

二氧化碳制冷剂在烷基萘润滑油中的溶解度研究

杨斌, 李力, 彭学院, 张波

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了研究二氧化碳制冷剂在烷基萘润滑油中溶解度的变化,根据分子聚集理论修正了状态方程并运用相应的混合法则,建立了二氧化碳在烷基萘润滑油中溶解度的理论计算模型.模型中润滑油的临界物性参数通过基团贡献法估算得到.与现有文献实验数据对比发现,建立在 vdWaals 分子聚集理论修正方程上的理论模型计算值与实验数据吻合较好,实验工况下的平均误差分别为 5.56% 和 3.47%,且溶解度越高,分子聚集现象越明显,模型计算值越准确.利用 PR 和 RKS 修正方程计算出的溶解度误差均非常大,分别达到了 48.92% 和 46.91%,不适用于二氧化碳制冷剂在烷基萘润滑油中溶解度的理论计算.利用模型对二氧化碳溶解度随温度和压力的变化趋势进行了预测,发现在 0 °C 和 10 °C 下,压力从 3.5 MPa 增加到 4.5 MPa 时,溶解度约提高 19%,而当过热度从 0 °C 升高到 20 °C 时,溶解度分别降低 20.9% 和 12.5%.

关键词: 二氧化碳;溶解度;vdWaals 状态方程;分子聚集模型;基团贡献法

中图分类号: TH457 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)12-0103-06

Solubility of Carbon Dioxide Refrigerant in Alkyl Naphthalene Lubricating Oil

YANG Bin, LI Li, PENG Xueyuan, ZHANG Bo

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A theoretical model of carbon dioxide solubility in alkyl naphthalene oil was established with the modified state equation on the basis of the molecular aggregation theory and the corresponding mixing rules. The critical physical properties of the oil were determined by the group contribution method. The comparison shows that the predictions of the carbon dioxide solubility in alkyl naphthalene oil by the solubility model based on the modified vdWaals equation agree well with the existing experimental data with a mean error of 5.56% and 3.47% under the experimental conditions, respectively. Moreover, the more precise value can be obtained at the higher carbon dioxide solubility because of the more obvious molecular aggregation phenomenon. However, the large errors of 48.92% and 46.91% confirm that the modified PR and RKS equations may not be applicable to determining the solubility of carbon dioxide in alkyl naphthalene oil. In addition, the variation of the solubility was predicted using the model developed. The results show that the solubility increases by about 19% from 3.5 MPa to 4.5 MPa at 0 °C and 10 °C, and decreases by 20.9% and 12.5%, respectively, when the superheat temperature is from 0 °C to 20 °C.

Keywords: carbon dioxide; solubility; vdWaals equation of state; molecular aggregation model; group contribution method

在活塞式二氧化碳制冷压缩机中,除使用聚(乙)二醇(Polyalkylene glycol, PAG)等润滑油以外,烷基萘润滑油以其良好的热稳定性以及与二氧化碳的互溶性,也得到了应用,如 Hubacher^[1]采用烷基萘润滑油代替原先引起压缩机故障的聚 α -烯烃润滑油(Polyalphaolefin, PAO)后,压缩机运行良好.在此类压缩机中,工作压力较高,位于活塞环及轴承处的摩擦功耗较大.若这两处的润滑油黏度过大,则会增加摩擦功耗;若过小,可能导致油膜厚度不足,引起摩擦面接触.润滑油的黏度除与温度压力有关外,与二氧化碳在该润滑油中的溶解度也有至关重要的关系. Li 等^[2]在其文章中表明,当二氧化碳在烷基萘润滑油(Alkyl Naphthalene, AN)中的溶解度(文中均为摩尔分数)为 10% 时,润滑油的黏度将减小 50% 以上.因此,研究二氧化碳制冷剂在润滑油中的溶解度有助于控制润滑油黏度,从而减少二氧化碳制冷压缩机的摩擦功耗,提高整机性能.

如何准确确定润滑油的物性参数是研究此类问题的一个重要方面. Conde^[3]总结了润滑油的物性参数求解方法,将正常沸点温度以及体积质量作为参数,可以求得润滑油的临界温度、临界压力、临界压缩因子以及偏心因子等物性参数.然而,此方法的前提是,必须要提供准确的正常沸点温度. Constantinou 等^[4-5]基于基团贡献法(Group Contribution Method, GCM),根据第一基团和第二基团在润滑油分子中出现的次数,得到临界物性参数以及正常沸点温度.与 Conde 的方法相比,基团贡献法只需润滑油的分子结构式,使用起来更为方便.本文采用基团贡献法,得到了烷基萘润滑油的临界物性参数.

