

R290 制冷系统节流毛细管的设计及分析

田德强 李平 逯兆栋 田向阳 夏俊伟

(TCL 家用电器 (合肥) 有限公司, 230601)

摘要: R290 制冷剂的热力学性能良好且环保无公害。在商业展示柜及无人售货机上进行匹配 R290 制冷系统, 是制冷剂 R134a、R600a 具有无法替代的优势。通过对 R290 制冷系统影响系统制冷剂质量流量的节流毛细管影响因素的分析, 结果表明: 节流毛细管的流量性能直接影响整个制冷系统的运行性能。节流毛细管的内径、进入节流毛细管前制冷剂的过冷度、冷凝器的冷凝温度及系统的质量流量是节流毛细管流量性能的关键影响因素, 合理选择节流毛细管进口状态参数及其长度对节流毛细管的流量性能与整个制冷系统的匹配具有重要的指导意义。

关键词: R290; 节流毛细管; 无人售货机; 性能分析; 质量流量; 制冷系统; 匹配

Calculation and Analysis of Throttle Capillaries in R290 Refrigeration System

Tian Deqiang, Li Ping, Lu Zhao Dong, Tian Xiang Yang, Xia Jun Wei

(TCL Home Appliances (Hefei) Co., Ltd, 230601)

Abstract:

The R290 refrigerant has good thermodynamic properties and is environmentally friendly. Matching the R290 refrigeration system on commercial display cases and unmanned vending machines is an irreplaceable advantage for refrigerants R134a, R600a. By analyzing the effect of the throttled capillary on the refrigerant mass flow of the R290 refrigeration system, the results show that the flow performance of the throttling capillary directly affects the performance of the entire refrigeration system. The internal diameter of the throttling capillary, the degree of subcooling of the refrigerant before entering the throttling capillary, the condensation temperature of the condenser, and the mass flow rate of the system are the key factors influencing the flow performance of the throttling capillary. Reasonably selecting the inlet state parameter and length of the throttling capillary It has important guiding significance for the flow performance of the throttling capillary and the matching of the whole refrigeration system.

Keyword: R290; Throttle capillary; Vending machine; Performance analysis; Mass flow; Refrigeration system; Match

1 引言

随着世界制冷技术的快速发展, 制冷工质的需求量越来越多, 从对环境的长期影响来看, 天然制冷工质的启用是一种必然的安全选择。R290(丙烷) 完全由碳氢元素构成的天然工质, ODP 值为零, GWP 值仅为 0.03, 并且其还具有良好的热力学性能, 是一种完全环保的制冷剂, 愈来愈受到全球制冷行业内的关注及广泛推广。

目前，我国制冷行业在制冷量 300W 以上的商用柜和无人售货机等制冷产品上绝大部分仍在使用 R134a 系统作为制冷剂，制冷量 300W 以下在大容积风冷冰箱上使用 R600a 系统作为制冷剂，使用 R290 系统做为制冷剂的产品非常少。本文通过今年在 TCL 公司开发的 LC-640L 无人售货机上匹配 R290 制冷系统，对制冷系统上影响其制冷剂质量流量的节流毛细管进行设计计算和对影响节流毛细管的流量性能的影响因素进行分析。

2 制冷工质的基础热物理性质

表 1 R600a、R290 及 R134a 的基础热物性参数

参数	R600a	R134a	R290
分子量	58.12	102.03	44.1
组成比例	1	1	1
沸点温度 (°C)	-11.7	-26.074	-42.09
临界温度 (°C)	152	101.06	96.7
临界压力 Mpa	3.8	4.06	4.25
ODP	0	0	0
GWP	<20	1300	<20
饱和液体密度 kg/m ³	593.83	511.9	580.89
毒性	无毒	无毒	微毒
可燃性	易燃	不可燃	易燃
纯度 ≥%	98.5	99.9	99.5

3 标准工况下三种制冷剂的性能比较

表 2 标准工况下各制冷剂的主要制冷性能

参数	单位	R600a	R134a	R290
冷凝压力	KPa	762.32	1470.58	1882.62
蒸发压力	Kpa	62.43	115.8	217.6
排气温度	°C	115.88	134.21	129.64
压比		12.21	12.7	8.65
单位容积制冷量	KJ/m ³	358.43	664.97	1025.2
单位质量制冷量	KJ/kg	247.11	139.81	262.37
耗电	W	152.12	84.57	162.39
COP	W/W	1.7	1.65	1.62

