

文章编号: 0253-4339(2012)05-0037-06

doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2012.05.037

新一代制冷剂HFO-1234yf的热物性模型

姜 昆 刘 颖 姜 莎

(上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093)

摘 要 基于Peng-Robinson通用状态方程,采用基团贡献原理以及多项式拟合方法,建立了符合精度要求的新型LGWP制冷剂HFO-1234yf的热物性模型,并对模型进行了验证,利用数学软件对模型进行编程求解,得到了较为全面的HFO-1234yf制冷剂的热物性数据。将HFO-1234yf制冷剂与R134a及R417A制冷剂的热物性能进行了对比,结果显示HFO-1234yf的饱和蒸汽压力与定压比热容和R134a的表现相似,二者的饱和蒸汽压均低于R417A, HFO-1234yf制冷剂与R134a和R417A相比,其饱和状态焓值较低,这将导致HFO-1234yf系统运行时的性能系数不高。该模型能为HFO-1234yf制冷剂在汽车空调以及固定式空调制冷设备上的应用提供理论依据。

关键词 工程热物理; HFO-1234yf; 热物性模拟; 工质替代; LGWP

中图分类号: TB61⁺2; TK121

文献标识码: A

Thermal Properties Model for the New Refrigerant HFO-1234yf

Jiang Kun Liu Ying Jiang Sha

(School of energy and power engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract Based on Peng-Robinson general state equation, combined with group contribution principle and a polynomial method, the thermal state model of the new LGWP refrigerant HFO-1234yf was established and validated with required accuracy. By using the computer programming, the state models were solved by a mathematic software and a complete thermal properties of refrigerant were obtained. The thermal properties of HFO-1234yf were compared with R417A and R134a, and the results showed that the saturated vapor pressure and the specific heat capacity under constant pressure of HFO-1234yf has a similar performance with R134a. Both The saturated vapor pressure of both HFO-1234yf and R134a are lower than R417A, and the saturated state enthalpy of HFO-1234yf is lower than R417A, which would lead that the HFO-1234yf system can not have a higher performance coefficient. The models could act as a theoretical basis for the application of HFO-1234yf in automotive air conditioning and fixed refrigeration equipment.

Keywords Engineering thermophysics; HFO-1234yf; Thermal properties simulation; Alternative refrigerants; LGWP

欧盟的相关指令中规定从2011年开始,禁止新车型使用GWP值超过150的制冷剂,2017年禁止所有汽车使用GWP超过150的制冷剂^[1],而就目前国内使用情况来看,中国汽车空调行业普遍使用的制冷剂为R134a,其GWP值高达1430,这和欧盟要求的差距较大。HFO-1234yf制冷剂是由霍尼韦尔和杜邦公司针对R134a推出的替代工质, HFO-1234yf制冷剂的环境参数优异, ODP值为0, GWP值为4^[2], 其相关热物性参数如表1所示。

对于正在考虑采用HFO-1234yf制冷剂的汽车空调企业与固定式制冷空调设备制造企业,获得其详细、可靠的热力学特性将有利于在产品替代改造上全面的模拟计算与分析。文章根据国外相关文献为依据,建立了HFO-1234yf的热力性质数学模

型,给出了制冷剂较为全面的热力性质数据表格,文章还将HFO-1234yf的饱和蒸汽压力等热力性质与R134a和R417A两种制冷剂进行了比较分析。

表1 HFO-1234yf与R134a制冷剂的临界参数比较^[2-3]

Tab.1 Comparison of critical parameters for HFO-1234yf and R134a^[2-3]

	HFO-1234yf	R134a
分子式	CF ₃ CF=CH ₂	CF ₃ CH ₂ F
临界压力 p_c /MPa	3.38	4.06
临界温度 T_c /K	367.85	374.21
临界密度 ρ_c /(kg/m ³)	478±3	511.9
摩尔质量 M_r /(kg/kmol)	114	102.03
ODP	0	0
GWP	4	1430
大气寿命	10~12d	14年

