

DOI: 10.7652/xjtuxb201811012

丙烷旋转压缩机油池中矿物油和丙烷混合物的黏度测量与溶解度推算

吴建华, 雷博雯, 陈振华, 李金波, 张泽
(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 丙烷(R290)在使用矿物油(MO)的高背压旋转压缩机油池中溶解度较大,影响其充注量及油池中 MO-R290 混合物的黏度,进而影响旋转压缩机滑动轴承的可靠性。本研究在压缩机性能试验台及空调器系统上对多个工况下压缩机油池内的 MO-R290 混合物黏度和温度进行了测量,并根据 MO-R290 混合物的物性推算出了 R290 的溶解度。结果表明,所研究的空调器压缩机油池中的混合物黏度足以满足轴承的润滑需求,但由于 R290 的排气温度或油池过热度较低,导致其在压缩机油池中溶解度较高,从而使得 MO-R290 混合物的黏度降低,影响旋转压缩机滑动轴承的可靠性。因此,R290 空调器选用高黏度 MO 时,其吸气过热度需要高于现有空调的吸气过热度,从而提高排气温度,保证油池过热度及混合物黏度处于合理范围。

关键词: 空调器;旋转压缩机;丙烷;矿物油;黏度;溶解度

中图分类号: TB652 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)11-0081-06

Viscosity Measurement and Solubility Calculation of Mineral Oil and Propane (R290) Mixture in Oil Sump of R290 Rotary Compressor

WU Jianhua, LEI Bowen, CHEN Zhenhua, LI Jinbo, ZHANG Ze
(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Propane (R290) has high solubility in mineral oil (MO) sump of rotary compressor with high back pressure which affects the charge quantity of R290 in the system and the MO/R290 mixture viscosity in oil sump, and further influences the reliability of bearings in the rotary compressor. In this study, measurements of the temperature and mixture viscosity in the oil sump under different conditions were conducted on both compressor performance test platform and air conditioner test system. Based on the measurements and the mixture properties, R290 solubility in oil sump was calculated. Conclusions are drawn: 1) The mixture viscosity in oil sump of rotary compressor for domestic air conditioner is enough to lubricate the bearings; and 2) Because of the low discharge temperature, higher suction superheat than the suction superheat of conventional air conditioner is necessary to obtain adequate discharge superheat or oil sump superheat to make R290 solubility appropriate and mixture viscosity sufficient.

Keywords: air conditioner; rotary compressor; propane; mineral oil; viscosity; solubility

丙烷(R290)属于自然工质,环保性好,但由于 R290 的可燃性,对系统的安全性有相应的要求。德

国 GIZ Proklima 公司和公安部天津消防研究所等单位对 R290 用于房间空调器的安全性进行了相关研究^[1-2]。此外,有关 R290 热物性、R290 房间空调器的能效及其压缩机等方面的研究也不少,例如:文献[3]对比了相同热泵或制冷设备中不同制冷剂的性能系数,发现丙烷(R290)、丙烯(R1270)等碳氢制冷剂与二氟一氯甲烷(R22)、四氟乙烷(R134a)等氢氟烃类制冷剂(HFC)的性能系数相当或略大,而在3种碳氢制冷剂中,R290和R1270的性能系数要高于异丁烷(R600a);文献[4]将R22房间空调器中压缩机的行程容积扩大20%、工质分别替换为R290和R1270后,空调系统的制冷量及性能系数均高于原R22空调系统,然而考虑到R290及R1270的可燃性,需要减小系统中工质的充注量,即需要同时减少换热器、压缩机及液相管路中的制冷剂量。文献[5]分别测量了不同工况下以R22和R290为工质的旋转压缩机的系统性能及 p - V 图,分析了能量损失的分布和热力过程,提出了提高R290旋转压缩机效率的方法。

房间空调器通常采用高背压旋转压缩机,其油池处于排气压力下,制冷剂在油池中的溶解度取决于润滑油及制冷剂自身的性质、油池温度和排气压力。润滑油制冷剂混合物的黏度不仅取决于给定温度下润滑油和液体制冷剂自身的黏度,而且还取决于制冷剂在润滑油中的溶解度,即溶解度越大,混合物的黏度越小^[6]。文献[7]测量了冷启动工况下油池中不同混合物的黏度。R22和R410A空调器中的旋转压缩机常采用黏度等级为ISO VG 56和68的润滑油,而由于R290在矿物油中的易溶性,所以R290旋转压缩机中需要采用高黏度(例如ISO VG 100)矿物油。文献[8]测量了R22和R410A变频热泵系统的双缸滚动转子压缩机油池中润滑油制冷剂混合物的黏度,发现MO-R22混合物的黏度为 $2.5\text{ mPa}\cdot\text{s}$,纯矿物油的黏度为 $6.5\text{ mPa}\cdot\text{s}$;R410A-POE混合物的黏度为 $4.0\text{ mPa}\cdot\text{s}$,纯POE油的黏度为 $10.0\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。可以看出,纯润滑油的黏度和混合物的黏度相差很大,且制冷剂溶解度越大,黏度相差也越大。