注：标准工况指冷凝温度为 54.4℃，蒸发温度为-23.3℃，吸气温度为 32.2℃，过冷温度为 32.2℃，压缩机定熵压缩指数为 0.66。

从表 2 可以看出，R600a 良好的热力学性能使 R600a 压缩机的 COP 值达到目前的 2.1，但 R600a 的单位容积制冷量较小，制造制冷量大于 300W 的压缩机较为困难，在当前以节能为主时代，R600a 广泛应用于冰箱及家用冷柜上。在压力方面，虽然 R290 的冷凝、蒸发压力高于 R134a，但 R290 的压缩比远小于 R134a。因此。R290 压缩机的效率容易提高，在单位容积制冷量和单位质量制冷量方面，R290 分别 R134a 大 87.7% 和 54.2%，所以在相同制冷系统上，R290 系统的制冷剂灌注量比 R134a 小 60%左右。故 R290 制冷系统制冷量在 300W 到 400W 之间的商用柜及无人售货机产品应用上逐渐被关注及推广应用。

4 无人售货机制冷循环的性能计算和理论分析

4.1 无人售货机的箱体热负荷计算

本文以 TCL 公司开发的 LC-640 无人售货机进行计算和分析

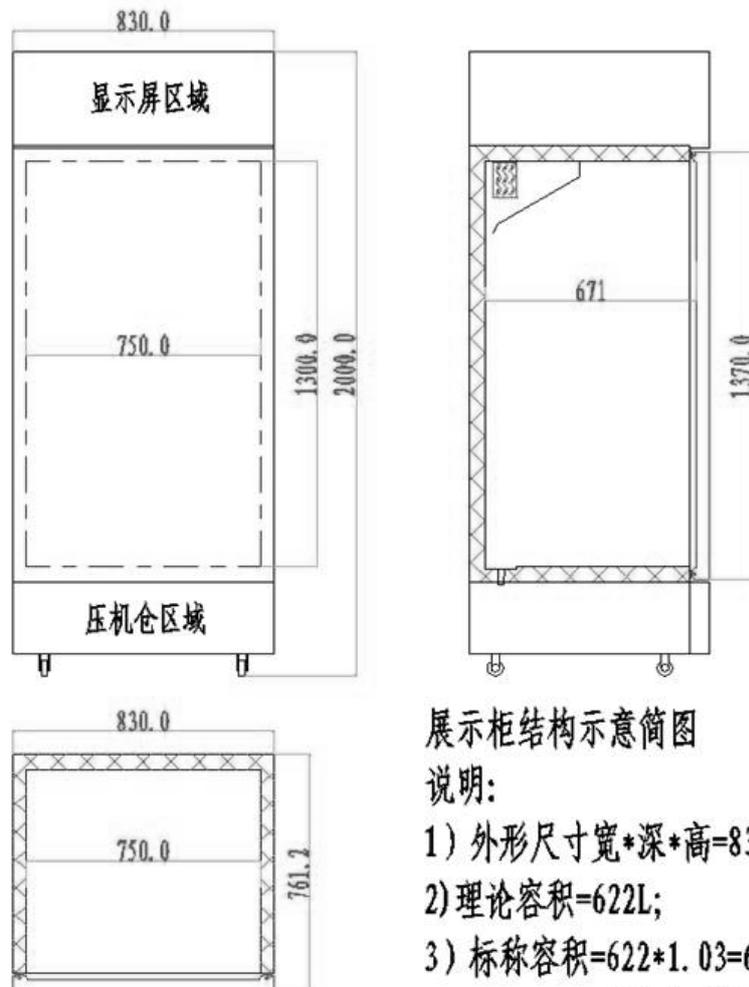


图 1 无人售货机箱体尺寸结构图

表3 LC-640 无人售货机箱体热负荷计算表

LC-640 计算数据表					
设计参数		箱尺寸			
冷藏室外表面 a_{os} (W/(m ² ·°C))	6	泡层 δ (mm)	冷藏室		压机部分
			顶部	50	55
后部	54				
冷藏室内表面 a_{is} (W/(m ² ·°C))	20.4		左侧面	40	43
			右侧面	40	43
泡层导热系数 λ (W/(m·°C))	0.0185		底面	55	
		门体	40		
		箱尺寸		宽度 (m)	0.83
环境温度 t_0 (°C)	32		深度 (m)	0.582	0.7
冷藏室温度 t_r (°C)	6		高度 (m)	1.36	0.235
玻璃导热系数 λ (W/(m·°C))	0.65	其他	容积 V_B (L)	640	/
玻璃厚度 δ (mm)	40				
空气导热系数 W /(m·°C)	5				
压机仓内温度 (°C)	42				
传热系数计算 $K=1/(1/a_{o1}+1/a_{i1}+\delta/\lambda)$				箱体漏热计算 $Q_i=K*A*\Delta t$ (W)	