1 HFO-1234yf热力性质模型的建立

1.1 状态方程

采用通用状态方程法, 只需要根据较少的实验数据, 如临界状态数据和偏心因子, 就可以方便地对制冷剂的热物性进行研究计算, 并可以达到令人满意的精度要求。考虑到精度和方便计算的因素, 选择Peng-Robinson方程^[4]作为制冷剂的状态方程, 其方程形式为:

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b)+b(V-b)} \quad (1)$$

$$Z = \frac{1}{1-b\rho} - \frac{a(T)}{RT} \frac{\rho}{1+2b\rho-b^2\rho^2} \quad (2)$$

式中: p —气体压力, kPa; R —摩尔气体常数, J/(mol·K); T —热力学温度, K; V 为摩尔体积, m³/kmol; Z 为压缩因子; ρ 为摩尔比体积, kmol/m³;

$$a(T) = 0.45724 \left(\frac{R^2 T_c^2}{p_c} \right) \left[1 + k \left(1 - \sqrt{T/T_c} \right) \right] \quad (3)$$

$$k = 0.3746 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2 \quad (4)$$

$$b = 0.0778 RT_c / p_c \quad (5)$$

Peng-Robinson方程(简称PR方程)是在1976年提出的一个二常数通用状态方程, 适用于气、液两相的p-V-T状态关系计算, 其关于压缩因子Z的三次方程形式如式(2)所示^[5]。

1.2 饱和蒸汽压力方程

制冷剂的饱和蒸汽压力参考Thmosa J. Leck在文献[6]中拟合公式, 采用式(6)进行描述,

$$\ln p_{\text{sat}} = A + \frac{B}{T} + C \ln T + DT + E \left(\frac{F-T}{T} \right) \ln(F-T) \quad (6)$$

式中: p_{sat} —饱和压力, kPa; A~F为常系数, 详见表2。

表2 式(6)的常系数值
Tab.2 Constants for Eq. (6)

A	48.70134	B	-4054.888
C	-5.353373	D	5.632772 × 10 ⁻³
E	0.2423738	F	368.7851

将采用式(6)计算得到的饱和蒸汽压力数据与文献[9]中的实验测试数据对比, 结果显示平均误差为0.6%, 说明式(6)满足精度要求。

1.3 饱和液体密度方程

参考Thmosa J. Leck对液体制冷剂密度的拟

合式^[6], 采用式(7)计算HFO-1234yf的饱和液体密度。

$$\frac{\rho_f}{\rho_c} = \sum_{i=0}^4 d_i X^i \quad (7)$$

$$X = \left(1 - \frac{T}{T_c} \right)^{\frac{1}{3}} - 0.3315471 \quad (8)$$

式中: ρ_f —饱和液体密度, kg/m³; d_i 为常系数, 详见表3。

表3 式(7)的常系数值
Tab.3 Constants for Eq. (7)

d_0	d_1	d_2	d_3	d_4
1.6671	2.3149	1.0329	0.0941	-0.82

将采用式(7)计算得到的饱和液体密度数据与文献[8]中的实验测试数据对比, 结果显示平均误差为0.65%, 说明式(7)满足精度要求。

1.4 理想气体的定压比热容方程

根据参考文献[6], 制冷剂理想气体的定压比热容 c_p^0 如(9)式所示:

$$c_p^0 = \sum_{i=0}^5 c_i T^i \quad (9)$$

式中: c_p^0 —定压比热容, kJ/(kg·K); c_i 为常系数, 详见表4。

表4 式(9)的常系数值
Tab.4 Constants for Eq. (9)

c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
0.2334	1.8245 × 10 ⁻³	3.5159 × 10 ⁻⁶	-1.1249 × 10 ⁻⁸	1.0607 × 10 ⁻¹¹	3.4828 × 10 ⁻¹⁵

