文章编号:0253-4339(2022) 01-0145-06 doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2022.01.145

# 一种精馏型油分离器的实验研究

#### 葛俊娜 唐黎明 陈光明 吴撼 陈琪

#### (浙江大学制冷与低温研究所 浙江省制冷与低温技术重点实验室 杭州 310027)

**摘 要** 精馏是利用气液混合物中各组分挥发度的差异进行分离。本文研制的精馏型油分离器结合了传统油分离器的分离原 理和精馏原理,以塔内恒定压力1000 kPa、入口温度 62 ℃、R134a 和 PAG 的质量比为7:3的进料条件用 Aspen 软件进行模拟,模 拟可得通过精馏过程可除去二元混合物中的润滑油。为验证该油分离器的实际可行性,搭建了测试油分离器效率的实验装置, 分别研究了制冷剂循环流量和顶端冷量对油分离器分离效率的影响,实验可得在制冷剂质量流量为7.5 g/s、顶端冷量为200 W 的条件下其油分离效率高达为99.967%。综合模拟和实验结果可得:将精馏原理引入油分离器用于制冷剂润滑油混合物的分 离,可以提高油分离器的分离效果。经测试,精馏型油分离器的分离效率比传统的旋风式油分离器高9.17%。

关键词 油分离器;精馏;制冷循环;制冷剂

中图分类号:TB657.6;TB61<sup>+</sup>1

文献标识码:A

## Experimental Study of a Distillation-type Oil Separator

Ge Junna<sup>1</sup> Tang Liming<sup>1</sup> Chen Guangming<sup>1</sup> Wu Han<sup>1</sup> Chen Qi<sup>1</sup>

(Key Laboratory of Refrigeration and Cryogenic Technology of Zhejiang Province, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China)

**Abstract** Distillation is the separation of components in a gas-liquid mixture using the difference in volatility. The distillation-type oil separator developed in this study combines the principles of traditional oil separation and distillation. The feed conditions of a constant pressure of 1 000 kPa in the tower, inlet temperature of 62  $^{\circ}$ C, and mass ratio of R134a and PAG of 7:3 were simulated using Aspen simulation software. The results show that the lubricating oil in the binary mixture can be removed by the distillation process. In this study an experimental setup was built to test the efficiency of the oil separator to verify its practical feasibility. The effects of the refrigerant circulation flow rate and the top cooling volume on the separation efficiency of the oil separator were investigated separately. The results showed that the oil separation efficiency was as high as 99.967% at a refrigerant mass flow rate of 7.5 g/s and a maximum cooling capacity of 200 W. From the experimental and simulation results, it was determined that introducing the distillation principle into the oil separator for the separation of the refrigerant-lubricant mixture can improve its separation efficiency. The separation efficiency of the distillation-type oil separator was 9.17% higher than that of a conventional oil separator.

Keywords oil separator; distillation; refrigeration cycle; refrigerant

润滑油在压缩式制冷循环中对压缩机起到润滑 运动部件、降低摩擦副温度、减轻摩擦副磨损、加强压 缩机气密性的作用<sup>[1-2]</sup>。但在制冷循环运行时,润滑 油不仅会随着气态制冷剂参与制冷循环,在换热器表 面产生油膜增大传热热阻;还会造成压缩机出现缺 油、抱轴等现象,因此在制冷循环中引入高效率的油 分离器非常重要。

按照不同结构型式,常见的油分离器可分为离心 式油分离器、过滤式油分离器以及填料式油分离 器<sup>[3]</sup>。在工业上应用广泛的旋风式油分离器即属于 离心式油分离器。目前的研究大多针对已有油分离 器的结构优化以及模拟仿真。在结构优化方面,Y. S. Cho 等<sup>[4-5]</sup>针对旋风式油分离器的内壁表面用亲 油疏油处理,油分效率提高至 93.10%,比传统的旋 风式油分离器提高了 1.67%。特灵空调系统(中国) 有限公司沈海英等<sup>[6]</sup>提出一种设置双行程旋风离心 分离和滤网过滤分离的油分离器,使之形成 4 个腔 室,并多次改变气流方向以增加分离路径从而增强分

基金项目:国家自然科学基金(51376156)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51376156).)