饱和润滑油制冷剂混合物的性质一般通过相应的模型或丹尼尔图来估计,压缩机厂家也会提供PVT图。Ginies等通过试验测量了低背压涡旋压缩机中制冷剂在润滑油中的动态溶解度,并与PVT图中相应的静态溶解度进行了对比,指出该动态溶解度比PVT图中的静态溶解度低5%~10%^[9]。

对于高背压旋转压缩机,动态溶解度可能更低,对黏度估计的影响也更大。由于旋转压缩机轴承的油膜厚度取决于轴承尺寸、转速和混合物的黏度,所以溶解度的估计偏差会进一步影响油膜厚度的计算。文献[10-11]分别提出了计算满足轴承可靠性的最小油膜厚度的方法。

R290在油池中的溶解度及MO-R290混合物的黏度是影响房间空调器旋转压缩机性能、轴承可靠性以及R290含量的重要因素。通过丹尼尔图或PVT图等来估计溶解度和黏度会有较大偏差,因此本研究在压缩机性能试验台及空调器系统上通过试验来测量不同制冷工况下油池中MO-R290混合物的温度和黏度,并根据MO-R290混合物的物性,推算R290在油池中的溶解度。

1 试验设备和试验工况

试验分为2部分,一部分在R290空调压缩机性能试验台进行,另一部分在空调器系统(即焓差室)进行。

1.1 压缩机、空调器与黏度计

研究对象是R290高背压变频旋转压缩机,采用与R290完全互溶的高黏度矿物油MO VG100。压缩机气缸直径为50 mm,气缸高度为24 mm,曲轴偏心距为5.3 mm,行程容积为 17.9 cm^3 。矿物油MO VG100在40℃时的运动黏度为 $97.4\text{ mm}^2/\text{s}$,在100℃时的运动黏度为 $10.9\text{ mm}^2/\text{s}$,酸价为0 mg/g,黏度指数为95,倾点为-15℃,燃点高于200℃。

试验用空调器采用美的公司制造的R290变频空调器,额定制冷和制热能力分别为2.6 kW和4.2 kW,所用压缩机为上述R290高背压变频旋转压缩机。

试验采用美国Cambridge公司的SPL501微型黏度探头及VISCO Pro 2000型黏度检测和控制系统来测试压缩机油池中混合物的黏度。

1.2 压缩机性能试验台与试验工况

压缩机性能试验台,又称量热器,可以精确设定和控制压缩机运行条件,并测量压缩机的制冷能力、输入功率和性能系数(用 C_p 表示)。除一些安全措施外,R290压缩机量热器的工作原理及结构与一般的HCHC或HFC量热器的相同。量热器所用热电偶和压力传感器的不确定度为0.15%。

压缩机性能试验台的7种工况(即符合美国采暖、制冷与空调工程师学会标准的工况(ASHRAE工况)及其4种变工况、高效工况(GX)和符合美国

制冷空调与供暖协会标准的工况 (ARI) 如表 1 所示,所有工况的环境温度均为 35℃。

表 1 压缩机性能试验台的测试工况

工况	冷凝温度 $t_c/^\circ\text{C}$	冷凝压力 p_c/MPa	蒸发温度 $t_e/^\circ\text{C}$	蒸发压力 p_e/MPa	吸气温度 $t_s/^\circ\text{C}$	阀前温度 $t_v/^\circ\text{C}$
ASHRAE	54.4	1.883	7.2	0.588	35	46.1
ASHRAE 1	54.4	1.883	7.2	0.588	25	46.1
ASHRAE 2	54.4	1.883	7.2	0.588	15	46.1
ASHRAE 3	60.0	2.117	7.2	0.588	35	51.7
ASHRAE 4	50.0	1.713	7.2	0.588	35	41.7
GX	46.0	1.569	10	0.637	18	41.0
ARI	43.3	1.477	-1.1	0.459	4.4	38.3

1.3 焓差室与试验工况

焓差室可以调整室内外的干球温度(t_d)和湿球温度(t_w),测量 R290 空调器的制冷/制热能力 Q 和耗功。进入空气测量装置的空气的干、湿球温度精度为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$,室内外热电偶的精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,电功率测量精度为 0.5%。制冷能力和能效比的不确定度分别为 1.53% 和 3.27%。空调器系统中压力传感器和热电偶的精度分别为 $\pm 0.25\%$ 和 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