		冷藏室	压机仓	压机仓	冷藏室
顶部		0.343	0.314	-3.722	4.304
后面		0.319	/	/	9.363
左侧面		0.421	0.394	-0.648	8.655
右侧面		0.421	0.394	-0.648	8.655
底面		0.314	/	/	5.454
门体		2.095	/	/	61.499
箱体漏热汇总		/	/	/	97.928
箱体漏热汇总				-5.018	0.000
门封漏热 $Q_2=0.15*$ 箱体总热负荷				/	14.689
使用热负荷 $Q_4=m*c*(t_1-t_2)/24$				0.000	174.000
开门热损失 $Q_5=V_{in}\Delta h/3.6V_a$				0.000	28.365
汇总				-5.018	314.983
$Q=1.1*(Q_1+Q_2+Q_3+Q_4+Q_5)$				340.962	
<p>储物热量计算式说明: m: 饮料存物总量, 每升有效容积储物 0.18kg; c: 饮料的比热<4.1868 kJ/(kg·°C)>; t_1: 水的初始温度<32°C>; t_2: 水的末态温度<6°C>;</p>					
<p>开门热损失计算说明: 开门次数冷藏室按 2 次/h 计算; 计算式中, n: 开门次数; Δh: 进入空气达到规定温度的比焓差, 根据湿空气焓湿图, 查得<32°C, 75%>空气比焓为 90.2kJ/Kg, <6°C, 85%>空气比焓为 18.4kJ/Kg, 24 为每天 24 小时更换储物一次。</p>					

4.2 LC-640 无人售货机制冷循环节流系统的质量流量计算

无人售货机 LC-640 采用间冷无霜系统，强制通风空气冷却式冷凝器，冷凝温度 $T_k=42^\circ\text{C}$ ；蒸发器采用空气冷却式，间室温度为 $0^\circ\text{C}\sim 12^\circ\text{C}$ ，平均温度为 6°C ，蒸发温度 $T_o=-13^\circ\text{C}$ ，设定节流毛细管的内径 $d=1\text{mm}$ ，冷凝器出口过冷度 $T_{ks}=0^\circ\text{C}$ 。

根据 R290 系统 ASHRAE-工况压焓图测试工况下的蒸发压力 $P_o=0.309\text{MPa}$ ，冷凝压力 $P_k=1.4337\text{MPa}$