收稿日期:2021-07-22;修回日期:2021-09-01

离效果。Xu Jiu 等<sup>[7]</sup>通过流动可视化以及实验测量 研究了在实际压缩机排气条件下油分离器的分离结 构,并提出了一个半经验分析模型检验分析带有波片 结构的撞击式油分离器的性能。在仿真模拟方面,谢 绪扬<sup>[8]</sup>利用 Fluent 软件模拟了油分离器中波纹板和 丝网除雾器内的气液两相流场,发现波纹板除雾器的 进出口压降和分离效率与进口气速成正比,与叶片转 折角度成反比:丝网除雾器的压降和分离效率与进口 气速呈正比:波纹板和丝网的整体分离效率较大。 Luo Xiaoming 等<sup>[9]</sup>利用 Fluent 软件模拟分析了不同 膨胀直径比和倾斜角度下的气液圆柱旋风分离器内 液滴的流动,以此来确定最佳膨胀比和倾斜角度。张 小彬等[10-11] 采用 PBM 和 CFD 双流体模型的耦合方 法,研究了航空发动机动压式油气分离器的纵横比 (气缸直径/气缸长度)对分离特性的影响,结果表 明,纵横比过大或过小均会导致油气分离器的分离性 能下降,存在一个最佳的横纵比5~6之间油气分离 器的分离性能最好,达到其最大分离效率约为93%。

通过文献调研可知,已有的油分离器的研究仅集 中在结构层面的优化,存在一定的限制性。结构缺陷 造成现有高效率油分离器的制造成本高,不能高效分 离油气混合物。然而由于制冷剂和润滑油的挥发度 差异,可以将精馏引入油分离器的设计中以有效提高 分离效率。

U. M. GARCÍA-VENTURA 等<sup>[12-13]</sup>提出了隔壁 萃取精馏的新工艺,以 DMF 作为萃取剂的同时利用 Aspen 对系统进行优化,优化后得到质量分数为 99.61%的环戊烷,比常规工艺的精馏节能 18.1%。 Z. Jaja 等<sup>[14]</sup>建立了哈考特港炼油公司蒸馏装置的 HYSYS 模型,采用了序列二次规划方法对模型进行 优化,并提高了轻柴油的产品质量流量,在最佳温度 257℃下得到产物的最佳摩尔分数值为0.0528。R. N. Mohapatro 等<sup>[15]</sup>利用 AspenPlus 对二元精馏塔进 行优化,在进料流速为3 165 kg/h、回流速率为1.2 kg/h、温度为80℃等条件下,苯和甲苯的纯度分别达 到 99.99%和 99.70%。

本文提出一种卧式精馏型油分离器,由碰撞与重 力分离相结合的储油筒体和精馏分离筒体组成,利用 精馏原理以达到更高效的分离效率,分别通过模拟和 实验研究验证油分离器的可行性和高效率。

## 1 精馏型油分离器的设计

— 146 —

由于仅靠惯性和重力作用的油分离器很难达到 高效分离,因而通常会采用一些如离心分离、碰撞拦 截、吸附分离等的强化分离技术<sup>[16-17]</sup>。在精馏时,混 合物中的气相和液相做逆向流动并在逆向流动过程 中不断进行传热传质,气相中的重组分逐渐进入液 相,而液相中的轻组分逐渐转入气相<sup>[18]</sup>。传统的油 分原理可以初步分离质量较大的油滴,而精馏可以在 此基础上进行高效分离。根据已有的油分离器结构 特点和精馏原理,同时保证油分离器高效、结构简单 且易于加工制造,设计得到的分离流程如图1所示。



图 1 分离流程设计 Fig.1 Design of separation process

根据图 1 所示的三段分离过程设计的卧式精馏 型油分离器的结构如图 2 所示。



 1油分离器进口;2储油筒体;3分离挡板;4回油口;5精馏 分离段筒体;6冷却盘管;7油分离器出口;8回油管路;
 9填料腔;10冷却水入口;11冷却水出口;12管道。