1.5 饱和液体的定压比热容方程

采用Bodin方程^[7], 对制冷剂的饱和液体比热容建立如下数学模型:

$$\frac{c_p^l - c_p^0}{R} = 2.56 + 0.436 (T_r')^{-1} + w \times (2.91 + 4.28 T_r' T_r + 0.296 (T_r')^{-1})$$

$$T_r' = 1 - \frac{T}{T_c}, \quad T_r = \frac{T}{T_c}; \quad (10)$$

式中: c_p^l 、 c_p^0 分别为饱和液体定压比热容和理想气体的定压比热容, J/(mol·K); w 为偏心因子, HFO-1234yf的 w 值为0.27803^[5]。

1.6 汽化潜热计算式

HFO-1234yf制冷剂的汽化潜热根据Wattson关联式计算, 关联式如式(11)^[7]所示:

$$r = r_b \left(\frac{1 - T_r}{1 - T_{br}} \right)^{0.38} \quad (11)$$

$$T_r = T/T_c; \quad T_{br} = T_b/T_c;$$

式中： r —制冷剂的汽化潜热，kJ/kg； r_b —HFO-1234yf正常沸点温度下的汽化潜热，参考文献[8]中的计算结果，根据式(17)即可计算得到 r_b 数值为171.1kJ/kg。

制冷剂的正常沸点温度 T_b 根据Joback基团贡献法计算，根据HFO-1234yf制冷剂的分子结构式，参照式(12)^[7]进行计算。

$$T_b = 198 + \sum \Delta b \quad (12)$$

式中： T_b —正常沸点温度，K； Δb 为基团贡献值，详见表5。

表5 Joback基团贡献值

Tab.5 Group contribution values for Joback				
基团种类	>C<	>C=	=CH ₂	-F
数量	1	1	1	4
贡献值	18.25	26.15	18.18	-0.03

1.7 比焓、比熵计算式

HFO-1234yf制冷剂的饱和液体比焓、比熵根据式(13)和(14)进行计算^[5]：

$$h_f = (h - h^{ig})_{T,p} + \int_{T_{ref}}^T c_p^0 dT - (h - h^{ig})_{ref} + h_{ref} \quad (13)$$

$$s_f = (s - s^{ig})_{T,p} + \int_{T_{ref}}^T \frac{c_p^0}{T} dT - R \ln \frac{p}{p_{ref}} - (s - s^{ig})_{ref} + s_{ref} \quad (14)$$

式中： h —饱和液体的比焓，kJ/kg； s —饱和液体的比熵，kJ/(kg·K)； h_{ref} 、 s_{ref} 是按照国际制冷学会(IIR)规定，在基准点温度 $T_0=273.15$ K时，参考点的比焓、比熵，分别为200kJ/kg，0kJ/(kg·K)； $(h - h^{ig})$ 、 $(s - s^{ig})$ 分别为制冷剂的焓值和熵值的余函数，根据式(15)和(16)求解^[5]：

$$(h - h^{ig})_{T,p} = RT \left(\int_0^p -T \left[\frac{\partial Z}{\partial T} \right]_p \frac{d\rho}{\rho} + Z - 1 \right) \quad (15)$$

$$(s - s^{ig})_{T,p} = R \left(\int_0^p \left[-T \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right) - (Z - 1) \right] \frac{d\rho}{\rho} + \ln Z \right) \quad (16)$$

HFO-1234yf制冷剂的饱和气体的焓、熵值可以根据式(17)和(18)进行计算^[8]：

$$h_g = h_f + r \quad (17)$$

$$s_g = s_f - \frac{r}{T} \quad (18)$$

式中： h_g —饱和气体的比焓，kJ/kg； s_g —饱和气体比熵，kJ/(kg·K)。

2 模型求解及精确度验证

根据式(1)~式(18)即可编程计算HFO-1234yf制冷剂的热物性质，采用数学符号计算软件在保证精确的前提下简化了编程计算的难度，模型计算需要的输入参数只包括：临界温度 T_c 、临界压力 p_c 和临界比体积 ρ_c ，计算结果列于表7。