$$\text{制冷剂质量流量 } m = \frac{Q}{h_1-h_3} \text{ kg/s}$$

其中： h_1 为压缩机吸入制冷剂气体的焓值 559.15kJ/kg ； h_3 为蒸发器入口制冷剂的焓值 282.69kJ/kg

$$m = \frac{0.34096}{559.15-282.69} = 4.44(\text{kg/h})。$$

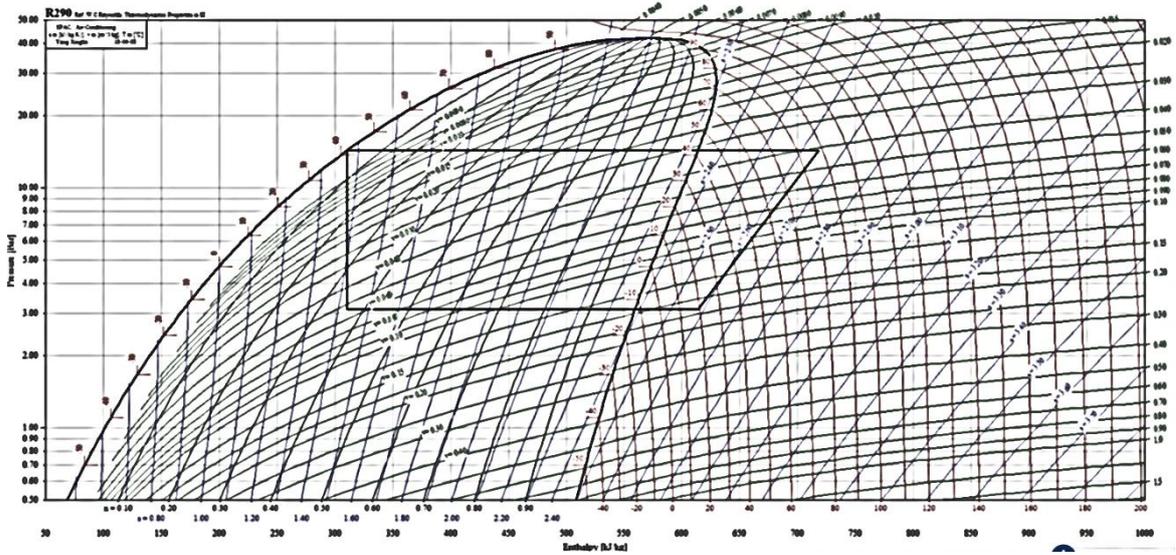


图 2 R290 压焓图—ASHRAE 工况

4.3 LC-640 无人售货机制冷循环节流系统毛细管长度的计算

适用于制冷剂 R290 制冷系统节流毛细管质量流量的关系式如下：

$$\pi_1 = 4.2579 \times 10^3 \pi_2^{0.7388} \pi_3^{-0.2220} \pi_4^{0.4671} \pi_5^{0.1226} \pi_6^{1.5956} \pi_7^{0.7061}$$

π_1 ——流量影响 π_2 ——节流装置进口压力影响 π_3 ——制冷剂密度影响 π_4 ——几何尺寸影响
 π_5 ——摩擦的影响 π_6 ——制冷剂干度的影响 π_7 ——制冷剂过冷的影响

$$\pi_1 = \frac{1.273m}{d^2 P_{in}^{0.5} \rho_{in}^{0.5}} \quad m \text{---质量流量 kg/h, } d \text{---毛细管内径 mm, } P_{in} \text{---毛细管进口制冷剂压力}$$

Pa, ρ_{in} ——毛细管进口制冷剂密度 kg/m^3

$$\pi_2 = \frac{P_{in}}{P_{sat}} \quad \text{毛细管进口过冷时 } P_{sat} \text{---饱和状态下的压力 pa}$$

$$\pi_3 = \frac{\rho_f}{\rho_g} \quad \rho_f \text{ 冷凝温度下饱和液体状态时, 制冷剂的密度 } \text{kg/m}^3$$

$$\rho_g \text{ 冷凝温度下饱和气体状态时, 制冷剂的密度 } \text{kg/m}^3$$

$$\pi_4 = \frac{d}{L} \quad \text{式中 } L \text{---毛细管长度 mm } d \text{---毛细管内径}$$

$$\pi_5 = \frac{d\sqrt{P_{in}\rho_{in}}}{\mu_{in}} \quad \mu_{in} \text{---毛细管进口制冷剂动力黏度 pa}\cdot\text{s}$$

$$\pi_6 = 1 - X_{in} \quad X_{in} \text{ --- 毛细管进口制冷剂的干度}$$

$$\pi_7 = 1 + \frac{t_{ks}}{t_k} \quad t_{ks} \text{ --- 过冷度 } ^\circ\text{C} \quad t_k \text{ --- 冷凝温度 } ^\circ\text{C}$$

通过查 R290 物理性质参数表可知，制冷剂 R290 在冷凝温度 42 度条件下，饱和液体密度 $\rho_g = 463.8913 \text{ kg/m}^3$ ；饱和气体密度 $\rho_f = 31.7014 \text{ kg/m}^3$ ；饱和液体的动力粘度 $\mu_{in} = 8.10491 \times 10^{-5} \text{ pa} \cdot \text{s}$ 各参数计算结果如下表：

表 4 系统质量流量关系式中各影响参数

π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	π_6	π_7
219.16	1	14.63	1/L	3.18×10^5	1	1