#### 图 2 精馏型油分离器结构 Fig.2 Structure of distillation type oil separator

该精馏型油分离器的三段分离工作流程如下:

重力沉降段分离:油气混合气体从压缩机排出后 通过精馏型油分离器进口1进入储油筒体2,混合气 体流速随着截面面积的增大而下降,质量较大的油滴 在重力作用下落完成分离,并沉积在储油筒体2的 底部。

碰撞分离段:经过重力沉降段分离后的混合气体 在分离挡板3上气体发生碰撞并改变了流动方向因 而分离出小直径的油滴,并在重力作用下沿挡板流入 储油筒体2的底部。

精馏分离段:剩余的混合气体通过管道 12 进入 精馏分离筒体 5 并轴向流经填料腔 9 时,溶于气体内 的润滑油会被填料吸附,并沉积于精馏分离段筒体 5 底部。由于储油筒体 2 顶部与精馏分离段筒体 5 底 部互相接触,使得沉积于精馏分离段筒体5底部的润 滑油与经过储油筒体2的混合气体进行热量交换,同 时混合气体接触到精馏分离段筒体5顶部的冷却盘 管6时被冷凝。综上,混合气体流经精馏分离段筒体 5时不断被气化与冷凝,最终气相中的油被彻底除 去。制冷剂气体通过精馏型油分离器出口7排出,而 沉积于精馏分离段筒体5底部的油液先通过回油管 路8流经储油筒体2,再经过回油口4回到压缩机 内。填料腔9内的填料采用小弹簧。

以气体进口温度 62 ℃、出口温度 45 ℃,循环水 进口温度 20 ℃、出口温度 25 ℃,制冷剂质量流量 12.53 g/s 的条件进行计算,精馏型油分离器结构尺 寸为:螺旋盘管规格 60 mm×40 mm×15 mm(盘管整 体外径×盘管整体内径×盘管间距);筒体直径 108 mm;筒体高度 185 mm;填料规格 5 mm×1 mm×1.86 mm(弹簧高度×弹簧内径×弹簧外径)。

## 2 精馏型油分离器的仿真模拟

目前常用的制冷剂有 R134a、R407c、R410a、R22 等<sup>[19]</sup>,本实验选择 R134a 作为实验工质。PAG 润滑 油和 POE 润滑油一般与 R134a 相匹配。考虑到实验 的安全性,实验中的润滑油选择性质更加稳定的 PAG 润滑油,因此采用 R134a/PAG 的制冷剂与润滑 油组合进行实验。

利用 Aspen 软件模拟计算 R134a/PAG 混合物精 馏过程,并按照精馏型油分离器结构参数设定精馏塔 结构尺寸。依据物性假设精馏塔的塔板数为 10,从 第 5 层塔板上进料,塔内为恒定压力 1 000 kPa, R134a 和 PAG 的质量比按照 7:3 进料,冷凝器及再 热器的换热量为 100 W,计算得到不同进料流量下的 油浓度,如图 3 所示。





模拟结果显示, R134a 作为易挥发组分, 入口流量由0 增至15.0 g/s, 顶端出口均为气态, 润滑油组

分占比为0,而 R134a 组分占比为1。由制冷剂与润 滑油组成的二元混合物通过精馏过程可除去气态制 冷剂中的润滑油,且制冷剂流量的变化基本不影响油 分离器的分离效率。

保持混合物流量为 7.5 g/s 不变,顶端冷量对油浓度的影响如图 4 所示。



## 图 4 顶端出口油和釜底油浓度随顶端冷量的变化 Fig.4 Variation of top outlet oil and bottom kettle oil concentration with top cooling rate

由图 4 可知,当顶端冷量为 0 W 时,顶端出口油 浓度为 0.025%;当顶端冷量为 100 W 时,顶端出口 油浓度几乎为 0。因此通过精馏过程,当顶端冷量达 到一定数值时几乎可以除尽二元混合物中的润滑油。