气体在液体中的溶解度通常采用 Prausnitz-Shair 等^[6]和 Yen-Mcketta 等^[7]的方法处理,然而应用这两种方法处理二氧化碳在碳氢化合物中的溶解度时,其效果较差^[8]. Yokozeki^[9]研究了二氧化碳在 PAG 和多元醇酯润滑油(Poly olester, POE)中的溶解度,得到了比较好的结果,但是该方法需要大量实验数据来确定多个相互作用系数.鉴于文献中只有极少量关于二氧化碳在烷基萘润滑油中的溶解度实验数据,该方法的应用受到了限制.因此,本文拟采用童景山等^[10]根据分子聚集理论提出的 vdWaals 修正方程,该方程只需利用二氧化碳和润滑油的临界物性参数,即可计算二氧化碳在烷基萘润滑油中的溶解度.

1 理论模型

1.1 分子聚集理论下的 vdWaals 方程

根据分子聚集理论,气体在液体中的溶解可以理解为气体分子和液体溶剂分子形成聚集体分子,该聚集体分子的运动和单个分子相当^[8].聚集体分子的形成导致流体实际分子数减少,该变化可由分子聚集参数 j 来表示,即

$$j = N_{\text{fact}}/N_0 \quad (1)$$

式中: N_{fact} 为每摩尔流体实际分子数; N_0 为阿伏加德罗常数.据此, vdWaals 状态方程可修正为

$$P = \frac{jRT}{V-b} - \frac{a(T)}{(V+mb)^2} \quad (2)$$

$$R = 8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)} \quad (3)$$

$$a = 0.421875 \frac{j_c^2 R^2 T_c^2}{P_c} \exp[4(1-j_c)(1-T_r)] \quad (4)$$

$$b = 0.088688 \frac{j_c RT_c}{P_c} \exp[0.15\left(\frac{1}{T_r} - 1\right)] \quad (5)$$

$$j = 1 - c = 1 - (1-j_c) \exp[(h-1)\left(1 - \frac{1}{T_r}\right) + \left(\frac{3C^*}{2} + 1\right) \ln \frac{1}{T_r}] \quad (6)$$

$$j_c = 2.9551845Z_c \quad (7)$$

$$h = \frac{T_{\text{br}} \ln(P_c/101325)}{(1-T_{\text{br}})} \quad (8)$$

$$T_r = T/T_c \quad (9)$$

$$T_{\text{br}} = T_b/T_c \quad (10)$$

式中: T_b 为正常沸点温度; P 、 P_c 的单位均为 Pa; Z_c 为临界压缩因子.当二氧化碳溶解于润滑油中时,可看作二氧化碳和润滑油形成了二元混合物,采用如下混合法则

$$a_m = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j (a_i a_j)^{1/2}; \quad b_m = \sum_{i=1}^N x_i b_i$$

$$c_m = \sum_i x_i c_i; \quad j_m = 1 - c_m \quad (11)$$

1.2 烷基萘润滑油临界物性参数的确定

烷基萘临界物性参数的确定采用 Constantinou 等^[4]提出的基团贡献法,即先将烷基萘分子结构分成不同的第一基团和第二基团,然后根据这些基团在分子中出现的次数组合得到,计算公式如下.

临界温度 T_c

$$e^{T_c/t_{c0}} = \sum_i N_i t_{c1i} + \sum_j M_j t_{c2j}$$

$$t_{c0} = 181.128 \text{ K} \quad (12)$$

临界压力 P_c

$$(P_c - p_{cl})^{-0.5} - p_{c2} = \sum_i N_i p_{cli} + \sum_j M_j p_{c2j}$$
$$p_{cl} = 137.05 \text{ kPa}; p_{c2} = 0.010\ 022 \text{ kPa}^{-0.5}$$

(13)

临界摩尔容积 V_c

$$V_c - V_{c0} = \sum_i N_i V_{cli} + \sum_j M_j V_{c2j}$$
$$V_{c0} = -0.004\ 350 \text{ m}^3/\text{kmol}$$

(14)