空调器的运行工况如表 2 所示。

表 2 空调器运行工况

工况	室外		室内		频率 /Hz
	$t_d/^\circ\text{C}$	$t_w/^\circ\text{C}$	$t_d/^\circ\text{C}$	$t_w/^\circ\text{C}$	
最大制冷	35	24	27	19	100
自定义制冷	35	24	27	19	60
额定制冷	35	24	27	19	45
中间制冷	35	24	27	19	19
额定制热	7	6	20	15	84
中间制热	7	6	20	15	33

2 油池中 R290 溶解度及混合物运动黏度的计算

压缩机排气中包含润滑油油滴,油滴可视为 MO-R290 的饱和溶液。在电机下部空腔中,油滴从制冷剂蒸气中分离出来,直接落入油池或在壳体壁面形成油膜进行回油。因为排气温度 t_d 高于油池温度,R290 在油滴中的溶解度低于在油池中的溶解度,所以 R290 会通过油池表面或泡沫层溶入矿物油。

当压缩机稳定运行时,矿物油从油池顶部流至曲轴孔下部的过程中会与环境、气缸和轴承换热,导致油池顶部温度高于底部温度。虽然油池中不同位置的油温不同,但油池油面以下无泡沫区中 R290 的溶解度基本相同,即为 R290 在油池中的溶解度。

试验中,同时测出油池中相同位置 MO-R290 混合物的温度和动力黏度,结合混合物的密度等热物性参数值,可得到润滑油中 R290 的溶解度及其运动黏度。

由于油池不同位置的温度不同,且润滑油制冷剂混合物不处于饱和状态,所以不能直接选取油池中某一位置的温度作为油池温度进行计算分析。本试验中,根据 R290 的溶解度和油池上的压力,可得到此溶解度下对应的饱和温度,定为饱和溶解温度 t_a ,油池过热度 Δt 。即为饱和溶解温度与冷凝温度的差值。

3 试验结果分析

3.1 压缩机性能试验台测试结果分析

压缩机性能试验台上的测试和推算结果见表 3。从 ASHRAE~ASHRAE2 工况下性能系数 C_p 的变化可以看出,吸气过热度越高,系统的性能系数也越高。在表 1 中的测试工况下,混合物黏度范围为 2.46~3.98 mPa·s。在 ASHRAE 工况下,R22 空调器用旋转压缩机中 MO VG56-R22 混合物的黏度约为 2.5 mPa·s^[8],MO-R290 混合物的黏度为 3.68 mPa·s,而 R290 和 R22 空调系统的吸排气压差分别为 1.3 和 1.5 MPa。

Sommerfeld 数(S_b)是用于评价径向滑动轴承承载性能的量纲一参数,表达式为

$$S_b = \frac{\eta NDL}{W} \left(\frac{R}{C}\right)^2$$

(1)

式中: D 为轴颈直径; N 为轴颈转速; L 为轴颈长度; R 为轴承半径; C 为轴承的半径间隙; W 为载荷; η 为润滑油黏度。

也就说,在转速相同的情况下,如果 R290 和 R22 旋转压缩机中轴承的尺寸相差不大,MO VG100 足以满足 R290 旋转压缩机轴承润滑的需要。

与 R22 或 R410A 旋转压缩机不同,R290 旋转

压缩机油池中混合物的黏度 μ_m 受吸气过热度 Δt_s 影响较大。在 ASHRAE~ASHRAE2 工况下,吸气过热度从 27.8℃降低到 7.8℃时,R290 的溶解度(S)从 15.6%急剧增至 22.5%,混合物的黏度从 3.68 mPa·s 降低到 2.46 mPa·s。同时,对比 ASHRAE、ASHRAE3 和 ASHRAE4 工况下混合物的黏度和 R290 的溶解度可以看出,排气压力对混合物黏度影响很大,而对 R290 的溶解度影响不大。与 ASHRAE 工况下相比,GX 和 ARI 工况下较低的吸气过热度 and 吸排气压比导致油池温度和油池过热度较低,所以,在这 2 种工况下 R290 在油池中的溶解度高于在 ASHRAE 工况下的溶解度,混合物黏度也更小。