表6 利用P-R方程模型的R134a焓值计算与误差

Tab.6 The enthalpy and error of R134a with P-R equation model

温度 T /°C	计算焓值 h_f /(kJ/kg)	参考焓值 h_f /(kJ/kg)	相对误差 /%
-40	149.013	148.14	0.589
-30	152.410	160.79	0.521
-20	174.016	173.64	0.217
-10	186.922	186.7	0.119
10	213.284	213.58	0.138
20	226.939	227.47	0.234
30	241.266	241.72	0.188
40	256.659	256.41	0.097
50	271.129	271.62	0.181

由于目前针对HFO-1234yf制冷剂的实验测试数据较为缺乏，为了验证模型状态方程的精确程度，对R134a制冷剂的饱和状态焓值采用P-R状态方程进行了验证计算，计算得出的结果与REFPROP软件中的数据进行了比较(见表6)，从比较的相对误差情况来看，P-R状态方程能够满足对模型计算精度的要求。

3 模拟结果与分析

根据式(1)~式(19)，运用Maple数学软件编程计算HFO-1234yf制冷剂的物性参数，具体如表7所示。

根据HFO-1234yf数学模型得到的计算结果，将HFO-1234yf的热物性能与R134a及R417A制冷剂进行了对比，具体如图1~图4所示。从比较的结果看，HFO-1234yf的饱和蒸汽压力与定压比热容和R134a在随温度变化时具有相似的表现，其中HFO-1234yf的理想气体的定压比热容略低于R134a，二者的饱和蒸汽压均低于R417A，较低的蒸汽压力将有利于压缩机的安全运行。但是从图3及图4可以看出，HFO-1234yf制冷剂较之R134a和R417A，其饱

和状态焓值较低, 这将导致HFO-1234y的系统在运行时不会有很高的性能系数。

表7 HFO-1234yf的饱和热力性质
Tab.7 The saturated thermal properties of HFO-1234yf

T/K	$p_{\text{ast}}/\text{kPa}$	$\rho_f/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$v_g/(\text{m}^3/\text{kg})$	$h_f/(\text{kJ}/\text{kg})$	$h_g/(\text{kJ}/\text{kg})$	$s_f/(\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$	$s_g/(\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$	$r/(\text{kJ}/\text{kg})$
233.15	62.196	1288.398	0.283	163.711	350.222	0.438	1.238	186.511
235.15	68.422	1283.360	0.260	165.377	350.831	0.471	1.260	185.454
237.15	75.138	1278.276	0.239	167.059	351.445	0.503	1.280	184.387
239.15	82.371	1273.146	0.221	168.757	352.066	0.534	1.300	183.310
241.15	90.149	1267.968	0.204	170.471	352.693	0.564	1.320	182.222
243.15	98.500	1262.741	0.189	172.201	353.324	0.593	1.338	181.123
245.15	107.454	1257.465	0.175	173.947	353.961	0.622	1.357	180.014
247.15	117.040	1252.138	0.163	175.708	354.602	0.651	1.375	178.893
249.15	127.290	1246.758	0.151	177.485	355.246	0.679	1.392	177.761
251.15	138.235	1241.325	0.141	179.278	355.894	0.707	1.410	176.617
253.15	149.906	1235.837	0.132	181.085	356.546	0.734	1.427	175.460
255.15	162.337	1230.293	0.123	182.908	357.200	0.761	1.444	174.292
257.15	175.559	1224.692	0.115	184.747	357.856	0.788	1.461	173.110
259.15	189.608	1219.032	0.108	186.600	358.515	0.815	1.479	171.914
261.15	204.517	1213.310	0.101	188.469	359.174	0.842	1.495	170.706
263.15	220.322	1207.527	0.095	190.353	359.835	0.868	1.512	169.483
265.15	237.057	1201.680	0.090	192.252	360.497	0.895	1.529	168.245
267.15	254.759	1195.767	0.084	194.166	361.158	0.921	1.546	166.992
269.15	273.464	1189.786	0.080	196.096	361.820	0.947	1.563	165.724
271.15	293.208	1183.735	0.075	198.040	362.480	0.974	1.580	164.440
273.15	314.030	1177.613	0.071	200.000	363.139	1.000	1.597	163.139
275.15	335.967	1171.416	0.067	201.975	363.796	1.026	1.614	161.821
277.15	359.058	1165.144	0.062	203.966	364.451	1.052	1.631	160.486
279.15	383.340	1158.792	0.059	205.972	365.103	1.078	1.648	159.132
281.15	408.853	1152.359	0.056	207.993	365.752	1.104	1.665	157.758
283.15	435.637	1145.841	0.053	210.027	366.393	1.130	1.682	156.365
285.15	463.731	1139.237	0.051	212.080	367.032	1.156	1.699	154.952
287.15	493.175	1132.542	0.048	214.148	367.665	1.182	1.716	153.517
289.15	524.011	1125.753	0.046	216.232	368.292	1.207	1.733	152.060
291.15	556.279	1118.867	0.044	218.333	368.913	1.233	1.750	150.580
293.15	590.020	1111.880	0.042	220.450	369.526	1.258	1.766	149.076
295.15	625.277	1104.788	0.040	222.584	370.130	1.283	1.782	147.546
297.15	662.091	1097.586	0.039	224.734	370.725	1.307	1.798	145.991
299.15	700.504	1090.270	0.037	226.902	371.309	1.331	1.814	144.407
301.15	740.561	1082.836	0.035	229.088	371.883	1.355	1.829	142.795
303.15	782.303	1075.276	0.034	231.291	372.444	1.378	1.844	141.153
305.15	825.776	1067.586	0.033	233.513	372.991	1.401	1.858	139.478
307.15	871.022	1059.760	0.031	235.753	373.524	1.423	1.871	137.771
309.15	918.088	1051.790	0.030	238.013	374.040	1.444	1.884	136.028
311.15	967.017	1043.668	0.029	240.292	374.540	1.464	1.896	134.248
313.15	1017.856	1035.388	0.028	242.591	375.020	1.484	1.907	132.428