## 3 精馏型油分离器的实验研究

实验系统以压缩式制冷循环为主题,同时具有流 量调节和工况调节能力。将精馏型油分离器安装在 压缩机和冷凝器之间,同时在压缩机和油分离器之间 安置回油泵和进油取样口,出油取样口则设置在冷凝 器后。实验循环系统如图5所示。



Fig.5 Experimental circulation system

## 3.1 实验设备的选取

预选型号为 BSD122DT-P6AU 的定排量压缩机, 压缩机额定功率为 570 W,额定制冷量为1 700 W,排 热量为 12.2 W,COP 为 2.98。换热器选定内管套管 式换热器,根据选定的压缩机与设定的蒸发温度、冷凝温度与过热度以及计算得到的循环参数可以对冷凝器和蒸发器分别进行计算得到换热器参数。实验选择 HOMK Milli-Mite1300 系列针阀,可通过调节阀门开度用于调节循环流量。

采用取样测量法测量制冷剂中油含量,以美国采 暖、制冷与空调工程师学会制定的 ANSI/ASHRAE Standard 41.4-2015<sup>[20]</sup>为准。该测量法可以测量较 大温区内的任意制冷剂与润滑油组合的含量,用取样 法可测得各重量参数并由式(1)和式(2)计算得到油 浓度和油分离效率:

油浓度=取样排气后总质量-取样瓶空质量 取样未排气总质量-取样瓶空质量×100%

(1)

油分离器效率= 进口油浓度-出口油浓度 ×100% 进口油浓度

(2)

取样时,分别对两个取样瓶进行称重,不锈钢取 样瓶质量为411.3g,铜取样瓶质量为144.8g,因此 选用 Precisa ES520A 分析天平,最大量程为520g,精 度为0.0001g。

#### 3.2 实验研究

#### 3.2.1 制冷剂循环流量的影响

根据选定的压缩机型号进行制冷循环计算可得, 制冷剂循环流量为 12.53 g/s,需要保持油分离器内 顶端冷量不变,分别得到油分离器顶端冷量为 0、 100、200 W 情况下进、出口油浓度以及油分离效率的 数值,如表 1 所示。

由表1可知,当顶端冷量为0、制冷剂流量为 2.04 g/s时,制冷剂流量较小,因此进入制冷循环 的油浓度较低,分离效率为99.861%;逐渐增加制 冷剂流量时,油分离器的进口油浓度基本维持在 5%;当顶端冷量为100 W时,进口油浓度变化较 小,而出口油浓度受制冷剂流量的影响比较随机, 分离效率基本不变,均在约99.50%;当顶端冷量为 200 W、制冷剂流量为7.63 g/s时,分离器的进口油 浓度出现较大波动,而其余情况的进口油浓度变化 波动较小,油分离效率较高,均维持在99.630% 以上。

综上所述,当精馏段的顶端冷量保持不变时, 油分离器的进口油浓度有微小变化,主要受制冷剂 流量变化的影响。制冷剂流量的变化基本不影响 油分离器的分离效率。精馏型油分离器的出口油 浓度基本在 0.028% 以内,油分离效率高达 99.967%。

表1不同顶端冷量时的油分离效率

Tab.1 Oil separation efficiency at different top cooling

顶端 冷量/W	制冷剂 流量/(g/s)	进口油 浓度/%	出口油 浓度/%	油分离 效率/%
0	2.04	1.209	0.002	99.861
	5.31	5.572	0.028	99. 493
	7.43	5.546	0.026	99. 531
	9.23	5.303	0.021	99.604
100	5.37	3. 351	0.019	99. 433
	7.33	3. 551	0.005	99. 859
	9.09	4.085	0.021	99. 486
	11.03	4. 126	0.009	99. 782
200	5.17	1. 576	0.017	98.921
	7.63	5.208	0.003	99.967
	8.96	2.716	0.010	99.630
	11. 99	2.829	0.008	99. 707

### 3.2.2 顶端冷量变化的影响

由 3.2.1 可知,精馏型油分离器的分离效率与顶端冷量的大小有关,因此需要保持制冷剂流量不变, 研究顶端冷量对油分离效率的具体影响。实验中的 制冷剂流量具有波动性,因此选取近似值进行研究分 析,选取制冷剂流量为 7.5 g/s 和 11.0 g/s 的情况, 实验结果如表 2 所示。