式中: N_i 、 M_j 分别表示第一基团和第二基团在分子结构中出现的次数。

烷基萘通常可通过 Friedel-Crafts 反应,将烷基化烯烃与萘环相连得到。由于烷基萘润滑油的具体分子结构为商家所保密,同时考虑到碳分子数超过 12 的烷基连接到萘环上即可得到满足要求的润滑油特性^[11],因此文中假设使用 1-14 (碳) 烯(C14H28)烷基。参照 Gani 提出的方法,该烷基萘分子可分成如表 1 和表 2 所示的第一基团组和第二基团组,利用式(12)~(14),分别计算烷基萘的临界温度、临界压力和临界摩尔容积,结果见表 3。值得注意的是,由该基团贡献法得到的临界温度、临界压力值与 Yokozeki^[12]提出的假想润滑油的临界温度(800 K)、临界压力(0.95 MPa)很接近。

表 1 第一基团组^[4]对温度、压力、摩尔容积的贡献值

基团名称	t_{cli}	$p_{cli}/\text{kPa}^{-0.5}$	$V_{cli}/\text{m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1}$
CH ₃	1.678 1	0.001 990 4	0.026 14
CH ₂	3.492 0	0.001 055 8	0.016 41
CH=CH	7.369 1	0.001 786 5	0.026 92
CH ₂ =CH	5.014 6	0.002 501 4	0.037 27
C=C	11.376 4	0.000 204 4	0.002 96

表 2 第二基团组^[3]对温度、压力、摩尔容积的贡献值

基团名称	t_{c2i}	$p_{c2i}/\text{kPa}^{-0.5}$	$V_{c2i}/\text{m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1}$
CH ₂ -CH=CH ₂	-0.523 1	0.000 353 8	0.000 12

表 3 二氧化碳及烷基萘润滑油的临界物性参数

临界物性参数	二氧化碳 ^[13]	烷基萘润滑油
T_c/K	304	805.6
P_c/MPa	7.382	1.01
$V_c/\text{m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1}$	0.094	1.26
Z_c	0.274	0.19

1.3 二氧化碳在烷基萘润滑油中的溶解度计算

二氧化碳溶解于烷基萘润滑油达到平衡时,其

在气相、液相中的逸度相等,即

$$\hat{f}_{\text{CO}_2}^g = \hat{f}_{\text{CO}_2}^l$$

(15)

用逸度系数表示为

$$\hat{\phi}_{\text{CO}_2}^g y_{\text{CO}_2} P = \hat{\phi}_{\text{CO}_2}^l x_{\text{CO}_2} P$$

(16)

式中: $\hat{\phi}_{\text{CO}_2}^g$ 、 $\hat{\phi}_{\text{CO}_2}^l$ 分别表示二氧化碳在气相、液相中的逸度系数; y_{CO_2} 、 x_{CO_2} 表示二氧化碳在气相和液相中的摩尔分数; P 为二元体系压力。考虑到烷基萘润滑油较高的正常沸点温度,具有难挥发性,达到溶解平衡的气相组成假设只有二氧化碳,即 $y_{\text{CO}_2} = 1.0$ 。此时,纯质二氧化碳气相的逸度系数可由下式计算

$$\ln \hat{\phi}_{\text{CO}_2} = (Z - 1) - \ln(Z - B) - \frac{A}{2(2^{1/2})B} \ln \frac{Z + 2.414B}{Z - 0.414B}$$

(17)

$$A = \frac{aP}{R^2 T^2}; B = \frac{bP}{RT}; Z = \frac{PV}{RT}$$

(18)

液相混合物中组分 i 的逸度系数可由下式得到

$$\ln \hat{\phi}_i = \ln \frac{V_m}{V_m - b_m} + \frac{b_i}{V_m - b_m} - \frac{2 \sum_j x_j a_{ij}}{RT(1 - c_m)(V_m + mb_m)} + \frac{ma_m b_i}{RT(1 - c_m)(V_m + mb_m)^2} - \ln Z_m$$

(19)

$$Z_m = \frac{PV_m}{RT}$$

(20)

2 结果与讨论

利用 Li 等^[2]的实验数据,对本文建立的二氧化碳在烷基萘润滑油中的溶解度计算模型进行了验证,如表 4 所示。应该注意的是, Li 等的实验结果以质量分数表示,表 4 中则换算成了相应的摩尔分数。从表中可以看出,采用 vdWaals 分子聚集理论修正状态方程得到的溶解度计算值与实验值非常吻合,在 0~56 ℃、1.99~4.82 MPa 范围内的平均误差为 5.56%,在 0~24 ℃、3.11~4.92 MPa 范围内的平均误差为 3.47%。另外,从表中还可以看到,随二氧化碳制冷剂在烷基萘润滑油中溶解度增大,分子聚集参数值相应减小,计算精度提高,即溶解度从 0.45 提高至 0.648,聚集参数均值从 0.900 降低至 0.866,平均计算误差从 5.56%降低至 3.47%。这说明随着溶解度的增大,分子聚集现象越为明显,根据分子聚集理论模型修正的 vdWaals 状态方程的适用性也随之提高。