表7 (续)

T/K	p_{ast} /kPa	ρ_f /(kg/m ³)	v_g /(m ³ /kg)	h_f /(kJ/kg)	h_g /(kJ/kg)	s_f /(kJ/(kg·K))	s_g /(kJ/(kg·K))	r /(kJ/kg)
315.15	1070.651	1026.939	0.027	244.912	375.479	1.502	1.917	130.567
317.15	1125.450	1018.312	0.026	247.254	375.915	1.520	1.925	128.661
319.15	1182.300	1009.496	0.025	249.619	376.327	1.536	1.933	126.709
321.15	1241.250	1000.479	0.024	252.006	376.712	1.551	1.939	124.706
323.15	1302.349	991.247	0.023	254.435	377.083	1.564	1.944	122.648
325.15	1365.649	981.786	0.023	256.874	377.407	1.576	1.946	120.534
327.15	1431.201	972.078	0.022	259.339	377.695	1.585	1.947	118.356
329.15	1499.058	962.106	0.021	261.833	377.944	1.593	1.946	116.112
331.15	1569.276	951.846	0.020	264.357	378.151	1.599	1.942	113.794
333.15	1641.910	941.274	0.020	266.913	378.309	1.602	1.936	111.396
335.15	1717.020	930.362	0.019	269.504	378.415	1.602	1.927	108.911
337.15	1794.666	919.076	0.019	272.131	378.462	1.600	1.915	106.330
339.15	1874.913	907.377	0.018	274.800	378.443	1.594	1.899	103.643
341.15	1957.828	895.220	0.017	277.512	378.349	1.584	1.880	100.837
343.15	2043.482	882.548	0.017	280.274	378.171	1.571	1.856	97.897
345.15	2131.952	869.293	0.016	283.090	377.896	1.553	1.828	94.806
347.15	2223.321	855.372	0.016	285.968	377.508	1.531	1.794	91.541
349.15	2317.678	840.679	0.016	288.917	376.990	1.503	1.755	88.073
351.15	2415.125	825.076	0.015	291.948	376.316	1.469	1.709	84.368
353.15	2515.774	808.383	0.015	295.078	375.454	1.429	1.656	80.376
355.15	2619.757	790.347	0.014	298.329	374.360	1.381	1.595	76.031
357.15	2727.229	770.610	0.014	301.732	372.970	1.325	1.524	71.238
359.15	2838.382	748.617	0.014	305.337	371.188	1.260	1.444	65.851
361.15	2953.470	723.446	0.013	309.227	368.855	1.186	1.351	59.628
363.15	3072.844	693.344	0.013	313.560	365.673	1.104	1.247	52.113
365.15	3197.074	654.097	0.012	318.727	360.942	1.020	1.136	42.215
367.15	3327.324	587.277	0.012	326.467	351.742	1.001	1.069	25.274