## 表 2 不同制冷剂流量下的油分离效率 Tab.2 Oil separation efficiency for different refrigerant flow rate

制冷剂 流量/(g/s)	顶端 冷量/W	进口油 浓度/%	出口油 浓度/%	油分离 效率/%
	0	5.303	0.021	99. 604
7.5	100	3. 551	0.005	99. 859
1.5	150	1.778	0.005	99. 710
	200	5.208	0.003	99. 967
	0	5. 546	0.026	99. 531
11 0	100	4. 126	0.009	99. 782
11.0	150	1.867	0.007	99. 625
	200	2.829	0.008	99. 707

由表2可知,当制冷剂循环流量分别为7.5 g/s 和11.0 g/s 时,随着顶端冷量的增大,精馏型油分离

— 148 —

器的出口油浓度逐渐降低,油分离效率则基本呈上升 趋势。分析可知,油分离器内精馏段的冷凝回流液随 着顶端冷量的增大而增加,进一步加强了制冷剂与润 滑油混合气液之间的传热传质,因而得到了更多的润 滑油液体,减少了气相中的润滑油组分。

对比模拟结果和实验数据可知,当精馏型油分离 器顶端冷量不变时,随着制冷剂质量流量的增大,油 分离效率呈上升趋势;当制冷剂质量流量不变时,随 着顶端冷量的增大,油分离效率也不断增大。因此, 模拟结果和实验数据验证了该精馏型油分离器的可 行性,但精馏型油分离器在提高油分离效率的同时也 增加了流动阻力及制作成本。

## 4 结论

本文在总结油分离器与精馏装置特点的基础上, 研制了一种全新的高效的卧式精馏型油分离器,该精 馏型油分离器采用重力沉降式分离、碰撞分离及精馏 分离以达到润滑油被高效分离的目的,得到结论 如下:

1)利用 Aspen 软件模拟计算 R134a/PAG 的在该 油分离器内的精馏过程,研究了制冷剂流量和顶端冷 量的影响,由模拟结果可知:通过精馏可以将二元混 合物中的润滑油分离出来,且油分离器的分离效率基 本不受流量变化影响;保持流量为 7.5 g/s 时,当顶 端冷量达到一定数值时,几乎可以除尽二元混合物中 的润滑油。

2)选定取样测量法作为油分测量的方式,研究 了制冷剂流量和顶端冷量对精馏型油分离器分离效 率的影响。实验结果表明:精馏型油分离器的分离效 率对制冷剂流速的变化不敏感,但会随着顶端冷量的 增大而提高分离效果。在制冷剂质量流量为7.5 g/s、顶端冷量为200W的条件下精馏型油分离器效 率高达99.967%,比传统的旋风式油分离器效率 高9.17%。

3) 对比模拟结果和实验数据可知,引入精馏原 理可以有效提高油分离器的效率,验证了该精馏型油 分离器的实际可行性和高效性,但提高油分离器的效 率的同时也增加了一定的成本与流动阻力。

#### 参考文献

- [1] 陈光明,陈国邦. 制冷与低温原理[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2010. (CHEN Guangming, CHEN Guobang. Principles of refrigeration and cryogenics[M].
  2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2010.)
- [2] WU Xiaokun, XING Ziwen, HE Zhilong, et al. Effects of

lubricating oil on the performance of a semi-hermetic twin screw refrigeration compressor[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112: 340-351.