根据 R290 制冷系统节流毛细管质量流量的关系式，求得：

$$L = 4.45 \text{ (m)}$$

5 LC-640 无人售货机制冷循环节流系统影响因素的理论分析

小型制冷系统的节流毛细管其作用是使高温高压的液体制冷剂被迫通过一个很小的截面积，产生合适的沿程阻力损失。靠其内径和长度的大小来控制液体制冷剂流量以满足蒸发器在合适的状态下工作。在制冷系统设计时，不考虑制冷剂在节流毛细管流动时产生闪发气体多少以及工艺缠绕圈数所产生的影响等因素。在一定的制冷工质下，仅考虑节流毛细管的内径，毛细管进口过冷度的大小，系统冷凝温度的高低及系统的制冷剂质量流量的大小对节流毛细管长度大小的影响，对类似制冷设备制冷系统设计具有一定的指导和参考意义。

5.1 改变节流毛细管的内径，对节流毛细管长度的影响

该无人售货机制冷系统冷凝温度 $T_k = 42^\circ\text{C}$ ，冷凝器出口过冷度 $T_{ks} = 0^\circ\text{C}$ ，毛细管进口制冷剂干度 $X_{in} = 0$ ，系统的制冷剂质量流量 $m = 4.44 \text{ (kg/h)}$ ，现改变节流毛细管内径 d 的大小，其计算对应各参数如下：

表 5 改变毛细管内径后，各影响参数值

$d \backslash \pi$	π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	π_6	π_7
1	219.16	1	14.63	1/L	3.18×10^5	1	1
0.95	242.84	1	14.63	0.95/L	3.02×10^5	1	1
0.9	270.57	1	14.63	0.9/L	2.86×10^5	1	1
0.85	303.34	1	14.63	0.85/L	2.7×10^5	1	1
0.8	342.44	1	14.63	0.8/L	2.54×10^5	1	1
0.75	389.62	1	14.63	0.75/L	2.39×10^5	1	1
0.7	447.27	1	14.63	0.7/L	2.23×10^5	1	1
0.65	518.72	1	14.63	0.65/L	2.07×10^5	1	1

表 6 改变节流毛细管内径，节流毛细管的长度

毛细管内径 $d \text{ (mm)}$	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1.00
节流毛细管长度 $L \text{ (m)}$	0.41	0.62	0.9	1.29	1.81	2.48	3.36	4.45

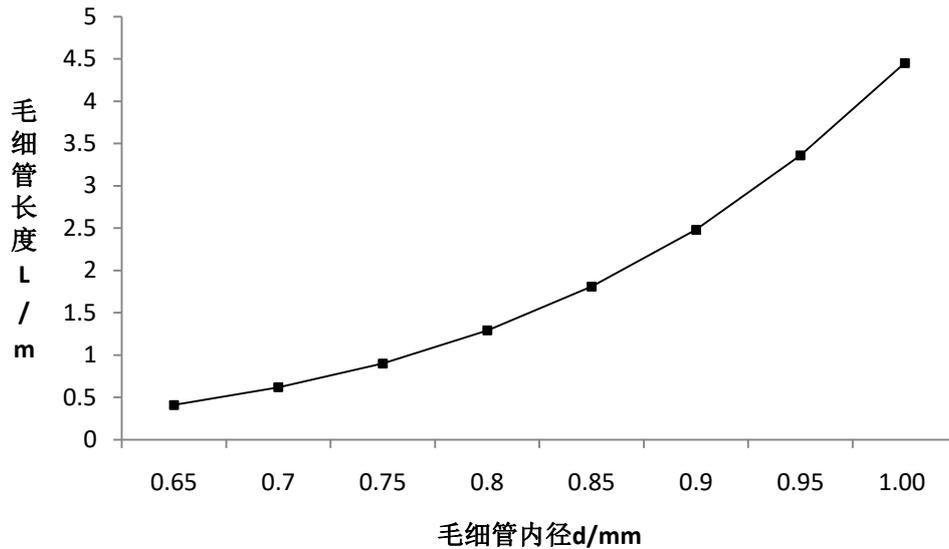


图3 毛细管内径改变时长度的变化

从图3可以看出：随着毛细管内径的增加，毛细管长度发生显著的改变。根据伯努力方程可知，理想流体在水平管内流动时，截面大的地方，流速小，压力大；截面小的地方，流速大，压力小。在制冷系统设计时，我们将系统内制冷剂的流动，看作理想流体的稳定流动，当毛细管内径增大时，制冷剂流速减小，压力变大，压差发生变化，毛细管长度就要增加。