表 4 二氧化碳在不同温度及压力下的溶解度实验值与计算值对比

工况 1					工况 2				
T/℃	P/MPa	溶解度		j_m	T/℃	P/MPa	溶解度		j_m
		实验值	计算值				实验值	计算值	
0.011 6	1.99	0.45	0.41	0.906 9	0.053 5	3.11	0.648	0.61	0.864 5
3.49	2.15	0.45	0.42	0.905 0	1.93	3.23	0.648	0.61	0.865 0
6.05	2.28	0.45	0.43	0.903 2	3.48	3.34	0.648	0.62	0.863 3
8.35	2.39	0.45	0.44	0.901 5	4.66	3.42	0.648	0.62	0.863 7
10.3	2.48	0.45	0.44	0.901 8	6.37	3.56	0.648	0.62	0.864 2
13.7	2.64	0.45	0.45	0.900 3	7.60	3.64	0.648	0.62	0.864 6
17.4	2.82	0.45	0.46	0.899 0	8.89	3.73	0.648	0.62	0.865 1
20.6	2.98	0.45	0.46	0.899 5	10.2	3.81	0.648	0.62	0.865 5
23.9	3.13	0.45	0.47	0.898 3	11.6	3.90	0.648	0.62	0.866 0
26.9	3.27	0.45	0.47	0.898 8	12.7	4.01	0.648	0.63	0.864 5
29.6	3.41	0.45	0.47	0.899 3	13.9	4.11	0.648	0.63	0.865 0
31.9	3.53	0.45	0.47	0.899 7	15.1	4.19	0.648	0.63	0.865 4
34.1	3.66	0.45	0.48	0.898 4	16.0	4.25	0.648	0.63	0.865 8
37.1	3.82	0.45	0.48	0.898 9	16.9	4.32	0.648	0.63	0.866 2
39.9	3.96	0.45	0.48	0.899 3	17.9	4.41	0.648	0.63	0.866 6
42.5	4.10	0.45	0.49	0.898 1	19.2	4.50	0.648	0.63	0.867 2
45.6	4.24	0.45	0.49	0.898 5	20.5	4.60	0.648	0.63	0.867 7
48.6	4.41	0.45	0.49	0.898 8	21.4	4.67	0.648	0.63	0.868 1
51.9	4.58	0.45	0.49	0.899 1	22.9	4.79	0.648	0.64	0.867 0
56.3	4.82	0.45	0.49	0.899 2	24.4	4.92	0.648	0.64	0.867 7
平均绝对误差/%		5.56					3.47		

利用本文建立的模型,预测了二氧化碳制冷系统在常用工况范围下,低压侧二氧化碳在烷基萘润滑油中的溶解度随压力和温度的变化趋势,发现二氧化碳的溶解度随压力的升高而升高.如图 1 所示,在 0 ℃和 10 ℃下,压力从 3.5 MPa 提升至 4.5 MPa 时,溶解度分别提高了 19.4%和 18.6%.随着温度的升高,二氧化碳气体将从润滑油中逸出,溶解度则不断降低.如图 2 所示,在 3.5 MPa、饱和温度下,溶解度为 0.67,过热度为 20 ℃时溶解度降为

0.53,减小了 20.9%,4.5 MPa、饱和温度下的溶解度为 0.72,过热度为 20 ℃时,溶解度降低为 0.63,减小了 12.5%.

在对二氧化碳在烷基萘润滑油中的溶解度理论模型进行研究的过程中,本文作者还尝试根据分子聚集理论对其他状态方程进行修正并计算溶解度.PR 修正方程、RKS 修正方程和 vdWaals 修正方程计算结果的对比如表 5 所示,发现利用 PR 修正方程及RKS修正方程得出的溶解度计算值与实验值