- [3] 吴业正. 制冷原理与设备[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2010: 265-268. (WU Yezheng. Refrigeration principles and equipment [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2010: 265-268.)
- [4] CHO Y S, LEE S W, WOO K S, et al. A numerical analysis of flow characteristics and oil separation performance for cyclone oil separator designs[J]. Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, 2008, 16(5): 22 -28.
- [5] JANG S, AHN J, LIM S H. Performance of oil-separator adopting nature-inspired surface [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, 16 (10): 2205-2211.
- [6] 特灵空调系统(中国)有限公司.油分离器: CN106196
   774A[P]. 2018-09-07. (Trane Air Conditioning Systems (China) Co. Oil separator: CN106196774A[P]. 2018-09-07.)
- [7] XU Jiu, HRNJAK P. Impinging oil separator for compressors[J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 119: 110–118.
- [8] 谢绪扬. 氨油分离器内高效气液分离元件分离性能的数值研究[J]. 能源化工, 2017, 38(6): 84-90. (XIE Xuyang. Numerical simulation study on the separating property of high efficiency gas-liquid separation device in ammonia-oil separator[J]. Energy Chemical Industry, 2017, 38 (6): 84-90.)
- [9] LUO Xiaoming, REN Jing, CHEN Tong, et al. Influence of slug flow on flow fields in a gas-liquid cylindrical cyclone separator: a simulation study [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2020, 28(8): 2075-2083.
- [10] 张小彬. 航空发动机用动压式油气分离器性能研究
   [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2018. (ZHANG Xiaobin. The research on performance of dynamic pressure type gas-oil separator in aero-engine[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.)
- [11] ZHANG Xiaobin, ZHANG Xiaofeng, GU Delin, et al. Numerical study on the influence of length-diameter ratio on the performance of dynamic pressure oil-air separator [J]. International Journal of Chemical Engineering, 2021: 1-16.
- [12] GARCÍA-VENTURA U M, BARROSO-MUÑOZ F O, HERNÁNDEZ S, et al. Experimental study of the production of high purity ethanol using a semi-continuous extractive batch dividing wall distillation column [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2016, 108: 74-77.

- [13] 彭珂, 胡本源, 王克峰. 隔壁萃取精馏塔分离戊烷混合物的模拟研究[J]. 现代化工, 2020, 40(10): 221-225. (PENG Ke, HU Benyuan, WANG Kefeng. Simulation study on separation of pentane mixture by extractive distillation dividing wall column[J]. Modern Chemical Industry, 2020, 40(10): 221-225.)
- [14] JAJA Z, AKPA J G, DAGDE K K. Optimization of crude distillation unit case study of the port harcourt refining company[J]. Advances in Chemical Engineering and Science, 2020, 10(3): 123-134.
- [15] MOHAPATRO R N, SWAIN R, ROUTRAY S, et al. Separation efficiency optimisation of toluene-benzene fraction using binary distillation column [J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Series D, 2021, 102(1): 125-129.
- [16] STEWART M, ARNOLD K. Two-phase gas-liquid separators[M]//Gas-Liquid And Liquid-Liquid Separators. Amsterdam: Elsevier, 2008: 65-130.
- [17] KIM H S, KANG G H, YOON P H, et al. Flow characteristics of refrigerant and oil mixture in an oil separator[J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 70: 206–218.
- [18] 姚玉英. 化工原理-下册[M]. 2版. 天津: 天津大学出

版社, 1999: 14-16. (YAO Yuying. Principles of chemical engineering[M]. 2nd ed. Tianjin: Tianjin University Press, 1999: 14-16.)

- [19] 何茂刚,范德勤,吕士济,等. 毛细管中 R22 替代制冷 剂流动特性的实验研究[J]. 工程热物理学报,2007, 28(增刊 1): 21-24. (HE Maogang, FAN Deqin, LYU Shiji, et al. Study on flow behavior of R22 alternative refrigerant in capillary tube [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007,28(Suppl. 1): 21-24.)
- [20] Standard method for measuring the proportion of lubricant in liquid refrigerant: ANSL/ASHRAE Standard 41.4-2015
   [S]. Atlanta (GA): ASHRAE, 2015.

#### 通信作者简介

陈琪,男,副教授,浙江大学制冷及低温工程研究所,0571-87951738,E-mail:zjuchenqi@zju.edu.cn。研究方向:制冷及 低温工程,动力工程。

#### About the corresponding author

Chen Qi, male, associate professor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, +86 571-87951738, E-mail: zjuchenqi@zju.edu.cn. Research fields: refrigeration and cryogenic engineering, power engineering.