部(mm)	55
	冷冻室两侧(mm)	83
	冷冻室背部(mm)	81
	冷冻室底部(mm)	75
	压缩机顶部(mm)	75
	压缩机前部(mm)	80
	门体	冷藏室门体(mm)
冷冻室门体(mm)		75

表3不同环境温度下热负荷仿真模型及计算结果

箱体热负荷	导热系λ (W/m·℃)	壁面面积 S (m ²)	32(℃)		16(℃)		25(℃)		
			Δt(℃)	Q32 (W)	Δt(℃)	Q16 (W)	Δt(℃)	Q25 (W)	
顶部	0.019	0.29	28	2.9	12	1.19	21	2.12	
左侧	0.019	0.46	33	5.13	15	2.23	29	4.4	
右侧	0.019	0.46	33	5.13	15	2.23	29	4.4	
底部	0.019	0.29	-24	-1.83	-24	-1.75	-24	-1.74	
背部(蒸发器室)	0.019	0.19	45.6	3.93	18	1.49	38.6	3.25	
冷藏	背部剩余	0.019	0.27	28	2.34	12	0.96	21	1.71
	左门	0.019	0.25	28	1.93	12	0.79	21	1.41
	右门	0.019	0.25	28	1.93	12	0.79	21	1.41
	翻转梁	0.045	0.04	28	1.52	12	0.63	21	1.11
	门封	0.037	/	28	4.88	12	2.09	21	3.66
	侧面+后背	0.019	/	28	0.53	12	0.22	21	0.39
	侧面+顶部	0.019	/	28	0.38	12	0.15	21	0.27
	顶部+后背	0.019	/	28	0.2	12	0.08	21	0.15

顶部	0.019	0.29	24	1.83	24	1.75	24	1.74
左侧上	0.019	0.21	55	2.62	37	1.68	51	2.36
右侧上	0.019	0.21	55	2.62	37	1.68	51	2.36
左侧下	0.019	0.08	55	0.98	37	0.63	51	0.89
右侧下	0.019	0.08	55	0.98	37	0.63	51	0.89
底部	0.019	0.15	50	2.23	34	1.45	47	2.05
背部（蒸发器）	0.019	0.23	53.6	2.94	40	2.1	46.6	2.49
冷 压机室顶部	0.019	0.06	65	1.0	43	0.63	58	0.87
冻 压机室侧部	0.019	0.08	65	1.2	43	0.76	58	1.05
上门	0.019	0.22	50	2.79	34	1.81	43	2.33
下门	0.019	0.22	50	2.79	34	1.81	43	2.33
门封	0.037	/	55	7.86	37	5.29	51	7.29
风扇				0.38		0.23		0.55
侧面+后背	0.019		50	0.44	34	0.28	43	0.37
后背+底部	0.019		50	0.54	34	0.35	43	0.45
侧面+底部	0.019		50	0.67	34	0.43	43	0.56
合计(W)				60.86		32.64		51.09

表4 不同环温下总漏热对耗电量的影响量

环温(°C)	32	16	25
冷藏热负荷 (W)	28.99	11.12	22.53
冷冻热负荷 (W)	31.86	21.52	28.56
总热负荷 (W)	60.86	32.64	51.09
冷藏热负荷占比	47.60%	34.10%	44.10%
冷冻热负荷占比	52.40%	65.90%	55.90%
耗电量占比天数	173	192	365
耗电量占比	62.70%	37.30%	100.00%

表5 纯发泡层两侧不同温度影响量占比

环温(°C)	32	16	25
冷藏热负荷 (W)	22.59	8.39	17.76
冷冻热负荷 (W)	23.62	16	20.72
总热负荷 (W)	46.21	24.4	38.48
冷藏热负荷占比（发泡料两侧温度°C）	48.9%(4,32)	34.4% (4,16)	46.2% (5,25)
冷冻热负荷占比（发泡料两侧温度°C）	51.1% (-18,32)	65.6% (-18,16)	53.8% (-18,25)

备注：数据为去翻转梁和门封后单纯发泡料影响因素分析

根据热负荷仿真结果分析如表4~5：1)、按耗电量计算，如表4不同环温下总漏热对耗电量的影响量，16°C耗电量占比在37.3%，32°C能耗占比在62.7%，因此32°C下制冷工况及发泡料的改善对GB12021.2-2015标准下标准耗电量影响最大。

2)、由于发泡料仅影响箱体和门体，对门封等无影响，因此表5仅核算纯发泡层影响的漏热，排除门封等漏热影响。16°C环温下冷藏热负荷(4~16°C温差)占比为34.4%，冷冻热负荷(-18°C