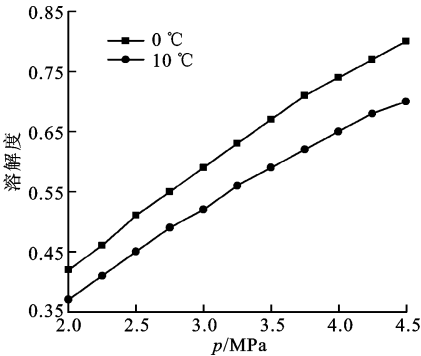


图 1 二氧化碳溶解度随压力的变化

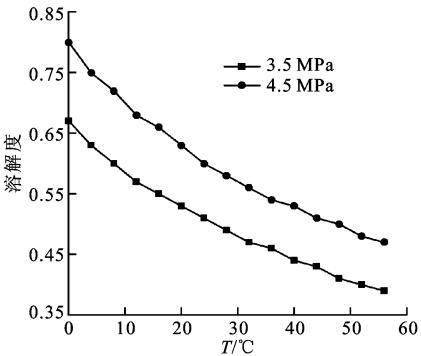


图 2 二氧化碳溶解度随温度的变化

表 5 不同分子聚集理论修正状态方程计算结果对比

T/ ℃	P/ MPa	溶解度			
		实验值	vdWaals 修正方程	PR 修正方程	RKS 修正方程
0.053 5	3.11	0.648	0.61	0.37	0.27
1.93	3.23	0.648	0.61	0.36	0.28
3.48	3.34	0.648	0.62	0.36	0.29
4.66	3.42	0.648	0.62	0.35	0.30
6.37	3.56	0.648	0.62	0.35	0.31
7.60	3.64	0.648	0.62	0.34	0.32
8.89	3.73	0.648	0.62	0.34	0.32
10.2	3.81	0.648	0.62	0.33	0.33
11.6	3.90	0.648	0.62	0.33	0.34
12.7	4.01	0.648	0.63	0.33	0.34
13.9	4.11	0.648	0.63	0.32	0.35
15.1	4.19	0.648	0.63	0.32	0.36
16.0	4.25	0.648	0.63	0.32	0.36
16.9	4.32	0.648	0.63	0.32	0.37
17.9	4.41	0.648	0.63	0.32	0.37
19.2	4.50	0.648	0.63	0.32	0.38
20.5	4.60	0.648	0.63	0.31	0.39
21.4	4.67	0.648	0.63	0.31	0.39
22.9	4.79	0.648	0.64	0.31	0.40
24.4	4.92	0.648	0.64	0.31	0.41
平均绝对误差/%			3.47	48.92	46.91

的平均误差分别达到了 48.92%和 46.91%,表明采用分子聚集理论方法修正的 PR 方程和 RKS 方程不适用于二氧化碳在烷基萘润滑油中溶解度的理论计算.

3 结 论

本文利用根据分子聚集理论修正的状态方程,建立了二氧化碳在烷基萘润滑油中的溶解度理论计算模型.模型中所需润滑油的临界物性参数,如临界温度、临界压力和临界摩尔容积,由基团贡献法得到.

研究发现:采用 vdWaals 分子聚集理论修正方程计算得出的二氧化碳在烷基萘润滑油中的溶解度与实验值非常吻合,溶解度越大,分子聚集现象越明显,理论模型的计算值越准确;采用建立在 PR 分子

聚集理论修正方程和 RKS 分子聚集理论修正方程上的理论模型,计算偏差很大,不适用于二氧化碳在烷基萘润滑油中的溶解度理论计算.

利用基于 vdWaals 修正方程的理论模型,预测了二氧化碳随压力和温度变化的趋势,发现二氧化碳溶解度随压力的升高而升高.

由于缺乏二氧化碳在烷基萘润滑油中溶解度研究的相关文献,本文只研究了部分实验工况下二氧化碳的溶解度,对于更宽范围工况(如二氧化碳临界压力以上)下的溶解度理论计算模型验证及溶解度影响因素的分析,将作进一步的研究.

参考文献:

[1] HUBACHER B. Measurement of performance of carbon dioxide compressors, ARPI-21CR/611-10070-01