表 3 不同工况下的试验和推算结果

工况	$t_c/^\circ\text{C}$	C_p	$\Delta t_s/^\circ\text{C}$	$t_u/^\circ\text{C}$	$t_b/^\circ\text{C}$	$t_m/^\circ\text{C}$	$\mu_m/\text{mPa}\cdot\text{s}$	$S/\%$	$t_a/^\circ\text{C}$	$\Delta t_o/^\circ\text{C}$
ASHRAE	54.4	3.68	27.8	76.9	66.7	67.0	3.68	15.6	75.1	20.7
ASHRAE 1	54.4	3.56	17.8	68.6	60.5	63.6	3.06	18.7	70.0	15.6
ASHRAE 2	54.4	3.44	7.8	63.1	56.4	59.2	2.46	22.5	66.1	11.7
ASHRAE 3	60.0	3.03	27.8	82.1	65.6	70.0	3.24	16.5	79.0	19.0
ASHRAE 4	50.0	4.17	27.8	73.6	60.6	63.5	3.98	15.8	72.5	22.5
GX	46.0	4.89	8.0	55.5	49.4	51.1	2.64	23.5	58.5	12.5
ARI	43.3	3.53	5.5	56.4	49.5	51.1	3.43	20.8	58.2	14.1

3.2 焓差室测试结果分析

焓差室中的测试结果及性能参数见表 4。可以看出,随着压缩机转速的增加,制冷/制热能力提高,性能系数降低。此外,额定制冷工况的冷凝温度和

制冷剂在润滑油中的溶解度取决于油池过热度 and 排气压力,即油池过热度越大,溶解度就越小;排气压力越高,溶解度就越大。油池的过热度取决于吸气过热度 and 吸排气压比,而润滑油制冷剂混合物的黏度不仅与吸气过热度、吸排气压比 and 排气压力有关,而且与润滑油黏度等级及液体制冷剂黏度有关。

矿物油从油池顶部流至曲轴孔下部的过程中与环境、气缸和轴承换热,导致油池顶部温度 t_u 高于底部温度 t_b 。黏度计安装在油池底部,所以黏度计测得的温度 t_m 与油池底部温度接近。试验数据表明,油池温度实际上更接近油池顶部温度,因此,若无合适的测量仪器,可以将油池顶部温度作为油池温度进行分析或计算。

蒸发温度均比 GX 工况的高约 1.7℃,其进排气压差比 GX 工况的略小。为了获得更大的制热能力,额定制热工况的转速更高,其冷凝温度较 ARI 工况的高 8.2℃,蒸发温度较 ARI 工况的低 1.7℃。

表 4 焓差室中的测试结果及性能参数

工况	f/Hz	p_e/MPa	$t_e/^\circ\text{C}$	p_c/MPa	$t_c/^\circ\text{C}$	$t_s/^\circ\text{C}$	$t_d/^\circ\text{C}$	Q/W	C_p
最大制冷	100	0.440	-2.45	1.748	50.92	15.9	75.9	3 831	2.30
自定义制冷	60	0.506	2.13	1.571	46.06	24.6	70.8	2 893	3.28
额定制冷	45	0.608	8.39	1.508	44.23	22.7	60.7	2 509	3.95
中间制冷	19	0.715	14.12	1.379	40.30	28.5	54.7	1 321	4.79
额定制热	84	0.434	-2.89	1.770	51.50	6.5	65.8	3 963	2.87
中间制热	33	0.481	0.45	1.183	33.79	7.9	39.8	1 747	4.42

焓差室中的测试和推算结果见表 5。可以看出:额定制冷工况下的吸气过热度为 14.3℃,远高于 R22 或 R410A 空调器的吸气过热度,而排气过热度 Δt_d 仅为 16.5℃;油池温度低于 60℃,油池过热度为 14.4℃;R290 的溶解度约为 20%。此系统中 R290 和 MO 的充注量相当,也就是说,约占 R290 总量 20%的制冷剂溶解在油池中,远高于 R22 或 R410A 系统中制冷剂的溶解度。

由于 R290 的低绝热指数和在 MO 中的易溶性,使得即使压缩机吸气过热度很高,其排气过热度仍然不高,因此油池过热度不高,进一步导致了 R290 的高溶解度。吸气过热度高时,会使蒸发器传热效率降低,导致空调器能效降低;吸气过热度低时,大量 R290 会溶解在润滑油中,导致混合物黏度下降,同时,由于换热器中缺少制冷剂,使得系统的制冷能力和性能系数下降。为了保证空调器系统的