5.2 改变冷凝器出口制冷剂的过冷度，对节流毛细管长度的影响

该无人售卖机制冷系统冷凝温度 $T_k=42^\circ\text{C}$ ，毛细管进口制冷剂干度 $x_{in}=0$ ，系统的制冷剂质量流量 $m=4.44(\text{kg/h})$ 。改变冷凝器出口制冷剂液体的过冷度 T_{ks} ，节流毛细管的变化情况如下表6所示。

表7 改变冷凝器出口制冷剂液体过冷度时，各影响参数值

T_{ks} \ Π	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5	Π_6	Π_7
0	219.16	1	14.63	1/L	3.18×10^5	1	1
1	221.25	1	14.63	1/L	3.15×10^5	1	1
2	223.39	1	14.63	1/L	3.12×10^5	1	1
3	225.56	1	14.63	1/L	3.09×10^5	1	1
4	227.79	1	14.63	1/L	3.06×10^5	1	1
5	230.05	1	14.63	1/L	3.03×10^5	1	1
6	232.35	1	14.63	1/L	3.00×10^5	1	1
7	234.71	1	14.63	1/L	2.98×10^5	1	1

表8 改变冷凝器出口制冷剂过冷度，节流毛细管的长度

冷凝器出口过冷度 T_{ks} ($^\circ\text{C}$)	0	1	2	3	4	5	6	7
节流毛细管长度 L (mm)	4.45	4.35	4.25	4.15	4.05	3.94	3.86	3.76

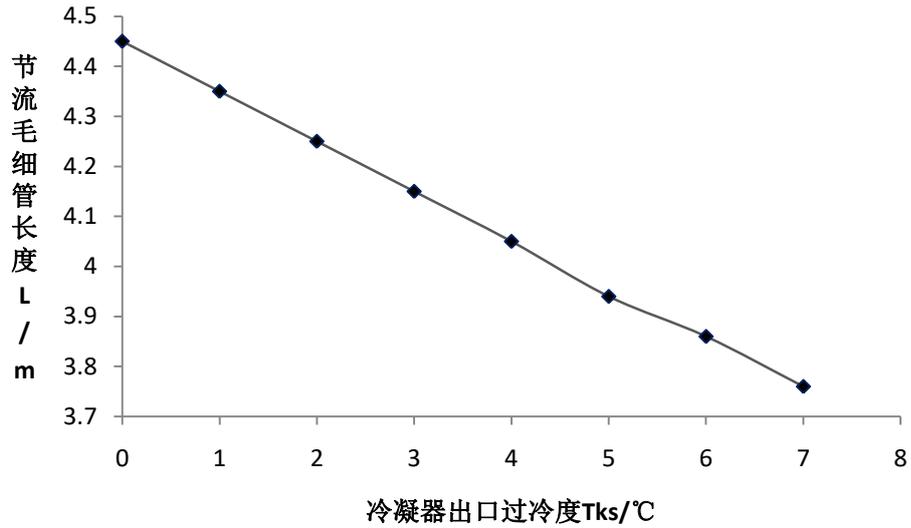


图4 冷凝器出口过冷度改变时长度的变化

从图4可以看出：冷凝器出口制冷剂过冷度与节流毛细管长度呈线性变化的关系，在相同的冷凝温度下，冷凝器出口制冷剂液体过冷度越大，进入节流毛细管的液体制冷剂温度越低，导致在节流毛细管内径不变的情况下，长度减小。

5.3 改变冷凝温度，对节流毛细管长度的影响

该无人售卖机制冷系统节流毛细管内径 $d=1\text{mm}$ ，毛细管进口制冷剂干度 $x_{in}=0$ ，系统的制冷剂质量流量 $m=4.44(\text{kg/h})$ ，过冷度 $T_{ks}=0^{\circ}\text{C}$ ，改变冷凝温度，节流毛细管的长度影响如下：