- [R]. West Lafayette, USA: Purdue University, 2002: 18-19.
- [2] LI H, RAJEWSKI T E. Experimental study of lubricant candidates for the CO₂ refrigeration system [C]// Proc 4th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids. West Lafayette, USA: Purdue University, 2000: 409-416.
- [3] CONDE M R. Estimation of thermophysical properties of lubricating oils and their solutions with refrigerants: an appraisal of existing methods [J]. Applied Thermal Engineering, 1996, 16 (1): 51-61.
- [4] CONSTANTINOU L, GANI R. New group contribution method for estimation properties of pure compounds [J]. AIChE Journal, 1994, 40 (10): 1697-1710.
- [5] CONSTANTINOU L, GANI R, O'CONNELL J P. Estimation of the acentric factor and the liquid molar volume at 298 K using a new group contribution method [J]. Fluid Phase Equilibria, 1995, 103: 11-22.
- [6] PRAUSNITZ J M, SHAIR F H. A thermodynamic correlation of gas solubilities [J]. AIChE Journal, 1961, 7(4): 682-687.
- [7] YEN L C, MCKETTA J J Jr. A thermodynamic correlation of nonpolar gas solubilities in polar nonassociated liquids [J]. AIChE Journal, 1962, 8(4): 501-507.
- [8] 童景山, 高光华, 王晓工. CO₂ 在碳氢化合物中溶解度的测定和状态方程计算 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1988, 28 (3): 28-32.
TONG Jingshan, GAO Guanghua, WANG Xiaogong. Determination of the solubility of CO₂ in hydrocarbon and calculation using equation of state [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1988, 28 (3): 28-32.
- [9] YOKOZEKI A. Solubility correlation and phase behaviors of carbon dioxide and lubricant oil mixtures [J]. Applied Energy, 2007, 84: 159-175.
- [10] 童景山, 李辉. 气体在液体中溶解的分子热力学模型 [J]. 工程热物理学报, 1988, 9 (4): 307-309.
TONG Jingshan, LI Hui. The molecular thermodynamic model of solution of gases in liquids [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1988, 9 (4): 307-309.
- [11] RUDNICK L. Synthetics, mineral oils, and bio-based lubricants chemistry and technology [M]. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2006: 151-158.
- [12] YOKOZEKI A. Solubility of refrigerants in various lubricants [J]. International Journal of Thermophysics, 2001, 22 (4): 1057-1071.
- [13] 苏长荪. 高等工程热力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1987: 664.

[本刊相关文献链接]

王菲, 邓建强. 跨临界 CO₂ 引射制冷循环临界背压分析. 2012, 46(9): 66-70.

王晶, 赵远扬, 李连生, 等. 跨临界 CO₂ 制冷系统中绝热毛细管性能模拟研究. 2011, 45(11): 16-21.

张可, 吴江涛, 高辉, 等. 爆炸极限实验系统研制及二甲醚/HFC125 的可燃性研究. 2011, 45(7): 28-32.

王永涛, 吴裕远, 禹志强, 等. NH₃-H₂O-LiBr 吸收式制冷机吸收和蒸发性能的实验研究. 2011, 45(3): 40-43.

李程, 巫江虹, 崔晓龙, 等. CO₂ 微通道气体冷却器压降与传热特性研究. 2010, 44(9): 48-53.

刘科伟, 吴裕远, 程玉龙, 等. 回热型氨-水-溴化锂吸收式制冷机的实验研究. 2010, 44(7): 38-41.

王晓坡, 宋渤, 吴江涛, 等. 采用 PR 方程的液相制冷剂摩擦理论黏度模型. 2010, 44(5): 10-14.

赵敏, 厉彦忠. 丙烷预冷混合制冷剂液化流程中原料气与制冷剂匹配研究. 2010, 44(2): 108-112.

钱文波, 晏刚, 冯永斌, 等. N₂O 跨临界喷射/压缩制冷循环的理论研究. 2010, 44(1): 66-70.

王勤, 陈福胜, 夏鹏, 等. 混合工质成分对自复叠冷冻干燥装置降温速率的影响. 2009, 43(11): 37-42.

徐肖肖, 陈光明, 唐黎明, 等. 带喷射器的跨临界 CO₂ 热泵热水器系统的实验研究. 2009, 43(11): 51-55.

张兴群, 张小艳, 袁秀玲. 混合制冷剂 R134a/R600a 与矿物油互溶性的实验研究. 2009, 43(9): 5-8.

钱文波, 晏刚, 冯永斌, 等. 丙烷和丙烯用于低温冷柜的性能和充灌量研究. 2009, 43(9): 104-108.

禹志强, 吴铁晖, 吴裕远, 等. 氨-水和氨-水-溴化锂在吸收式制冷机中的对比实验研究. 2009, 43(3): 46-49.

何茂刚, 张颖, 费继友, 等. 含油制冷剂 R134a 饱和液相运动黏度及表面张力实验测量. 2008, 42(9): 1065-1069.

李青, 余云松, 姜钧, 等. 一种改进的二氧化碳吸收减排法. 2008, 42(1): 1413-1417.

(编辑 荆树蓉)