~16℃温差) 占比65.6%;

32℃环温下, 冷藏热负荷(4~32℃温差) 占比48.9%, LD (-18℃~32℃温差) 占比51.1%;

3)、同时考虑制冷系统效率, 冷冻热负荷对耗电量影响系数大于冷藏, 综合分析发泡层两侧温差占比及耗电量影响, 影响量最大的温差范围是32℃环温冷冻间室即-18℃~32℃。

3 冰箱保温发泡改进

根据GB12021.2-2015耗电量测试标准要求, 如表6不同环温温差下的发泡层综合传热系数占比分析, 计算发泡料综合传热系数K:

$$K = (K1+K2)/2*37.3\%+(K3+K4)/2*62.7\%$$

由于有热负荷仿真模型分析, 在发泡层在-18~32℃即K4对能耗影响最大, 发泡料重点改进, 因此降低高温下K值是设计发泡配方的关键。通过高粘度、快反应降低高温下K值。通过优化单体, 提高导热的绝对值, 使得导热在高温下的数值变小, 如表7。采用新配方发泡料综合K比原来发泡体系降低约3%, 如表8。

表6 发泡料综合传热系数K值占比分析表

	发泡层两侧温差	传热系数 K
16℃环温占比 37.3%	4~16℃	K 1
	-18~16℃	K 2
32℃环温占比 62.7%	4~32℃	K 3
	-18~32℃	K 4

表7 原配方和新配方更改对比

	原发泡配方	新发泡配方
组合聚醚	105	95
单体 A2	/	8
CP	12	12
245fa	3	3
拉丝	51	51
密度	22.3	22.20

表8 原配方和新配方不同状态下K值对比

	原发泡配方传热系数 K		新发泡配方传热系数 K	
16℃环温	4~16℃	18.81	4~16℃	18.43
能耗工况 温差	-18~16℃	18.46	-18~16℃	18.09
32℃环温	4~32℃	19.5	4~32℃	18.92
能耗工况 温差	-18~32℃	19.21	-18~32℃	18.63

4 样机实验验证

通过上述分析, 采用新配方发泡制作三台BCD-360W样机, 同时与原配方发泡料样机测试对比。根据GB12021.2-2015能耗测试方法进行测试, 考虑影响冰箱耗电量的因素较多, 特别是风冷冰箱, 故仅比较稳定状态下的稳态耗电量, 同时为避免系统效率影响稳态耗电量结果, 测试中通过小范围内调整变频压缩机转速以减小新配方样机和原配方样机由于保温效果的更变对耗电量测试验证结果的影响。如表9, 原配方3台样机与新配方3台样机稳态耗电量

测试结果，从测试结果可以看出，新配方下样机32℃稳态耗电量降低3.18%，16℃稳态耗电量提升2.62%，新发泡配方对能耗提升显著。

表9 原配方与新配方稳态耗电量测试结果

样机	原发泡配方		样机	改进发泡配方		提升比例	
	32℃稳态 能耗	16℃稳态能耗		32℃稳态能 耗	16℃稳态 能耗	32℃稳态 能耗	16℃稳态 能耗
NO1	0.92	0.403	NO4	0.883	0.392		
NO2	0.892	0.398	NO5	0.865	0.382		
NO3	0.875	0.382	NO6	0.853	0.378		
平均	0.896	0.394	平均	0.867	0.384	3.18%	2.62%

5 总结

本文通过冰箱保温层仿真实论建立冰箱保温层热负荷仿真模型，分析GB12021.2-2008《家用电冰箱耗电量限定值及能效等级》25℃环温下耗电量向GB12021.2-2015《家用电冰箱耗电量限定值及能效等级》16℃和32℃两种综合环温工况下耗电量转换下，冰箱保温绝热优化配方方向，通过发泡配方的改进，降低两种环温下发泡层综合传热系数K值，经K值测试和多台样机测试验证表明：根据冰箱热负荷仿真分析方向更改后的保温层绝热优化方向更改冰箱发泡配方可有效降低GB12021.2-2015两种测试工况下冰箱标准耗电量。

参考文献

- [1] 杨世铭,陶文铨. 传热学. 北京: 高等教育出版社(第四版), 2006.
- [2] 刘导金,罗莉文等. 仿真计算在节能冰箱开发中的应用[J], 家电科技. 2017,1:83-85.
- [3] 和鹏,粘权鑫等. 冰箱冷量损失的实验测定与保温性能的改进[J], 制冷学报. 2017,5:83-87.
- [4] 梁耀文,张军等. 365mfc/245fa/环戊烷三元混合体系发泡技术在冰箱的试验研究[J], 日用电器. 2015,2:46-51.