表9 改变冷凝温度时，各影响参数值

$T_k \backslash \Pi$	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5	Π_6	Π_7
42	219.16	1	14.63	1/L	3.18×10^5	1	1
43	217.10	1	14.22	1/L	3.24×10^5	1	1
44	215.17	1	13.82	1/L	3.34×10^5	1	1
45	213.11	1	13.43	1/L	3.38×10^5	1	1
46	211.17	1	13.04	1/L	3.45×10^5	1	1
47	209.28	1	12.67	1/L	3.52×10^5	1	1
48	207.42	1	12.31	1/L	3.59×10^5	1	1
49	205.60	1	11.96	1/L	3.66×10^5	1	1

表10 改变冷凝温度，节流毛细管的长度

冷凝温度 $T_k (^{\circ}\text{C})$	42	43	44	45	46	47	48	49
节流毛细管长度 $L (\text{m})$	4.45	4.62	4.82	5.00	5.20	5.40	5.61	5.83

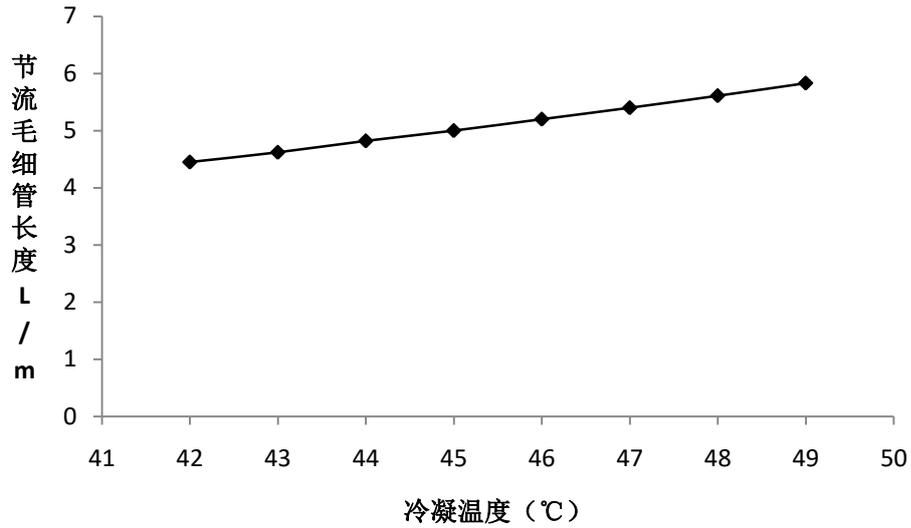


图 5 冷凝温度改变时节流毛细管长度的变化

从图 5 看出：在其它条件不变的情况下，冷凝温度增加，节流毛细管两端压力差变大，长度增大，增加的趋势近似线性。

5.4 改变系统的制冷剂质量流量，对节流毛细管长度的影响

该无人售卖机制冷系统节流毛细管内径 $d=1\text{mm}$ ，毛细管进口制冷剂干度 $x_{in}=0$ ，过冷度 $T_{ks}=0^\circ\text{C}$ ，冷凝温度 $T_k=42^\circ\text{C}$ ，改变系统的制冷剂质量流量，节流毛细管的长度影响如下：

表 11 改变系统的制冷剂质量流量，各影响参数值

$m \backslash \pi$	π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	π_6	π_7
4.40	217.19	1	14.63	1/L	3.18×10^5	1	1
4.41	217.68	1	14.63	1/L	3.18×10^5	1	1
4.42	218.17	1	14.63	1/L	3.18×10^5	1	1
4.43	218.67	1	14.63	1/L	3.18×10^5	1	1
4.44	219.16	1	14.63	1/L	3.18×10^5	1	1
4.45	219.66	1	14.63	1/L	3.18×10^5	1	1
4.46	220.15	1	14.63	1/L	3.18×10^5	1	1
4.47	220.64	1	14.63	1/L	3.18×10^5	1	1

表 12 改变系统制冷剂质量流量，节流毛细管的长度

质量流量(kg/h)	4.4	4.41	4.42	4.43	4.44	4.45	4.46	4.47
毛细管长度 L (m)	4.54	4.51	4.49	4.47	4.45	4.43	4.41	4.39