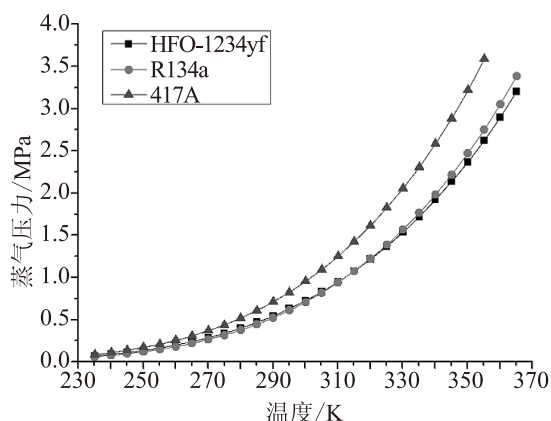


图1 HFO-1234yf与R134a和R417A饱和蒸气压力比较
Fig.1 Comparison of saturated vapor pressure of HFO-1234yf, R134a and R417A

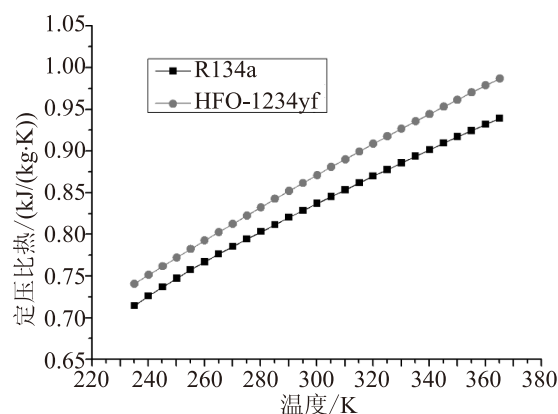


图2 HFO-1234yf与R134a理想气体定压比热容比较
Fig.2 Comparison of ideal gas heat capacity of HFO-1234yf, R134a and R417A

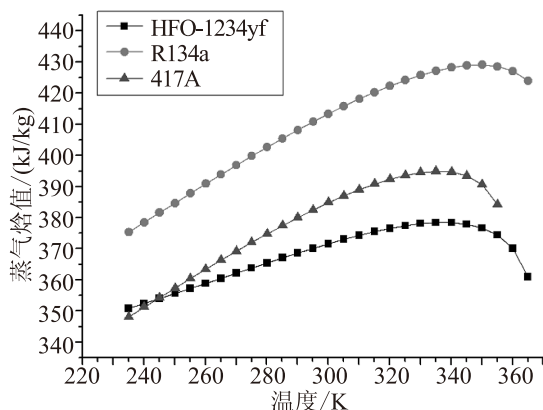


图3 HFO-1234yf与R134a和R417A饱和蒸气焓值比较
Fig.3 Comparison of saturated vapor enthalpy of HFO-1234yf, R134a and R417A