表 5 焓差室中的测试和推算结果

工况	$\Delta t_s / ^\circ\text{C}$	$\Delta t_d / ^\circ\text{C}$	$t_u / ^\circ\text{C}$	$t_m / ^\circ\text{C}$	$\mu_m / \text{mPa} \cdot \text{s}$	$S / \%$	$t_a / ^\circ\text{C}$	$\Delta t_o / ^\circ\text{C}$
最大制冷	18.4	25.0	74.2	67.1	4.42	13.7	75.9	25.0
自定义制冷	22.5	24.8	68.3	60.1	4.30	15.8	68.2	22.1
额定制冷	14.3	16.5	59.1	51.9	3.57	20.0	58.6	14.4
中间制冷	14.2	14.4	53.8	46.8	3.13	23.1	53.0	12.7
额定制热	9.4	14.3	65.0	52.3	3.53	22.7	63.5	12.0
中间制热	7.5	6.0	41.0	33.1	4.15	23.7	45.4	11.6

可靠性及其能效,需要在使用与 R290 互溶性好的矿物油的空调器系统中采取高吸气过热度。

若系统采用与 R290 互溶性不好的润滑油,如 PAG,则系统所需要的吸气过热度减小,同时系统还会产生其他问题。溶解度和互溶性概念不同,但一般来说,R290 溶解度低的润滑油与 R290 的互溶性差。

表 5 中的 2 种制热工况与 4 种制冷工况相比,吸气过热度和油池过热度(Δt_o)均较小,R290 溶解度更高。此外,对比黏度计测得的阀前温度 t_v 、油池顶部温度 t_u 和饱和溶解温度 t_a 不难发现,饱和溶解温度与油池顶部温度更为接近。

R290 在 MO 和 PAG 中的溶解度随油池过热度的变化如图 1 所示,图中还显示了排气压力对 R290 溶解度的影响。以溶解度为 20% 作为分隔点,每条曲线可以分为 2 部分,前半部分 R290 的溶解度随着油池过热度的增加急剧下降,而后半部分则是缓慢下降。

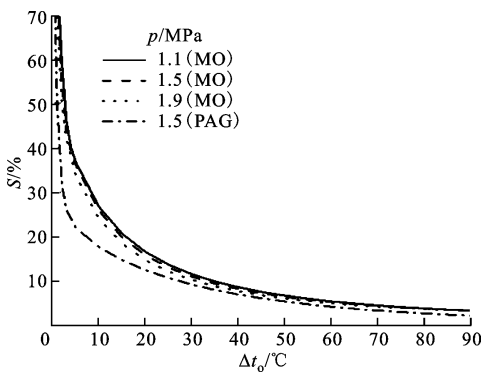


图 1 不同油池过热度下 R290 在 MO 和 PAG 中的溶解度

MO-R290 和 PAG-R290 曲线的变化趋势有所不同,曲线的分隔点位置也不同。相较 PAG,R290 更易溶于 MO,所以溶解度相同时,MO-R290 所需的油池过热度更高。由图 1 可见:MO-R290 曲线分隔点处的油池过热度为 14℃,而 PAG-R290 曲线分

隔点处的油池过热度为 5℃,换句话说,在相同的油池过热度下,R290 在 MO 中的溶解度大于在 PAG 中的溶解度;当油池过热度从 4℃ 上升到 7.5℃ 时,R290 在 MO 中的溶解度由 40% 降到 30%,R290 在 PAG 中的溶解度由 25% 降到 20%,而当油池过热度达到 30℃ 时,R290 在 MO 和 PAG 中的溶解度几乎相同。

图中 3 条 MO-R290 曲线对应的排气压力均为常用排气压力,但曲线之间差异不大,相较于排气压力,油池过热度对溶解度影响更大。

综上所述,R290 在润滑油中的溶解度主要受油池过热度的影响,排气压力对其影响不大;当润滑油的类型不同时,R290 空调器所需的油池过热度也不相同。

4 结 论

(1)对于采用 MO 润滑的 R290 空调器,R290 在 MO 中的溶解度及其混合物的黏度主要受油池过热度的影响,即油池过热度越高,油池中 R290 的溶解度就越低,而油池过热度则与吸气过热度正相关。

(2)在多种测试工况下,对于性能试验台上及空调系统中的 R290 旋转压缩机,选用互溶性好的矿物油时,吸气过热度要适当,即使是选用高黏度的矿物油时,吸气过热度也需要高于现有空调的吸气过热度,这样润滑油-R290 混合物的黏度才能满足轴承润滑的需要。当压缩机转速相同时,若 R290 旋转压缩机与 R22 旋转压缩机中的轴承尺寸相差不大,则润滑油 MO VG100 足以满足 R290 旋转压缩机轴承润滑的需要。

(3)压缩机吸气过热度的最优化不仅要考虑系统的性能,而且要考虑系统中 R290 的充注量及油池中 MO-R290 混合物的黏度。

(下转第 92 页)