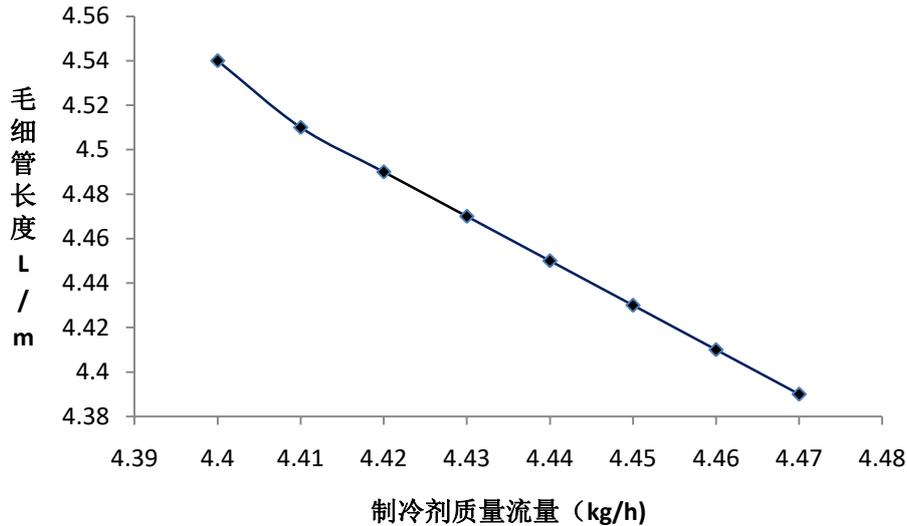


图6 系统制冷剂质量流量改变时, 节流毛细管长度的变化

从图6可以看出: 制冷剂流速大则压力小, 系统质量流量增大造成制冷剂流速增加, 引起压力降低。在节流毛细管内径不变的情况下, 质量流量增大导致毛细管长度减小。节流毛细管长度减小的趋势基本一致, 近似成线性关系。

6 结论

(1) 从热力学性能上看, R290 制冷剂及 R290 压缩机系统在制冷量 300W 以上的制冷系统上具有 R134a 制冷剂及 R600a 制冷剂无法比拟的优越性, 绿色环保、单位容积制冷量大、压比小、压缩机的容积效率容易提升, 在制冷量 300W~400W 的商用柜及无人售货机产品应用上推广前景好。

(2) 节流系统的流量性能是整个制冷系统流量变化的最直接的反映, 完全影响整个制冷系统的运行性能。

(3) 节流毛细管的内径、冷凝器出口制冷剂液态的过冷度、冷凝温度的大小及系统的制冷剂质量流量大小这些节流毛细管进口状态参数是影响系统节流毛细管流量性能及长度的关键因素, 进一步说明了在其他条件不变的情况下, 节流毛细管内径增加、过冷度增加、系统冷凝温度的增加都会造成节流毛细管长度的增大; 系统质量流量的增加则会造成节流毛细管长度的减小。

(4) 根据 LC-640 无人售货机 R290 制冷系统的节流毛细管与回气管的热交换面积, 系统的过冷度、冷凝温度及节流毛细管的内径大小、系统制冷剂的质量流量及系统成本等因素综合考虑, 本产品选用节流毛细管内径 1mm, 长度 3.6m、系统流量为 4.44kg/h、系统冷凝温度为 42℃, 系统过冷度为 7℃, 压缩机制冷量为 340W 等参数, 所选参数经实验测试系统制冷性能完全符合要求, 与理论计算基本吻合。

(5) 在设计类似制冷设备制冷系统时, 合理选择制冷剂进入节流毛细管进口状态参数及长度, 对节流系统的流量和整个制冷系统的匹配具有重要的指导和参考意义。

参考文献:

- [1] 宋新洲. R290 应用在大容积卧式冷柜上的性能试验研究, 电器 2011-增刊, 73-78.
- [2] 谷波. 毛细管计算公式的建立与分析[Z], 上海交通大学, 2009. 3
- [3] 吴业正. 制冷原理及设备[M], 西安交通大学出版社, 2013
- [4] 彭慧兰, 胡荣枝, 孙继勇等. R290 工质大规格节能型冷柜用制冷压缩机研究【J】, 家电科技, 2009. 9, 59-60

第一作者简介: 田德强, 男, 1973 年 8 月生, 毕业于郑州轻工业学院家用电器专业, 现任 TCL 家用电器(合肥)有限公司制冷性能开发工程师, 主要从事冰箱制冷系统设计、开发及相关制冷技术研究等工作, 电子邮箱 bd_tiandq@tcl.com.