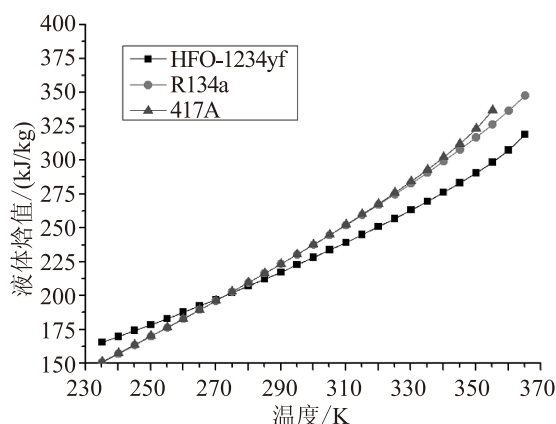


图4 HFO-1234yf与R134a和R417A饱和液体焓值比较
Fig.4 Comparison of saturated liquid enthalpy of HFO-1234yf, R134a and R417A

4 结语

利用参考文献中的实验测试数据,采用Peng-Robinson通用状态方程、基团贡献原理以及多项式拟合模型,建立和拟合了新型制冷剂HFO-1234yf的热物理性质,并对模型的精确程度进行了对比性的验证。

从计算结果的对比如分析来看, HFO-1234yf的热物性中饱和蒸汽压力以及定压比热容与R134a相近,但HFO-1234yf制冷剂的饱和焓值较低,这将导致HFO-1234yf系统运行时的性能系数可能较低。HFO-1234yf制冷剂热物性模型能为其在汽车空调以及固定式空调制冷设备上的应用提供理论依据。

本文受上海市重点学科建设项目(S30503);上海市研究生创新基金项目(JWCXSL1102)资助。(The project was supported by Shanghai leading academic discipline project (No. S30503) and the Innovation Fund Project For Graduate Student of Shanghai (No. JWCXSL1102).)

参考文献

- [1] 曹霞.HFO-1234yf——新一代汽车空调制冷剂[J]. 制冷与空调, 2008, 8(6): 55-61. (Cao Xia. HFO-1234yf—new generation for automobile air conditioner[J]. REFRIGERATION AND AIR-CONDITIONING, 2008, 8(6): 55-61.)
- [2] 王博, 张伟, 马洋博, 等. 第四代制冷剂HFO-1234yf[J]. 化工新型材料, 2010, 30(8): 30-32. (Wang Bo, Zhang Wei, Ma Yangbo, et al. The fourth generation refrigerant HFO-1234yf[J]. NEW CHEMICAL MATERIALS, 2010, 30(8): 30-32.)
- [3] Katsuyuki Tanaka, Yukihiro Higashi. Thermodynamic properties of HFO-1234yf (2,3,3,3-tetrafluoropropene) [J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF REFRIGERATION, 2010, 33(3): 474-479.
- [4] 高洪亮. 绿色替代制冷剂制冷性质的计算及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005: 42-52.
- [5] Moisés A Marcelino Neto, Jader R Barbosa Jr. Modeling of State and Thermodynamic Cycle Properties of HFO-1234yf Using a Cubic Equation of State[J]. J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng. Special Issue, 2010, 32(5): 461-467.
- [6] Thomas J Leck. Evaluation of HFO-1234yf as a Potential Replacement for R-134a in Refrigeration Applications[C]// 3rd IIR Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants, Paper No. IIR-155, Boulder, CO, 2009.
- [7] 童景山. 流体的热物理性质[M]. 北京: 中国石化出版社, 1996: 4-13, 141.
- [8] Ryo Akasaka, Katsuyuki Tanaka, Yukihiro Higashi. Thermodynamic property modeling for 2,3,3,3-tetrafluoropropene (HFO-1234yf) [J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF REFRIGERATION, 2010, 33(1): 52-60.
- [9] Giovanni Di Nicola, Fabio Polonara, Giulio Santori. Saturated Pressure Measurements of 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (HFO-1234yf) [J]. J. Chem. Eng. Data, 2010, 55(1): 201-204.

作者简介

姜昆, 男(1987-), 硕士在读, 上海理工大学制冷及低温工程专业, 13601839495, E-mail: jiang_kun2010@163.com. 研究方向: 热泵, 制冷及空调系统测试与优化。

About the author

Jiang Kun (1987-), male, bachelor, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, 13601839495, Email: jiang_kun2010@163.com. Research fields: Heat pump, test and optimization of refrigeration and air conditioning.